

**DETERMINACIÓN DEL ESPEJO DE AGUA DEL COMPLEJO CENAGOSO BAJO  
SINÚ Y MONITOREO DE LA MANCHA DE INUNDACIÓN PARA EL AÑO 2017  
MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES SENTINEL 2**

**CARLOS ARTURO BUELVAS BUSTAMANTE**



**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA  
MANIZALES  
2019**

**DETERMINACIÓN DEL ESPEJO DE AGUA DEL COMPLEJO CENAGOSO BAJO  
SINÚ Y MONITOREO DE LA MANCHA DE INUNDACIÓN PARA EL AÑO 2017  
MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES SENTINEL 2.**

**CARLOS ARTURO BUELVAS BUSTAMANTE**

Trabajo de Grado presentado para optar  
al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA  
MANIZALES**

**2019**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecido enormemente con el Subdirector de Gestión Ambiental de la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge – CVS, Albeiro Arrieta López, por la gran oportunidad brindada entorno al estudio de los fenómenos asociados con la Gestión del Riesgo de Desastres en el departamento de Córdoba y sobre todo del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.

Igualmente, a los profesionales especializados de la CAR CVS Rafael Espinosa Forero (biólogo) y César Buelvas Mercado (ingeniero civil) por las asesorías, consejos y lineamientos brindados para el abordaje de estudios relacionados con los humedales y el riesgo de desastres naturales principalmente de inundaciones.

Al Geógrafo y magister en Ciencias Ambientales Orlando Tordecilla Correa, por sus excelentes enseñanzas relacionadas con el manejo de herramientas SIG para el análisis de variables ambientales y de gestión del riesgo de desastres naturales.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	12
1. ÁREA PROBLEMÁTICA .....	14
2. OBJETIVOS .....	16
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3. JUSTIFICACIÓN .....	17
4. MARCO TEÓRICO .....	19
4.1 MARCO CONCEPTUAL .....	19
Humedales .....	19
Imagen satelital .....	19
Información.....	19
Inundación .....	20
Mapa .....	20
Mapa de inundación .....	21
Sistema.....	21
Sistema de Información Geográfica .....	21
4.2 ANTECEDENTES .....	22
5. METODOLOGÍA .....	27
5.1 TIPO DE TRABAJO .....	28
5.2 PROCEDIMIENTO .....	28
5.2.1 Fase 1. Revisión bibliográfica.....	28
5.2.2 Fase 2. Adquisición de imágenes satelitales Sentinel 2.....	29

5.2.3 Fase 3. Corrección atmosférica de las imágenes satelitales.....	32
5.2.4 Fase 4. Aplicación y clasificación de los índices de agua. ....	38
Índice de Diferencia de Agua Normalizado (NDWI).....	39
Índice de Diferencia de Agua Normalizado Modificado (MNDWI). ....	41
Clasificación de los Índices de Agua .....	43
Procesamiento Post Clasificación .....	44
5.2.5 Fase 5. Análisis de los resultados obtenidos. ....	48
5.2.7 Fase 6. Compilación y entrega de los resultados finales. ....	48
6. RESULTADOS.....	49
MONITOREO DE LA MANCHA DE INUNDACIÓN.....	56
ALTERNATIVAS DE MANEJO PARA LAS ZONAS INUNDABLES DEL ÁREA DE INFLUENCIA DEL COMPLEJO CENAGOSO BAJO SINÚ .....	65
7. CONCLUSIONES .....	69
8. RECOMENDACIONES .....	71
BIBLIOGRAFÍA .....	73

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Portales web de descarga gratuita de imágenes satelitales .....	30
Figura 2. Bandas del satélite Sentinel 2. ....	31
Figura 3. Instalación del complemento Semi-Automatic Classification Plugin.....	35
Figura 4. Corrección atmosférica de imágenes satelitales Sentinel 2 .....	36
Figura 5. Comparativa de imágenes antes y después de la corrección atmosférica DOS1 .....	37
Figura 6. Recorte de bandas de las imágenes satelitales .....	38
Figura 7. Aplicación del NDWI a las imágenes satelitales y resultado obtenido.....	40
Figura 8. Aplicación del MNDWI a las imágenes satelitales.....	42
Figura 9. Función eliminate en software ArcGis.....	44
Figura 10. Combinación de bandas en QGIS .....	45
Figura 11. Combinación de bandas espectrales Sentinel 8A – 11 – 4 .....	46
Figura 12. Panel de clasificación supervisada en QGIS .....	47
Figura 13. Coberturas delimitadas para seleccionar las nubes y las sombras de estas .....	47
Figura 14. Proceso para obtención de área del espejo de agua.....	50
Figura 15. Geoproceso para determinar el espejo de agua.....	55
Figura 16. Espejo de agua del CCBS 2017 .....	55
Figura 17. Zonas afectadas por las inundaciones en el año 2017 en el área de influencia del CCBS.....	57
Figura 18. Espejo de agua y mancha de inundaciones diciembre de 2017 .....	62
Figura 19. Firmas espectrales de coberturas identificadas en la imagen satelital de diciembre de 2017.....	63

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fuentes de información más relevantes .....	29
Tabla 2. Características principales imágenes Sentinel 2.....	31
Tabla 3. Colección de imágenes satelitales utilizadas en el proyecto.....	32
Tabla 4. Valores de ESUN para bandas de Sentinel-2.....	34
Tabla 5. Clasificación del NDWI.....	43
Tabla 6. Clasificación del MNDWI .....	43
Tabla 7. Áreas del espejo de agua con el NDWI.....	50
Tabla 8. Áreas del espejo de agua con el MNDWI.....	51
Tabla 9. Variación del espejo de agua en el año 2017 .....	53
Tabla 10. Áreas del espejo de agua para cada fecha del año.....	54
Tabla 11. Centros poblados afectados por las inundaciones .....	56
Tabla 12. Áreas resultantes del índice NDWI .....	59
Tabla 13. Áreas resultantes del índice MNDWI.....	59
Tabla 14. Espejo de agua y manchas de inundación para el año 2017 en el área de influencia del CCBS.....	61
Tabla 15. Zonas propuestas para el área del CCBS .....	65
Tabla 16. Definiciones de usos acorde con el Decreto 3600 de 2006 .....	66
Tabla 17. Propuestas de manejo para las zonas del área de influencia del CCBS.....	67

## GLOSARIO

**Complejo Cenagoso:** Zona en la que dos o más ciénagas conforman un complejo o sistema cenagoso si sus cuencas están aisladas en condiciones hidrológicas de aguas altas, normales y se conectan al río a través de un caño, quebrada o arroyo común.

**Corrección atmosférica:** Es un proceso matemático que se desarrolla en software SIG en el cual se eliminan los efectos de dispersión y absorción de la atmósfera para obtener la reflectancia de la superficie caracterizada (propiedades de la superficie).

**Imagen satelital:** Se trata de la representación visual, multiespectral o hiperespectral de aquella información que es registrada por un satélite artificial sobre las coberturas del planeta Tierra y que se puede utilizar para la realización de estudios a diferentes escalas y de diferentes fenómenos físico-naturales que se presenten en determinada zona.

**Sistema:** Este concepto surge desde el establecimiento de la Teoría General de los Sistemas – TGS en la cual el biólogo Bertalanffy fue pionero y a partir de dicho científico se comenzó con la búsqueda de una definición de sistema, el cual está entendido como un conjunto de elementos que guardan estrechas relaciones entre sí, que mantienen al sistema directo o indirectamente unido de modo más o menos estable y cuyo comportamiento global persigue, normalmente, algún tipo de objetivo.

**Sistemas de Información Geográfica:** Puede definirse como el conjunto de métodos, datos, hardware, software y personas, que permiten la entrada, visualización, manipulación, actualización, extracción, análisis y salida de la información geográfica. En un sentido más estricto se definen como el conjunto de múltiples elementos como: usuarios, hardware, software, y datos que permiten realizar procesos concernientes a los estudios geográficos, para así, dar solución a problemas e interrogantes que surgen en cuanto al manejo adecuado de los elementos presentes en el espacio.



**Tuberías:** Son grandes extensiones de humedales distribuidas principalmente en latitudes altas en ambos hemisferios, aunque también pueden encontrarse en zonas tropicales. Los ecosistemas de turberas son ambientes terrestres en los cuales la producción primaria neta excede la descomposición de la materia orgánica.

## RESUMEN

Los Sistemas de Información Geográfica – SIG en su conjunto son de gran utilidad para la toma de decisiones en cualquier territorio, principalmente en el manejo de temáticas ambientales. Uno de los productos que se puede obtener de la aplicación de los SIG están asociadas con el recurso hídrico, en donde se pueden obtener datos asociados con los humedales o ciénagas, las zonas inundadas, al igual que zonas de pastos, cultivos y demás que se vean afectadas por el exceso de humedad. A la vez se genera información estadística sobre las áreas que son afectadas por el fenómeno de las inundaciones en un determinado tiempo.

En el presente estudio se identificó el espejo de agua y las zonas inundadas para el año 2017 mediante la aplicación de índices de agua con imágenes satelitales Sentinel 2. Igualmente se proponen alternativas de manejo para cada una de las zonas identificadas en el área de influencia del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú - CCBS.

**PALABRAS CLAVES:** Índice de Agua Normalizado (NDWI), Índice de Agua Normalizado Modificado (MNDWI), espejo de agua, mancha de inundación.

## **ABSTRACT**

The Geographic Information Systems - GIS are very useful for decision making in any territory, mainly in the management of environmental issues. One of the products that can be obtained from the application of GIS are associated with the water resource, where data associated with wetlands or swamps, flooded areas, as well as areas of pastures, crops and others that can be obtained are affected by excess moisture. At the same time, statistical information is generated on the areas that are affected by the flood phenomenon in each time.

In the present study, the water layer and the flooded areas were identified by the year 2017 through the application of water indexes with Sentinel 2 satellite images. Likewise, management alternatives are proposed for each of the areas identified in the area of influence of the Marshy Complex of Bajo Sinú - CCBS.

**KEY WORDS:** Normalized Water Index (NDWI), Modified Normalized Water Index (MNDWI), water layer, flood spot.

## INTRODUCCIÓN

Los Sistemas de Información Geográfica – SIG hoy día son fundamentales para el desarrollo de estudios ambientales que son un soporte para la toma de decisiones entorno a las dinámicas e interacciones que se presentan en un territorio determinado y que permiten encaminar políticas, planes, proyectos y acciones de entidades locales, regionales y nacionales.

Entre los estudios ambientales prioritarios en la actualidad se encuentra el estudio de los cuerpos de agua y las dinámicas que se dan en torno a los mismos, el cual es de vital importancia hoy día, esto teniendo en cuenta todas las incidencias asociadas con el cambio climático y la gestión del riesgo de desastres naturales que se da en las diferentes áreas administrativas de cada territorio. Además, el recurso hídrico es el sustento de fuente de vida para el ser humano, los animales y la flora existentes en las zonas donde se encuentran.

Los SIG constituyen la herramienta principal en los estudios del recurso hídrico superficial, esto mediante el análisis de imágenes satelitales que se pueden obtener a un costo determinado o gratuitamente en portales como el Earth Explorer y Glovis del Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS, Copernicus Open Access Hub de la Agencia Espacial Europea - ESA, entre otros, que permiten la descarga de imágenes para el procesamiento y análisis de las mismas, esto mediante la corrección atmosférica y aplicación de índices de agua como NDWI y MNDWI en software SIG de libre acceso como es el caso de QGIS y en software SIG pago como ArcGis.

Otra de las actividades fundamentales que se puedan llevar a cabo en los SIG y que facilitan el trabajo en la toma de decisiones es la clasificación supervisada de imágenes satelitales en software SIG gratuito (QGIS), en el cual, mediante combinación de bandas y análisis de curvas espectrales de coberturas, se pueden obtener archivos *ráster* y *vector* para realizar cálculos de áreas y de este modo facilitar la toma de decisiones entorno a las intervenciones, proyectos, políticas o planes que se quieran llevar a cabo en un territorio determinado.

A partir del análisis de imágenes satelitales mediante la utilización de los SIG se pueden proponer acciones o mecanismos de intervención y manejo de las áreas propensas a los procesos de inundaciones y que anualmente se ven afectadas por las crecientes de ríos, ciénagas, quebradas, arroyos, etc., esto teniendo en cuenta que las políticas actuales están enfocadas en determinar los impactos causados por determinada problemática ambiental, pero poco se ha hecho entorno a la prevención y manejo de dichas problemáticas.

En el presente documento se determina el espejo de agua del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú y además las zonas afectadas por las inundaciones para el año 2017, esto con el fin de brindar insumos que contribuyan como elementos orientadores en la toma de decisiones asociadas con acciones, políticas, planes y proyectos sobre el manejo de las zonas afectadas por las inundaciones y además evitar a futuro que se lleven a cabo intervenciones en el territorio que afecten las dinámicas naturales de la zona.

Igualmente, se proponen alternativas de manejo y uso de las zonas delimitadas mediante la aplicación de los índices de agua, esto con el propósito de sentar bases y dejar iniciativas entorno al ordenamiento y manejo de dichas áreas por parte de las entidades como las alcaldías, la gobernación de Córdoba, la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge – CVS, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenibles, entre otras entidades del sector público y privado que tengan influencia directa o indirecta en la zona.

## 1. ÁREA PROBLEMÁTICA

El recurso hídrico a nivel mundial juega un papel fundamental, esto teniendo en cuenta que es fuente de vida; animal, vegetal y humana, tanto oceánica como continental, encontrándose en este último los humedales, en los cuales “se incluye una amplia variedad de hábitat tales como pantanos, turberas, llanuras de inundación, ríos y lagos” (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2010, p. 2), que cumplen una función ecosistémica muy relevante en el ámbito de conservación de la flora y la fauna.

Dentro del recurso hídrico continental se encuentran los humedales, los cuales “están estrechamente relacionados con el bienestar humano, debido a su trascendente aporte en más del 40% en los servicios ecosistémicos del planeta por año, incluyendo protección contra las inundaciones, mejora en la calidad del agua, almacenamiento de carbono, el ciclo de nutrientes, entre otros” (Valencia y Figueroa, 2014, p. 31), por ello son considerados a nivel mundial como áreas de especial protección.

A nivel nacional cabe resaltar que “Los humedales son un elemento vital dentro del amplio mosaico de ecosistemas con que cuenta el país y se constituyen, por su oferta de bienes y prestación de servicios ambientales, en un renglón importante de la economía nacional, regional y local” (Ministerio del Medio Ambiente, 2002, p. 6). Sin embargo, el recurso hídrico con el tiempo se ha visto afectado por las diferentes actividades antrópicas, entre las cuales se encuentran: déficit o desactualización en la planificación y ordenamiento del territorio, malos hábitos de uso del suelo, desconocimiento por parte de la población, asentamientos inadecuados de la población, prácticas socioeconómicas inadecuadas y mal uso del recurso hídrico.

En el departamento de Córdoba se encuentran identificados algunos humedales, dentro de los que sobresalen la Ciénaga de Ayapel, Ciénaga de Betancí, Ciénaga de Cintura y el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú - CCBS. Sin embargo, estos presentan déficit en la delimitación, dado que se han utilizado fotografías aéreas de la época de los 80 e imágenes satelitales con las cuales se ha elaborado cartografía a escala 1:100.000 y que ha contribuido como una base, pero no se ha establecido claramente el espejo de agua de estas y sus áreas de amortiguamiento. Asimismo, no

se han realizado estudios con imágenes satelitales de mejor resolución espacial para obtener cartografía más detallada sobre el área de las ciénagas e igualmente sobre las inundaciones que se han presentado, principalmente en el área que corresponde al Bajo Sinú.

El CCBS influye sobre las comunidades que se encuentran en los alrededores, esto teniendo en cuenta que en época de lluvias aumentan los niveles de agua debido a la saturación del suelo y por lo general las inundaciones afectan los centros poblados y todas las actividades productivas que se estén desarrollando al momento de subir los niveles del agua en la zona.

Teniendo en cuenta la necesidad de tener los humedales y espejos de agua delimitados y a su vez su área de amortiguamiento e inundación se debe tener claridad para el caso de estudio sobre ¿Cuál es el área del espejo de agua del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú y qué áreas fueron afectadas con la ola invernal que se presentó en el departamento de Córdoba para el año 2017?

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar el área del espejo de agua del Complejo cenagoso del Bajo Sinú – CCBS y la mancha de inundación para el año 2017, mediante el procesamiento de imágenes satelitales en software SIG del proyecto COPERNICUS (Sentinel 2).

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Delimitar el espejo de agua para el año 2017 del humedal Complejo Cenagoso Bajo Sinú mediante la utilización de los índices de agua NDWI y MNDWI en las imágenes satelitales Sentinel-2.

Determinar la mancha de las inundaciones para el año 2017 en el Bajo Sinú del departamento de Córdoba mediante la utilización de software SIG en el procesamiento de imágenes satelitales Sentinel 2.

Proponer alternativas de manejo para las zonas inundables del área de influencia del Complejo Cenagoso Bajo Sinú enfocadas al ordenamiento territorial y la gestión del riesgo de desastres.



### 3. JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con La Convención de Ramsar, esta “reconoce que la designación de Humedales de Importancia Internacional (Sitios Ramsar) solo establece el punto de partida para asegurar la sostenibilidad de los humedales y el mantenimiento de los servicios de los ecosistemas” (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2010, p. 2). Ahora bien, “La pérdida de humedales en el mundo se ha estimado en un 50% de la superficie original en los últimos 100 años” (Brena, Castillo y Wagner. 2015. p. 86), por ello se deben adelantar estudios y estrategias enfocadas a la protección, conservación y buen manejo de estos ecosistemas estratégicos.

Colombia ha sido catalogado en múltiples ocasiones como uno de los países más biodiversos a nivel mundial, sin embargo, ecosistemas estratégicos como los humedales, “gradualmente se han ido perdiendo o alterando debido a los mismos procesos naturales y a la presión antrópica a través de la agricultura intensiva, la urbanización, la contaminación, la desecación y otras formas de intervención. La degradación de estos sistemas y la pérdida de su capacidad productiva ameritan acciones agresivas y prioritarias en el contexto nacional, regional y local” (Parra y Hernández. 2010, p. 79).

Para mitigar o controlar el proceso de degradación o pérdida de los humedales a nivel nacional, regional y local, se deben adelantar proyectos, estudios y políticas enfocados a la protección y conservación de los mismos. Para llevar a cabo dichas actividades, se debe inicialmente partir de la delimitación de los humedales y su respectiva área de amortiguamiento, teniendo hoy día múltiples herramientas tecnológicas para dicho fin y que les brindan a las administraciones municipales, las Corporaciones Autónomas Regionales – CARs, gobernaciones y ministerios a nivel general, mayor facilidad y practicidad a la hora de tomar decisiones relacionadas con las protección y conservación del recurso hídrico.

Las imágenes satelitales son la base fundamental en la actualidad para la delimitación de coberturas, espejos de agua, usos del suelo, entre otros elementos que se pueden obtener de las mismas. De las imágenes satelitales se tiene que "su utilización puede ser una alternativa viable y

rápida de acceder a información espacial extensa de lugares inaccesibles, haciendo de la percepción remota una herramienta invaluable para la identificación de humedales"(Ministerio del Medio Ambiente, 2011, p. 15).

A nivel nacional se presentan datos sobre las afectaciones entorno a familias afectadas, infraestructura afectada o especies y no se especifican las superficies del territorio que se vieron inmersas en dichas afectaciones. Es por ello que con el presente estudio se busca delimitar el espejo de agua e igualmente las zonas afectadas por las inundaciones, de tal modo que se puedan presentar estadísticas relacionadas con las áreas inundadas para el año 2017 y así en un futuro realizar comparativas sobre dichas áreas y prevenir que se presenten mayores afectaciones en las actividades socio-productivas de las comunidades del Bajo Sinú cordobés.

Teniendo en cuenta que actualmente se cuenta con imágenes satelitales gratuitas con resolución espacial de 10 metros con las cuales se pueden delimitar cuerpos de agua, coberturas y se pueden realizar aproximaciones a los usos del suelo. Para el presente caso se tiene que la delimitación del humedal y su respectiva zona de amortiguamiento es de vital importancia en los procesos de planificación y ordenamiento ambiental, además de contribuir con las políticas de protección y conservación del medio ambiente, específicamente en lo que respecta a los ecosistemas de humedales.

## **4. MARCO TEÓRICO**

### **4.1 MARCO CONCEPTUAL**

En el marco de la delimitación del espejo de agua del CCBS mediante la utilización de imágenes satelitales y software SIG se deben tener en cuenta algunos conceptos, los cuales se interrelacionan y brindan un mayor entendimiento de los resultados que se obtienen en el presente proyecto.

#### **Humedales**

“El término humedales se refiere a una amplia variedad de hábitats interiores, costeros y marinos que generalmente se los identifica como áreas que se inundan temporalmente donde el agua subterránea aflora en la superficie, o con áreas con suelos de baja permeabilidad que permanecen cubiertos por agua poco profunda” (López et al, 2013, p. 6).

#### **Imagen satelital**

Es una representación visual de los datos reflejados por la superficie de la tierra que captura un sensor montado en un satélite artificial. Los datos son enviados a una estación terrena en donde se procesan y se convierten en imágenes, enriqueciendo nuestro conocimiento de las características de la Tierra en diferentes escalas espaciales (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2017).

Las imágenes de satélite tienen la ventaja de que abarcan una zona mucho más amplia que las imágenes aéreas, permitiendo realizar estudios territoriales a bajo coste.

#### **Información**

Son diversas las tesis planteadas entorno a la definición de información, sin embargo, una de las más sintéticas y aplicadas a los Sistemas de Información Geográfica se concibe como “un conjunto de mecanismos que permiten al individuo retomar los datos de su ambiente y

estructurarlos de una manera determinada, de modo que le sirvan como guía de su acción” (Jiménez, 2005, p. 13).

### **Inundación**

Inundación es la acumulación temporal de agua fuera de los cauces y áreas de reserva hídrica de las redes de drenaje (naturales y construidas). Se presentan debido a que los cauces de escorrentía superan la capacidad de retención e infiltración del suelo y/o capacidad de transporte de los canales. Las inundaciones son eventos propios y periódicos de la dinámica natural de las cuencas hidrográficas (González, 2014, p. 22).

De acuerdo con González (2014) la lluvia es el factor amenazante más importante en la generación de inundaciones. El agua de los ríos proviene en principio de la escorrentía proveniente de la parte alta de la cuenca, la cual depende del relieve, de la vegetación, del uso del suelo y en general de las condiciones en las que se encuentre la cuenca. Sin embargo, estos cuerpos de agua se nutren de igual manera de los flujos subsuperficiales que a su vez dependen de las condiciones hidrogeológicas y de los niveles freáticos de la zona.

### **Mapa**

La representación visual de la información es una de las grandes ventajas que ofrecen los SIG, es por ello por lo que el mapa ha sido catalogado como la mayor expresión de la realidad en forma análoga, pero su definición concreta se centra en que “un mapa es una forma de comunicación. Conjuga el lenguaje visual, expresado en la imagen formada por el arreglo de tonalidades, colores, formas y texturas, con el lenguaje sonoro (escrito), presente en el título, la leyenda, la toponimia (nombres de lugares u objetos) y otras partes del mapa (Bruschi y Cutinella, 2009).

A la definición anterior se le debe adjuntar la representación de información en una temporalidad específica, de tal modo que con los mapas se pueden llevar a cabo análisis multitemporales del territorio.

### **Mapa de inundación**

representación espacial de información sobre eventos que ya han sucedido en el país o sobre la extensión (probable o potencial) de inundación, junto con sus respectivos impactos. Esta información les permite a los tomadores de decisiones a nivel local, regional o nacional mejorar el enfoque de la gestión de las inundaciones y hacerlo más integral. A su vez, los diferentes tipos de mapas permiten la concientización de la población sobre las inundaciones y áreas seguras de uso (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, 2018).

### **Sistema**

Este concepto surge desde el establecimiento de la Teoría General de los Sistemas – TGS en la cual el biólogo Bertalanffy fue pionero y a partir de dicho científico se comenzó con la búsqueda de una definición de sistema, el cual está entendido como “conjuntos de elementos que guardan estrechas relaciones entre sí, que mantienen al sistema directo o indirectamente unido de modo más o menos estable y cuyo comportamiento global persigue, normalmente, algún tipo de objetivo (Arnold y Osorio, 1998).

### **Sistema de Información Geográfica**

Es un concepto que tiene múltiples definiciones en la academia, sin embargo, la mayoría de los autores coinciden en que los SIG son un “conjunto de herramientas técnicas capaces de capturar, organizar, almacenar, manipular y analizar toda información de componente espacial, es decir aquella que es capaz de ser georreferenciada” (Bosque, 1992.) e igualmente que tiene la capacidad de realizar la representación de dicha información en un mapa.

En la actualidad “Los SIG representan las características de la tierra: edificios, ciudades, carreteras, ríos y estados en una computadora. Las personas usan SIG para visualizar, cuestionar, analizar y comprender datos sobre el mundo y la actividad humana. A menudo, estos datos se ven en un mapa, lo que proporciona una ventaja sobre el uso de hojas de cálculo o bases de datos” (ESRI, 2012, p. 6).

## 4.2 ANTECEDENTES

Son diversas las dinámicas espaciales que se presentan sobre el territorio, las cuales influyen directamente sobre los recursos naturales, generando cambios de uso del suelo, en la dinámica del recurso hídrico, todo esto debido al uso indebido o inapropiado de los recursos naturales. De acuerdo con Xiaojun y Zhi (2005) “los impactos de la intensificación de las actividades económicas humanas y la concentración de la población humana en las áreas estuarinas se hacen sentir en todo el mundo tanto en los países en desarrollo como en los desarrollados. Por lo tanto, la información sobre cambios en el uso del suelo y la cobertura del suelo en áreas de drenaje estuarino es importante no solo para la gestión y planificación de estas áreas, sino también para una mejor comprensión de la relación entre la dinámica del paisaje y las respuestas del ecosistema estuarino. La teledetección satelital permite una visión retrospectiva sinóptica de grandes regiones, lo que brinda la posibilidad de una evaluación geográfica y temporalmente detallada de los cambios en el uso de la tierra y la cobertura de la tierra en cuencas hidrológicas estuarinas”.

Son cambios en los usos del suelo los que hoy día están afectando considerablemente los recursos naturales y por ello se deben plantear nuevas alternativas de aprovechamiento de los recursos de tal modo que sea sostenible. Ahora bien “para identificar cambios en el paisaje, primero es necesario identificar algunas características y áreas de interés. Normalmente en entornos urbanos, estas características son edificios, caminos y vegetación. Las técnicas de interpretación manual de imágenes siempre son más confiables, aunque consumen mucho tiempo. Las técnicas automáticas o semiautomáticas son deseables, aunque la calidad radiométrica de las imágenes históricas a menudo no es satisfactoria para tales enfoques (Nocerino, Menna y Remondino, 2012).

Dolores y Gabriel (2017) han comprobado que los Sistemas de Información Geográfica son de gran utilidad para estudios de cuerpos de agua, dado que permiten generar mapas de situación a través de los cuales se pueden llevar a cabo diferentes tipos de análisis y diseñar estrategias tendientes a la sostenibilidad ambiental. Se destaca la valiosa información histórica aportada por las imágenes satelitales y los buenos resultados obtenidos teniendo en cuenta los escasos registros pluviográficos de los que se puede tener acceso.

Moser, Schmitt y Wendleder (2016) consideran que “especialmente en regiones semiáridas, donde los reservorios de agua y los humedales son el principal recurso hídrico durante la larga estación seca, el monitoreo del agua -incluidas las aguas de vegetación inundada o flotante- es vital, así como el monitoreo de las actividades de irrigación alrededor de los humedales, con las cuales se extrae el agua del humedal”. Estos planteamientos se realizan con base en la delineación de humedales y la derivación de clases de cambio de series de tiempo densas y regulares, utilizando diferentes series de tiempo de datos SAR polarizados dobles. Utilizando un método de clasificación supervisado bien establecido, basado en un clasificador de máxima verosimilitud, un enfoque de clasificación multitemporal desarrollado para el monitoreo de humedales utilizando datos de TerraSAR.

De acuerdo con el estudio "Estimación de la pérdida de área en los humedales de Bogotá en las últimas cinco décadas debido a la construcción y sus respectivos efectos" llevado a cabo por Cruz y otros en el año 2017, se tiene que “La construcción de la Autopista Norte en 1952 separó uno de los más grandes lagos en la historia de Bogotá, dando paso a lo que se conoce hoy como el humedal Guaymaral-Torca, ésta obra dividió en tres partes el Humedal sin que se tomaran medidas de mitigación ni compensación. En 1994 se designó al humedal de Torca como perteneciente a Usaqué y el de Guaymaral a Suba, en la actualidad los dos humedales se conectan hidráulicamente por medio de dos box coulvert a través de la autopista. En 1998 se reparó el tramo vial Calle 170-Chía sin considerar su afectación ya que no se construyeron cajas de regulación ni se reforzaron los piedraplenes, llegó un nuevo problema con los complejos comerciales y recreativos del sector que vierten en el humedal sus aguas servidas”.

González y González realizaron para el año 2015 un estudio con imágenes satelitales de la Laguna de Fúquene, del cual concluyeron que “el área del espejo de agua de la laguna disminuyó del año 1985 al 2000 en 1,001 ha, es decir un 53.7% y del año 2000 al 2015 en 392 ha equivalente al 45.4%. Teniendo en cuenta esta información se puede inferir que la pérdida del espejo de agua es muy acelerada perdiendo casi la mitad de su área cada quince años de manera progresiva, de mantenerse las condiciones de uso y manejo actuales y no tomarse las medidas adecuadas en un periodo similar, es decir de treinta años, este ecosistema podrá aumentar su velocidad de degradación e incluso desaparecer”. Por ende, se tiene que la tendencia de las actividades

antrópicas está enfocada en la disecación del recurso hídrico, principalmente de los humedales, por ello se deben llevar a cabo estrategias, políticas, planes y proyectos enfocados a la conservación y preservación de estos ecosistemas de especial protección.

Acorde con Rojas y Cárdenas (2013, p. 2) “la gestión de la información es hoy en día la herramienta más valiosa para afrontar los problemas ambientales, las autoridades distritales, regionales y nacionales administradores de los recursos hídricos, necesitan obtener información del comportamiento volumétrico de los recursos hídricos, esto para tener la certeza de tomar la mejor decisión en cuanto distribución, concesión de los recursos sin que afecte al medio ecológico y social”. Por dicha tesis elaboraron un estudio denominado “identificación y registro catastral de cuerpos de agua mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes en landsat-5” en el año 2012, en dicho estudio llevaron a cabo la descarga de imágenes satelitales Landsat 5, les aplicaron corrección atmosférica y finalmente realizaron el análisis de índices de vegetación y de agua con las bandas de cada imagen obtenida.

En España se han llevado a cabo algunos estudios relacionados con el recurso hídricos, como es el caso de Cifuentes, García, Checa y Escudero (2015), quienes elaboraron la “estimación por teledetección de la superficie de la lámina de agua y los niveles de profundidad de las lagunas en los humedales de la Campiña Andaluza Central incluidos en la demarcación hidrográfica del Guadalquivir”. El objetivo principal de los mismos consistió en “diseñar una metodología operativa, de fácil aplicación, versátil y poco exigente en cuanto a la disponibilidad de datos que permitiera caracterizar el hidropereodo de humedales en los que no se dispone de series de medidas de profundidad ni superficie inundada, permitiendo fijar umbrales compatibles con el buen estado ecológico” (Cifuentes et al, 2015, p. 322). Para cumplir con el objetivo acudieron a las técnicas de teledetección mediante análisis de índices de agua como el ICEDEX y el NDVI, obteniendo finalmente unos lineamientos que permiten el monitoreo multitemporal de las láminas o espejos de agua continental.

Los aportes científicos y metodológicos desde Sur América en lo que respecta al análisis de imágenes satelitales para determinar espejos de agua o delimitación de humedales es muy relevante, siendo un caso particular el expuesto por San Martín, Morandeira, Grimson y Kandus



(2015) en cuanto al “Uso de imágenes ALOS/PALSAR-1 para la clasificación e inventario de humedales en la Llanura Costera de Ajó (Buenos Aires, Argentina)”. Con las imágenes satelitales y software SIG llevaron a cabo la siguiente clasificación: humedal, humedal permanente, humedal transitorio tipo 1, humedal transitorio tipo 2, agua libre y no humedal. En la zona de estudio es la primera delimitación de humedales que se realiza con imágenes satelitales, por ello es de vital importancia continuar con la realización de estudios relacionados con la delimitación de los humedales y su respectivo espejo de agua.

Para el caso del estudio realizado por Castañeda (2014) se tiene que “una eficiente evaluación de los cambios a través de los años usando las herramientas adecuadas como imágenes satelitales facilita la clasificación de coberturas y datos asociados a la laguna y permite ser compatible con otros ecosistemas muy cercanos como el del Lago Calima”. El mismo principio se adopta para el presente estudio en el cual se llevará a cabo el análisis de las características de imágenes satelitales Sentinel para determinar el área del espejo de agua del CCBS e igualmente la mancha de inundación que se presentó en el año 2017 en el Bajo Sinú.

Entorno a los desastres naturales y su seguimiento y monitoreo se han desarrollado una variedad de estudios en los cuales se ha vinculado el análisis de las imágenes satelitales sobre todo a principios en los últimos diez o veinte años. Es el caso de Sánchez et al, quienes para el año 2015 desarrollaron un indicador para el seguimiento de los niveles de inundación en humedales Mediterráneos, para lo cual utilizaron imágenes satelitales Landsat y les aplicaron indicadores de inundación para 3 años diferentes y obtuvieron las áreas inundadas para cada año al igual que la frecuencia de las inundaciones. Finalmente concluyeron que su “investigación proporciona una visión general de los beneficios de un indicador espacial utilizando imágenes de satélite y técnicas de teledetección para identificar, inventariar y monitorear áreas de inundación de los humedales. Las imágenes Landsat de 30 m resultan eficientes para identificar las inundaciones y el cálculo de la superficie total ocupada por el agua. El uso de imágenes de mayor calidad podría mejorar la precisión de los resultados” (Sánchez, Abdul, Guelmami, Parennou y Martínez, 2015, p. 365).

Asimismo, las imágenes satelitales hoy día son un insumo fundamental para el monitoreo de los desastres naturales, siendo uno de estos la aplicación de imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2 en

la detección y delimitación de información de crisis de desastres naturales en el marco de los servicios Copernicus EMS, el cual fue desarrollado por Donezar et al (2017). En dicho estudio se logró la detección de incendios, delimitación de lava y delimitación de inundación mediante la utilización de imágenes satelitales Sentinel, demostrando que dichas tecnologías son una herramienta de gran utilidad para la toma de decisiones en torno a los eventos naturales que se presentan en el espacio geográfico.

En Colombia se ha avanzado en el tema de utilización de imágenes satelitales para el análisis de las inundaciones, como es el caso de Ardilla y Quintero (2013) quienes elaboraron el estudio denominado “Aplicación De La Teledetección Y Los Sistemas De Información Geográfica En La Interpretación De Zonas Inundables. Caso De Estudio: Río Soapaga, Sector Paz De Río, Boyacá”. En dicho estudio a partir de las técnicas de teledetección y los Sistemas de Información Geográfica se logró delimitar el área de inundación ocurrida por el desbordamiento del Río Soapaga (sector Paz de Río, Boyacá) para el año 2012. En el proyecto se adquirieron dos tipos de imágenes, una imagen óptica adquirida del sistema satelital RapidEye y una imagen de radar del programa CosmoSkymed e igualmente un DEM de 10 metros de resolución. A dichas imágenes se le aplicaron los análisis de bandas y realizaron combinaciones de estas para finalmente determinar el área de inundación del Río Soapaga para el año 2012.

## 5. METODOLOGÍA

La delimitación de superficies o espejos de agua es uno de los temas que en los años venideros tendrá alta relevancia en el entorno científico, económico, ambiental y político, esto teniendo en cuenta que el recurso hídrico dispondrá de una mayor demanda por el constante crecimiento poblacional que se registra diariamente. Por ende, se deben adelantar estudios enfocados a la identificación de los cuerpos de agua de tal modo que a futuro se puedan establecer comparaciones y de este modo determinar el crecimiento o retroceso de los mismos, lo cual será base fundamental para la toma de decisiones entorno al aprovechamiento y manejo de los mismos.

Para la identificación y delimitación de humedales se empleaban en un principio métodos tradicionales de cartografía mediante trabajos de campo (Parra, et al, 2010, p. 78). Sin embargo, esto conllevaba exceso de tiempo para el desarrollo de los estudios relacionados con los espejos de agua. “Debido a las crecientes aplicaciones tecnológicas en el campo de las ciencias de la tierra y las actuales preocupaciones sobre el cambio global (inundaciones, deforestaciones, incendios, entre otros), han llevado a que las imágenes obtenidas desde los diferentes sensores remotos se conviertan en una fuente fundamental de información, promoviendo la aplicación de técnicas de detección de cambios de la cubierta terrestre a partir de datos obtenidos de satélites y otras plataformas de observación” (Ariza et al, 2013). Es por ello que en el presente estudio se utilizan imágenes satelitales para la delimitación del espejo de agua del CCBS, esto con el objetivo de aprovechar las bondades que estas ofrecen.

En la actualidad se cuenta con acceso a diferentes portales web en los cuales se pueden visualizar y descargar imágenes satelitales gratuitas para el uso de cualquier persona, entidad o empresa que quiera llevar a cabo estudios relacionados con el procesamiento de las mismas. Actualmente la European Space Agency (ESA) cuenta con un proyecto denominado Copernicus, el cual “es el programa de observación de la Tierra más ambicioso de la historia, diseñado para proporcionar información precisa, actualizada y de fácil acceso para mejorar la gestión del medio ambiente, comprender y mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad ciudadana” (ESA, 2018).

En el marco de dicho programa se tiene el satélite Sentinel 2, el cual fue puesto en órbita en junio de 2015 y ofrece imágenes cada 10 días con interesante resolución espacial y espectral. Sus características lo hacen apto tanto para estudios zonales y/o regionales como para escala a nivel de predio (Ferreira, 2016:58).

## **5.1 TIPO DE TRABAJO**

El presente estudio representa una investigación con un enfoque descriptivo-explicativo, esto teniendo en cuenta que se basa en información secundaria de los diferentes sectores locales, regionales y nacionales para el análisis de los diferentes eventos que se presentan entorno al Complejo Cenagoso del Bajo Sinú – CCBS y las acciones que se adelantan para determinar el área de este. Del mismo modo, para la delimitación del espejo de agua se acude a la aplicación de diferentes índices de agua en software SIG, que permiten realizar análisis de las diferentes características de las imágenes satelitales para obtener el área específica del CCBS y la mancha de inundación para el año 2017.

Igualmente se tiene el enfoque explicativo, dado que se consideran las fuentes primarias y secundarias de información para llevar a cabo una explicación detallada de las causas principales de las inundaciones en la zona del bajo Sinú y las afectaciones que estas ocasionan a la comunidad aledaña. Dicho análisis se realiza para consolidar bases de peso para la toma de decisiones en los temas relacionados con el ordenamiento territorial y ambiental e igualmente en torno a la gestión del riesgo de desastres naturales.

## **5.2 PROCEDIMIENTO**

En el proyecto de investigación se tuvieron en cuenta 6 fases

**5.2.1 Fase 1. Revisión bibliográfica.** Se llevan a cabo consultas en la web que estén relacionadas con el procesamiento de imágenes satelitales, delimitación de espejos de agua,

análisis de áreas inundables y gestión del riesgo a nivel nacional. Entre las referencias bibliográficas más importantes que fueron consultadas se pueden resaltar.

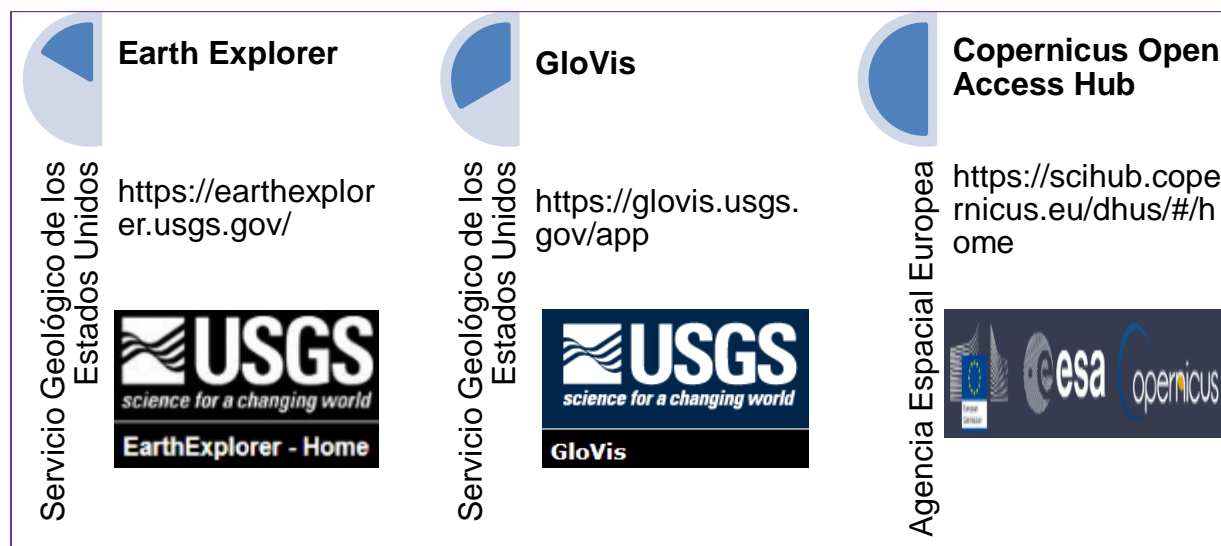
Tabla 1. Fuentes de información más relevantes

<b>TÍTULO</b>	<b>FUENTE DE INFORMACIÓN</b>
Aplicación de la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica en la interpretación de zonas inundables. Caso de estudio: Río Soapagá, Sector Paz de Río, Boyacá.	Ardilla, Jhon y Quinter, Oscar. 2013
Manejo de humedales: Marcos para manejar Humedales de Importancia Internacional y otros humedales.	Secretaría de la Convención de Ramsar, 2010
Imágenes del satélite de Sentinel 2.	Copernicus Open Access Hub, 2018
Identificación y delimitación de humedales lenticos en el valle alto del río Cauca mediante el procesamiento digital de imágenes de satélite.	Parra Andrés y Hernández Francisco. 2010.
Desarrollo de un indicador para el seguimiento de los niveles de inundación en humedales Mediterráneos.	Sánchez, Antonio; Abdul, Dania; Guelmami, Anis; Perennou, Christian; Martínez, Juan. 2015.
Análisis multitemporal del cuerpo de agua de la laguna el Sonso mediante imágenes satelitales Landsat.	Edgar Iván Castañeda Mora. 2014.
Aplicación de imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2 en la detección y delimitación de información de crisis de desastres naturales en el marco de los servicios Copernicus EMS.	Donezar, U; Larrañaga, A; Tamés, A; Sánchez, C; Albizua, L; Ciriza, R; Barrio, F. 2017.
Análisis multitemporal del espejo de agua en la Laguna de Fúquene para el periodo de 1985 a 2015.	González, Nixon; y González, Adriana. 2015.

Fuente: Elaboración propia, 2018.

**5.2.2 Fase 2. Adquisición de imágenes satelitales Sentinel 2.** Las imágenes de satélite son el principal insumo del presente proyecto, por lo que fueron seleccionadas las imágenes del satélite Sentinel 2, las cuales se encuentran disponibles de forma gratuita en las siguientes plataformas web:

Figura 1. Portales web de descarga gratuita de imágenes satelitales



Fuente: Elaboración propia con base en los geoportales disponibles, 2018

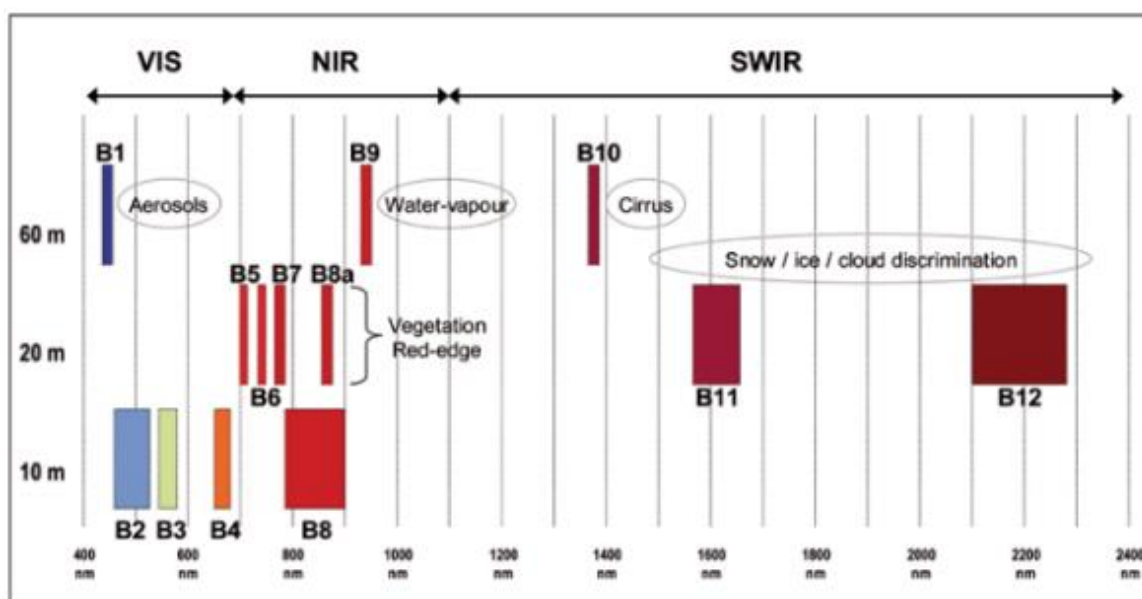
Se seleccionan estas imágenes dado que actualmente son las que mayor resolución espacial tienen en comparación con otros satélites que adquieren imágenes gratuitas como Landsat, OrbView, Aster, entre otros, con las cuales se pueden realizar múltiples procesos relacionados con la superficie de la tierra.

Son diversas las características específicas del satélite, sin embargo, cabe resaltar que “El Sentinel-2 tiene un escaner multi-spectral que permite obtener información en las dos longitudes de onda, visibles e infrarrojos, permitiendo monitorizar los cambios en la tierra y en la vegetación, así como vigilar a nivel mundial el cambio climático, con una resolución de 10m. Las imágenes están disponibles de manera gratuita y pueden ser utilizadas en un rango amplio de aplicaciones” (Bravo, 2017, p. 27).

Los satélites Sentinel corresponden a una iniciativa que está liderada por la Comisión Europea (CE), en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA), cuyo propósito principal es proporcionar información precisa, actualizada y de fácil acceso para mejorar la gestión del medio ambiente, comprender y mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad ciudadana.

“La misión Sentinel-2 comprende una constelación de dos satélites en órbita polar colocados en la misma órbita, en fase a 180° entre sí. Su objetivo es monitorear la variabilidad de las condiciones de la superficie de la tierra, su amplio ancho de banda y su tiempo de revisitación (10 días en el ecuador con un satélite y 5 días con 2 satélites en condiciones de ausencia de nubes, lo que resulta en 2-3 días en latitudes medias) apoyará el monitoreo de los cambios a la vegetación dentro de la temporada de crecimiento. Los límites de cobertura se encuentran entre las latitudes 56° sur y 84° norte” (European Space Agency, 2018).

Figura 2. Bandas del satélite Sentinel 2.



Fuente: European Space Agency, 2018, p. 13.

Son trece las bandas que conforman el satélite sentinel 2, las cuales se encuentran dentro del espectro electromagnético en las áreas del visible, el infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta (Figura 2 y Tabla 2)

Tabla 2. Características principales imágenes Sentinel 2.

BANDAS	SENSOR	LONGITUD DE ONDA CENTRAL (MICRÓMETROS)	RESOLUCIÓN ESPACIAL (METROS)
Banda 1 - Costero / aerosol	VNIR	0.443	60
Banda 2 – Azul		0.49	10

Banda 3 – Verde		0.56	10
Banda 4 – Rojo		0.665	10
Banda 5 - Visible e Infrarrojo Cercano		0.705	20
Banda 6 - Visible e Infrarrojo Cercano		0.74	20
Banda 7 - Visible e Infrarrojo Cercano		0.783	20
Banda 8 - Visible e Infrarrojo Cercano		0.842	10
Banda 8A - Visible e Infrarrojo Cercano		0.865	20
Banda 9 - Vapor de Agua		0.945	60
Banda 10 - Cirrus		SWIR	1.375
Banda 11 - Onda Corta Infrarroja	1.61		20
Banda 12 - Onda Corta Infrarroja	2.19		20

Fuente: Elaboración propia con base en las European Space Agency, 2018.

De las diferentes plataformas web que se mencionaron anteriormente se obtuvieron las siguientes imágenes:

Tabla 3. Colección de imágenes satelitales utilizadas en el proyecto

ID DE IMAGEN	FECHA	SATÉLITE	RESOLUCIÓN ESPACIAL (M)
L1C_T18PVR_A008359_20170127T153612	Enero 27 de 2017	Sentinel 2	10, 20 y 60
L1C_T18PVR_A009360_20170407T153616	Abril 07 de 2017		
L1C_T18PVR_A010790_20170716T153619	Julio 16 de 2017		
L1C_T18PVR_A012792_20171203T153613	Diciembre 03 de 2017		
L1C_T18PVR_A013078_20171223T153613	Diciembre 23 de 2017		

Fuente: Elaboración propia con base en las imágenes satelitales obtenidas

**5.2.3 Fase 3. Corrección atmosférica de las imágenes satelitales.** Para la corrección atmosférica de las imágenes satelitales se han desarrollado diferentes metodologías, sin embargo, en el presente estudio se utilizó la corrección Dark Object Substraction (DOS) o substracción de objeto oscuro, la cual hoy día es la más aceptada y utilizada en el entorno del análisis de las imágenes satelitales.

De acuerdo con Congedo (2018) el Dark Object Substraction (DOS) o substracción de objeto oscuro es una familia de correcciones atmosféricas basadas en imagen. Chavez (como se citó en Congedo, 2018) explica que «la suposición básica es que en la imagen algunos píxeles están



completamente en sombra, y sus radiancias recibidas en el satélite se deben a la dispersión atmosférica (efecto bruma). Esta suposición es combinada con el hecho de que muy pocos elementos en la superficie de la Tierra tienen un color negro absoluto, por lo tanto, una reflectancia asumida de uno por ciento es mejor que un cero por ciento». Es importante mencionar que la exactitud de las técnicas basadas en imagen es generalmente menor que las correcciones basadas en medidas físicas, pero son muy útiles cuando no están disponibles mediciones atmosféricas que puedan mejorar la estimación de la reflectancia de la superficie terrestre. El efecto bruma es dado por (Sobrino, et al., 2004, como se citó en Congedo, 2018):

$$L_p = L_{min} - L_{DO1} \%$$

Donde:

$L_{min}$  = «radiancia que corresponde a un valor digital para el cual la suma de todos los píxeles con valores digitales menores o iguales a este valor es igual al 0.01 % de todos los píxeles de la imagen considerada» (Sobrino, et al., 2004, p. 437, como se citó en Congedo, 2018), por lo tanto, la radiancia obtenida con ese valor de conteo digital ( $DN_{min}$ ).

$L_{DO1} \%$  = radiancia del objeto oscuro, con un valor asumido de reflectancia de 0.01.

Las imágenes Sentinel-2 son convertidas a radiancia antes del cálculo DOS1. La Radiancia de Objeto Oscuro es dada por (Sobrino, et al., 2004):

$$L_{DO1\%} = 0,01 * [(ESUN_{\lambda} * \cos\theta_s * T_z) + E_{down}] * T_v / (\pi * d^2)$$

Por lo tanto, el efecto bruma es:

$$L_P = M_L * DN_{min} + A_L - 0,01 * [(ESUN_{\lambda} * \cos\theta_s * T_z) + E_{down}] * T_v / (\pi * d^2)$$

Existen varias técnicas DOS (ej. DOS1, DOS2, DOS3, DOS4), basadas en diferentes asunciones acerca de  $Tv$ ,  $Tz$ , y  $E_{down}$ . La técnica más simple es la DOS1, donde se hacen las siguientes suposiciones (Moran et al., 1992, citado por Congedo, 2018):

$$Tv = 1$$

$$Tz = 1$$

$$E_{down} = 0$$

Por lo tanto, el efecto bruma es:

$$L_p = M_L * DN_{min} + A_L - 0,01 * ESUN_\lambda * \cos\theta_s / (\pi * d^2)$$

Los valores de ESUN [ $W / (m^2 * \mu m)$ ] para el sensor Sentinel-2 (provistos en los metadatos de la imagen) se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4. Valores de ESUN para bandas de Sentinel-2

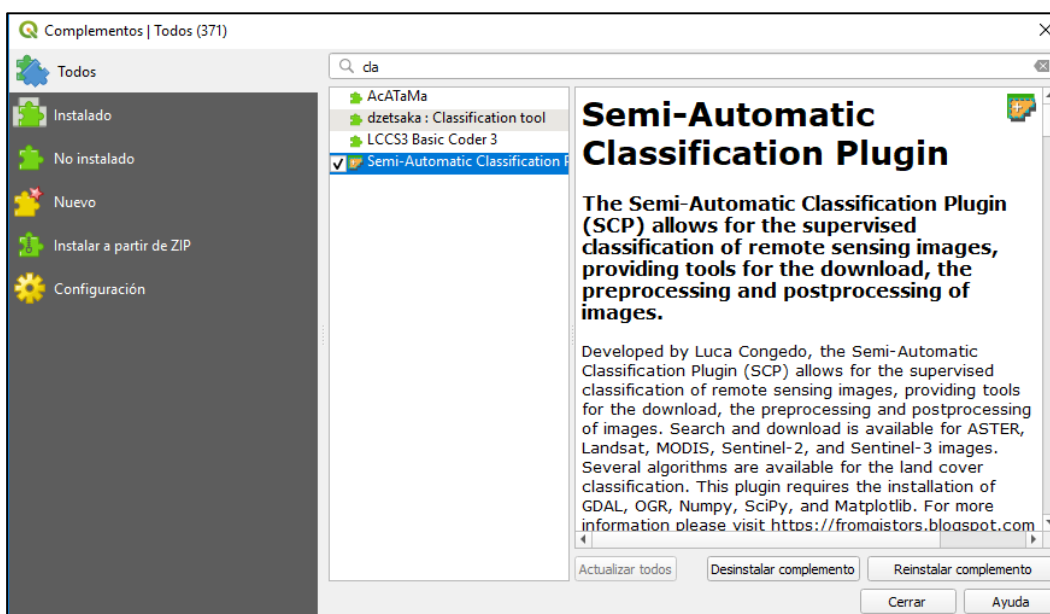
Banda	Sentinel-2
1	1913.57
2	1941.63
3	1822.61
4	1512.79
5	1425.56
6	1288.32
7	1163.19
8	1036.39
8A	955.19
9	813.04
10	367.15
11	245.59
12	82.25

Fuente: Congedo, 2018.

Para realizar la corrección atmosférica se utilizó el software QGIS, el cual es un Sistema de Información Geográfica de código abierto. El proyecto nació en mayo de 2002 y se estableció como un proyecto en SourceForge en junio del mismo año. QGIS actualmente funciona en la mayoría de las plataformas Unix, Windows y Mac. QGIS se desarrolla usando el kit de herramientas Qt (<https://www.qt.io>) y C++. Esto significa que es ligero y tiene una interfaz gráfica de usuario (GUI). En dicho software se utiliza el complemento Dark Object Substrction (DOS) o substracción de objeto oscuro para cada una de las imágenes utilizadas en el proceso.

Para llevar a cabo dicho proceso se abre QGIS y se instala el complemento Semi-Automatic Classification Plugin en el cual se pueden llevar a cabo diferentes procesos.

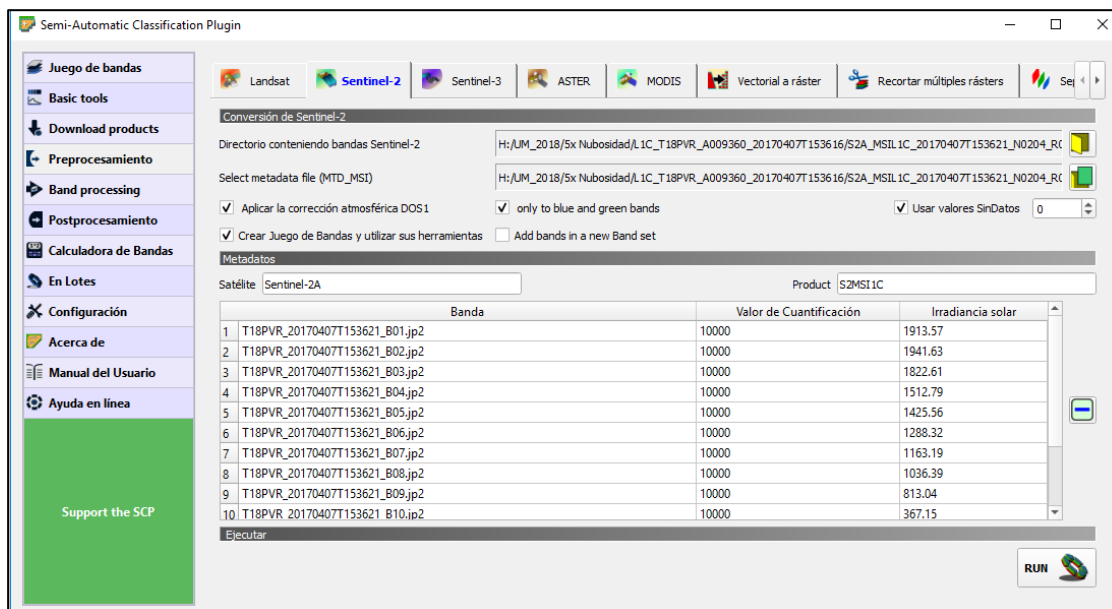
Figura 3. Instalación del complemento Semi-Automatic Classification Plugin



Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de las imágenes satelitales se hace necesario contar con la menor influencia de las características atmosféricas, es por ello que se aplica en el software QGIS la corrección DOS1 para cada uno del conjunto de bandas de las imágenes satelitales descargadas, en donde se seleccionan las imágenes como entradas, se define el directorio de salida y escoge el metadato que contiene toda la información de cada una de las imágenes.

Figura 4. Corrección atmosférica de imágenes satelitales Sentinel 2

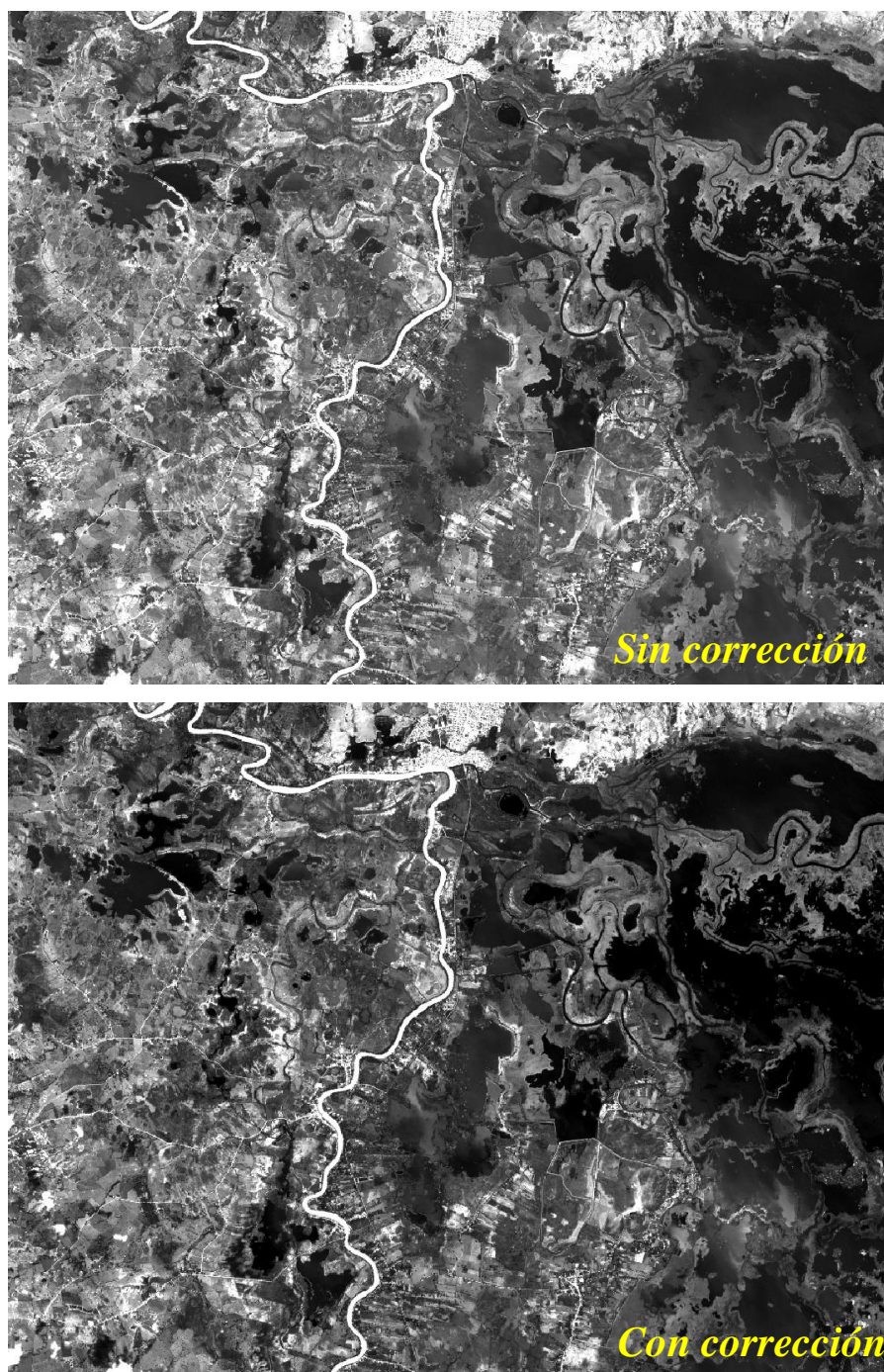


Fuente: Elaboración propia

Al aplicar la corrección atmosférica se tiene que las coberturas en las bandas se pueden diferenciar de forma visual y espectral más claramente (figura 5), esto teniendo en cuenta que se realzan ciertos colores en las imágenes corregidas y por ende se pueden obtener mejores resultados en la interpretación de las mismas.

Luego que se obtienen las salidas de la corrección atmosférica, se procede con el recorte de las imágenes satelitales con el polígono del área de estudio del proyecto. Para ello se cargan todas las bandas que conforman la imagen satelital y se utiliza la herramienta Recortar Múltiples Ráster que se encuentra en el complemento Semi-Automatic Classification Plugin.

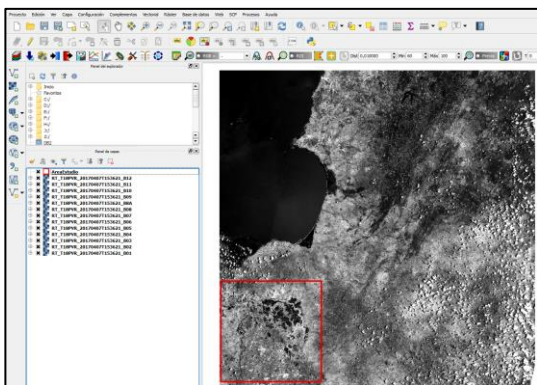
Figura 5. Comparativa de imágenes antes y después de la corrección atmosférica DOS1



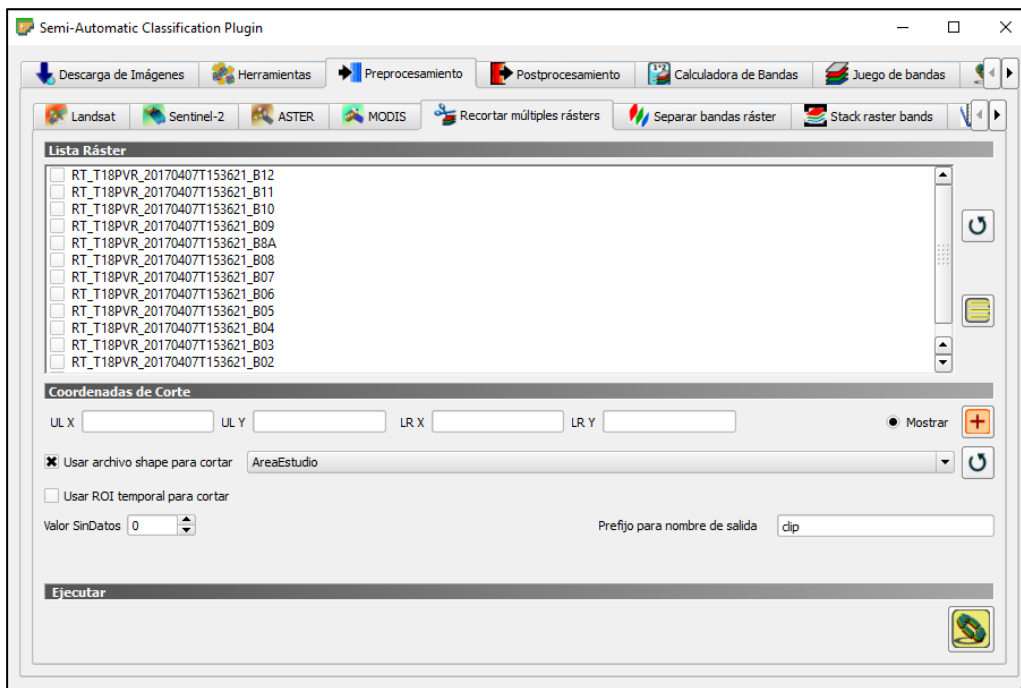
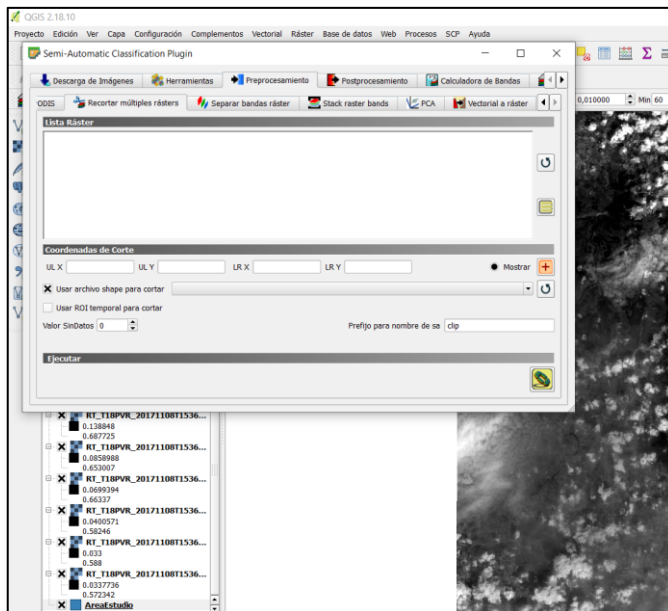
Fuente: Elaboración propia

Figura 6. Recorte de bandas de las imágenes satelitales

Cubrimiento de las imágenes satelitales y área  
para recorte



Recorte de bandas de las imágenes satelitales



Fuente: Elaboración propia

**5.2.4 Fase 4. Aplicación y clasificación de los índices de agua.** Las imágenes satelitales son el método más exacto que se tiene hoy en día para determinar áreas de espejos de agua de gran



extensión, esto teniendo en cuenta que se dificulta el acceso mediante la utilización de GPS en campo y que los gastos serían superiores a la hora de llevar a cabo la delimitación. Para llevar a cabo dicha delimitación se tienen los índices de agua, entre los cuales se tienen principalmente los siguientes; Índice Diferencial de Agua Normalizado – NDWI, Índice de Diferencia de Agua Normalizado Modificado – MNDWI y para realizar algunas comparaciones el Índice NDVI.

### **Índice de Diferencia de Agua Normalizado (NDWI).**

Acorde con el Sistema Nacional de Información Agropecuaria de Uruguay– SNIA (2018) el Índice de Agua de Diferencia Normalizada, NDWI por su sigla en inglés. Provee información del estrés hídrico de la vegetación. El índice NDWI utiliza la combinación de las reflectancias de la resolución espectral a 0.86  $\mu\text{m}$  y 1.24  $\mu\text{m}$  eliminando las variaciones inducidas por la estructura interna de los tejidos vegetales y su contenido de materia seca, mejorando la precisión en la determinación del contenido de agua de la vegetación. Los valores del índice poseen un rango de -1 a +1, estando los valores menores a 0 asociados a superficies brillantes sin presencia de vegetación o agua y los mayores a 0 asociados a presencia de agua y vegetación. Cuanto más se acerca a 1, mayor es el contenido de agua.

Xu, 2006, indica que, en 1996, McFeeters, señaló que este índice es diseñado para:

- Maximizar la reflectancia de las características acuáticas, al usar la longitud de onda correspondiente al verde.
- Minimiza la baja reflectancia del NIR para las características acuáticas.
- Maximiza la alta reflectancia del NIR para la vegetación terrestre y los suelos.

$$\text{NDWI} = \frac{\text{Verde} - \text{NIR}}{\text{Verde} + \text{NIR}}$$

En 1988, Clevers modificó el índice, para medir la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo (Muñoz, 2015), la expresión es:

$$\text{NDWI} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}}$$

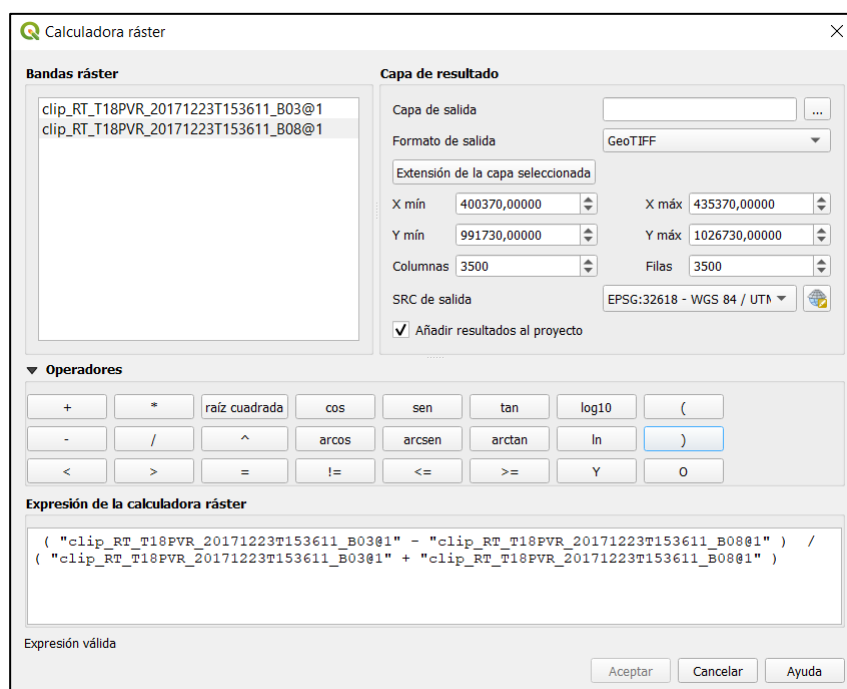
Donde:

SWIR: la banda del Infrarrojo Medio.

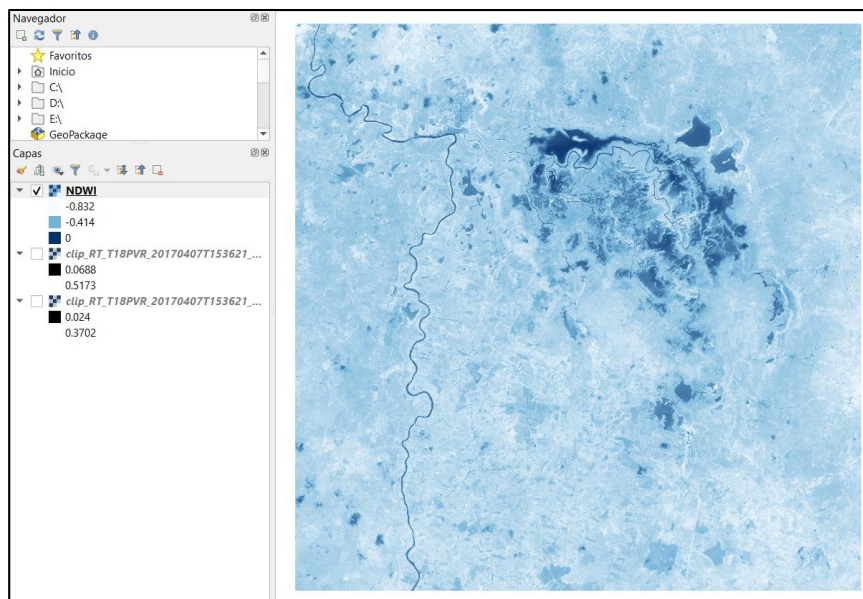
En el software SIG QGIS se aplicó la ecuación para el satélite Sentinel 2 como se muestra a continuación:

$$NDWI = \frac{\text{Banda 3} - \text{Banda 8}}{\text{Banda 3} + \text{Banda 8}}$$

Figura 7. Aplicación del NDWI a las imágenes satelitales y resultado obtenido







Fuente: Elaboración propia

### **Índice de Diferencia de Agua Normalizado Modificado (MNDWI).**

Este índice surgió como respuesta a la incapacidad del índice de diferencia de agua normalizado (NDWI) para separar territorios cubiertos del agua. Por este motivo en 2006, Xu propuso modificar el NDWI reemplazando la banda del Infrarrojo Cercano (NIR) por la banda del Infrarrojo Medio (SWIR). Los valores de este índice varían entre -1 y 1, donde los valores superiores a cero corresponden a cuerpos de agua. (Ariza, Garcia, Rojas, y Ramírez, 2014).

El Índice de diferencia de agua normalizado modificado (MNDWI) utiliza las bandas verde y SWIR para realzar las entidades que se encuentran en mar abierto. También disminuye las entidades de área construidas que a menudo se correlacionan con el mar abierto en otros índices.

$$\text{MNDWI} = (\text{Green} - \text{SWIR}) / (\text{Green} + \text{SWIR})$$

Verde = valores de píxel de la banda verde

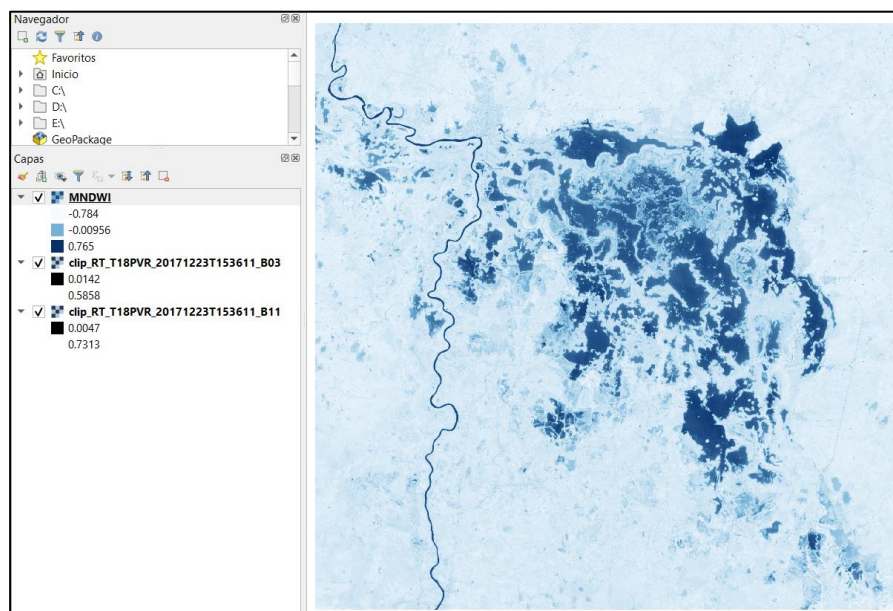
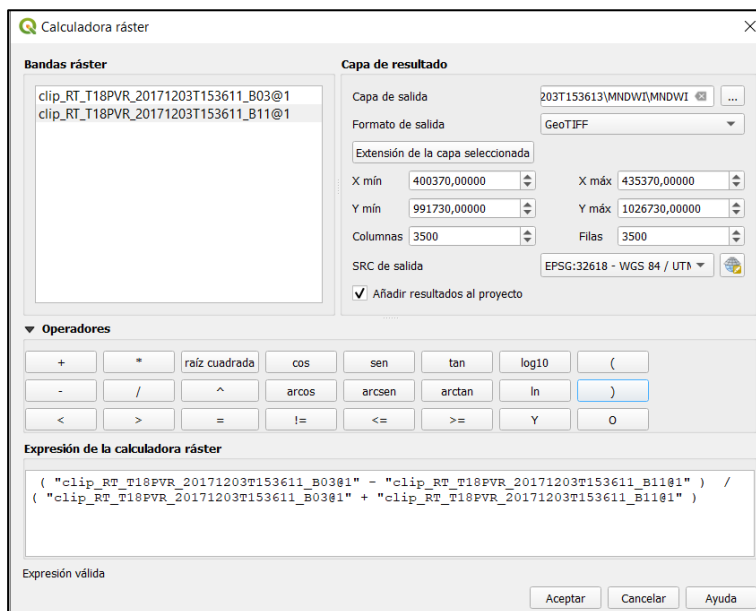
SWIR = valores de píxel de la banda infrarroja de onda corta

$$\text{MNDWI} = \frac{\text{Verde} - \text{SWIR}}{\text{Verde} + \text{SWIR}}$$

Para el caso de las imágenes satelitales Sentinel 2, se utilizan las bandas que se relacionan a continuación en el software SIG QGIS:

$$\text{MNDWI} = \frac{\text{Banda 3} - \text{Banda 11}}{\text{Banda 3} + \text{Banda 11}}$$

Figura 8. Aplicación del MNDWI a las imágenes satelitales



Fuente: Elaboración propia

Los procesos ilustrados para el NDWI y el MNDWI se repiten para cada una de las imágenes satelitales que fueron utilizadas en el proyecto y se obtiene el archivo ráster de cada una de las fechas con valores que oscilan entre 1 y -1, los cuales deben ser reclasificados para diferenciar las zonas con agua y las zonas que no tienen presencia de agua.

### Clasificación de los Índices de Agua

Teniendo en cuenta que el software SIG QGIS arroja un ráster con valores entre 1 y -1 se hace necesario reclasificar estos índices de acuerdo con las coberturas de agua que se presentan en el entorno. En el software SIG ArcGis 10.5 a realizar la reclasificación de categorías de dichos índices como se muestra a continuación:

Tabla 5. Clasificación del NDWI

Categoría MNDWI	Nombre reclasificación
<b>-0.60 A -1.0</b>	No Agua
<b>-0.25 A - 0.50</b>	Agua con coberturas (pastos, cultivos, etc)
<b>0.0 A -0.25</b>	Agua con sedimentos y/o vegetación acuática
<b>1.0 A 0.0</b>	Espejo de agua

Fuente: Elaboración propia con base en análisis en software SIG

Para el MNDWI se establecieron cuatro categorías acordes con los resultados espectrales obtenidos de la aplicación de este:

Tabla 6. Clasificación del MNDWI

Categoría MNDWI	Nombre reclasificación
<b>-0.50 A -1.0</b>	No Agua
<b>-0.25 A - 0.50</b>	Agua con coberturas (pastos, cultivos, etc)
<b>0.0 A -0.25</b>	Agua con sedimentos y/o vegetación acuática
<b>1.0 A 0.0</b>	Espejo de agua

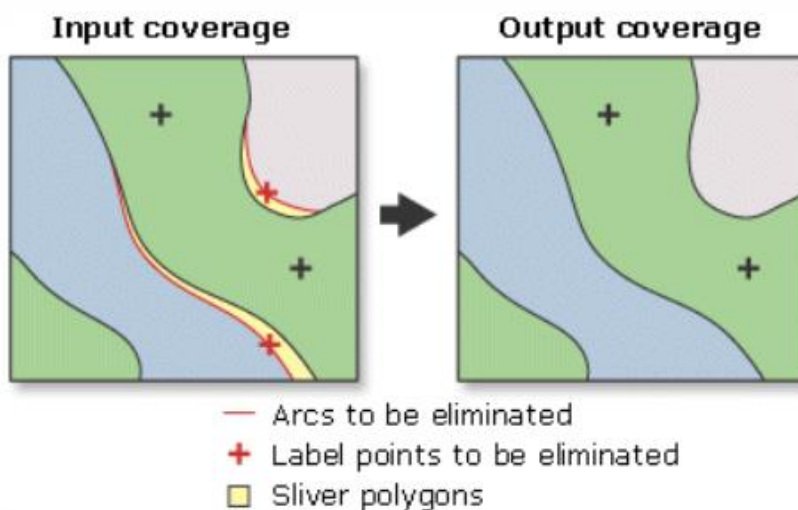
Fuente: Elaboración propia con base en análisis en software SIG

A partir de las clasificaciones anteriormente expuestas se pueden llevar a cabo los cálculos de áreas de cada una de las categorías para su respectivo análisis.

### Procesamiento Post Clasificación

Después de evaluar el resultado de la clasificación de los índices NDWI y MNDWI, se procede a realizar la limpieza y filtrado de los vectores que conforman la clasificación. Para este post procesamiento en el software SIG se utiliza la función de ArcGis Data Management tools → Generalization → Eliminate. Esta herramienta se utiliza con el propósito de eliminar polígonos demasiado pequeños que resultan de la aplicación de índices de agua, y de este modo se generalizan las áreas objeto de estudio para la presentación de estadísticas sobre cada una de las categorías.

Figura 9. Función eliminate en software ArcGis



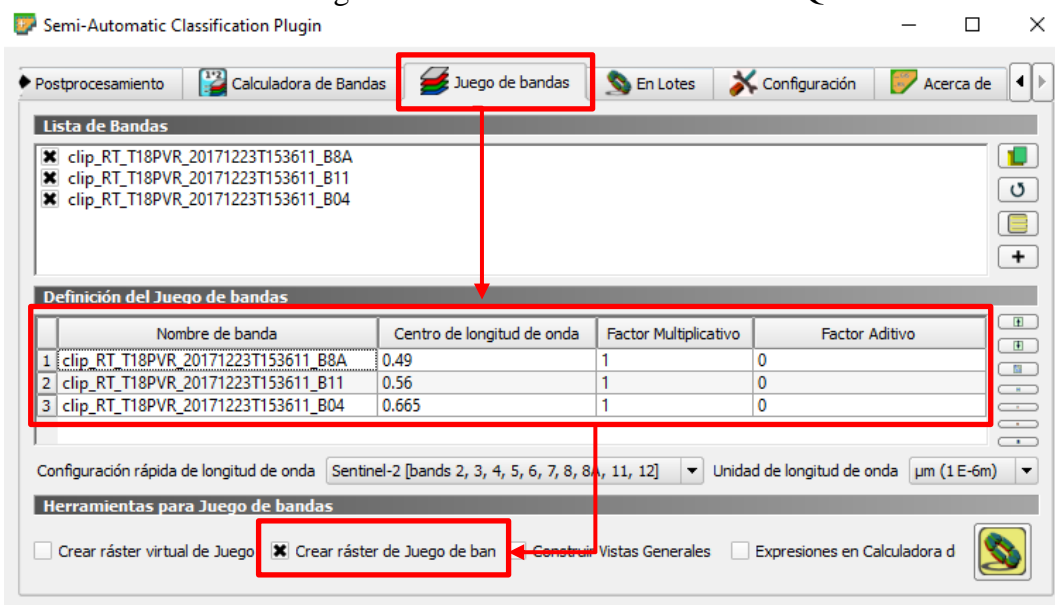
Fuente: Función Eliminar, ESRI 2019

La función Eliminate de ArcGis permite eliminar los polígonos menores a 0,2 hectáreas fusionándolos al vecino más cercano. Para ejecutar dicha función se abre la capa en ArcGIS y se procede a revisar y categorizar adecuadamente las clases de cada uno de los índices de agua obtenidos de las imágenes satelitales a una escala 1:25.000 con el objetivo de corregir errores mayores en la clasificación. Los errores mayores hacen referencia a agrupaciones de polígonos clasificados erróneamente; por ejemplo, cuando las sombras de nubes son clasificadas como agua,

o bosques como sombras de nubes, etc. En los casos en los que se encuentran errores de clasificación sistemáticos, se realiza la reasignación manual de la cobertura correcta.

Para tener menor grado de incertidumbre en las zonas que se encuentran influenciadas por nubes en las imágenes satelitales, se llevó a cabo la clasificación de coberturas supervisada mediante el software SIG gratuito QGIS. Para llevar a cabo la clasificación supervisada en el software gratuito QGIS, en primera instancia se realiza una combinación de bandas en la cual se logren diferenciar los cuerpos de agua de las demás coberturas que se representen en la imagen satelital. Para ello se utiliza la combinación de bandas 8A – 11 – 4 del espectro electromagnético (Infrarrojo cercano – Infrarrojo lejano – Rojo).

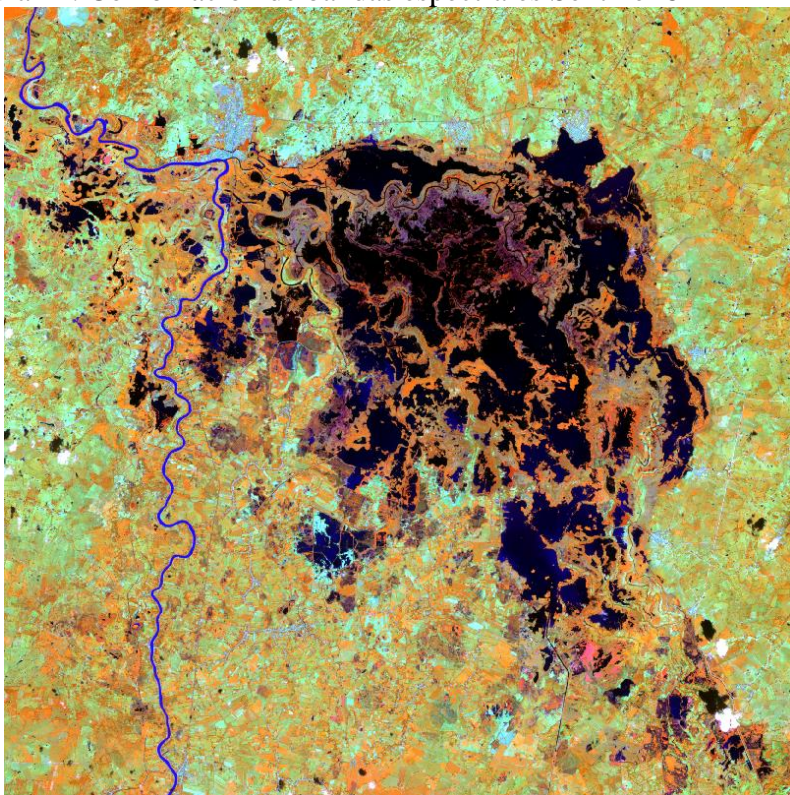
Figura 10. Combinación de bandas en QGIS



Fuente: elaboración propia



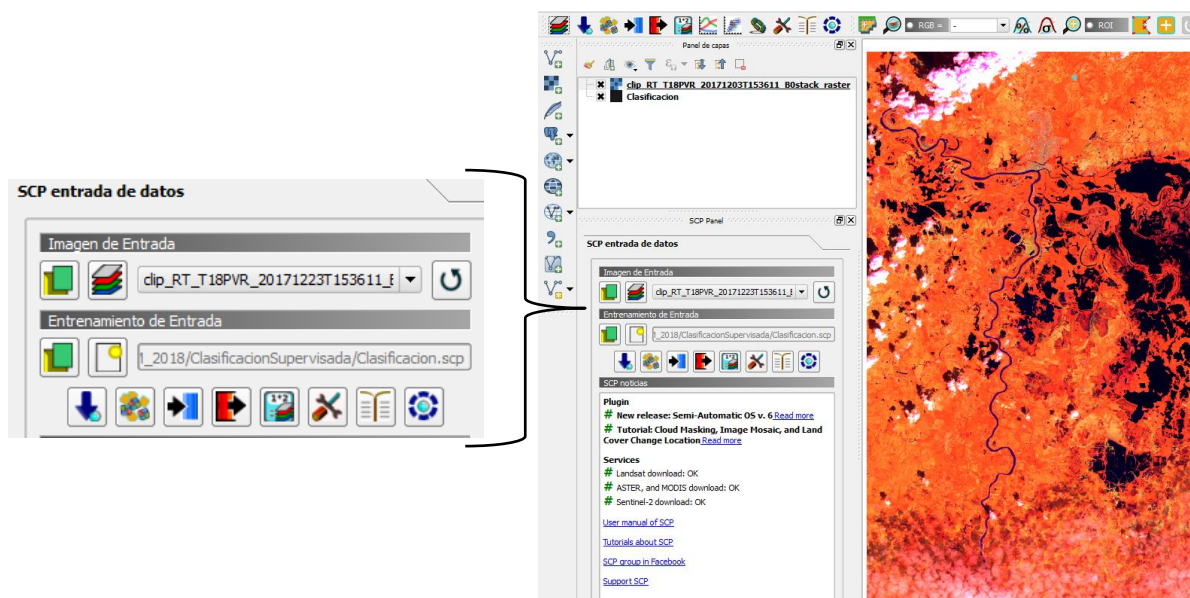
Figura 11. Combinación de bandas espectrales Sentinel 8A – 11 – 4



Fuente: Elaboración propia

Para la delimitación de coberturas se ingresan diferentes ROIs temporales o polígonos temporales de cada una de las coberturas, los cuales pueden ser guardados permanentemente para el análisis que se quiera llevar a cabo con dicha información. En QGIS se utiliza el panel Semi-Automatic Classification Plugin en la cual se ingresa la combinación de bandas que se crea anteriormente, se determinan los ROIS de cada cobertura dentro de la imagen satelital y se ejecuta la clasificación con el propósito de delimitar las nubes y las sombras de nubes con respecto a las demás coberturas y de este modo eliminar dichas áreas de los resultados obtenidos de índices de agua aplicados.

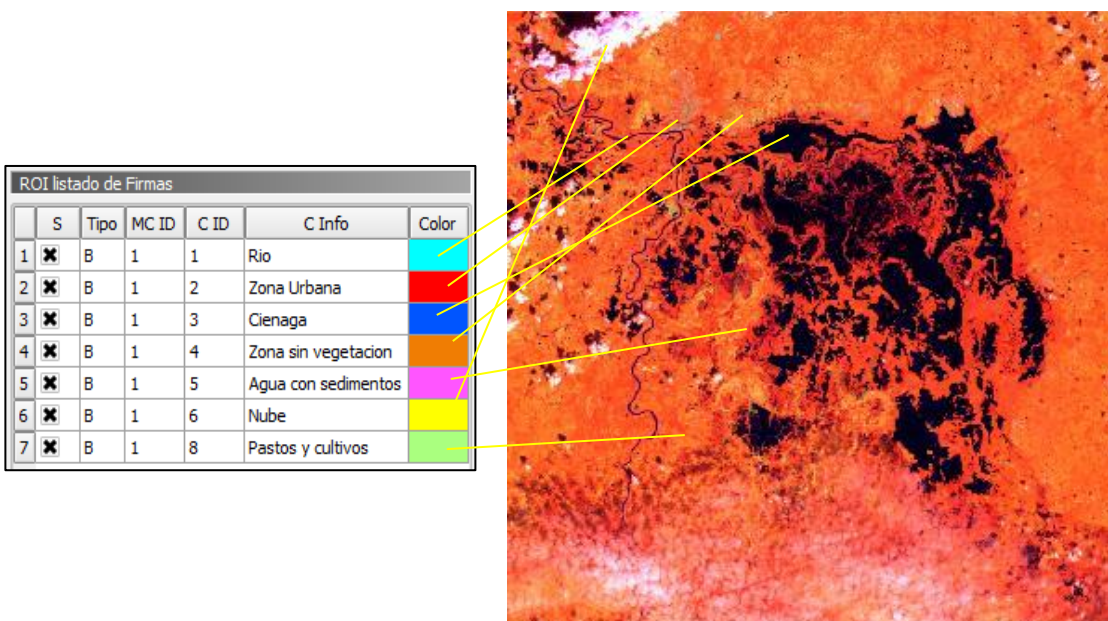
Figura 12. Panel de clasificación supervisada en QGIS



Fuente: Elaboración propia

En la clasificación de coberturas se utilizaron seis clases, para las cuales se creó un ROI independiente de cada una (figura 13) y posteriormente se corrió la clasificación, obteniendo como resultado dos archivos, uno *ráster* y otro vector de las coberturas delimitadas.

Figura 13. Coberturas delimitadas para seleccionar las nubes y las sombras de estas



Fuente: Elaboración propia

**5.2.5 Fase 5. Análisis de los resultados obtenidos.** Es fundamental realizar el análisis de los resultados, en donde se describa y se expliquen las aproximaciones sobre el comportamiento de las diferentes coberturas en las imágenes satelitales y la influencia que tuvieron las lluvias en el año 2017 para que las coberturas se distribuyeran como lo muestran las imágenes satelitales sentinel 2.

**5.2.7 Fase 6. Compilación y entrega de los resultados finales.** Finalmente se estructura un documento en el cual se compilen los resultados obtenidos de las diferentes imágenes satelitales y se realiza un análisis de los diferentes fenómenos que se presentan en el área de estudio, de tal modo que se convierta en una herramienta que facilite la toma de decisiones en el corto, mediano y largo plazo en lo que respecta al ordenamiento territorial, el manejo del recurso hídrico y la gestión del riesgo de desastres naturales.



## 6. RESULTADOS

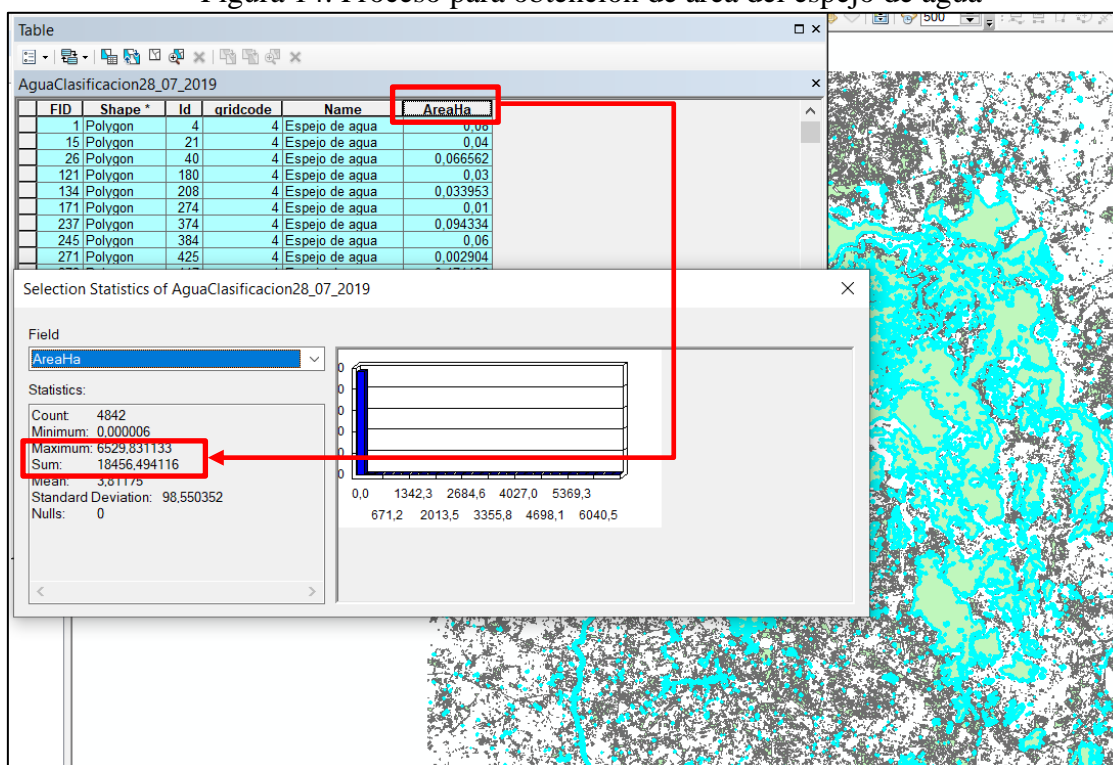
Los SIG brindan a los tomadores de decisiones una amplia visión sobre las diferentes problemáticas o fenómenos físico-ambientales que se presentan en el territorio y por ello se convierten en herramienta vital, esto teniendo en cuenta que el análisis de variables como el recurso hídrico, permiten direccionar políticas, acciones, planes y proyectos acordes con las diferentes áreas y sus características medioambientales. De este modo, se previene una mala planificación de las actividades socio productivas y organizacionales que se puedan llevar a cabo.

En el caso del área de estudio, les permite a entidades como la alcaldía, la gobernación, la CAR CVS, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y otras entidades públicas y privadas con influencia en la zona, enfocar sus actuaciones administrativas y de cualquiera índole teniendo en cuenta las características de cada zona.

La delimitación del espejo de agua es vital, dado que con base en dicha delimitación se puede velar por la conservación de este y evitar o prevenir que se desarrollen actividades que vayan en contra de la preservación y conservación del mismo. Para el área de influencia del CCBS se tiene que el río Sinú cuenta con un área de 624 hectáreas, las cuales se delimitan como espejo de agua a la hora de aplicar los índices NDWI y MNDWI en QGIS, es por ello que esta superficie se les resta a las áreas resultantes de los índices de agua, esto teniendo en cuenta que el río Sinú es un cauce permanente y que moviliza agua durante todo el año.

Para el cálculo de áreas del espejo de agua en ArcMap, se abre la capa de clasificación de agua que se creó previamente, se abre la tabla de atributos y se seleccionan las zonas que fueron delimitadas como espejo de agua ("Name" = 'Espejo de agua'), luego se da clic derecho sobre el campo de "AreaHa" y se selecciona la opción "Statistics" con el objetivo de obtener el dato de área total del espejo de agua para la zona (figura 11). Al valor se le resta el área de 624 hectáreas del cauce del río Sinú y se obtiene el dato de área del espejo de agua que se relaciona en la tabla 7.

Figura 14. Proceso para obtención de área del espejo de agua



Fuente: elaboración propia

Luego de llevar a cabo los diferentes procesamientos y análisis en los softwares SIG para la delimitación del espejo de agua, se obtuvieron como resultados de los índices de agua NDWI y MNDWI los siguientes datos de áreas:

Tabla 7. Áreas del espejo de agua con el NDWI

Fecha	Área (Ha) espejo de agua
<b>Enero 27 de 2017</b>	2.827,75
<b>Abril 07 de 2017</b>	6.777,23
<b>Julio 16 de 2017</b>	1.555,45
<b>Diciembre 03 de 2017</b>	14.837,26
<b>Diciembre 23 de 2017</b>	17.832,49

Fuente. Elaboración propia con base en los datos obtenidos en software SIG

Tabla 8. Áreas del espejo de agua con el MNDWI

Fecha	Área (Ha) espejo de agua
<b>Enero 27 de 2017</b>	10.193,06
<b>Abril 07 de 2017</b>	416,72
<b>Julio 16 de 2017</b>	8.156,01
<b>Diciembre 03 de 2017</b>	15.476,47
<b>Diciembre 23 de 2017</b>	15.513,12

Fuente. Elaboración propia con base en los datos obtenidos en software SIG

De los resultados obtenidos se tiene que para la delimitación de espajos de agua el el Índice de agua de diferencia normalizada modificada (MNDWI, por sus siglas en inglés), es el que mejores resultados ofrece, esto teniendo en cuenta que utiliza bandas verdes y SWIR para mejorar las características de aguas abiertas. También disminuye las características del área construida que a menudo se correlacionan con las aguas abiertas en otros índices (Xu, 2006 como se citó en ESRI, 2019).

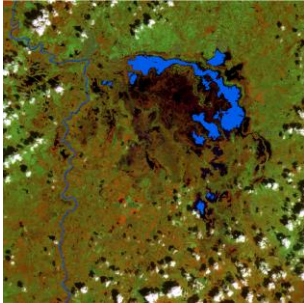
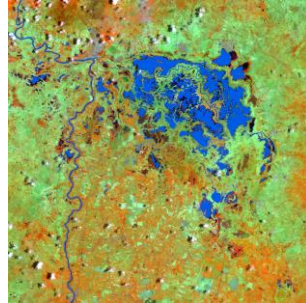
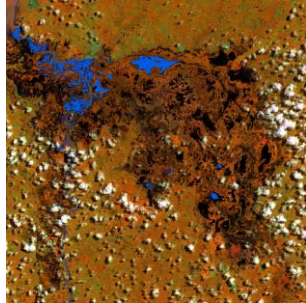
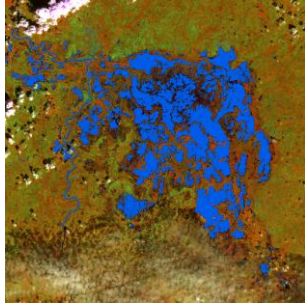
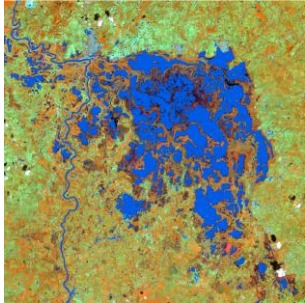
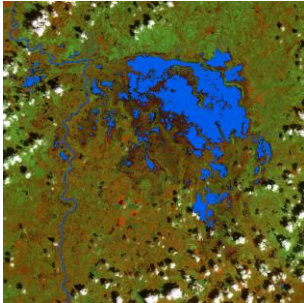
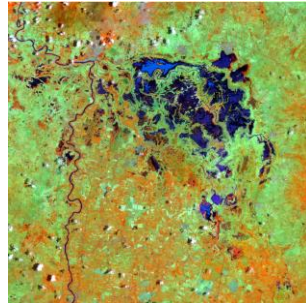
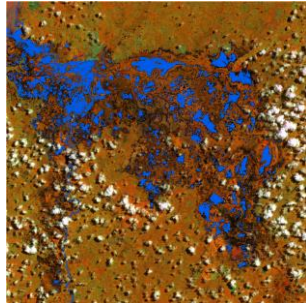
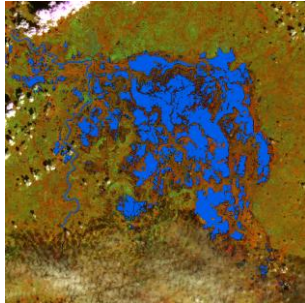
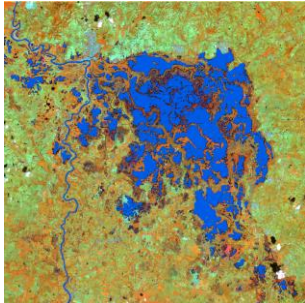

Caso contrario sucede con el NDWI, en el cual ejercen influencia las zonas que no tienen cobertura o que tienen alta reflectancia, como es el caso de suelos erosionados o zonas urbanas, las cuales tienden a confundirse con cuerpos de agua a la hora de aplicar el proceso en el software SIG.

De las cinco (5) imágenes satelitales Sentinel 2 que fueron utilizadas para la delimitación del espejo de agua y la mancha de inundación, se tiene que las que menos influencia de nubes tienen son las imágenes del mes de enero, abril y diciembre, por ende, son en las que mayor énfasis se hace a la hora de llevar a cabo los análisis de las zonas con aguas continentales, como ríos, ciénagas, represas o humedales que se encuentren en el entorno.

Otro de los factores fundamentales para seleccionar las imágenes anteriormente descritas, es el hecho relacionado con la nubosidad, esto teniendo en cuenta que es uno de los elementos atmosféricos que no se pueden eliminar de una imagen satelital de una fecha determinada, a menos que se cuente con otra imagen de otro sensor y que se pueda comparar las zonas donde se encuentre

la nubosidad. Lo anteriormente descrito no se logró realizar, dado que las imágenes Landsat (gratuitas) de la zona y para estas fechas también tienen alta cantidad de nubosidad y por ende se incurriría en mayores errores a la hora de obtener los resultados relacionados con el área de influencia del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.

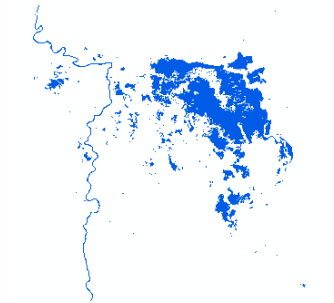

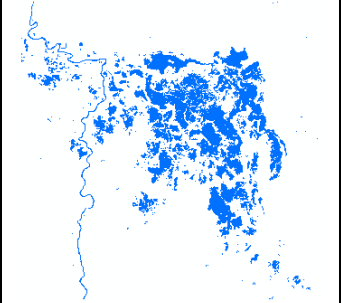
Tabla 9. Variación del espejo de agua en el año 2017

INDICE	Enero 27 de 2017	Abril 07 de 2107	Julio 16 de 2017	Diciembre 03 de 2017	Diciembre 23 de 2017
NDWI					
MNDWI					
 <b>Espejo de Agua</b>					

Fuente. Elaboración propia con base en los datos obtenidos en software SIG

Para la delimitación del espejo de agua o del humedal y acorde con Brena, Castillo y Wagner (2015), se lleva a cabo la sobreposición de las áreas con agua en diferentes fechas del año. Se seleccionaron los resultados de los índices de agua de los meses de enero, abril y diciembre y se llevó a cabo la superposición de dichas zonas que se categorizaron como espejo de agua en cada uno de los meses (Tabla 10). De la operación anterior se obtuvo como resultado un polígono de 26.746,9 hectáreas que corresponde al espejo de agua del CCBS para el año 2017, esto teniendo en cuenta que fue el área que durante todo el año siempre contó con presencia de agua y por ende es el área hacia la cual se deben enfocar políticas, proyectos y actividades enfocadas a la conservación y preservación del recurso hídrico.

Tabla 10. Áreas del espejo de agua para cada fecha del año

DESCRIPCIÓN	Enero 27 de 2017	Abril 07 de 2017	Diciembre 23 de 2017
Espejo de agua			

Fuente: elaboración propia

En ArcMap se utiliza el geoproceso *Union* (figura 15) para superponer el espejo de agua de las tres fechas seleccionadas, obteniendo como resultado y acorde con Brena, Castillo y Wagner (2015), la superficie del espejo de agua del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú para el año 2017 (figura 16).



Figura 15. Geoproceso para determinar el espejo de agua

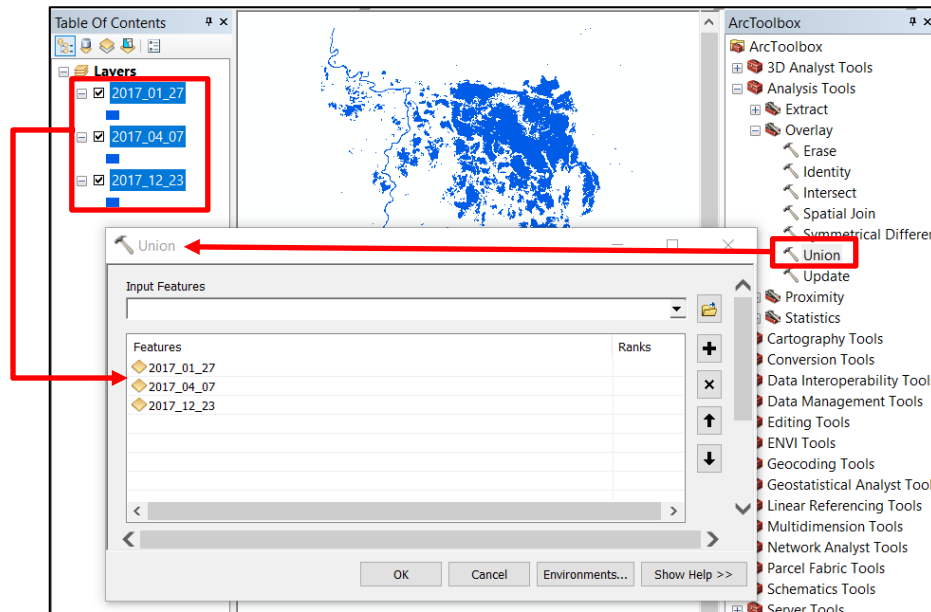
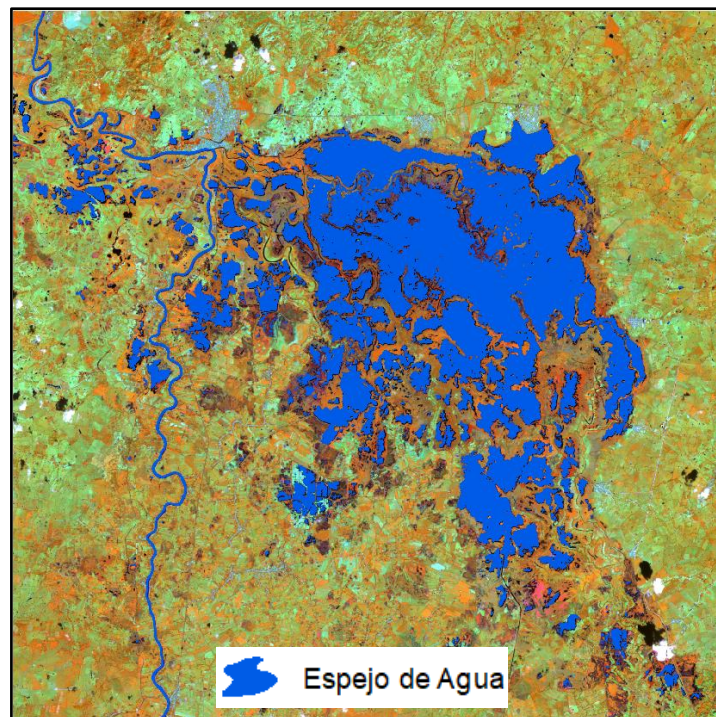


Figura 16. Espejo de agua del CCBS 2017



Fuente. Elaboración propia con base en los datos obtenidos en software SIG

## MONITOREO DE LA MANCHA DE INUNDACIÓN

De acuerdo con el informe diario operación atención inundaciones de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres Naturales - UNGRD de Córdoba, a corte del 12 de diciembre de 2017 se registraron en el área de influencia del CCBS 8470 familias afectadas por las inundaciones. Los principales centros poblados que fueron afectados por las inundaciones para el año 2017 se relacionan en la siguiente tabla:

Tabla 11. Centros poblados afectados por las inundaciones

MUNICIPIO	CENTRO POBLADO	FAMILIAS DAGNIFICADAS
<b>Lorica</b>	Zona urbana	6.200
	Palo de Agua	
	Nariño	
	La Palma	
	Los Monos	
	Mazamorra	
	San Sebastián	
	El Playón	
	La Peinada	
	Recula	
<b>Purísima</b>	Zona urbana	354
	Los Corrales	
<b>Momil</b>	Zona urbana	1.166
<b>Chimá</b>	Zona urbana	750
	Sitio Viejo	
	Arache	
<b>Total</b>		8.470

Fuente: Modificado de UNGRD 2017 y recorridos en campo 2017



La respuesta a emergencias supone un reto a la hora de gestionar los recursos tanto en los momentos inmediatamente posteriores, como en el proceso de recuperación y valoración de los daños (Donezar et al, 2017, p. 50). Uno de los insumos fundamentales para suplir lo anterior son los análisis que se llevan a cabo mediante la herramienta SIG con el monitoreo de los fenómenos naturales que se presentan en un entorno determinado y para el presente caso de las inundaciones. En el área de influencia del CCBS se vieron afectados varias comunidades, las cuales fueron visitadas para evidenciar los daños ocasionados por el aumento en el nivel del agua de las diferentes fuentes hídricas en la zona. A continuación, se muestra una muestra fotográfica de algunas zonas afectadas:

Figura 17. Zonas afectadas por las inundaciones en el año 2017 en el área de influencia del CCBS



Sobrevuelo con DRONE el día 27 junio 2017 en la zona urbana del municipio de Lórica, Córdoba



Recorrido de zonas inundadas el día 18 de julio en los centros poblados de Nariño y Palo de Agua en el municipio de Lórica, Córdoba



Recorrido de zonas inundadas el día 18 de julio en la zona urbana del municipio de Momil, Córdoba

Fuente: fotografías tomadas en campo

Para el manejo de las inundaciones en los municipios antes mencionados, la gobernación de Córdoba y las alcaldías con apoyo de la UDGRD suministraron a las comunidades kits de alimentos y aseo, colchonetas, al igual que costales para la mitigación de las inundaciones y de este modo evitar la propagación o generación de focos de enfermedades asociadas con el estancamiento de aguas.

Sin embargo, a nivel departamental sólo se mostraron cifras relacionadas con las familias afectadas por las inundaciones y no se determinó el área que fue afectada por dicho fenómeno. En los análisis que se llevaron a cabo con software SIG y los índices de agua a partir de imágenes satelitales, se logró determinar el área que fue afectada para el año 2017 para cada uno de los meses en los que se obtuvo imagen satelital con mínima influencia de nubes.

Luego de llevar a cabo la clasificación de los índices de agua como se indicó en el proceso metodológico, se eliminan las áreas que no tienen presencia de agua (no agua) y se calculan las áreas en el software SIG ArcMap para cada una de las zonas determinadas (mismo proceso en la figura 14) y se consolidaron los resultados en las tablas 12 y 13.

Tabla 12. Áreas resultantes del índice NDWI

Fecha	HUMEDAL	ZONAS INUNDADAS	
	Área (Ha) espejo de agua	Área (Ha) agua con sedimentos y/o vegetación acuática	Área (Ha) agua con coberturas
<b>Enero 27 de 2017</b>	2.827,75	7.724,53	4.290,71
<b>Abril 07 de 2017</b>	6.777,23	6.614,94	42.423,11
<b>Julio 16 de 2017</b>	1.555,45	6.967,56	39.997,58
<b>Diciembre 03 de 2017</b>	14.837,26	1.776,27	14.703,54
<b>Diciembre 23 de 2017</b>	17.832,49	870,96	19.092,97

Fuente. Elaboración propia con base en los datos obtenidos en software SIG

Tabla 13. Áreas resultantes del índice MNDWI

Fecha	HUMEDAL	ZONAS INUNDADAS	
	Área (Ha) espejo de agua	Área (Ha) agua con sedimentos y/o vegetación acuática	Área (Ha) agua con coberturas
<b>Enero 27 de 2017</b>	10.193,06	2.849,24	10.066,77
<b>Abril 07 de 2017</b>	416,72	5.599,72	5.483,70
<b>Julio 16 de 2017</b>	8.156,01	13.715,28	37.117,77
<b>Diciembre 03 de 2017</b>	15.476,47	3.349,47	20.342,98
<b>Diciembre 23 de 2017</b>	15.513,12	2.892,74	16.841,78

Fuente. Elaboración propia con base en los datos obtenidos en software SIG

Nuevamente se opta por tomar como referencia los datos obtenidos a partir del índice MNDWI, esto teniendo en cuenta que es en el que menores errores se obtienen a partir del análisis de las respuestas espectrales de las diferentes bandas de las imágenes satelitales procesadas.

Para el mes de julio de 2017 fueron aproximadamente 13.715 hectáreas las que se vieron afectadas directamente por las inundaciones, afectando centros poblados, actividades productivas (ganadería, cultivos de maíz, yuca, piña, plátano, entre otros) y la mayor parte de la zona rural de los municipios de Loricá, Purísima, Momíl y Chimá en el área de influencia del CCBS. Cabe resaltar que a partir de finales del mes de mayo y en el mes de junio, se presentaron en el departamento de Córdoba lluvias fuertes que ocasionaron la saturación del suelo e igualmente que los puntos críticos por erosión fluvial en el río Sinú se desbordaran, afectando aproximadamente a 8.470 familias que se mencionaron anteriormente.

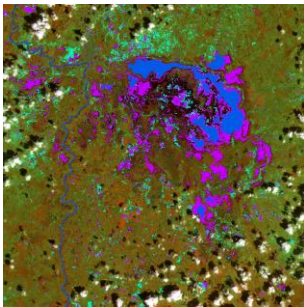
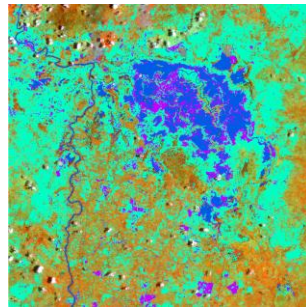
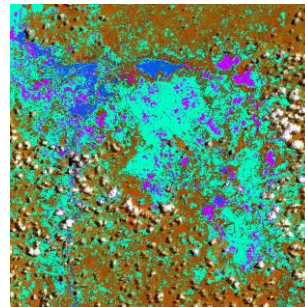
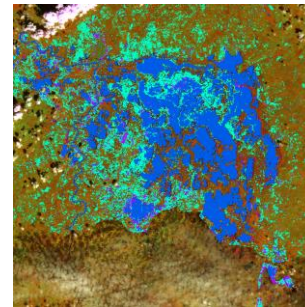
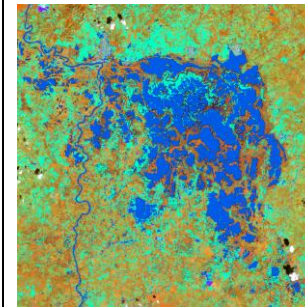
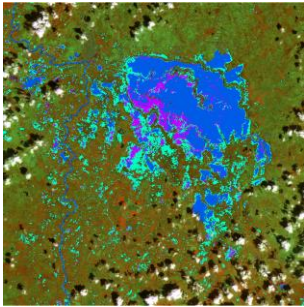
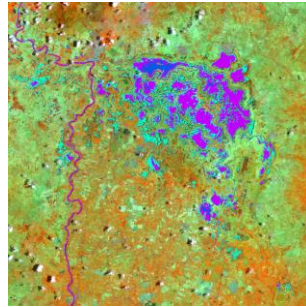
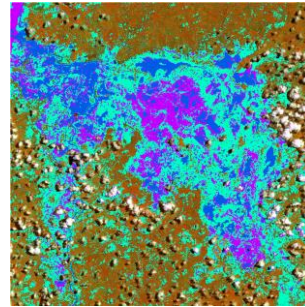
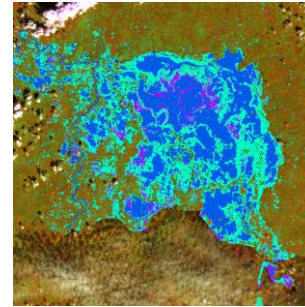
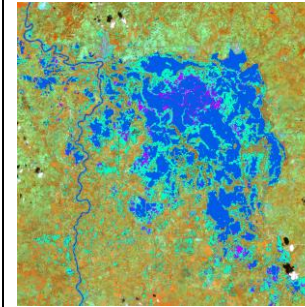



Igualmente se tenían 37.117 hectáreas de pastos, cultivos y zonas de pequeños bosques (agua con coberturas), que estaban influenciadas por el aumento en los niveles del río, canales, arroyos, ciénagas y humedales de los alrededores, que al saturarse tienden a afectar a las comunidades aledañas.

Para finales del mes de diciembre de 2017 (23 de diciembre) permanecían totalmente inundadas aproximadamente 2.892 hectáreas y algunas zonas de pastos, cultivos y fragmentos de bosque tenían aproximadamente 16.841 hectáreas en las cuales pocas actividades productivas se podían desarrollar, sin embargo, en estas zonas las afectaciones eran menores en lo que respecta a la capacidad de habitabilidad y manejo de las zonas se refiere.

Los resultados de los índices de agua que se calcularon en el software SIG se presentan a continuación para cada una de las fechas específicas de las que se tuvo acceso a imágenes con la menor presencia de nubes posible. En estas se muestra la dinámica de la mancha de inundación para el año 2017 en el área de influencia del CCBS, la cual afectó a todas las comunidades aledañas y sus actividades de sustento y producción en la zona.



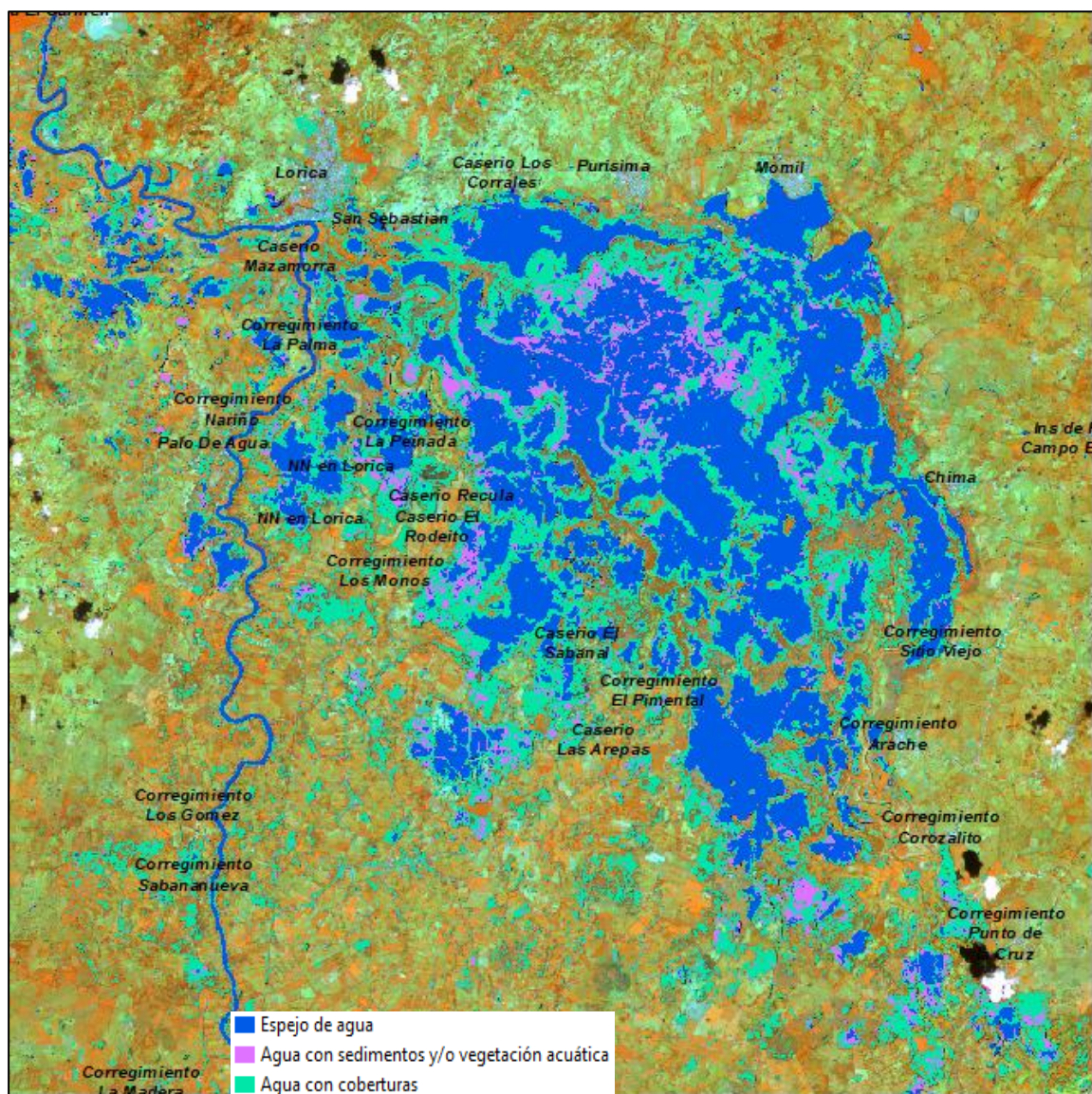
Tabla 14. Espejo de agua y manchas de inundación para el año 2017 en el área de influencia del CCBS

INDICE	Enero 27 de 2017	Abril 07 de 2107	Julio 16 de 2017	Diciembre 03 de 2017	Diciembre 23 de 2017
NDWI					
MNDWI					
<p>  Espejo de agua   Agua con sedimentos y/o vegetación acuática   Agua con coberturas </p>					

Fuente. Elaboración propia con base en los datos obtenidos en software SIG



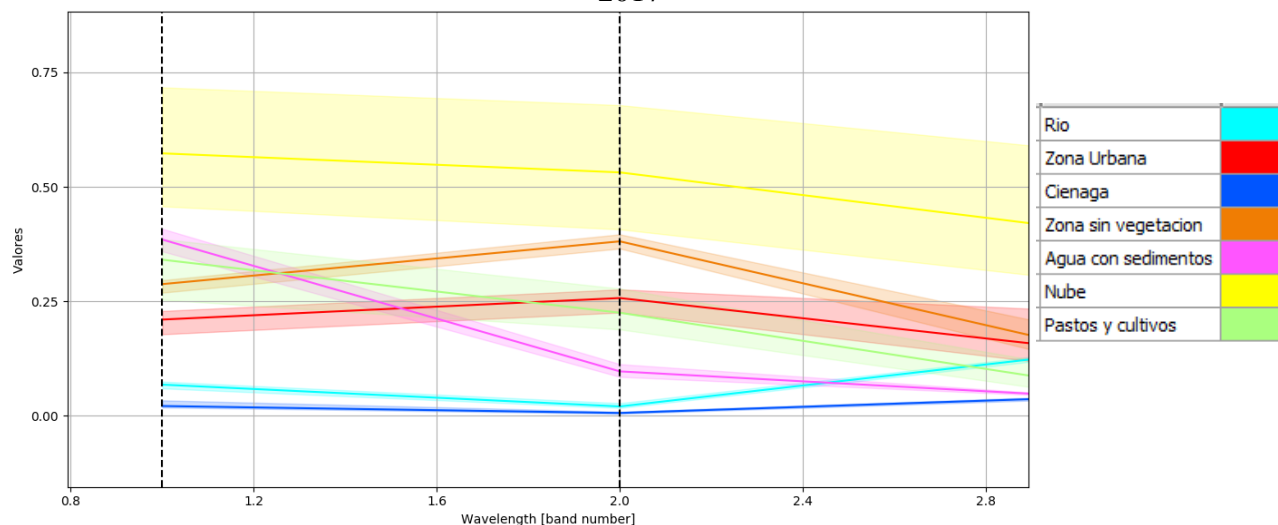
Figura 18. Espejo de agua y mancha de inundaciones diciembre de 2017



Fuente: Elaboración propia con base en los resultados MNDWI diciembre de 2017

Para la diferenciación de las categorías de agua se utilizan las firmas espectrales en el software QGIS, en las cuales se nota que estas áreas en la banda roja la reflectancia es alta y a medida que pasa al infrarrojo cercano y al lejano esta tiende a cero en la reflectancia, sin embargo, siempre se encuentra por encima de la curva espectral del espejo de agua (figura 19), por ende es a partir de las curvas espectrales que se logran diferenciar estas áreas en el resultado final obtenido.

Figura 19. Firmas espectrales de coberturas identificadas en la imagen satelital de diciembre de 2017



Fuente: elaboración propia

El área de influencia del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú es propensa a aumentos de nivel del agua anualmente, esto teniendo en cuenta que al presentarse las lluvias y saturarse el suelo en la zona, el agua tiende a aumentar su nivel, afectando comunidades y sus medios productivos. Es por ello, que sería propicio que anualmente se realizaran monitoreos de la mancha de inundación en la zona, esto con el propósito de llevar a cabo un registro de las áreas que se inundan anualmente y a la vez poder contribuir en los instrumentos de planificación que requieran de este tipo de información para orientar sus políticas, planes y proyectos enfocados al desarrollo del territorio.

Con base en los objetivos de la Ley 388 de 1997, entre los que se tiene el establecimiento de los mecanismos que permitan al municipio, en ejercicio de su autonomía, promover el ordenamiento de su territorio, el uso equitativo y racional del suelo, la preservación y defensa del patrimonio ecológico y cultural localizado en su ámbito territorial y la prevención de desastres en asentamientos de alto riesgo, así como la ejecución de acciones urbanísticas eficientes, se deben llevar a cabo por parte de la administración municipal la estructuración de las políticas, proyectos y actuaciones que se pueden llevar a cabo en el área de influencia del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.

Igualmente, bajo los lineamientos de la Ley 1523 de 2012 y el decreto 1807 de 2014, se deben llevar a cabo los estudios detallados de gestión del riesgo de desastres para cada uno de los centros poblados que fueron afectados por las inundaciones para el año 2017 y que históricamente sufren por este fenómeno. Lo anterior, con el propósito de que se definan las actuaciones que se deben llevar a cabo en cada una de las zonas afectadas por las inundaciones y que sean incorporadas en los planes de ordenamiento territorial de cada municipio acorde a las exigencias de la ley.



## ALTERNATIVAS DE MANEJO PARA LAS ZONAS INUNDABLES DEL ÁREA DE INFLUENCIA DEL COMPLEJO CENAGOSO BAJO SINÚ

Los ecosistemas de humedales son esenciales para el hábitat de varias especies, y su deterioro resulta en un impacto negativo irreversible, afectando a las diversas especies de aves y fauna íctica principalmente (Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge - CVS, 2016, p. 36). Es por ello que en torno a estas áreas se deben orientar directrices enfocadas al buen manejo y uso de las mismas, de tal modo que no se lleven a cabo actuaciones irracionales en estas áreas y se pueda velar por la integridad de la fauna y flora existente en el entorno.

En primera instancia es evidente la necesidad de llevar a cabo estudios detallados sobre gestión del riesgo de desastres naturales en el área de influencia del CCBS, de tal modo que se brinden directrices sobre las comunidades y las diferentes actividades sociales y productivas que se dan en el entorno. Sin embargo, en el presente estudio se proponen las siguientes medidas de manejo generales de acuerdo con las zonas que fueron delimitadas al aplicar los índices de agua en software SIG:

Tabla 15. Zonas propuestas para el área del CCBS

ZONA	MEDIDA DE MANEJO
<b>Espejo de agua</b>	Protección, Conservación o Preservación
<b>Agua con sedimentos y/o vegetación acuática</b>	Uso sostenible
<b>Agua con coberturas</b>	

Fuente: Modificado del acuerdo de consejo directivo N° 351 de 2017, CVS

Teniendo como base el Decreto 3600 de 2007, por el cual se reglamentan las disposiciones de las Leyes 99 de 1993 y 388 de 1997 relativas a las determinantes de ordenamiento del suelo rural y al desarrollo de actuaciones urbanísticas de parcelación y edificación en este tipo de suelo y se adoptan otras disposiciones, se proponen para cada una de las áreas identificadas en el área de influencia del CCBS los usos que se deben llevar a cabo acorde con los lineamientos de dicho decreto, en el cual se tienen las siguientes definiciones:

Tabla 16. Definiciones de usos acorde con el Decreto 3600 de 2006

USO	DEFINICIÓN
<b>Uso Principal</b>	Uso deseable que coincide con la función específica de la zona y que ofrece las mayores ventajas para el desarrollo sostenible
<b>Uso Compatible o Complementario</b>	Uso que no se opone al principal y concuerda con la potencialidad, productividad y protección del suelo y demás recursos naturales conexos
<b>Uso Condicionado o Restringido</b>	Uso que presenta algún grado de incompatibilidad urbanística y/o ambiental que se puede controlar de acuerdo con las condiciones que impongan las normas urbanísticas y ambientales correspondientes
<b>Uso Prohibido</b>	Uso incompatible con el uso principal de una zona, con los objetivos de conservación ambiental y de planificación ambiental y territorial, y por consiguiente implica graves riesgos de tipo ecológico y/o social

Fuente: Decreto 3600 de 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006

En el área de estudio desde al año 2016 se está ejecutando un proyecto de alto impacto socioecosistémico como lo es Conexión BioCaribe y que ejecuta la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura – FAO, en el cual cuentan con un corredor que comprende ecosistemas de gran relevancia para la región que se encuentran en estado crítico como lo son los bosques y vegetación inundable y el bosque seco. Es una conectividad importante para el paso de felinos y la conservación de aves como el Cahavarry, entre otras especies más. Uno de los servicios más importantes que beneficia a las poblaciones es el suministro de agua y la regulación hídrica, además de recursos hidrobiológicos para la seguridad alimentaria. Es por ello, que la zona adquiere mayor relevancia entorno al manejo que se le debe brindar a cada de una de las zonas que cuenta con zonas inundables y el mismo espejo de agua del humedal.

Tabla 17. Propuestas de manejo para las zonas del área de influencia del CCBS

ZONA	Uso Permitidos	Usos		Usos Prohibidos
		Complementarios	Restringidos	
<b>Espejo de agua (Protección)</b>	Actividades de protección, regulación, ordenamiento y control y vigilancia, dirigidas al mantenimiento de los atributos, composición, estructura y función de la biodiversidad en el área del espejo de agua del CCBS	Recreación Educación Ecoturismo Investigación Pesca responsable	Obtención de agua solo para necesidades básicas. Utilización de artes de pesca ilegales	-Ganadería extensiva, cultivos agrícolas, cacería, quema o cualquier otra actividad, obras de ingeniería hidráulica no autorizadas por las autoridades o entidades competentes y cualquier actividad que implique pérdida de la vegetación o contaminación del agua (Vertimientos)
<b>Agua con sedimentos y/o vegetación acuática (Uso sostenible)</b>	Pesca responsable, recreación, investigación y agricultura no técnica, reforestación con especies nativas, implementación de agroecosistemas diversos.	Ecoturismo, recreación, educación e investigación, construcción de viviendas adaptadas al cambio climático, agricultura adaptada al cambio climático.	Ganadería extensiva, cultivos con alta demanda de agua y agroquímicos.	Desviación de cauces y drenajes, la quema de la vegetación acuática con el objetivo de extracción de fauna para usos propios o comerciales, ganadería extensiva, relleno y extracción de material de los cuerpos de agua, obras de ingeniería hidráulica no autorizadas por las autoridades o entidades competentes.
<b>Agua con coberturas (Uso sostenible)</b>	Cultivos, ganadería bajo sistemas silvopastoriles o tecnificada, reforestación, obras enfocadas al desarrollo del territorio.	Agricultura no tecnificada o que no contemple el uso de agroquímicos	Ganadería extensiva, cultivos con alta demanda de agua y agroquímicos.	Desviación de cauces y drenajes, quema o tala de árboles, ganadería extensiva, relleno y extracción de material de los cuerpos de agua.

Fuente: Modificado del acuerdo de consejo directivo N° 351 de 2017, CVS

Desde las administraciones locales, departamentales y regionales, se deberían adelantar actuaciones enfocadas al control y manejo de esta zona del CCBS, esto con el propósito de velar por la conservación y preservación de estos ecosistemas de alta relevancia a nivel mundial, sobre todo en la actualidad en la que se evidencian los impactos del cambio climático y que apuntan a seguir afectando sino se les brinda un manejo sostenible a los recursos del medio ambiente.

## 7. CONCLUSIONES

Luego de aplicar los índices de agua se determinó que el MNDWI es el más idóneo para este tipo de estudios, esto teniendo en cuenta que utiliza bandas verdes y SWIR para mejorar las características de aguas abiertas como el caso del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú. Igualmente con este índice se disminuyen las características del área construida que a menudo se correlacionan con las aguas abiertas en otros índices. El NDWI es un índice en el cual se debe seguir trabajando para mejorarlo y obtener resultados de mayor fiabilidad en lo que ha superficies de agua continentales se refiere.

Con base en los resultados obtenidos del MNDWI y el análisis SIG aplicado se obtuvo como resultado un polígono de 26.746,9 hectáreas que corresponde al espejo de agua del CCBS para el año 2017, esto teniendo en cuenta que fue el área que durante todo el año siempre contó con presencia de agua y por ende es el área hacia la cual se deben enfocar políticas, proyectos y actividades enfocadas a la conservación y preservación del recurso hídrico e igualmente es el área que por su importancia ecosistémica se debe priorizar entorno a las problemáticas de cambio climático que se manejan actualmente y se proyectan a futuro.

La nubosidad es una limitante que afecta directamente los productos que se obtienen de las diferentes imágenes satelitales, sin embargo, en el presente estudio las zonas que contenían nubes o sombras de las mismas fueron eliminadas de los resultados obtenidos, evitando de este modo que se tomen decisiones en zonas que quizá no pertenezcan a alguna categoría y que por estar cubiertas de nubes en los índices de agua se iban a clasificar de algún modo.

A partir del mes de junio se presentaron las primeras inundaciones en el Bajo Sinú y para el mes de julio de 2017 fueron aproximadamente 13.715 hectáreas las que se vieron afectadas directamente por las inundaciones, afectando centros poblados, actividades productivas (ganadería, cultivos de maíz, yuca, piña, plátano, entre otros) y la mayor parte de la zona rural de los municipios de Lorica, Purísima, Momil y Chimá en el área de influencia del CCBS. Cabe resaltar que a partir de finales del mes de mayo y en el mes de junio, se presentaron en el departamento de Córdoba lluvias fuertes que ocasionaron la saturación del suelo e igualmente que

los puntos críticos por erosión fluvial en el río Sinú se desbordaran, afectando aproximadamente a 8.470 familias que se mencionaron anteriormente.

Igualmente, se vieron afectadas coberturas de pastos, cultivos y zonas de pequeños bosques en aproximadamente 37.117 hectáreas (agua con coberturas), que estaban influenciadas por el aumento en los niveles del río, canales, arroyos, ciénagas y humedales de los alrededores, que al saturarse tienden a afectar a las comunidades aledañas. Estas áreas podrían ser consideradas como amortiguadores al presentarse futuras épocas de lluvia intensas y que al superar la capacidad de los humedales sean las áreas receptoras de los excedentes de agua de dichas zonas, para lo cual se deben restringir algunas acciones o actuaciones relacionadas con el aprovechamiento productivo de las mismas.

Para finales del mes de diciembre de 2017 (23 de diciembre) aún se encontraban zonas afectadas por las inundaciones, aproximadamente 2.892 hectáreas e igualmente algunas zonas de pastos, cultivos y fragmentos de bosque tenían aproximadamente 16.841 hectáreas en las cuales pocas actividades productivas se podían desarrollar, dado que aún se tenían los suelos saturados y muy poca capacidad de fluidez de agua se presentaba. Sin embargo, en estas últimas zonas las afectaciones eran menores en lo que respecta a la capacidad de habitabilidad y manejo de las zonas se refiere.

Finalmente se proponen alternativas de manejo y uso para cada una de las áreas delimitadas por la aplicación de los índices de agua en la zona del Bajo Sinú, entre los cuales se tienen: usos permitidos, complementarios, restringidos y prohibidos. Bajo estas directrices se pueden proponer políticas, proyectos o actividades dentro de los planes de ordenamiento territorial o los planes municipales de gestión del riesgo de desastres naturales.

## 8. RECOMENDACIONES

En un proyecto de tesis futuro a nivel de especialización o maestría se pueden realizar comparativas de más índices de agua y además de clasificaciones supervisadas, esto con el propósito de reajustar los índices de agua que existe actualmente y quizá plantear un nuevo índice con sus respectivas categorías de acuerdo con las respuestas espectrales que presenta cada una de las bandas que conforman las imágenes satelitales.

Realizar un monitoreo anual sobre las superficies de agua en el área de influencia del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú, de tal modo que a futuro se puedan llevar a cabo comparativas sobre el aumento o detrimento del espejo de agua y de las inundaciones en la zona, permitiendo redireccionar las actuaciones que se puedan llevar a cabo en el Bajo Sinú. Para cumplir con este fin, desde las administraciones municipales y entidades con influencia en el área deben aunar esfuerzos para que dichas actividades se lleven a cabo, sobre todo resaltando la importancia de este tipo de áreas por ser zonas receptoras y generadores de fauna y flora.

Al ser los SIG los generadores de insumos fundamentales para la toma de decisiones, los resultados obtenidos de estudios como el presente se deben compartir con las entidades correspondientes que ejerzan influencia sobre las áreas de estudio y de este modo facilitar la gestión de políticas, planes, proyectos y acciones que se encaminen hacia un determinado territorio, sea por su importancia ecológica y ambiental o por la asociación que se tenga con procesos de ordenamiento territorial y de gestión del riesgo de desastres naturales y el cambio climático.

Se deben plantear a mayor detalle las actuaciones que se puedan dar en las zonas, teniendo en cuenta temáticas como las coberturas vegetales, el uso actual y potencial del suelo, las características geológicas y geomorfológicas de la zona, así como las dinámicas sociales y productivas que se presentan en cada comunidad en los alrededores del CCBS.

Las entidades del orden nacional deberían gestionar la realización de estudios detallados de los diferentes ecosistemas acuáticos con herramientas SIG e igualmente con la inclusión de variables biológicas, sociales, físicas, entre otras, de las diferentes zonas con superficies de agua, esto teniendo en cuenta que son zonas trascendentales en el marco de las problemáticas de cambio climático.



## BIBLIOGRAFÍA

Ardilla, J., y Quintero, O. 2013. Aplicación de la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica en la interpretación de zonas inundables. Caso de estudio: Río Soapaga, sector Paz de Río, Boyacá. Universidad Militar Nueva Granada - Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Volumen 23-2, pp. 55-76. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v23n2/v23n2a04.pdf>

Arnold, M., y Osorio, F. 1998. Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría General de Sistemas Cinta de Moebio. Núm. 3, Universidad de Chile. Santiago, Chile. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/101/10100306.pdf>

Bosque, J. 1992. *Sistemas de Información Geográfica*. Editorial Rialp, Madrid, España.

Bravo, N. 2017. Teoría – Teledetección Espacial Landsat, Sentinel-2, Aster L1t Y Modis. Universidad Nacional Agraria De La Selva. Facultad de Recursos Naturales Renovables. Huánuco, Perú. Recuperado de [https://acolita.com/wp-content/uploads/2018/01/Teledeteccion\\_espacial\\_ArcGeek.pdf](https://acolita.com/wp-content/uploads/2018/01/Teledeteccion_espacial_ArcGeek.pdf)

Brena, J., Castillo, C., y Wagner, A. 2015. Metodología para la delimitación y caracterización de humedales en escalas 1:50 000 y 1:20 000. Tecnología y Ciencias del Agua. Vol. VII, núm. 2, pp. 85-98. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v7n2/2007-2422-tca-7-02-00085.pdf>

Bruschi, R., y Cutinella, C. 2009. ¿Qué es un mapa?. Recuperado de <http://www.reduambiental.edu.uy/wp-content/uploads/2009/12/02-material-extra.pdf>

Castañeda, E. 2014. Análisis multitemporal del cuerpo de agua de la laguna el Sonso mediante imágenes satelitales Landsat. Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de ingeniería, especialización en Geomática. Recuperado de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/13442/1/Casta%20C3%20B1edaMoraEdgarIv%20C3%A1n2015.pdf>

Cifuentes, V., García, M., Checa, M., y Escudero, R. 2015. Estimación por teledetección de la superficie de la lámina de agua y los niveles de profundidad de las lagunas en los humedales de la Campiña Andaluza Central incluidos en la demarcación hidrográfica del Guadalquivir. Teledetección: Humedales y Espacios Protegidos. XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección. pp. 322-325. Sevilla, España. Recuperado de <http://ocs.ebd.csic.es/index.php/AET/2015/paper/view/27/274>

Congedo, L. 2018. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>

Congreso de la república. 2012. Ley 1523 de 2012, Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. Recuperado de [http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_1523\\_2012.html](http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1523_2012.html)

Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge - CVS. 2016. Plan de acción institucional 2016-2019. Recuperado de <https://www.cvs.gov.co/jupgrade/images/stories/docs/planes/PAI%202016-2019%20pdf.pdf>

Cruz, Diana; Motta, Javier; García, César. Estimación de la pérdida de área en los humedales de Bogotá en las últimas cinco décadas debido a la construcción y sus respectivos efectos. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5345/1/CruzSolanoDianaPaola2017.pdf>

Donezar, U., Larrañaga, A., Tamés, A., Sánchez, C., Albizua, L., Ciriza, R., y Barrio, F. 2017. Aplicación de imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2 en la detección y delineación de información de crisis de desastres naturales en el marco de los servicios Copernicus EMS. Revista de Teledetección, Asociación Española de Teledetección. 50, pp. 49-57. Recuperado de [https://polipapers.uv.es/index.php/r\\_aet/article/view/8896/9123](https://polipapers.uv.es/index.php/r_aet/article/view/8896/9123)

ESRI. 2012. What is GIS?. New York, Estados Unidos. Recuperado de <http://www.esri.com/library/bestpractices/what-is-gis.pdf>

ESRI. 2019. Galería de índices. Recuperado de <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/data/imagery/indices-gallery.htm>

European Space Agency. 2012. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. Leiden, Netherlands. Recuperado de [https://sentinel.esa.int/documents/247904/349490/S2\\_SP-1322\\_2.pdf](https://sentinel.esa.int/documents/247904/349490/S2_SP-1322_2.pdf)

European Space Agency. 2018. SENTINEL-2. Sentinel Online. Recuperado de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>

González, J. 2014. La gestión del riesgo de desastres en las inundaciones de Colombia: una mirada crítica. trabajo de grado para optar al título de especialista en recursos hídricos. Universidad Católica de Colombia, facultad de ingeniería, programa de ingeniería civil, especialización en recursos hídricos. Bogotá D.C, Colombia. Recuperado de [https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2128/1/Gesti%C3%B3n\\_riesgo\\_desastres\\_inundaciones\\_%20Colombia\\_mirada-cr%C3%ADtica.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2128/1/Gesti%C3%B3n_riesgo_desastres_inundaciones_%20Colombia_mirada-cr%C3%ADtica.pdf)

González, N., y González, A. 2015. Análisis multitemporal del espejo de agua en la Laguna de Fúquene para el periodo de 1985 a 2015. Trabajo de grado, Especialización en Sistemas de Información Geográfica - SIG, Universidad de Manizales, Facultad de Ciencias e Ingeniería.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. 2018. Mapas de inundación en Colombia. Recuperado de <http://www.siac.gov.co/inundaciones>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2017. Imágenes de satélite Elementos de percepción remota. Ciudad de México, México. Recuperado de [http://www3.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/imagenes/ingsatelite/metadatos/elem\\_per\\_rem.pdf](http://www3.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/imagenes/ingsatelite/metadatos/elem_per_rem.pdf)

Jiménez, M. 2005. El ensayo fotográfico como Diseño de Información. El uso de la fotografía en la investigación exploratoria de un fenómeno social. Tesis profesional, Licenciatura en Diseño de Información. Departamento de Diseño de Gráfico. Escuela de Artes y Humanidades, Universidad de las Américas Puebla. Recuperado de [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/ldf/jimenez\\_r\\_mc](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/ldf/jimenez_r_mc)

LA FM. Agosto 15 de 2017. Las ciénagas de Ayapel y Grande del Bajo Sinú entrarán a la lista internacional Ramsar. LA FM. Recuperado de <https://www.lafm.com.co/regional/las-cienagas-ayapel-grande-del-sinu-entraran-la-lista-internacional-ramsar/>

Ley 388.1997. Por la cual se modifica la Ley 9a de 1989, y la Ley 3a de 1991 y se dictan otras disposiciones. Recuperado de [http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_0388\\_1997.html](http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0388_1997.html)

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2007. Decreto número 3600 del 20 de septiembre de 2007, por el cual se reglamentan las disposiciones de las Leyes 99 de 1993 y 388 de 1997 relativas a las determinantes de ordenamiento del suelo rural y al desarrollo de actuaciones urbanísticas de parcelación y edificación en este tipo de suelo y se adoptan otras disposiciones. Recuperado de [http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2007/dec\\_3600\\_2007.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2007/dec_3600_2007.pdf)

Ministerio del Medio Ambiente. 2002. Política Nacional para Humedales interiores de Colombia: Estrategias para su conservación y uso sostenible. Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá D.C. Colombia. Primera Edición. Recuperado de [http://capacitacion.siac.ideam.gov.co/SIAC/polit\\_nal\\_humedales\\_int\\_colombia.pdf](http://capacitacion.siac.ideam.gov.co/SIAC/polit_nal_humedales_int_colombia.pdf)

Ministerio del Medio Ambiente. 2011. Diseño del inventario nacional de humedales y el seguimiento ambiental. Ministerio del Medio Ambiente. Gobierno de Chile. Recuperado de [http://www.mma.gob.cl/1304/articles50507\\_documento.pdf](http://www.mma.gob.cl/1304/articles50507_documento.pdf)

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. 2014. Decreto número 1807 del 19 de septiembre de 2014, por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones. Recuperado de [http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/SRR/decreto\\_1807\\_19\\_%20septiembre\\_2014.pdf](http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/SRR/decreto_1807_19_%20septiembre_2014.pdf)

Moser, L., Schmitt, A., y Wendleder, A. 2016. Automated wetland delineation from multi-frequency and multipolarized SAR images in high temporal and spatial resolution.

Nocerino, E., Menna F., y Remondino, F. 2012. Multi-Temporal analysis of landscapes and urban areas.

Parra, A., y Hernández, F. 2010. Identificación y delimitación de Humedales lénticos en el Valle Alto del Río Cauca mediante el procesamiento digital de imágenes de Satélite. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, núm. 9, pp. 77-88 Universidad del Valle Cali, Colombia. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/2311/231116434010.pdf>

Rojas, K., y Cárdenas, Ch. 2013. Identificación y registro catastral de cuerpos de agua mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes en Landsat-5. Universidad Nacional de Ingeniería, Perú. Recuperado de <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1309/1309.7609.pdf>

San Martín, L., Morandeira, N., Grimson, R., y Kandus, P. 2015. Uso de imágenes ALOS/PALSAR-1 para la clasificación e inventario de humedales en la Llanura Costera de Ajó (Buenos Aires, Argentina). Teledetección: Humedales y Espacios Protegidos. XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección. pp. 583-586. Sevilla, España. Recuperado de <http://ocs.ebd.csic.es/index.php/AET/2015/paper/view/284/358>

Sánchez, A., Abdul, D., Guelmami, A., Perennou, Ch., y Martínez, J. 2015. Desarrollo de un indicador para el seguimiento de los niveles de inundación en humedales Mediterráneos. Teledetección: Humedales y Espacios Protegidos. XVI Congreso de la Asociación Española de

Teledetección. pp. 362-365. Sevilla, España. Recuperado de <http://ocs.ebd.csic.es/index.php/AET/2015/paper/view/192/341>

Secretaría de la Convención de Ramsar. 2010. Manejo de humedales: Marcos para manejar Humedales de Importancia Internacional y otros humedales. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales, 4ª edición. Vol. 18. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza). Recuperado de <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/lib/hbk4-18sp.pdf>

Sistema Nacional de Información Agropecuaria de Uruguay– SNIA. 2018. Índice de Agua de Diferencia Normalizada. Uruguay. Recuperado de [http://dlibrary.snia.gub.uy/maproom/Monitoreo\\_Agroclimatico/INDICES\\_VEGETACION/NDWI/NDWI\\_250m/NDWI.html](http://dlibrary.snia.gub.uy/maproom/Monitoreo_Agroclimatico/INDICES_VEGETACION/NDWI/NDWI_250m/NDWI.html)

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - Colombia. 2017. Informe diario N° 117 operación atención inundaciones del 12 de diciembre de 2017. Departamento de Córdoba.

Valencia, M., y Figueroa, A. 2014. Vulnerabilidad de humedales altoandinos ante procesos de cambio: tendencias del análisis. Revista Ingenierías Universidad de Medellín. Vol. 14, No. 26, pp. 29-42. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v14n26/v14n26a03.pdf>

Xiaojun, Y., y Zhi, L. 2005. Using satellite imagery and GIS for land-use and land-cover change mapping in an estuarine watershed.

Xu, H. 2006. Modificación del índice de diferencia de agua normalizada (NDWI) para mejorar las características de aguas abiertas en imágenes de sensores remotos. *International Journal of Remote Sensing* 27, No. 14: 3025-3033.