



**MAESTRÍA EN TELEDETECCIÓN
ESTIMACIÓN DE LA EXTENSIÓN Y
PROFUNDIDAD DE FLUJO EN ZONAS
AFECTADAS POR INUNDACIONES
ASOCIANDO TÉCNICAS DE
TELEDETECCIÓN Y NIVELES DE
AGUA. CASO DE ESTUDIO
SUBREGIÓN DEL BAJO SINÚ,
COLOMBIA.**

JAMILTON ECHEVERRI DÍAZ



**Universidad[®]
Católica
de Manizales**

VIGILADA Mineducación

*Obra de Iglesia
de la Congregación*



**Hermanas de la Caridad
Dominicas de La Presentación
de la Santísima Virgen**

ESTIMACIÓN DE LA EXTENSIÓN Y PROFUNDIDAD DE FLUJO EN ZONAS
AFECTADAS POR INUNDACIONES ASOCIANDO TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN Y
NIVELES DE AGUA. CASO DE ESTUDIO SUBREGIÓN DEL BAJO SINÚ, COLOMBIA.

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Magister en
Teledetección

Asesor

Msc. Sarah Weber

Autores:

Jamilton Echeverri Díaz

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
MAESTRÍA EN TELEDETECCIÓN
MANIZALES

2023

<https://orcid.org/0000-0002-1268-7183>

DEDICATORIA

Principalmente a Dios por darme la vida y permitir haber llegado a este momento tan importante de mi formación profesional. A mi familia por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su amor y apoyo incondicional. Finalmente, a mi Directora de Tesis, la profesora Sarah Weber por haber compartido sus conocimientos y guiado con su profesionalismo en el desarrollo del presente proyecto de investigación; a la empresa SERTET SAS por su valioso aporte durante el desarrollo del proyecto acá referenciado.

Tabla de contenido

1.	INTRODUCCIÓN	12
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
3.	JUSTIFICACIÓN.....	19
4.	OBJETIVOS.....	21
4.1.	Objetivo general	21
4.2.	Objetivos específicos.....	21
5.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	22
5.1.	Antecedentes	22
5.2.	Marco teórico	29
5.2.1.	Imágenes satelitales.....	29
5.2.2.	Teledetección como herramienta para estimación de procesos de inundación	31
5.2.3.	Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)	31
5.2.4.	Definición del umbral mediante el procesamiento de imágenes SAR	33
5.2.5.	Modelos digitales de elevación y superficie	35
5.2.6.	Estaciones limnimétricas y limnigráficas.....	36
5.2.7.	Profundidad de inundación.....	37
5.3.	Marco geográfico	39
5.3.1.	Área de estudio.....	39
5.3.2.	Dinámica fluvial de la cuenca del río Sinú	40
5.3.3.	Precipitación.....	42
6.	METODOLOGÍA	44
6.1.	Definición área y épocas de estudio.....	45
6.2.	Selección de la colección de imágenes y generación de mosaicos	47
6.2.1.	Colección de imágenes ópticas	47
6.2.2.	Colección de imágenes SAR.....	49
6.3.	Calculo y categorización del NDWI	51
6.4.	Generación mosaicos de áreas afectadas por inundaciones desde imágenes ópticas.....	54
6.5.	Calculo de relación de épocas y definición de umbral desde imágenes SAR.....	55
6.6.	Generación mosaicos de áreas afectadas por inundaciones desde imágenes SAR	56
6.7.	Validación y fusión de imágenes SAR con imágenes ópticas	57
6.8.	Selección, descarga y medición de datos de las estaciones de estudio	58

6.9.	Calculo de elevaciones de la lámina de agua (SNMM)	61
6.10.	Interpolación, generación de contornos de elevaciones de la lámina de agua	63
6.11.	Selección del modelo digital de superficie y validación de su precisión	63
6.12.	Generación del mosaico de profundidad de inundación	64
6.13.	Calculo de áreas inundadas y reclasificación de la profundidad de inundación	65
7.	RESULTADOS	67
7.1.	Selección de imágenes ópticas y generación de mosaicos.....	67
7.2.	Selección de imágenes SAR y generación de mosaicos filtrados	67
7.3.	Cálculo del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)	69
7.4.	Reclasificación del NDWI	70
7.5.	Detección de cambios y cálculo de áreas afectadas desde imágenes ópticas.....	72
7.6.	Detección de cambios desde imágenes (SAR).....	74
7.7.	Generación de mosaicos y cálculo de áreas afectadas desde imágenes activas (SAR)..	75
7.8.	Fusión de imágenes ópticas y SAR para la obtención de áreas inundadas	76
7.9.	Procesamiento de estaciones limnimétricas y limnigráficas	80
7.10.	Generación de mapa de elevaciones lámina de agua época de lluvia	81
7.11.	Modelo digital de superficie y validación de su precisión	83
7.12.	Generación de mosaicos y cálculo de la extensión y profundidad de inundación	85
8.	DISCUSIONES	88
9.	CONCLUSIONES	92
10.	REFERENCIAS	94

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Espectro electromagnético. Dominio de frecuencias de las microondas y bandas.	31
Ilustración 2. Postes de madera con reglas limnimétricas distribuidas escalonadamente.....	37
Ilustración 3. Localización geográfica de la región del bajo Sinú	40
Ilustración 4. Localización general de la cuenca del río Sinú y la ciénaga grande del bajo Sinú.	41
Ilustración 5. Régimen de precipitaciones de la estación Sincelejo.....	42
Ilustración 6. Mapa de precipitación trimestral.....	43
Ilustración 7. Constructo metodológico	44
Ilustración 8. Área de estudio	46
Ilustración 9. Definición de número de clases desde el histograma.....	52
Ilustración 10. Identificación de píxeles en fronteras de agua y no agua.....	53
Ilustración 11 Localización estaciones limnimétricas y limnigráficas.....	59
Ilustración 12 Nivel máximo diario (NMD) detectado en la estación Sabana Nueva	61
Ilustración 13. Ilustración cálculo de la profundidad de flujo en las estaciones del IDEAM	62
Ilustración 14. Niveles de alerta establecidos para una ERE municipal o distrital.....	66
Ilustración 15 Mosaicos analíticos normalizados a nivel de reflectancia superficial.....	67
Ilustración 16 Visualización de corrección por filtrado de una imagen SAR	68
Ilustración 17 Visualización del histograma antes y después de filtrar la imagen SAR	68
Ilustración 18 Mosaicos empleando imágenes SAR polarización VH	69
Ilustración 19 Mosaicos empleando imágenes SAR polarización VV	69
Ilustración 20 Mosaicos NDWI época de sequía y de lluvia	70
Ilustración 21 Cálculo del NDWI reclasificado para las épocas de estudio.....	71
Ilustración 22 Cálculo áreas afectadas aplicando detección de cambios con imágenes ópticas	72
Ilustración 23 Identificación de fenómenos antrópicos desde el NDWI.....	73
Ilustración 24 Detección de cambios empleando imágenes SAR	75
Ilustración 25 Detección de áreas inundadas empleando imágenes SAR.....	76
Ilustración 26 Extensión de la lámina de agua sobre el río Sinú	76
Ilustración 27 Áreas detectadas como zonas inundadas mediante SAR	77
Ilustración 28 Fusión de áreas inundadas detectadas desde imágenes ópticas y SAR.....	78
Ilustración 29 Mosaicos fusión áreas inundadas imágenes ópticas y SAR.....	80
Ilustración 30 Mapa de elevaciones lámina de agua época de lluvia.....	82
Ilustración 31 Mosaicos modelos digitales de superficie.....	83
Ilustración 32 Mosaicos profundidad de inundación	87

Lista de tablas

Tabla 1 Localización, pendiente media y área de los municipios de estudio.....	46
Tabla 2 Propiedades mosaicos época de sequía.....	49
Tabla 3 Propiedades mosaicos época de lluvia.....	49
Tabla 4 Colección de imágenes SAR municipios del bajo Sinú.....	51
Tabla 5 Valores asignados en la reclasificación	55
Tabla 6 Características de las estaciones limnimétricas y limnigráficas	60
Tabla 7 Umbrales de reclasificación NDWI según clasificación de Jenks	70
Tabla 8 Matriz de confusión, verificación de la precisión general y coeficiente de Kappa.....	71
Tabla 9 Diferencia de épocas para algebra de mapas	72
Tabla 10 Cálculo de áreas afectadas por las inundaciones	74
Tabla 11 Áreas inundadas obtenidas desde imágenes SAR polarización VH y VV.....	75
Tabla 12 Validación fusión de imágenes ópticas – SAR VH	79
Tabla 13 Validación fusión de imágenes ópticas – SAR VV	79
Tabla 14 Calculo del nivel máximo diario (NMD) época de lluvia.....	81
Tabla 15 Calculo de la elevación lámina de agua época de lluvia estaciones del IDEAM.....	81
Tabla 16 Resultados métodos interpolación para generar mapa de elevación lámina de agua.....	82
Tabla 17 Resultados cálculo del EMC del DSM desde vértices del IGAC	84
Tabla 18 Cálculo de áreas inundadas para los municipios del bajo Sinú.....	87

Lista de anexos

Anexo 1 Mosaicos analíticos normalizados a nivel de reflectancia superficial.....	104
Anexo 2 Colección de imágenes SAR municipio de Montería.....	107
Anexo 3 Mosaicos empleando imágenes SAR polarización VH.....	109
Anexo 4 Mosaicos empleando imágenes SAR polarización VV	112
Anexo 5 Mosaicos NDWI época de sequía y de lluvia.....	115
Anexo 6 Puntos para validación método de clasificación de Jenks	118
Anexo 7 Calculo del NDWI reclasificado para las épocas de estudio	123
Anexo 8 Cálculo áreas afectadas aplicando detección de cambios con imágenes ópticas.....	126
Anexo 9 Detección de cambios empleando imágenes SAR	128
Anexo 10 Detección de áreas inundadas empleando imágenes SAR	131
Anexo 11 Mosaicos fusión áreas inundadas imágenes ópticas y SAR	134
Anexo 12 Mosaicos modelos digitales de superficie	136
Anexo 13 Mosaicos profundidad de inundación.....	138
Anexo 14 Procesamiento digital desde GGE empleando imágenes ópticas	142
Anexo 15 Procesamiento digital desde GGE empleando imágenes SAR.....	148

RESUMEN

En este estudio se realizó un análisis de zonas afectadas por inundaciones, se considerando la fuerte temporada invernal que afectó la subregion de la sabana cordobesa en Colombia para el año 2022, inundaciones causadas por los desbordamientos del rio Sinú y la ciénaga grande del bajo Sinú como consecuencia de las fuertes precipitaciones presentadas. Se consideraron los cambios que esta región experimento pasando de una época de sequía a una época de lluvia. El cálculo de la profundidad de inundación se realizó limitándose a las zonas afectadas por inundaciones, relacionando técnicas de teledetección y los niveles de lámina de agua que alcanzaron los cuerpos de agua para la época de lluvia. Se realizó la fusión de imágenes ópticas e imágenes SAR una vez se calculó del índice de agua de diferencia normalizada NDWI mediante imágenes pasivas empleando las bandas del rojo, verde, azul, NIR y la generación de una máscara de áreas inundadas para una polarización VH con imágenes SAR. Para este procesamiento, se detectaron las áreas inundadas mediante un proceso de reclasificación del índice espectral del NDWI separando el agua de otras coberturas y definiendo un umbral de aguas no permanentes mediante detección de cambios con imágenes SAR. Seguidamente mediante un proceso de interpolación con los niveles de la lámina de agua de los registros de las estaciones de monitoreo sobre el rio y la ciénaga antes mencionada, se creó un mapa de contornos de niveles máximos alcanzados en la época de lluvia, lo que permitió calcular la profundidad de inundación cuando se realizó un proceso de superposición con un modelo digital de superficie DSM que funcionó como lecho o fondo de la superficie inundada. Por ultimo este producto fue intersectado con el territorio detectado e inundado mediante la fusión de imágenes, permitiendo calcular las áreas que fueron afectadas por las inundaciones. Si bien cuando se comparó con los datos de referencia de otros estudios, se encontró que para otros estudios donde

se realizó la fusión de imágenes, este procesamiento presentó un mejor comportamiento cuando se fusionaron imágenes ópticas con imágenes SAR con polarización VV; pero si se evidenció que la variable de referencia para determinar la profundidad de inundación fueron los registros de las estaciones de medición de la superficie del agua y un modelo digital de superficie. Se puede concluir que para el año 2022, al haber calculado la profundidad de inundación, se definieron diferentes niveles de alerta y al haber detectado las áreas afectadas, se identificó la extensión que puede alcanzar la lámina de agua en el territorio. Adicional se encontró que los municipios más propensos a inundaciones son los que se encuentran en cercanías a la intersección del río Sinú y la ciénaga grande del río Sinú como lo son Lorica, Momil, Chimá, Purísima y San Bernardo del Viento, ya que estos presentaron mayor extensión de superficie inundada al igual que las mayores profundidades de inundación, con un total del 91.05% del territorio total afectado, lo anterior con una influencia marcada por el desbordamiento de los dos cuerpos de agua en este sector del territorio. También se pudo clasificar la inundación según un código de colores que permite para un futuro estudio, conocer el nivel de afectación y clasificar la amenaza de inundación para atender los pobladores ante una emergencia por el riesgo generado.

Palabras claves: Fusión de imágenes, niveles máximos de agua, áreas inundadas, profundidad de inundación.

ABSTRACT

In this study, an analysis of areas affected by floods was carried out considering the strong winter season that affected the subregion of the Cordoba savannah in Colombia for the year 2022, floods caused by the overflow of the Sinú river and the large swamp of lower Sinú as a consequence of the heavy rainfall presented. The changes that this region experienced going from a dry season to a rainy season were considered. The calculation of the flood depth was carried out limiting itself to the areas affected by floods, relating remote sensing techniques and the levels of water depths that reached the bodies of water during the rainy season. The fusion of optical images and SAR images was carried out once the NDWI normalized difference water index was calculated through passive images using the red, green, blue, NIR bands and the generation of a mask of flooded areas for a VH polarization with SAR images. For this processing, the flooded areas were detected through a reclassification process of the NDWI spectral index, separating the water from other coverage and defining a threshold of non-permanent water through detection of changes with SAR images. Subsequently, through an interpolation process with the levels of the water sheet from the records of the monitoring stations on the river and the aforementioned swamp, a contour map of maximum levels reached in the rainy season was created, which allowed Calculate the flood depth when a superimposition process was performed with a DSM digital surface model that functioned as bed or bottom of the flooded surface. Finally, this product was intersected with the detected and flooded territory by means of image fusion, allowing the calculation of the areas that were affected by the floods. Although when compared with reference data from other studies, it was found that for other studies where image fusion was performed, this processing performed better when optical images were fused with SAR images with VV polarization; but it was evidenced that the

reference variable to determine the flood depth were the records of the measurement stations of the water surface and a digital model of the surface. It can be concluded that for the year 2022, having calculated the flood depth, different alert levels were defined and having detected the affected areas, the extent that the sheet of water can reach in the territory was identified.

Additionally, it was found that the municipalities most prone to flooding are those located in the vicinity of the intersection of the Sinú river and the large swamp of the Sinú river, such as Lórica, Momil, Chimá, Purísima and San Bernardo del Viento, since these presented greater extension of flooded surface as well as the greater depths of flooding, with a total of 91.05% of the total territory affected, the above with a marked influence by the overflow of the two bodies of water in this sector of the territory. It was also possible to classify the flood according to a color code that allows for a future study, to know the level of affectation and to classify the threat of flooding to attend to the inhabitants in the event of an emergency due to the risk generated.

Keywords: image fusion, maximum water levels, flooded areas, flow depth

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional, desarrollo urbanístico, la falta de ordenamiento territorial y el cambio climático, han aumentado el riesgo de inundaciones, riesgo que puede causar pérdida de vidas humanas y pérdidas materiales, (Dang & Kumar, 2017). De igual forma, se puede decir que las inundaciones se encuentran entre las afectaciones o riesgos más peligrosos en la naturaleza, (Gao, Shen, Zhou, & Li, 2018).

Las inundaciones presentadas en la subregión del bajo Sinú para el año 2022, han causado fuertes afectaciones como desbordamiento del río y la ciénaga grande del bajo Sinú, esto debido a las fuertes precipitaciones que se presentaron a lo largo de la cuenca del río Sinú, precipitaciones con valores entre 100 y 400 mm según el (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM., 2022)

Es muy notorio observar como las comunidades se asientan en la ribera de los ríos y alrededores de las ciénagas, como construyen terraplenes y diques para aislar la fuente hídrica de sus territorios y como esto afecta el balance hídrico de una región disminuyendo la capacidad de amortiguamiento en las zonas bajas de las cuencas hidrográficas cuando se presentan eventos extremos, trayendo consigo afectaciones ambientales y amenazas por inundación que conllevan a pérdidas económicas y en muchos casos pérdidas humanas, (Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge – CVS., 2014).

Según la CVS, es muy normal observar cuando se presenta el fenómeno de la niña, como muchas regiones donde este tiene incidencia se ven fuertemente afectadas, generando desplazamientos masivos de habitantes ribereños. La subregión de la sabana cordobesa no es la excepción y para el año objeto de estudio, se observó cómo en 8 de los 13 municipios que

conforman esta región, muchos pobladores se vieron obligados a dejar sus viviendas y desplazarse a zonas que no fueron afectadas por tal fenómeno.

Uno de los principales objetivos a la hora de analizar las inundaciones es conocer la magnitud de la afectación y la extensión de la misma. Para ello es importante determinar de manera precisa las áreas que han sido afectadas por las inundaciones asociadas a eventos máximos de precipitaciones. Por lo tanto, poder contar con el aporte del sensoramiento remoto, las diferentes colecciones de imágenes y las técnicas de procesamiento para definir umbrales, convierten a la teledetección en un insumo de valioso aporte para detectar áreas inundadas, (Abdelkarim, Gaber, & Youssef, 2019).

Cuando se presenta un evento extremo de precipitación que trae consigo crecientes súbitas en ríos y ciénagas y cuando estos eventos se vuelven recurrentes en cortos periodos de tiempo, frecuentemente se generan problemas de desbordamientos de los cuerpos de agua; por tanto conocer los niveles máximos la lámina de agua se traduce en una variable fundamental a la hora de monitorear el comportamiento macrodinámico de las inundaciones presentadas. Para ello, es de gran aporte contar con los registros históricos de las agencias o entidades que se encargan del monitoreo de las fuentes hídricas y conocer los valores de registros históricos de niveles de inundación o profundidad de flujo u otra variable que aporte a las medidas de control, (Gao, Shen, Zhou, & Li, 2018).

Algunos antecedentes que se pueden relacionar a los objetivos trazados en este proyecto de investigación. Se encuentra el realizado por (Klemas, 2015), quien empleando técnicas y modelación de sensoramiento remoto logró identificar áreas afectadas por inundaciones, definiendo su extensión y calculando de la vulnerabilidad. (Gao, Shen, Zhou, & Li, 2018), realizaron un análisis de distribución espacial donde determinar la profundidad de inundación

empleando una ecuación que relacionó la elevación del suelo y de la superficie de agua, caracterizando el desastre de inundación; lo anterior lo lograron combinando datos de monitoreo de nivel de agua, sistemas de información geográfico (SIG), modelos digitales de elevación (DEM) y sistemas de sensoramiento remoto mediante imágenes SAR y ópticas. Finalmente se cita a (Agnihotri, Ohri, Gaur, Shivam, & Mishra, 2019), quienes en su investigación mapearon las inundaciones empleando datos hidrológicos e imágenes SAR, caracterizando áreas que se vieron afectadas por las inundaciones en los ríos Ganges y Ramganga en el norte de la india.

Como objetivo se encuentra la necesidad de calcular la profundidad de flujo o inundación realizando una interacción de técnicas y variables antes mencionadas que permitan resaltar claramente las áreas afectadas mediante el mapeo del territorio, permitiendo en lo posible clasificar la profundidad de inundación y de lograrse categorizar el riesgo al que se ve expuesta cada zona afectada en las épocas de lluvias con fuertes precipitaciones que se traducen en crecientes.

El alcance de este estudio se limita a un año particular y una problemática puntual que se presentó en el año 2022 en la subregión del bajo Sinú, Colombia, específicamente las inundaciones causadas por las fuertes precipitaciones presentadas entre los meses de julio y octubre según reportes meteorológicos del IDEAM. Por tal razón, para el caso de estudio se limita a un evento particular, sin darse la necesidad de realizar otro tipo de estudios como un análisis multitemporal.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cambio climático que ha experimentado el planeta tierra en los últimos años ha afectado al hombre y su entorno de manera decisiva; durante el siglo XXI, las inundaciones se han presentado de forma más frecuente y peligrosas generando crisis mundial causada principalmente por el cambio climático, (Elhag & Abdurahman, 2020). Adicionalmente, los desastres naturales causan más de \$500 mil millones de pérdidas al año, siendo las inundaciones los eventos catastróficos más frecuentes, (Anusha & Bharathi, 2020). Considerando el impacto que genera en los ríos y cuerpos de agua la variación de caudales, los cuales causan un aumento o disminución en la lámina de agua, es necesario contar con medidores que proporcionen de manera frecuente una lectura del nivel de la lámina de agua; si bien en la actualidad se cuenta con estaciones de medición de datos meteorológicos, estas se encuentran distribuidas de manera escasa, (Liang & Liu, 2020), siendo una limitante para determinar sistemas de alertas tempranas.

De acuerdo con, (Elkhrachy, 2015), es imposible evitar los riesgos de inundaciones o prevenir su ocurrencia, pero si es posible reducir sus efectos y las pérdidas resultantes. Para lograr lo antes mencionado, se requiere de información importante tal como: la proyección de precipitación y temperatura que suministran los modelos climáticos, la evolución de los caudales previstos en una cuenca a partir de la simulación con modelos hidrológicos correlacionados mediante niveles de flujo, profundidades de inundación o niveles máximos diarios suministrados por entidades competentes. Esta información proporciona una oportunidad para la evaluación del riesgo en cuanto a desastres por inundación se refiere y las respectivas actividades de gestión, (Thirumurugan & Krishnaveni, 2019). Lo anterior permite poder entre otras cosas, pronosticar o planificar el entorno respecto a futuros comportamientos del medio ambiente y el ordenamiento territorial.

La problemática de variación de niveles de los ríos y cuerpos de agua, no es ajena en Colombia ni en la región caribe. En los últimos años, los niveles máximos de agua del río Sinú han presentado un aumento significativo según los valores históricos de referencia como lo presenta la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge – CVS. A su vez, no se cuenta con un mapa que defina las áreas inundadas asociadas al cambio que se da por el régimen monomodal climático que se presenta en la subregión de la sabana cordobesa según, (Guzmán, Ruiz, & Cadena, 2014), lo que dificulta el entendimiento de las probabilidades de excedencia que se puedan presentar en los siguientes años que imposibilita el ordenamiento territorial de las zonas aledañas a las márgenes del río Sinú y la ciénaga grande del bajo Sinú la cual tiene conexión directa con el río antes mencionado en el municipio de Lorica.

Como consecuencia, el aumento de niveles de la lámina de agua ha generado alteraciones en el comportamiento hidrológico y geomorfológico del río Sinú, lo que ha causado cambios en la sinuosidad, problemas de erosión del cuerpo de agua e inundaciones de terrenos destinados para el aprovechamiento ganadero, agrologico y desarrollo urbano, (Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge –CVS, 2020); seguido a lo anterior, el proceso de sedimentación en el fondo de las ciénagas genera procesos de colmatación lo que aumenta la película de agua en el territorio ya que se genera pérdida de profundidad efectiva y procesos de eutrofización de las aguas, (Amaya, Hernandez, & Prado, 2018). Otra óptica, y no menos importante, el no contar con información geográfica que permita observar el comportamiento histórico del río Sinú y la ciénaga grande del bajo Sinú en función de la mancha de inundación y áreas afectadas, ha imposibilitado generar una estrategia de planificación a través del tiempo en cuanto al uso del suelo y ordenamiento territorial se refiere.

En este caso, contar con un primer mapa que presente las zonas afectadas, la extensión y profundidad de inundación para un año particular, permite evidenciar una problemática y podría ser una ventana para empezar a comprender el comportamiento de la región ante el riesgo de inundación. Por lo tanto, apoyado en información geográfica, registros de monitoreo de nivel de agua, modelos digitales de superficie DSM y técnicas de teledetección con enfoque en identificar zonas inundadas mediante detección de cambios, es posible identificar áreas afectadas y profundidades de inundación, y se podrían plantear para los próximos años soluciones realizando análisis de multitemporalidad que aporten a la problemática recurrente de desastres naturales, los cuales generan un daño considerable al medio ambiente y a las personas, dificultando el ordenamiento territorial y aprovechamiento del uso del suelo.

Lo anterior de no realizarse, podría agravar la problemática actual ya que es posible que se sigan generando asentamientos de personas a lo largo de la ribera de los cuerpos de agua y procesos antrópicos como la construcción de diques que disminuyen la capacidad de almacenamiento en las ciénagas; adicional se seguiría acrecentando la problemática actual que afecta a terratenientes, personas que se dedican a la ganadería y la agricultura como actividad económica ya que no se podría presentar una solución a la mitigación de afectación en sus propiedades, las cuales actualmente en épocas de lluvias se inundan.

Por lo tanto, este proyecto de investigación pretende calcular las áreas afectadas por las inundaciones presentadas en el año 2022 en la subregión de la sabana cordobesa, específicamente en 8 de los 15 municipios que la conforman (Montería, Cereté, San Pelayo, Lórica, Momil, Chimá, San Bernardo del Viento y Purísima). Adicionalmente, utilizar técnicas de teledetección empleando imágenes SAR y ópticas, combinarlas con los niveles de la lámina

de agua reportados por el IDEAM para la época de estudio y superponerlos con un modelo digital de superficie; de esta forma calcular la profundidad de flujo o inundación.

Tras el anterior planteamiento, se formula la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo asociar técnicas de teledetección, niveles máximos de la lámina de agua a un modelo digital de superficie y un evento específico de inundación?

3. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años las afectaciones generadas por el cambio climático han cobrado mucha importancia, a tal punto que los daños son observables y cuantificables. Si bien el cambio climático puede atribuirse a sequías extremas o eventos extremos de precipitaciones, no se puede desconocer que el ciclo hidrológico se está viendo afectado (González, Escobar, & Jiménez, 2007).

El departamento de Córdoba es atravesado por dos ríos, el río San Jorge y el río Sinú, éste último tiene un comportamiento sinuoso, algunos sectores en su trayecto formas meándricas, otros tramos con presencia de procesos de sedimentación y por último lugares con fenómenos erosivos y deslizamientos sobre los taludes del río Sinú (Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge – CVS., 2014). Una descripción más detallada permite delimitar la cuenca del río Sinú, la cual está constituida por 13952 km² aproximadamente, generando una influencia en departamentos como Córdoba, Antioquia y Sucre; siendo el primero donde el área de la cuenca hidrográfica se extiende en un 93%, lo que la convierte en una de las cuencas más extensas propia de un departamento (Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge – CVS., 2014).

La consecución de mapas de inundaciones de los archivos históricos de imágenes de satélite y la aplicación de algoritmos de mapeo para el monitoreo de inundaciones a gran escala se hace cada vez más necesario, pero también cada vez más desafiante con la proliferación constante de datos de detección remota (Domeneghetti, Schumann, & Tarpanelli, 2019). La gestión de inundaciones consta de muchos aspectos, como la evaluación de peligros, la evaluación de la vulnerabilidad, la evaluación de la exposición, la evaluación de riesgos, el sistema de alerta temprana, la evaluación de daños y la planificación de la mitigación de riesgos (Rahman & Di, 2017).

Como el departamento no cuenta con información que defina la afectación, extensión del área y profundidad de inundación, considerando el cambio que se da entre una época de sequía y una época de lluvia, el contar con mapas donde se identifique la extensión de las inundaciones facilita el entendimiento de las probabilidades de excedencia que se puedan presentar en las épocas antes mencionadas, facilitando trabajos importantes como el Plan de Ordenamiento Territorial – POT de localidades ribereñas, limitando o perpetuando una calidad de vida tendiente a líneas de pobreza continuas, dado que no se optimizan los recursos para la correcta planeación de espacios habitables o no.

De lo anterior, se deduce la importancia de realizar estudios paralelos que permitan obtener información confiable respecto a los posibles comportamientos del río Sinú y la ciénaga grande del bajo Sinú en los siguientes años, y si así se quiere, tomando como referencia los resultados obtenidos del presente estudio de investigación para el año 2022. De aquí, resaltar la importancia de emplear imágenes ópticas y SAR, fusionar los índices extraídos de las mismas, superponer con registros históricos de inundaciones e información geográfica para detectar cual ha sido la máxima afectación y las áreas más afectadas con su profundidad de inundación. De esta forma poder desde el ordenamiento territorial mitigar el riesgo de inundación y de desastres.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Estimar la extensión y profundidad de flujo o inundación para un evento extremo ocurrido en zonas afectadas por inundaciones presentadas a lo largo del río Sinú y la ciénaga grande del bajo Sinú en la subregión de la sabana colombiana para el año 2022, asociando técnicas de teledetección, DSM, niveles de lámina de agua y alerta por inundaciones.

4.2. Objetivos específicos

- Identificar áreas afectadas por las inundaciones mediante técnicas de teledetección empleando la fusión de imágenes ópticas e imágenes SAR.
- Relacionar los niveles máximos diarios de agua registrados en las estaciones del IDEAM con un modelo digital de superficie DSM en el área de estudio.
- Identificar la profundidad de inundación con base en las áreas afectadas asociando a diferentes niveles de alerta por inundaciones.

5. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

5.1. Antecedentes

Tiempo atrás, se han estado estudiando diferentes métodos y modelos que permitan identificar áreas afectadas por fenómenos de inundación asociados a eventos extremos de precipitación. En muchos casos se los autores han empleado diferentes técnicas desde el sensoramiento remoto, relacionando con diferentes modelos regionales para el monitoreo o mediciones de niveles de agua o inundación.

Se describe a continuación algunos trabajos que constituyen los antecedentes de la propuesta de investigación, a nivel internacional, nacional y regional y se registran según el alcance de los objetivos específicos y en un orden cronológico.

Entre los primeros antecedente se encuentra el trabajo realizado por (Rao, 1994), en el cual utilizó imágenes de Indian Remote Sensing Satellite (IRS IA) del delta del río Krishna en el sur de la India para el monitoreo y seguimiento efectivo de un ciclón desde el día de su formación, es decir, el 5 de mayo de 1990, ayudando a la evacuación oportuna de más de 600.000 personas que residían en el ciclón /zona propensa a inundaciones.

Para principios del nuevo siglo, (Sasia, Cisneros, Gutiérrez, & Camarasa, 2002), los autores emplearon sistemas de información geográfica y técnicas de teledetección para el análisis de inundaciones en la región del sudeste para la provincia de Córdoba (Argentina), inundaciones que han visto afectadas las cadenas de producción en este sector del país. De ahí, la importancia de emplear SIG y técnicas de teledetección para analizar tales fenómenos, proporcionando información que permita ordenar el territorio y mitigar el riesgo. Los autores pudieron concluir que, en el análisis de identificación de zonas inundadas y clasificación de la amenaza, la tecnología y los diferentes procesos de análisis de datos e imágenes se convierten en una

herramienta potente, novedosa y valiosa para el beneficio del ordenamiento de las regiones. Avalan los autores a la Teledetección como herramienta útil y eficaz para el estudio de fenómenos como lo son las afectaciones de cuerpos de agua y la importancia de emplear técnicas de procesamiento digital de imágenes.

En el trabajo de (Sandholt, y otros, 2003) los autores monitorearon las inundaciones anuales del río Senegal, específicamente las ocurridas en el año 1999 para ayudar a evaluar la viabilidad continua de la agricultura tradicional en recesión por inundaciones, así como también los peligros para las personas, la agricultura de regadío, los edificios y la infraestructura. Los investigadores procedieron a comparar y validar varias técnicas basadas en diferentes sensores con estudios en tierra. Todos los métodos probados fueron altamente precisos, así como su potencial operativo cuando se combinaron con el modelado hidrodinámico. Los autores concluyeron que el Landsat ETM + contiene toda la información requerida para el monitoreo de inundaciones; las áreas inundadas se pueden delimitar con precisión y se distinguen fácilmente de otros tipos de cobertura terrestre. Por último, el modelo de mezcla lineal, aplicado a una sola variable derivada de las bandas 4 y 5 de NOAAVHRR, proporciona una buena estimación general de la proporción de agua para toda el área de estudio. A escala de píxeles.

Mediante el uso del satélite IKONOS, satélite óptico de alta resolución espacial, (Fuentes, Bolaños, & Rozo, 2012), los autores describen en su artículo la consecución de DSM en la ciudad de Santa Marta, específicamente en la zona de la costa. Los autores describen la metodología mediante la cual pudieron generar un modelo topográfico simulando algunos parámetros del sensor y su órbita para así, conocer los coeficientes para una tendencia polinómica de la imagen; seguidamente, mediante el algoritmo de Thierry Toutin se logró representar un modelo en tres dimensiones de la superficie. Con estos insumos fue posible

identificar la cantidad de superficie o área afectada por la inundación. Concluyeron que los resultados fueron satisfactorios porque al calcular el EMC para la escala de 1:25000 del DTM, se obtuvo un nivel de confianza aceptable, EMC entre 3.9 m y 2.5 m. Por otra parte, con los resultados obtenidos, fue posible identificar las áreas propensas a inundaciones y sectorizar la bahía de Santa Marta según la pendiente, siendo el área norte, la zona más propensa a inundarse.

En el estudio desarrollado por (Bhatt & Rao, 2016), se centraron en inundaciones sin precedentes capturada a través de imágenes de satélite multitemporales, observadas a lo largo del río Ganges en Uttar Pradesh durante septiembre de 2010 y en tres estaciones de medición el nivel del agua del río superó el nivel de crecida alcanzado con anterioridad. Para tal efecto, los autores se apoyan en el uso de imágenes de satélite anteriores y posteriores a la inundación, junto con datos hidrológicos y meteorológicos. Los autores crearon un banco de datos históricos de satélites y reconocimiento de la capa de inundación con el nivel de agua observado. Los autores buscaron que la información generara un método útil para anticipar las áreas que se verán afectadas en situaciones en las que las imágenes de satélite no se pueden utilizar de manera efectiva debido a la nubosidad y también para proporcionar información sobre las áreas que están parcialmente cubiertas por datos de satélite. Los investigadores pudieron concluir que las observaciones hidrológicas, meteorológicas y de satelitales se convierten en un buen insumo para que investigaciones futuras en el campo. El análisis de lluvia acumulada de siete días muestra que las dos rachas continuas de lluvia de más de 100 mm con un intervalo de una semana llevaron al cruce de DL por río, y si seguidas por una tercera racha, podrían conducir a una situación de inundación sin precedentes. Esta relación observada entre las precipitaciones y el nivel del agua del río se puede utilizar como uno de los indicadores indirectos de la alerta de inundaciones durante la temporada de monzones.

Para (Dang & Kumar, 2017), la urbanización rápida y no planificada, junto con el cambio climático, han exacerbado el riesgo de inundaciones las cuales han sido la causa de devastadoras pérdidas de vidas humanas y propiedades en la ciudad de Ho Chi Minh, Vietnam. En este estudio los autores utilizaron técnicas de teledetección combinadas con modelos hidrológicos basados en sistemas de información geográfica para identificar el riesgo de inundaciones en esta área urbana. Las imágenes de QuickBird se utilizaron para crear información sobre el uso de la tierra y la cobertura de la tierra, un aporte importante en el modelo de la versión 55 de la técnica del Servicio de Conservación de Suelos de EE. UU. (SCS TR-55) que se utiliza para predecir las inundaciones inducidas por la lluvia. Los hallazgos indicaron que la inundación inducida por la lluvia no es un problema serio con una profundidad de inundación de 2 a 10 cm, mientras que la inundación por marea es un problema importante con profundidades de inundación de 10 a 100 cm. Concluyeron que estos hallazgos tienen implicaciones en las soluciones para el control del riesgo de inundaciones en el distrito, incluida la gestión de los procesos de urbanización con la infraestructura adecuada y la mejora de la capacidad de infiltración de la escorrentía con sistemas de drenaje optimizados.

Otro antecedente respecto a las inundaciones y peligros naturales que ello conlleva, es la investigación de (Gao, Shen, Zhou, & Li, 2018), el objetivo de este estudio fue analizar inundación en cuencas no calibradas mediante la detección casi en tiempo real con la extensión y profundidad de la inundación basada en datos de teledetección de múltiples fuentes. A través del análisis de distribución espacial de la extensión y profundidad de la inundación en una serie de tiempo, se pudo reflejar la condición de la inundación y las características del desastre de la inundación. Los resultados muestran que los datos de teledetección de múltiples fuentes pueden compensar la falta de datos hidrológicos en cuencas no aforadas, lo que es útil para reconstruir la

secuencia hidrológica; la combinación de las producciones de reflectancia de superficie MODIS (espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada) y la base de datos de inundaciones DFO (Dartmouth Flood Observatory) pudo lograr el monitoreo macrodinámico de la inundación en cuencas no aforadas, y luego la técnica de teledetección basada en imágenes ópticas y las imágenes de microondas antes y después de las inundaciones se pueden usar para calcular la extensión de la inundación para reflejar los cambios espaciales de la inundación; el algoritmo de monitoreo para la profundidad de inundación que combina RS y GIS es simple y fácil y puede calcular rápidamente la profundidad con una extensión de inundación conocida que se obtiene de imágenes de sensores remotos en cuencas no calibradas. Los resultados relevantes pueden proporcionar una ayuda eficaz para el trabajo de socorro en casos de desastre realizado por los departamentos gubernamentales.

(Agnihotri, Ohri, Gaur, Shivam, & Mishra, 2019), desarrollaron una investigación en la cuenca del Ganga-Ramganga doab, caracterizada por áreas prolongadas afectadas por inundaciones en la llanura media del Ganges debido al monzón estacional que conduce a un aumento en los niveles de agua de los ríos Ganges y Ramganga, mapearon las condiciones de inundación severas capturadas a través de datos de radar de apertura sintética (SAR) durante el periodo de agosto a septiembre de 2018. En este estudio, se utilizaron imágenes de Sentinel-1 SAR de polarización dual (VV y VH) junto con datos hidrológicos (nivel de agua del río) para producir mapas de inundaciones. Los investigadores hicieron uso de la técnica de umbralización para determinar el mapeo de inundaciones a través de los datos de Sentinel-1. De igual forma se aplicó métodos de polarización VH y VV para comparar sus respectivas precisiones al delimitar el agua superficial. Los resultados se han validado con una imagen óptica Sentinel-2 y ambas polarizaciones produjeron una precisión total de más del 93%. La polarización VV tiene una

mayor precisión que la polarización VH, ya que también se han observado resultados similares en estudios anteriores. El hallazgo revela que se produjo una severa erosión del banco en el canal Ramganga que afectó significativamente la morfología del canal, principalmente la movilización masiva de sedimentos del canal. Los resultados muestran que el ancho promedio del canal aumentó de 46 a 336 m. El enfoque propuesto demuestra que los datos de detección remota de microondas junto con el SIG se pueden utilizar de manera eficiente para el mapeo de inundaciones, el monitoreo y el análisis de su efecto en la morfología del canal. Por lo tanto, los resultados de este estudio ayudarán a tomar la iniciativa para reducir el impacto del peligro de inundaciones en el área de Doab y aumentar la flexibilidad en el proceso de gestión de inundaciones.

Para este artículo (Yuan, Wang, Wang, & Zhou, 2019), evaluaron la precisión de la teledetección multiescala para el monitoreo de inundaciones. Para tal efecto, se obtuvo el límite del agua de inundación para la aplicación del método de escalamiento basado en mecanismos y el método de extracción de agua NDWI. Mediante la simulación de la extracción de agua de inundación, se analizó la precisión para diferentes extensiones espaciales, resoluciones espaciales, patrones de paisaje y proporciones de masas de agua en ocho llanuras de inundación en China. Mediante la simulación y análisis de la precisión de extracción de agua del monitoreo de sensores remotos multiescala de desastres por inundaciones con diferentes patrones de paisaje; y en base a datos satelitales multiespectrales de resolución GF-1 de 8 m de ocho áreas de estudio en China, se generó una serie de conjuntos de datos de imágenes de resolución aproximada con el método de escalamiento basado en mecanismos. El límite de agua de imágenes de diferentes resoluciones se extrajo con el método NDWI y se generaron resultados para diferentes extensiones y resoluciones espaciales. La precisión regional aumentó

gradualmente con la extensión espacial teniendo a la resolución espacial como constante, y disminuyó con la resolución espacial cuando la extensión espacial fue constante. La precisión de la extracción de agua mostró una correlación significativa con la proporción de masa de agua y los índices de patrón de paisaje hídrico. El error relativo de la extracción de agua tuvo una fuerte correlación positiva con la complejidad de la forma del parche y una fuerte correlación negativa con la agregación y conectividad del parche y la proporción del cuerpo de agua.

En este artículo (Anusha & Bharathi, 2020), discuten las metodologías de clasificación no supervisada y de umbralización, con el fin de encontrar las áreas inundadas debido a las lluvias incesantes y el aumento del nivel del agua en los ríos Rapti y Ghaghara durante el mes de agosto de 2017. Los autores usaron un radar de apertura sintética (SAR) multitemporal e imágenes pasivas que se lograron capturar durante el mes de agosto de 2017 cuando la región se vio afectada por las inundaciones en el estado de Uttar Pradesh, India, lo que permitió el cálculo de las estadísticas zonales durante la identificación de áreas inundadas para la zona caso de estudio llamada (AOS). El mapeo de inundación se realizó por cada distrito realizando una superposición de la máscara de imagen pre-inundación digitalizada sobre las capas de agua extraídas. La capa de inundación está integrada con la capa de límite de distrito para extraer estadísticas de inundación por distrito. El área de inundación se encuentra superponiendo. A partir de los hallazgos los autores pudieron concluir que los datos SAR pueden ser utilizados de forma eficaz para la cartografía y el seguimiento de las inundaciones. Con base en el análisis del SAR Sentinel-1A y los datos ópticos, se observa que Gorakhpur es el distrito más afectado entre los elegidos como AOS. Los resultados obtenidos se validan contra las observaciones meteorológicas.

Por último, (Elhag & Abdurahman, 2020) hicieron un estudio sobre las áreas montañosas, urbanizadas y áridas como la región de Tabuk en Arabia Saudita, zonas altamente vulnerables a las fuertes y repentinas tormentas que afectaron a las personas, las infraestructuras y el medio ambiente ecológico y biofísico. En este artículo, las imágenes SAR de acceso libre de la Agencia Espacial Europea (ESA) se utilizaron con éxito para delinear la mortal crisis alimentaria que tuvo lugar en la ciudad de Tabuk en enero de 2019. La plataforma de aplicaciones Sentinel para Sentinel-1 Toolbox (S1TBX) se utiliza para respaldar la visualización y el análisis del gran archivo de productos de la misión SAR de la ESA. Se seleccionó un valor de retrodispersión de -22,39 decibeles para separar el agua de todo lo demás. Para el análisis del histograma solo se consideran los píxeles de máscara de la región de interés. En consecuencia, el error de umbral máximo se establece en 0,255. El mapa RGB creó una máscara binaria de píxeles inundados y no inundados que muestran que una parte significativa del área estaba en peligro. Los hallazgos de la metodología actual cuantifican la superficie inundada en casi 9 km² que cubre principalmente las prácticas agrícolas y las áreas urbanas de la ciudad de Tabuk. Este estudio recomienda que el futuro plan maestro del área de Tabuk debería considerar que la mayoría de las tierras áridas como Tabuk están cubiertas por arena que tiene una retrodispersión similar a las condiciones de las tierras inundadas.

5.2. Marco teórico

El siguiente trabajo de investigación está fundamentado en:

5.2.1. Imágenes satelitales

Son una diversidad de imágenes obtenidas desde plataformas satelitales y que se pueden obtener a diferentes resoluciones espaciales, temporales, a diferentes escalas y con información

espectral que permiten caracterizar la superficie, (Ruiz Fernández, Rey Pérez, Estornell Cremades, & Ruiz Marín, 2007).

Las imágenes ópticas contienen información valiosa en sus bandas y no cuentan con su propio haz de energía. Su región espectral va desde el visible hasta el infrarrojo térmico y la cantidad de bandas depende de la colección a emplear al igual que su resolución espacial y temporal, (Monterroso-Tobar, Londoño-Bonilla, & Samsonov, 2018). Si bien pueden ser vulnerables por las condiciones climáticas, las imágenes ópticas permiten hacer la clasificación de la cobertura terrestre y detección de cambios basado en píxeles y una gran variedad de servicios que se basan en observaciones ópticas multiespectrales en función de la resolución espacial, (Huang & Jin, 2020).

Las imágenes SAR utilizan un sistema de transmisión y recepción de ondas electromagnéticas permitiendo obtener información de un objeto en cuanto a su posición o velocidad se refiere. Su principio se fundamenta en la emisión de una señal irradiada al espacio mediante una antena, que en el momento que alcanza un objeto, esta rebota y se capta el rebote o eco, (Muñoz Artigues, 2020). También se puede decir que el RADAR que traduce (radio detection and ranging) son una serie de sensores activos de microondas que se desplazan a bordo de plataformas y que exploran la tierra mediante la emisión de pulsos de energía durante el día y la noche. El rango de microondas está comprendido entre 0.5 cm y 75 cm con diferentes intervalos de frecuencia identificados como banda (K, X, C, S, L y P). Por último estos sistemas ofrecen distintas combinaciones de polarizaciones para una misma imagen: Single Pol (HH o VV), Dual Pol con dos escenas (HH+HV o VV+VH) y Quad Pol o polarimetría con cuatro escenas (HH+HV+VH+VV), (Marchionni & Cavayas, 2014).

La Ilustración 1 consigna el rango del espectro electromagnético.

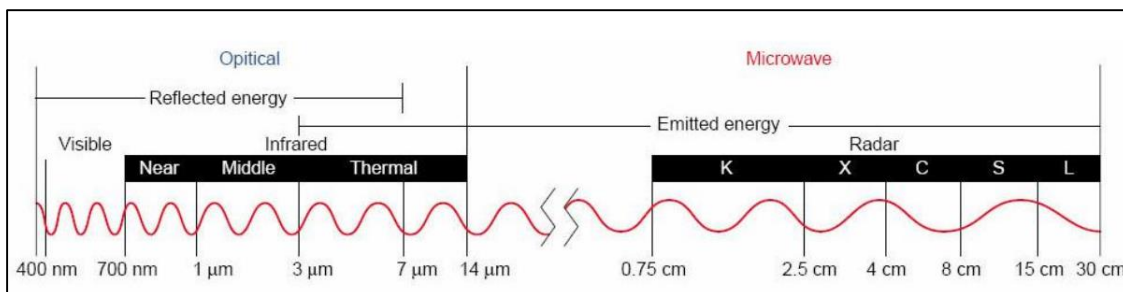


Ilustración 1. Espectro electromagnético. Dominio de frecuencias de las microondas y bandas.

Fuente: (Marchionni & Cavayas, 2014)

5.2.2. Teledetección como herramienta para estimación de procesos de inundación

Los sensores remotos se pueden aplicar para adquirir información espacial en forma digital, se puede identificar el tipo de suelo, uso y cobertura de la tierra, variables importantes para la hidrología y modelado de estudios de inundaciones, (Dang & Kumar, 2017). Con el sensoramiento remoto y técnicas de modelación se puede pronosticar la vulnerabilidad de áreas afectadas por inundaciones, determinando la extensión e intensidad de la misma y así poder realizar una evaluación de los daños causados por la inundación, (Klemas, 2015).

Si bien para detectar áreas inundadas se pueden realizar mediciones en campo, estas resultan ser costosas e imprecisas; por lo cual emplear imágenes satelitales se convierte en una alternativa factible y rápida para mapear el territorio según el objeto de estudio. Los sensores pasivos y activos que operan en las franjas del visibles, infrarrojo, térmica y microondas del espectro electromagnético, brindan información de gran interés para definir zonas inundadas, (Sanyal & Lu, 2004).

5.2.3. Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)

Este índice fue propuesto por (McFeeters, 1996), permite optimizar y maximizar los valores de reflectancia superficial de los cuerpos de agua en las bandas del verde y del infrarrojo

cercano (NIR). (Du, y otros, 2016). También es conocido como índice espectral de agua y la expresión de cálculo es la Ecuación 1.

$$\text{Ecuación 1, NDWI} = \frac{\rho_{\text{verde}} - \rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{verde}} + \rho_{\text{NIR}}}$$

Donde

NDWI = índice de agua de diferencia normalizada

ρ_{verde} = reflectancia banda del verde

ρ_{NIR} = reflectancia banda del infrarrojo cercano

Contando con una colección de imágenes multiespectral, se pueden emplear diferentes técnicas según las características significativas de reflectancia espectral del agua como lo es el índice de agua de diferencia normalizado (NDWI), (McFeeters, 1996). Este método se ha utilizado ampliamente para extraer información sobre áreas inundadas con excelentes resultados según los índices espectrales, (Yuan, Wang, Wang, & Zhou, 2019).

De las bandas mencionadas anteriormente, según (McFeeters, 1996), en la banda del verde las longitudes de onda permiten que se maximice la reflectancia de la superficie del agua y en la banda del infrarrojo cercano se maximiza la reflectancia de la vegetación, generando un efecto contrario en el agua ya que minimiza la reflectancia.

Para identificar diferentes tipos de superficie a través del NDWI, se encuentran las siguientes categorías:

- 0.2 - 1 Superficie del agua
- 0.0 – 0.2 Inundación, humedad
- -0.3 – 0.0 Sequia moderada, superficies sin agua
- -1 - -0.3 Sequia, superficies sin agua.

Otra forma de clasificar los valores del NDWI, es como lo realizaron (Gulácsi & Kovács, 2015), definiendo un umbral del área de estudio según condiciones particulares de la cobertura

del suelo, definición del tipo de flujo y la reclasificación del mismo (permanente, no permanente u otro).

Para la definición de los umbrales, se pueden considerar dos categorías que permitan diferenciar agua y otras coberturas, de esta forma mediante detección de cambios conocer el comportamiento de las regiones antes y después de las inundaciones, (Huang & Jin, 2020) .

Cuando se conocen las técnicas a emplear y los umbrales para el análisis de inundaciones, la detección de cambios juega un papel clave ya que cuando se designan los mismos umbrales y se emplea la misma metodología en periodos previos y después de una inundación, se pueden extraer los resultados de detección de cambios del NDWI de las imágenes, tomando como criterio la diferencia o relación entre las dos épocas. Como la detección de cambios suele estar basada en píxeles u objetos, suele ser empleada asignando el mismo valor promedio reclasificado en función del umbral para los dos periodos, (Huang & Jin, 2020).

5.2.4. Definición del umbral mediante el procesamiento de imágenes SAR

Dado que los sistemas SAR emiten un pulso de radar y registran el retorno de la superficie terrestre al satélite, dependiendo de la fuerza del retorno del radar asociada a la rugosidad de la superficie, se pueden mapear y delimitar cuerpos de agua, contando con las bondades que los sistemas SAR pueden coleccionar información en la noche y son capaz de atravesar las nubes, (Clement & Kilsby, 2018).

Como los datos SAR proporcionan polarizaciones VV y VH, definir el tipo de polarización a emplear es de gran importancia a la hora de mapear inundaciones; la polarización VH tiene un retorno más fuerte sobre áreas con dispersión de volumen y la polarización VV a su vez sobre áreas con dispersión especular, (Huang & Jin, 2020). Adicional la polarización VV proporciona una mejor inclinación a la hora de definir la retrodispersión para valores del agua en

comparación con la polarización VH. Sin embargo en ocasiones es confiable comparar mediante algún método de validación estadística los resultados de las dos polarizaciones mencionadas con datos obtenidos a través del NDWI y así tomar la mejor decisión, (Clement & Kilsby, 2018). Algunos de los métodos empleados para validar datos de referencia y observados pueden ser el coeficiente de Kappa (K), (Agnihotri, Ohri, Gaur, Shivam, & Mishra, 2019) y el error medio cuadrático, (Echeverri-Díaz, Coronado-Hernández, Gatica, & Méndez-Anillo, 2022).

Los productos de rango de suelo detectado o GRD (Ground Range Detected) a emplear se deben someter a un proceso de filtrado para la calibración radiométrica, geométrica y de moteado, siendo esta última la que se corrige mediante un proceso de reducción de ruido de moteado relacionado al SAR, (Twele, Cao, Plank, & Martinis, 2016).

Existen diferentes técnicas que permiten separar diferentes coberturas según el área de interés. Una de las técnicas más empleadas en la definición de áreas de inundación es el método de umbralización, (Rahman & Thakur, 2018), La creación de umbrales es una técnica simple que se utiliza para separar las áreas inundadas de las áreas no inundadas en la imagen. Esta es una de las técnicas más utilizadas, que funciona bien para superficies lisas también conocidas como reflectores especulares, (Voigt & Schneiderhan, 2009). Esta clasificación se realiza desde la plataforma de Google Earth Engine GEE considerando un valor de pixel igual a 1 para zonas inundadas, a los demás píxeles, se les asigna un valor de 0 o una máscara de agua. En este análisis, se emplean imágenes antes y después de la inundación, (Anusha & Bharathi, 2020).

(Erazo & Obando, 2019), definen la umbralización en la determinación de un valor umbral de intensidad de una imagen, aquellos píxeles que queden por debajo del valor umbral definido, se les asigna un valor de cero o una máscara.

Normalmente la variedad de técnicas y métodos para realizar detección de cambios se emplea utilizando información de detección remota como imágenes ópticas y SAR. Por tal motivo, las diferentes técnicas que existen y las que siguen surgiendo para detección de cambios, se basa en píxeles, orientadas a estadísticas con un enfoque en valores espectrales y el contexto espacial. Por lo cual, contar con un alto volumen de información de datos de imágenes de alta resolución y múltiples sensores, permite minimizar los errores y mejorar los resultados obtenidos cuando se emplean las técnicas de detección de cambios, (Hussain, Chen, Cheng, Wei, & Stanley, 2013).

5.2.5. Modelos digitales de elevación y superficie

Siendo los modelos digitales de elevación la representación gráfica de todas las variaciones de elevación de los objetos y superficie presentes durante el momento de captura de datos, estos pueden representar estructuras regulares o irregulares, (Fuentes, Bolaños, & Rozo, 2012), las cuales pueden ser empleadas durante análisis de inundaciones ya que, al conocer u obtener modelos hidrológicos, son empleados desde un concepto de SIG para adquirir formas topográficas de redes de drenaje, arroyos, direcciones de flujo, pendientes, entre otras variables, (Dang & Kumar, 2017).

Contando con un modelo digital de elevación y el nivel máximo de agua que permita calcular la elevación del agua en época de inundación, se puede calcular la profundidad de inundación medida desde el suelo (DEM), (Gao, Shen, Zhou, & Li, 2018). Para ello desde los SIG, se puede crear un algoritmo que combine el DEM y la zona inundada como lo hizo (Yonghong, Xiuwan, & Huan, 2005), donde adquirieron una distribución de elevación suave desde los límites de la inundación; por ultimo superponiendo la superficie del área inundada con

el DEM y por un proceso de interpolación bilineal, pudieron determinar la profundidad de inundación.

La superposición de los elementos mencionados anteriormente ha sido replicados por diferentes investigadores, como es el caso de (Liang & Liu, 2020). Los autores antes mencionados calcularon la profundidad de la inundación fluvial mediante el modelo de flujo del río y las lecturas de los medidores de la Agencia Federal de Manejo de Emergencias (FEMA) referenciados al nivel medio del mar superpuesto a un modelo digital de elevación (DEM) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) con una resolución de 5m. De esta forma, cuando el nivel del agua subía, la profundidad de inundación aumentaba. Por último, se menciona que los medidores se encontraban espacialmente dispersos por lo que la elevación de inundación debió calcularse por interpolación.

Cuando se conoce la posición de las estaciones de medición de niveles de agua y se genera la interpolación, se crea una imagen raster georreferenciada y alineada con los datos del DEM. Las zonas inundadas se pueden describir como la diferencia de las elevaciones del raster generado con los niveles de agua y las elevaciones del DSM; dicha diferencia debe arrojar valores positivos. Cuando se calcula esta diferencia en zonas no inundadas, los valores negativos se consideran áreas falsas y se descartan, pero si se observan diferencias positivas en zonas no inundadas, se pueden considerar como zonas con evidencia espacial con probabilidad de presencia de inundaciones, (Liang & Liu, 2020).

5.2.6. Estaciones limnimétricas y limnigráficas

Estas estaciones se hicieron dentro de la guía metodológica de la operación estadística de variables meteorológicas con las cuales se puede medir el nivel de la corriente hídrica para así poder determinar la profundidad de inundación (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios

Ambientales - IDEAM., 2022). Estas estaciones se instalan de manera distribuida y escalonada en la sección transversal de un cuerpo de agua como se muestra en la Ilustración 2.

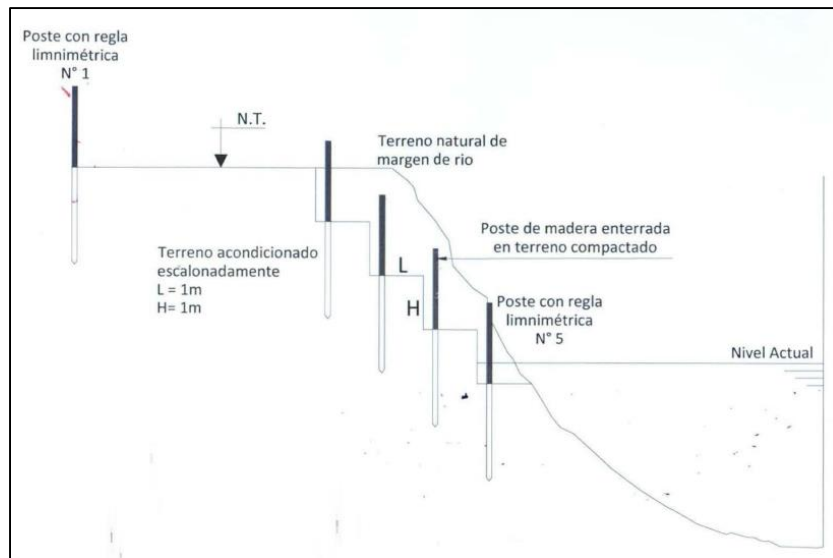


Ilustración 2. Postes de madera con reglas limnimétricas distribuidas escalonadamente

Fuente: (SAC, 2018)

Corresponde a una red de estaciones que se instalan para la operación y mantenimiento de una red fluvial y que permiten conocer profundidades de flujo (niveles de los ríos y cuerpos de agua) y caudales, (SAC, 2018).

5.2.7. Profundidad de inundación

Se puede hablar de inundación como la unión de diferentes fenómenos, ya sean naturales o antrópicos, los cuales causan una serie de pérdidas del orden económico y pérdida de vidas humanas; constituyendo uno de los riesgos naturales con mayor afectación en el mundo, (Sasia, Cisneros, Gutiérrez, & Camarasa, 2002).

Esta variable es medida desde la lámina de agua, superficie del agua o nivel máximo diario hasta el fondo del cuerpo de agua (lecho o suelo), (Chow, 1988). Desde la perspectiva de la teledetección, la profundidad de flujo o inundación es indispensable para evaluar desastres, usando datos de SIG, mediciones de niveles de agua en campo y empleando modelos digitales de

elevación (DEM) o en su defecto de superficie (DSM), (Gao, Shen, Zhou, & Li, 2018) y se puede calcular mediante la Ecuación 2.

$$\text{Ecuación 2, } D = E_w - E_g \quad (E_w > E_g)$$

Donde

D = profundidad de inundación, m

E_w = nivel lamina o superficie del agua, m

E_g = nivel del lecho o fondo de la superficie, depende del DSM, m

La planificación, preparación y concientización del cambio climático y los eventos de inundaciones que se están presentando en la actualidad, juegan un papel importante en la búsqueda de mitigar el impacto que generan estos eventos; Así, los modelos hidrológicos, las simulaciones y el empleo de los recursos hídricos han permitido en países desarrollados establecer sistemas de alertas tempranas para reducir la problemática que genera las inundaciones y así minimizar las afectaciones a las poblaciones, (Alfieri, y otros, 2013).

Dicho lo anterior, poder medir la profundidad de flujo o inundación del río para definir el alcance de la inundación, permite calcular periódicamente la evolución del nivel de la lámina de agua en función de elevaciones referenciadas al nivel medio del mar; este resultado se denomina elevación de la superficie del agua estandarizada, (Liang & Liu, 2020).

En el recorrido de los ríos se pueden encontrar medidores que proporcionan la altura del agua o nivel máximo diario y se encuentran distribuidos a lo largo del mismo; aunque en algunos casos de forma escasa; sin embargo esta información permite construir modelos de inundación fluvial, modelos los cuales su calidad, depende de los datos de entrada y el proceso empleado para la calibración de los mismo, permitiendo el seguimiento de la dinamica fluvial de los cuerpos de agua, (Liang & Liu, 2020). Estos datos de observaciones de altura del agua, se pueden representar en un hidrograma de inundación y mediante un análisis de precipitaciones y se

pueden correlacionar con observaciones satelitales antes y después del evento; de esta forma, explicar los cambios que se presentaron en el curso del río o área inundada, (Bhatt & Rao, 2016).

Si bien los sistemas convencionales de monitoreo pueden tener un uso limitado por la escasez de estaciones de monitoreo para la predicción de inundaciones, mapeo y respuesta de emergencia, contar con aforos que midan la altura del agua permiten definir la extensión de inundación, (Klemas, 2015). Lo anterior mediante un proceso de interpolación permite conocer espacialmente el comportamiento de la inundación y sus niveles máximos de agua.

Los sistemas convencionales de monitoreo hidrológico tienen un uso limitado en la predicción de inundaciones, el mapeo y la respuesta a emergencias para una alerta adecuada de inundaciones; los países deben poder recopilar información a través de las fronteras de forma independiente. Los sensores remotos en satélites y aviones pueden proporcionar datos para cumplir con estos requisitos.

Los datos históricos que normalmente proporcionan estas estaciones meteorológicas son precipitaciones máximas en 24 horas, fuente para Colombia del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM., 2022).

5.3. Marco geográfico

5.3.1. Área de estudio

La subregión del bajo Sinú se encuentra ubicada en la parte noroccidente de Colombia dentro de la región del Atlántico. Adicionalmente hace parte de la cuenca del río Sinú, es atravesada de sur a norte por el río que lleva el mismo nombre y se encuentra dentro de la influencia de variadas ciénagas dentro de la cual se destaca la ciénaga grande del bajo Sinú.

El presente proyecto se desarrolló tomando como caso de estudio 8 de los 15 municipios que conforman la subregión de bajo Sinú del departamento de Córdoba, Colombia (Montería, Cereté, San Pelayo, Lorica, Momil, Chimá, San Bernardo del Viento y Purísima), con un área aproximada de 565030 ha según el reporte de análisis regional de las subzonas hidrográficas del río Sinú y Alto San Jorge (SZH-RSASJ), ver Ilustración 3. La selección de los 8 municipios antes mencionados, se hace en consideración que son los que tienen una incidencia directa por el río Sinú y la ciénaga grande del bajo Sinú.

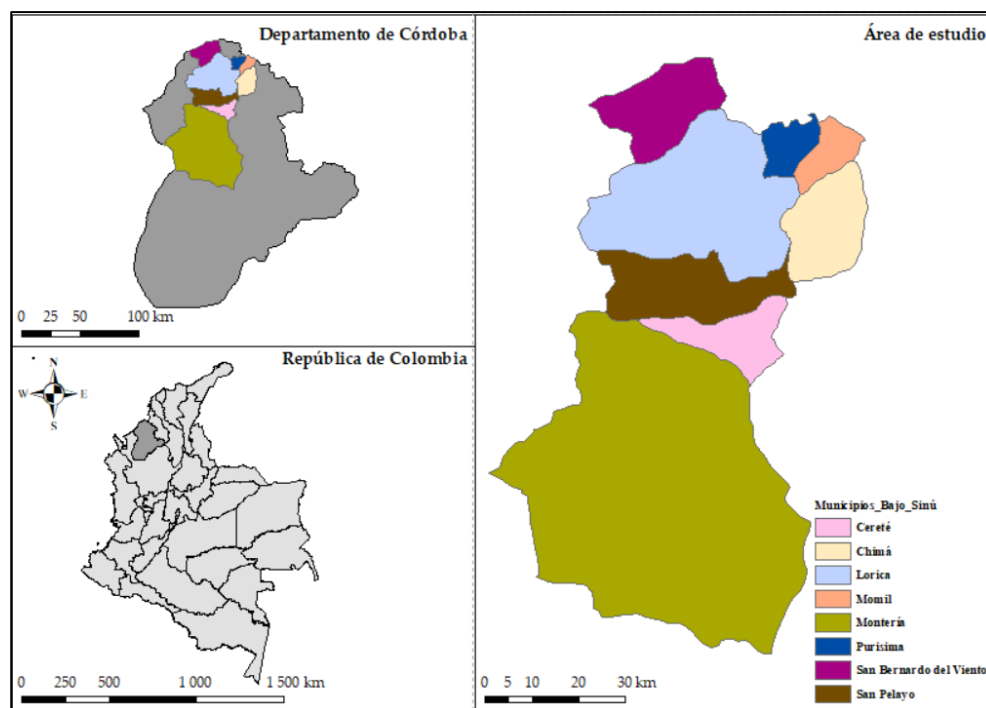


Ilustración 3. Localización geográfica de la región del bajo Sinú

Fuente: Elaboración propia, ARC-GIS 10.6

5.3.2. Dinámica fluvial de la cuenca del río Sinú

El ancho de la sección transversal del río Sinú hasta su desembocadura en el mar caribe varía entre 120 m y 160 m, la profundidad alcanzada puede llegar a 5 y 8 m de altura para un rango en caudal alto y los caudales observados en el río Sinú, según registros históricos de las

estaciones limnimétricas, limnigráficas y meteorológicas es de 650 y 1200 m³/s según (CVS, 2004).

Dentro del complejo hídrico de la cuenca del río Sinú, se encuentra la ciénaga grande del bajo Sinú, la cual permite el amortiguamiento de caudales máximos en épocas de lluvias provenientes de la parte alta de la cuenca. Además permite amortiguar el aporte de otras ciénagas de menor envergadura en épocas de lluvia y sequía, (Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge –CVS, 2020).

La Ilustración 4 permite observar la cuenca hidrográfica del río Sinú, la cual tiene un área aproximada de 17.000 km², el río Sinú con una longitud aproximada de 438 km y la ciénaga grande del bajo Sinú, (Lasso, y otros, 2011)

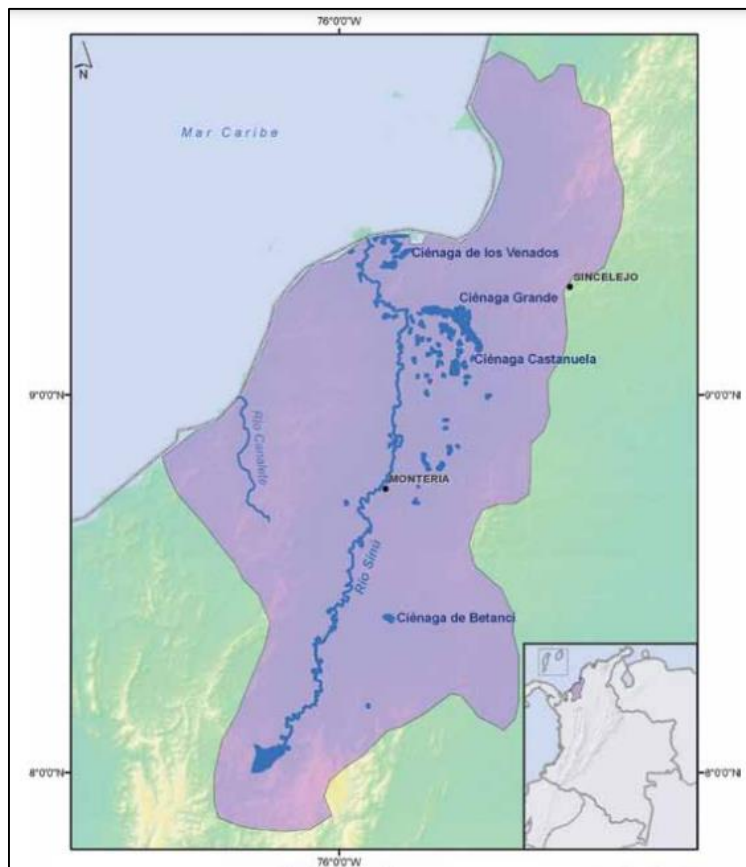


Ilustración 4. Localización general de la cuenca del río Sinú y la ciénaga grande del bajo Sinú.

Fuente: (Lasso, y otros, 2011).

5.3.3. Precipitación

Según reportes del IDEAM, la región de bajo Sinú se encuentra entre las más lluviosas de la región caribe colombiana, para lo cual cuenta como referencia para definir valores mensuales de precipitación con la estación Sincelejo. En la Ilustración 5 se muestran bajas precipitaciones entre los meses de enero y marzo, con valores mensuales inferiores a 50 mm donde se denomina la temporada seca, un aumento desde el mes de abril el cual se mantiene hasta el mes de octubre con variaciones de precipitaciones entre 100 mm y 160 mm aproximadamente para la temporada de lluvias y empieza a disminuir en el mes de noviembre donde inicia de nuevo la temporada seca disminuyendo los valores de precipitaciones de 110 mm y 60 mm aproximadamente.

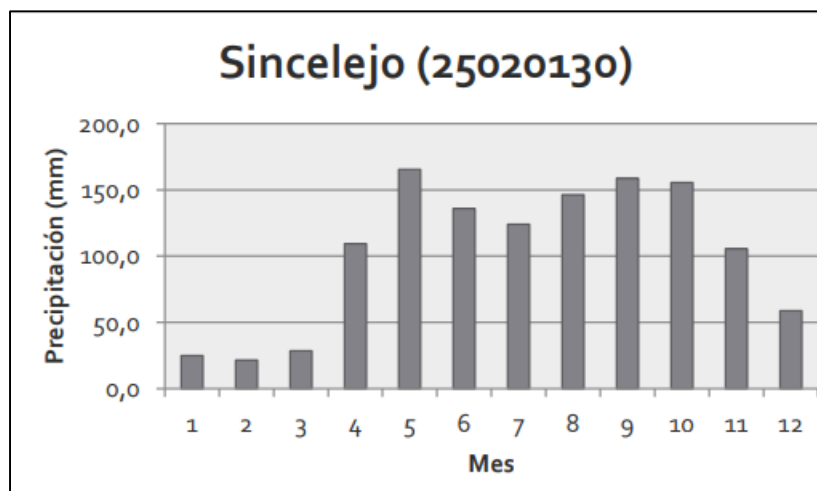


Ilustración 5. Régimen de precipitaciones de la estación Sincelejo

Fuente: (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM., 2022)

Por último, en la Ilustración 6 se encuentra el comportamiento de precipitación trimestral en Colombia. Haciendo énfasis en la región caribe donde se encuentra ubicada la subregión del bajo Sinú, se puede observar que el patrón de precipitaciones varía de 0 a 250 mm para el trimestre que va desde enero a marzo y el trimestre que inicia en febrero y termina en abril. Finalmente se observa para el trimestre julio-agosto-septiembre y agosto-septiembre-octubre las

precipitaciones aumentan hasta 750 mm, (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM., 2022).

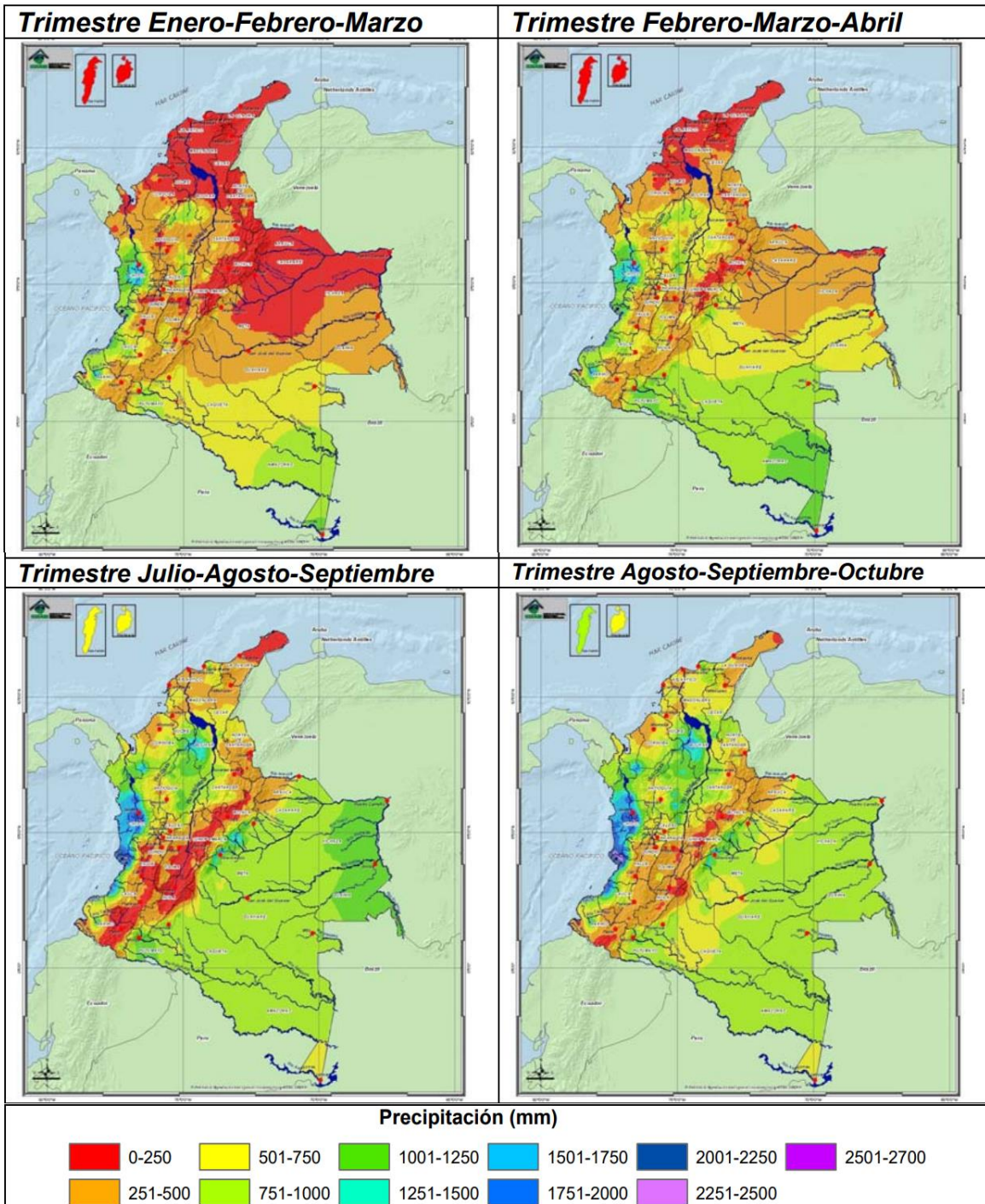


Ilustración 6. Mapa de precipitación trimestral

Fuente: (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM., 2022)

6. METODOLOGÍA

La Ilustración 7 presenta el flujograma de la metodología propuesta para el desarrollo del proyecto de investigación acá referenciado.

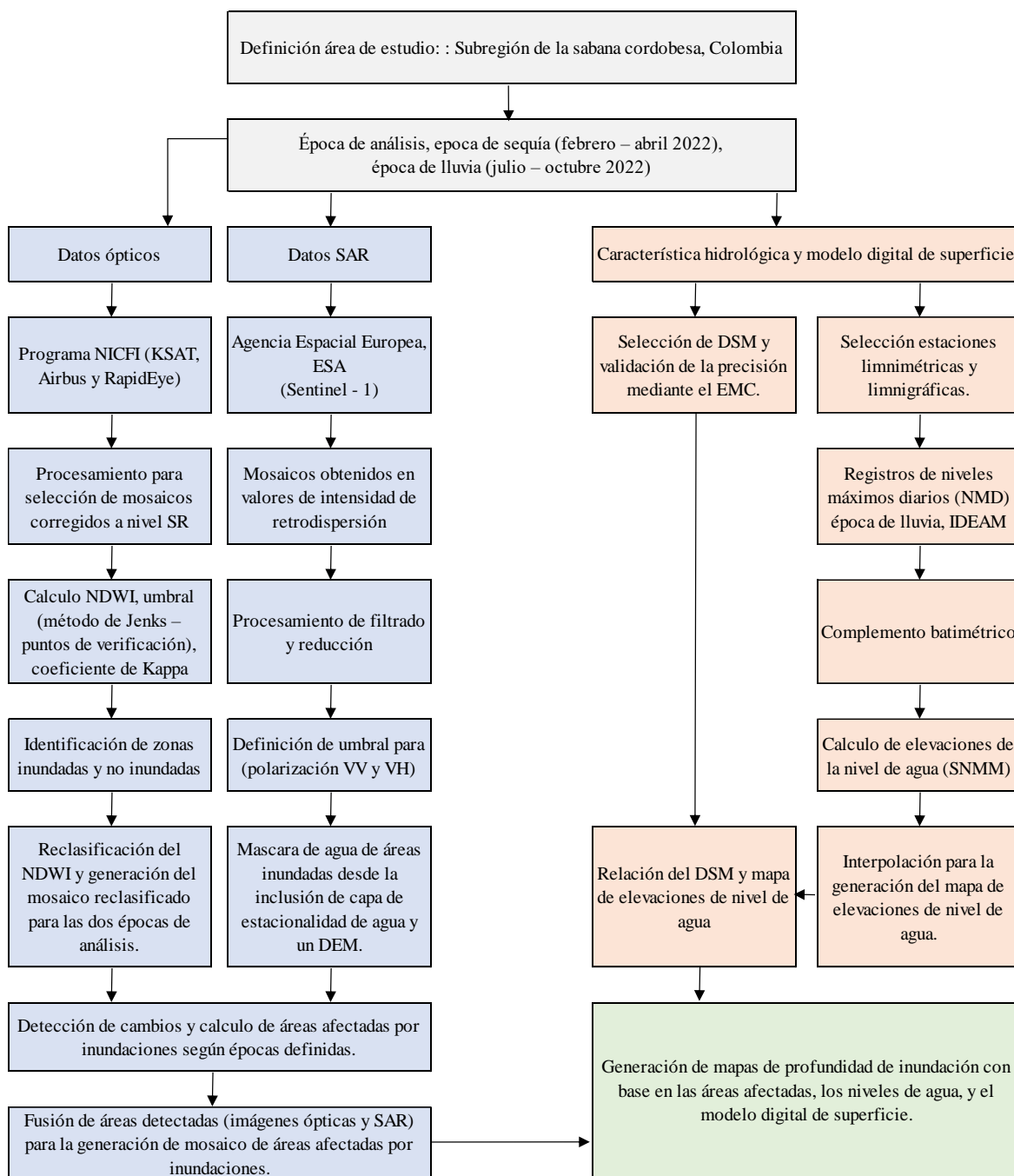


Ilustración 7. Constructo metodológico

Fuente: Elaboración propia

Es necesario resaltar que la mayoría de operaciones y procesamiento digital de imágenes se realizó desde la plataforma de trabajo de Google Earth Engine (GGE) ya que esta plataforma de computación en la nube cuenta con diferentes recursos, conjunto de datos y funciones que facilitan el procesamiento digital de imágenes, (Amani, y otros, 2020).

Para la elaboración de algunos productos como lo son mapas temáticos, se empleó software de sistemas de información geográfico como Arc-Gis.

6.1. Definición área y épocas de estudio

En la etapa inicial de este proyecto de investigación se definió el área de estudio. Tal actividad, se realizó empleando las capas de unidades administrativas globales 2015 (GAUL) desde GGE, donde se seleccionó cada uno de los municipios que contiene la región de estudio como se muestra en la Ilustración 8, en este caso la subregión de la sabana del departamento de Córdoba, (FAO Map Catalog, 2015). En total se seleccionaron ocho municipios los cuales, durante el procesamiento de la información, su análisis se ejecutó de manera independiente. Tal selección obedece a que los municipios acá mencionados son los que se ven directamente afectados por las inundaciones que pueda causar el desbordamiento del río Sinú y la ciénaga grande del bajo Sinú según los reportes presentados para ese momento por el IDEAM.

Una vez seleccionada el área de estudio, se procedió a definir las épocas de análisis las cuales corresponden a una época de sequía de la subregión del bajo Sinú, que típicamente se presenta entre los meses de febrero y abril, y una época de lluvia que normalmente inicia en el mes de mayo y que históricamente presenta los valores máximos de precipitaciones entre los meses de julio y octubre, (Guzmán, Ruiz, & Cadena, 2014).

Seguidamente el año de estudio corresponde al año 2022 ya que, en el año acá mencionado, se han presentado fuertes precipitaciones, serios problemas de desbordamiento de

los cuerpos de agua y grandes afectaciones por las inundaciones observadas según los registros históricos de niveles máximos de agua presentados por el IDEAM.

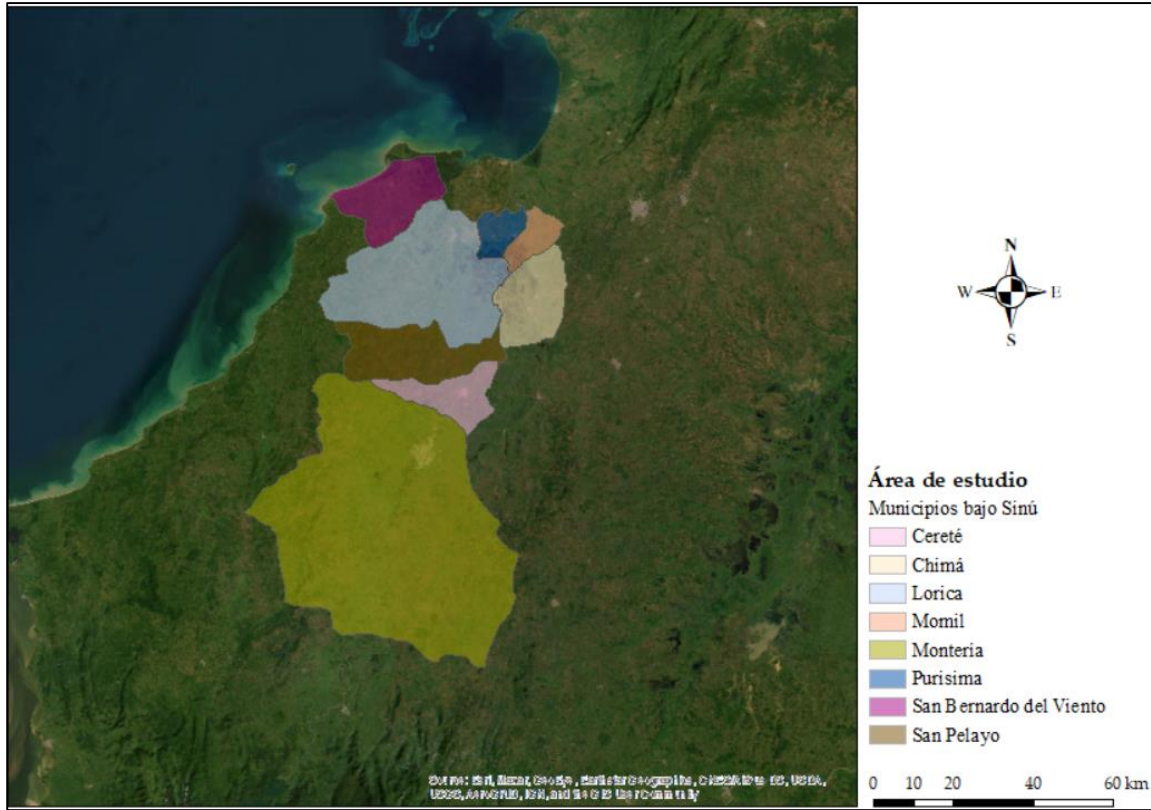


Ilustración 8. Área de estudio

Fuente: Elaboración propia, Arc-Gis 10.6

Por último la Tabla 1 permite conocer la localización geográfica y algunas características morfométricas del área de estudio la cual en su totalidad son 565030.18 ha.

Municipio	Coordenadas geográficas (° ' ")						Pendiente (%)	Area (ha)
	Longitud			Latitud				
San Bernardo del Viento	75	57	18.9	9	19	32.88	2.70	34777.39
Lorica	75	53	6.39	9	8	24.38	3.40	98144.57
Purísima	75	42	42.6	9	14	58.33	2.19	11121.35
Momil	75	38	8.37	9	14	5.00	1.71	11731.43
Chimá	75	38	17.1	9	5	43.34	1.55	33141.56
San Pelayo	75	54	38.8	8	58	30.38	3.44	48344.33
Cereté	75	49	18.6	8	52	55.48	1.79	24282.03
Montería	75	57	28.1	8	35	3.53	4.12	303487.52

Tabla 1 Localización, pendiente media y área de los municipios de estudio

Fuente: Elaboración propia

6.2. Selección de la colección de imágenes y generación de mosaicos

Identificadas las épocas de análisis, se seleccionaron las imágenes correspondientes a la zona de estudio, las cuales cubren cada municipio de estudio y en su totalidad la subregión del bajo Sinú dentro del cual se encuentra parte del recorrido del río Sinú y la ciénaga grande del bajo Sinú.

6.2.1. Colección de imágenes ópticas

Las imágenes ópticas seleccionadas corresponden al producto de datos que ofrece el programa de datos satelital NICFI, (Labs, NICFI Program - Satellite Imagery and Monitoring - Planet, 2022) el cual permite en la plataforma Google Earth Engine (GEE) visualizar y procesar mosaicos bimensuales generados de la colección de imágenes obtenidas en el programa NICFI; imágenes en color verdadero tanto para la época de sequía como para la época de lluvia.

Esta colección de imágenes ópticas cuenta con una resolución espacial menor a 5m y los mosaicos se encuentran corregidos a nivel de reflectancia superficial, (Pandey, Kington, Kanwar, & Curdoglo, 2021). Los mosaicos de esta colección (NICFI), son el producto de una asociación entre KSAT y Airbus, en el año 2017 se incorporaron los mapas bases analíticos de RapidEye y del año 2020 en adelante se han incorporado datos del instrumento PS2.SB.

Los mapas bases de esta colección fueron corregidos atmosféricamente tomando como referencia modelos estacionales de Landsat mediante la normalización y armonización de datos de escenas TOAR o en su defecto datos de Landsat con corrección a nivel de reflectancia superficial (SR). Adicional a las correcciones anteriores, para el enmascaramiento de nubes se utilizó la máscara de datos utilizables (UDM), así de esta forma eliminar pixeles marcados por sombras y nubes. (Labs, NICFI Program - Satellite Imagery and Monitoring - Planet, 2022).

Si bien el programa NICFI permite visualizar mapas bases analíticos y mosaicos analíticos normalizados, para el análisis fueron utilizados mapas bases analíticos normalizados ya que contienen información de 4 bandas (rojo, verde, azul e Infrarrojo cercano) y resolución radiométrica de 16 bit, permitiendo hacer cálculos de índices espectrales como lo es el índice de agua de diferencia normalizado (NDWI), (Labs, NICFI Program - Satellite Imagery and Monitoring - Planet, 2022).

Los mosaicos analíticos normalizados se generaron a nivel de reflectancia superficial como resultado de los productos seleccionados y de manera independiente por cada municipio; para la época de sequía se generaron entre los meses de febrero y marzo y para la época de lluvia entre los meses de julio y octubre.

Definida la colección de imágenes ópticas a emplear, se utilizaron los operadores y funciones de GGE que permitieron realizar un proceso de filtrado para seleccionar las escenas menos nubosas, obteniendo valores precisos de reflectancia superficial y minimizando efectos atmosféricos.

La Tabla 2 y Tabla 3 permite conocer algunas características de los mosaicos seleccionados para las diferentes épocas.

Es necesario resaltar para los resultados obtenidos y descargados de GGE, que el programa NICFI no permite conocer como tal una serie de imágenes, si no, un producto el cual es un mosaico resultante de una colección de imágenes según las épocas seleccionadas.

Municipio	Periodo	Producto	Resolución espacial (m)	Bandas
San Bernardo del Viento	2022-02	1646688735030809	4,77	Rojo, verde, azul, NIR
Lorica	2022-02	1646688735030809	4,77	Rojo, verde, azul, NIR
Purísima	2022-02	1646688735030809	4,77	Rojo, verde, azul, NIR
Momil	2022-02	1646688735030809	4,77	Rojo, verde, azul, NIR
Chimá	2022-02	1646688735030809	4,77	Rojo, verde, azul, NIR
San Pelayo	2022-02	1646688735030809	4,77	Rojo, verde, azul, NIR

Municipio	Periodo	Producto	Resolución espacial (m)	Bandas
Cereté	2022-02	1646688735030809	4,77	Rojo, verde, azul, NIR
Montería	2022-02	1646688735030809	4,77	Rojo, verde, azul, NIR

Tabla 2 Propiedades mosaicos época de sequia

Fuente: Elaboración propia

Municipio	Periodo	Producto	Resolución espacial (m)	Bandas
San Bernardo del Viento	2022-08	1660085672994433	4,77	Rojo, verde, azul, NIR
Lorica	2022-08	1663736904264104	4,77	Rojo, verde, azul, NIR
Purísima	2022-08	1663736904264104	4,77	Rojo, verde, azul, NIR
Momil	2022-08	1663736904264104	4,77	Rojo, verde, azul, NIR
Chimá	2022-08	1663736904264104	4,77	Rojo, verde, azul, NIR
San Pelayo	2022-08	1663736904264104	4,77	Rojo, verde, azul, NIR
Cereté	2022-08	1663736904264104	4,77	Rojo, verde, azul, NIR
Montería	2022-08	1666060021989933	4,77	Rojo, verde, azul, NIR

Tabla 3 Propiedades mosaicos época de lluvia

Fuente: Elaboración propia

6.2.2. Colección de imágenes SAR

Respecto a las imágenes SAR, se seleccionó desde GGE la colección Sentinel-1, Ground Range Detected GRD a nivel 1, con un modo de adquisición de amplia franja interferométrica (IW) en banda C, tanto para orbitas descendientes y ascendentes y polarizaciones VH y VV, obteniendo diferentes alternativas de imágenes para las diferentes épocas pre y post al evento. Al igual que con la colección de imágenes ópticas, se empleó el motor de GGE para realizar el proceso de corrección de moteado aplicando un Kernel mediante un círculo predeterminado en metros. Este proceso de corrección se realizó para las imágenes obtenidas en las diferentes orbitas antes mencionadas con polarización VV y VH. De esta forma se obtuvieron mosaicos corregidos de cada época, lo que permitió calcular valores de intensidad de retrodispersión.

Con los procedimientos antes empelados para imágenes activas, se obtuvo así los mosaicos insumo para el procesamiento y análisis según el objetivo marcado en el presente proyecto de investigación.

La Tabla 4 contiene la colección de imágenes necesarias para el procesamiento digital de los municipios de San Bernardo del Viento, Lorica, Purisima, Momil, Chimá, San Pelayo y Cereté. Las imágenes SAR seleccionadas corresponden a la misión Sentinel -1 de banda C con polarización dual a 5.405 GHz y una resolución de imágenes de 10 m. En el Anexo 2 queda consignada la colección de imágenes para el procesamiento del municipio de Montería.

Orbita descendente polarización VV y VH		
1	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220223T105012_20220223T105037_042039_0501F5_34B6	Época de sequía
2	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220307T105012_20220307T105037_042214_0507E4_D0DA	
3	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220319T105012_20220319T105037_042389_050DD3_Cf3C	
4	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220331T105012_20220331T105037_042564_0513C4_7E69	
5	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220412T105012_20220412T105037_042739_0519A4_2C4C	
6	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220424T105013_20220424T105038_042914_051F76_A82C	
7	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220705T105018_20220705T105042_043964_053F7D_0D4C	Época de lluvia
8	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220717T105018_20220717T105043_044139_0544BD_721C	
9	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220729T105019_20220729T105044_044314_0549E3_EDD8	
10	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220810T105020_20220810T105045_044489_054F1C_A0A5	
11	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220822T105020_20220822T105045_044664_0554FD_CADA	
12	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220903T105021_20220903T105046_044839_055AE6_46FB	
13	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220915T105021_20220915T105046_045014_0560C5_5C5D	
14	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220927T105022_20220927T105047_045189_0566AB_72A0	
Orbita ascendente polarización VV y VH		
1	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220211T231536_20220211T231605_041872_04FC18_AC97	Época de sequía
2	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220223T231529_20220223T231554_042047_050233_7B20	
3	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220307T231529_20220307T231554_042222_050824_B8F5	
4	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220319T231529_20220319T231554_042397_050E11_6D24	
5	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220331T231529_20220331T231554_042572_0513FD_12F0	
6	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220412T231529_20220412T231554_042747_0519E5_0015	
7	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220705T231535_20220705T231600_043972_053FB5_BAC8	Época de lluvia
8	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220717T231536_20220717T231601_044147_0544F3_A439	
9	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220729T231536_20220729T231601_044322_054A1D_7ADC	
10	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220810T231537_20220810T231602_044497_054F59_9A03	
11	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220822T231538_20220822T231603_044672_05553D_0CAB	
12	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220903T231538_20220903T231603_044847_055B26_4C8D	

Tabla 4 Colección de imágenes SAR municipios del bajo Sinú

Fuente: Elaboración propia y GGE

6.3. Calculo y categorización del NDWI

En función de los mosaicos generados desde el espectro óptico, se procedió a calcular para ambas épocas el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) empleando el cociente de las bandas del verde y del infrarrojo cercano (NIR). De los resultados obtenidos, se generó un mosaico en función del NDWI para cada época de análisis y cada municipio.

Calculado el NDWI y como lo que se busca en este proyecto es separar el agua de otras coberturas, se procedió a realizar un proceso de reclasificación y definición de umbral del índice de agua de diferencia normalizada; para lo cual, se siguió el siguiente procedimiento:

- i. En primera instancia, se realizó un proceso de categorización de los valores del índice del NDWI para lo cual se empleó las discontinuidades naturales o clasificación de Jenks. Este procedimiento busca quiebres o saltos en los datos observados para agrupar casos en clases. Con base en interacciones estadísticas (optimización de Jenks), este método identifica la mejor opción definida como la clasificación que minimiza la distancia entre los valores similares al interior de cada clase y maximiza la distancia entre ellas. Aunque este método requiere de una distribución normal, generalmente se aplica a información asimétrica previamente estandarizada manipulando temporalmente los casos extremos, como lo realizado por (Crews & Peralvo, 2008) y como se observa en la Ilustración 9. Dicho de otra forma, permite minimizar la varianza que se presenta dentro de cada clase y maximizar la varianza entre clases, (Gui, y otros, 2022); la Ecuación 3, presenta el arreglo para el cálculo de la bondad de ajuste de la varianza (FVB). Se puede complementar que,

cuando más cerca de 1 está el valor de FVB, mejor será el efecto de clasificación, (Coulson, 1987).

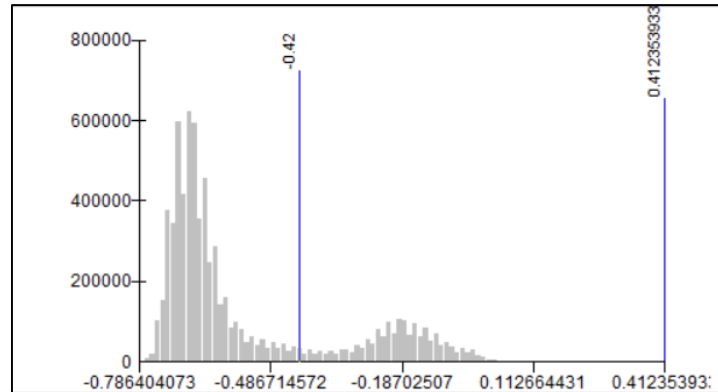


Ilustración 9. Definición de número de clases desde el histograma

Fuente: Elaboración propia, Arc-Gis 10.6

$$\text{Ecuación 3, } FVB = \frac{(SDAM - SDCM)}{SDAM}$$

$$\text{Para lo cual, } SDAM = \sum(xi - X)^2 \quad \text{y} \quad SDCM = \sum \sum (xi - Z)^2$$

Donde

FVB = bondad de ajuste de la varianza

SDAM = diferencia de la desviación cuadrática de la media de cada clase o arreglo

SDCM = desviación cuadrática de la media de cada clase

X = promedio de la matriz

Z = valor medio de la clase

(Morsy, Shaker, El-Rabbany, & LaRocque, 2016) en su estudio, emplearon el método de optimización de cortes naturales para delimitar y conocer el umbral de diferentes índices utilizados en la agrupación encontrada en dos clases (agua y tierra o vegetación o área construida).

- ii. En segunda instancia, se identificaron una serie de píxeles en la frontera de agua y otras coberturas en toda la región afectada por las inundaciones sobre el mosaico del NDWI para la época de lluvia; esta identificación incluye las zonas afectadas a lo largo del río Sinú, lo mencionado anteriormente se evidencia en la Ilustración 10. La finalidad de los puntos

identificados en las fronteras visibles en la imagen, es usarlos como puntos de verificación de la precisión de la umbralización empleada mediante el método descrito en el punto anterior. Estos puntos fueron exportados a Google Earth y empleando imágenes allí cargadas para la misma época de análisis (época de lluvia) se clasifican en dos categorías (agua y otras coberturas), de esta forma se valida la precisión de la clasificación mediante la matriz de confusión calculando la precisión general (OA) y el coeficiente de Kappa (K) mediante las Ecuación 4 y Ecuación 5 respectivamente, (Acharya, Subedi, & Lee, 2018).

$$\text{Ecuación 4, } OA = \frac{TP+TN}{T} , \quad \text{Ecuación 5, } K = \frac{T(TP+TN) - \Sigma}{T^2 - \Sigma}$$

Donde

OA = precisión general

K = coeficiente de Kappa

T = número total de píxeles

TP = número de píxeles de agua extraídos correctamente

TN = número de píxeles que no son de agua rechazados correctamente

Σ = precisión de probabilidad representada por (TP + TN)

Donde se define el grado de acuerdo según la estimación de Kappa teniedo:

K < 0 no hay acuerdo, 0 – 0.2 insignificante, 0.2 – 0.4 bajo, 0.4 – 0.6 moderado, 0.6 – 0.8 Bueno y 0.8 – 1 muy bueno.

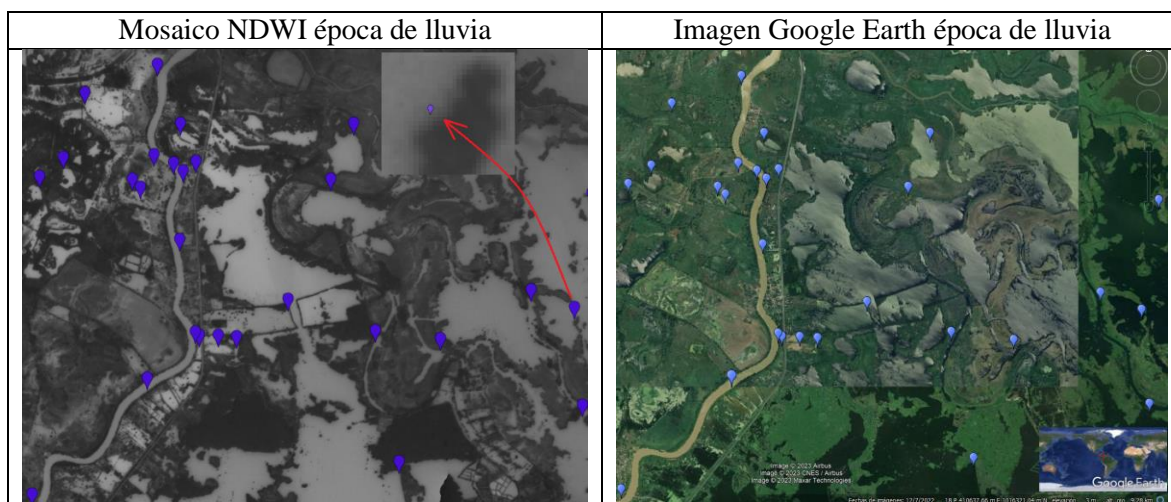


Ilustración 10. Identificación de píxeles en fronteras de agua y no agua

Fuente: GGE

- iii. Seguidamente, con el valor encontrado, se definió el umbral para poder realizar la reclasificación desde GGE; de esta forma, se logró separar el agua de otro tipo de coberturas. Los valores de los umbrales que se definieron y con los que se efectuó la reclasificación, fueron asignados al mosaico obtenido del NDWI tanto para época de sequía como para época de lluvia. Así, se generaron unos nuevos mosaicos para cada época debidamente reclasificados.
- iv. Calculado el umbral de reclasificación, se procedió a reclasificar los valores del NDWI para las dos épocas de estudio como se muestra en el numeral 6.4. Todos los valores menores al del umbral calculado fueron considerados como otras coberturas y se les asignó un identificador numérico igual a 0. Todos los valores mayores al umbral hallado fueron considerados como agua y se les asignó un valor numérico igual a 1.
- v. Durante este proceso de reclasificación se visualizó que algunas zonas urbanas y zonas donde se evidenciaron nubes, fueron reclasificadas como agua. Sin embargo, en el momento que se realice la detección de cambios, que se fusionen los resultados de reclasificación de imágenes ópticas y SAR y que se calcule la profundidad de inundación mediante la metodología expuesta en el numeral 6.12, estos resultados erróneos serán enmascarados y no serán tenidos en cuenta en la muestra final para el cálculo de áreas afectadas por las inundaciones.

6.4. Generación mosaicos de áreas afectadas por inundaciones desde imágenes ópticas.

Definido el umbral de clasificación del índice NDWI para las épocas de estudio, se procedió mediante el álgebra de mapas realizar el análisis de datos espectrales. La Tabla 5 muestra los valores asignados para la reclasificación empleada que permitió separar la cobertura de agua de otras coberturas.

Cobertura	Época Sequía	Cobertura	Época Lluvia
Otras coberturas	0	Otras coberturas	0
Agua	1	Agua	1

Tabla 5 Valores asignados en la reclasificación

Fuente: Elaboración propia

Realizado el proceso de reclasificación y asignado un identificador numérico a cada cobertura para ambas épocas, se logró reclasificar los datos vectoriales mediante la resta de las dos épocas, sometiendo los datos a un análisis para identificar áreas inundadas como lo realizaron, (Escamilla & López, 2017). De esta forma, se pudo realizar la detección de cambios cuantificando efectos temporales sobre la superficie de forma similar como (Quiroga Olarte, 2018). En este caso identificando áreas afectadas por las fuertes precipitaciones presentadas en la época de lluvia sobre la ciénaga grande del bajo Sinú y la extensión de la lámina de agua en la sección transversal del río Sinú.

Seguidamente, se logró calcular el área en función de los cambios detectados, principalmente áreas inundadas. Por último, se generó un mosaico detectando áreas inundadas y otros tipos de cambios según las otras coberturas reclasificadas. El procesamiento de calcular la diferencia de los mosaicos reclasificados (época de lluvia – época de sequía) se ejecutó desde la plataforma de GGE.

6.5. Calculo de relación de épocas y definición de umbral desde imágenes SAR

Realizado el proceso de filtrado de la colección de imágenes SAR, se realiza un proceso de cálculo mediante una diferencia binaria empleando un valor de umbral definido donde se relacionan las imágenes de épocas de lluvia y sequía, proceso en el cual se relacionó los valores de retrodispersión de las dos épocas y se encontró un cociente que permitió visualizar de forma

efectiva las zonas inundadas por los efectos del fenómeno climático. Cabe resaltar que este procedimiento se realizó para las dos polarizaciones simples VV y VH.

Para el cálculo de relación de épocas, se procedió en función de los valores encontrados, definir un umbral para el cual los valores mayores al umbral seleccionado serán empleados para crear una máscara de agua. El valor de umbralización más efectivo a emplear de las dos polarizaciones en la fusión de imágenes, será el que presente mayor precisión según el parámetro de decisión que se emplee durante la fusión con las imágenes ópticas, en este caso Kappa.

6.6. Generación mosaicos de áreas afectadas por inundaciones desde imágenes SAR

Para la identificación de las zonas que se vieron afectadas por el fenómeno climático en función de la relación de épocas desde imágenes SAR, fue necesario emplear algunas funciones desde la plataforma de GGE, los cuales se mencionan a continuación:

- i. En primera instancia se definió el valor del umbral de reclasificación, el cual fue de 1.20, todos los valores mayores fueron considerados áreas inundadas y los valores inferiores a 1.20 se enmascararon.
- ii. En segunda instancia se empleó una máscara de estacionalidad de agua superficial mediante la cual se pudieron separar aquellos píxeles que se detectaron como agua después de la inundación y agua permanente. Durante el proceso de enmascaramiento, se empleó el conjunto de datos del mapa del explorador global de aguas superficiales JRC/GSW, el cual corresponde a una máquina virtual que permite mapear la ubicación temporal de las aguas permanentes a nivel mundial, (Pekel, Cottam, & Belward, 2016). En el motor de GGE, se puede encontrar como: "JRC/GSW1_1/GlobalSurfaceWater".
- iii. Luego se le asignó un valor de reclasificación a los cuerpos de agua permanentes mayores a cuatro meses de estacionalidad con el fin de separarlos de los no permanentes y se

verificó la conectividad de los 8 vecinos más cercanos con el fin de eliminar el ruido en la extensión de la zona inundada.

- iv. Posteriormente, se generó una imagen refinada en la cual se conectaron los 8 píxeles del vecino más cercano incluyendo el mismo.
- v. A continuación, se empleó un modelo digital de elevación (DEM) con el cual, las áreas con más del 5% de pendiente fueron enmascaradas y no consideradas como zonas inundadas después del evento climático y las áreas que, si presentaron inundación, fueron reclasificadas con un valor numérico. Durante este procedimiento se empleó el producto HydroSHEDS el cual ofrece una serie de capas que sirven de apoyo a la investigación en aplicaciones hidrogeológicas, (Hydrosheds, 2022), el cual se basa en datos de elevaciones obtenidos durante el año 2000 por la Misión Topográfica de Radar del Transbordador (SRTM) de la NASA.
- vi. Por último, se cruzó la imagen filtrada durante el proceso de refinado con el modelo digital de elevación de HydroSHEDS; las zonas con pendiente menor al 5% obedecieron a zonas inundadas y las zonas con pendiente mayor al 5% se enmascararon.

6.7. Validación y fusión de imágenes SAR con imágenes ópticas

Realizado el proceso de detección de cambios e identificación de las áreas afectadas durante la ola invernal en la subregión del bajo Sinú, se procedió a calcular el área inundada, la cual se obtuvo desde el procesamiento de imágenes ópticas e imágenes SAR. Este procedimiento se realizó para cada municipio de estudio mediante la secuencia que se muestra a continuación.

- i. Inicialmente, desde las imágenes ópticas se definió el área calculada mediante el NDWI, la cual se clasificó como áreas inundadas según la categorización o asignación numérica empleada durante el proceso de reclasificación. Por último, empleando las imágenes SAR,

se realizó la detección de cambios de aguas no permanentes para calcular el área inundada para cada polarización empleada (VH y VV); el valor encontrado en este proceso para cada polarización, fue sometido a un proceso de validación o predicción empleando como parámetro de decisión la precisión general (OA) y el coeficiente de Kappa (K) mediante la Ecuación 4 y Ecuación 5 respectivamente; durante este análisis, el área encontrada desde las imágenes ópticas se consideró como área o valores del usuario y el área hallada desde las imágenes SAR como área del productor. Se emplearon los valores de área que presentaron el mejor efecto según cada polarización.

- ii. Identificadas las áreas que fueron afectadas por las inundaciones, se procedió a generar los mosaicos de las zonas inundadas y a superponer los resultados encontrados mediante el NDWI (imágenes ópticas) y la detección de cambios con imágenes SAR. Se pudo evidenciar que algunas zonas inundadas que no fueron plenamente detectadas con imágenes ópticas, si lo fueron con imágenes SAR y viceversa, lo que da mayor peso a la fusión de los resultados obtenidos mediante el uso de las dos técnicas de procesamiento.

6.8. Selección, descarga y medición de datos de las estaciones de estudio

Delimitada la región de estudio, se procedió a identificar las estaciones limnimétricas y limnigráficas que generan una incidencia directa e indirecta en la subregión del bajo Sinú (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM., 2022).

Las estaciones acá mencionadas fueron 13, distribuidas espacialmente en el área de estudio, las cuales permitieron conocer su localización geográfica en la región de estudio y obtener registros históricos de la profundidad de flujo o nivel máximo diario (NMD) de manera puntual según la localización de las estaciones sobre el del río Sinú y la ciénaga grande del bajo Sinú.

Seleccionadas las estaciones de análisis, se procedió a descargar los datos históricos de profundidad de inundación, principalmente los registros entre los meses de julio y octubre del año 2022 (época de lluvia). Los datos descargados corresponden a niveles de agua medidos a partir del lecho o suelo del cauce del río o ciénaga hasta la lámina de agua, nombrados como nivel máximo diario (NMD). Las estaciones se visualizan en la Ilustración 11 y en la Tabla 6 se consigna su localización geográfica, nombre, código de cada estación y el municipio donde se ubica.

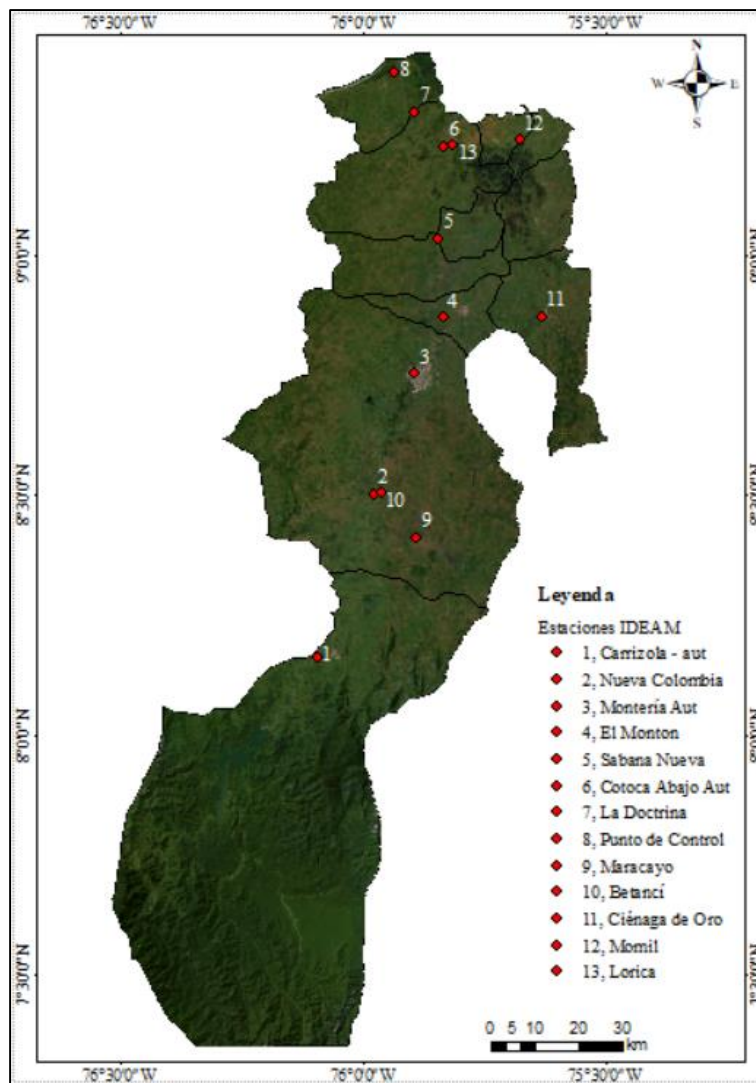


Ilustración 11 Localización estaciones limnimétricas y limnigráficas

Fuente: Elaboración propia, Arc-Gis 10.6

Estación	ID	Ciudad	Latitud	Longitud
Carrizola - aut	13037040	Tierralta	8,1608	-76,0956
Nueva Colombia	13057010	Montería	8,4994	-75,9786
Montería Aut	13067020	Montería	8,7516	-75,8924
El Monton	13077300	Montería	8,8683	-75,8356
Sabana Nueva	13077010	San Pelayo	9,0322	-75,8458
Cotoca Abajo Aut	13077060	Lorica	9,2244	-75,8344
La Doctrina	13077040	Lorica	9,2972	-75,8928
Punto de Control		San Bernardo del Viento	9,3780	-75,9359
Maracayo	13067040	Montería	8,4100	-75,8900
Betancí	13067080	Montería	8,5040	-75,9637
Ciénaga de Oro	13077070	Ciénaga de Oro	8,8700	-75,6300
Momil	13070520	Momil	9,2389	-75,6764
Lorica	13077170	Lorica	9,2267	-75,8150

Tabla 6 Características de las estaciones limnimétricas y limnigráficas

Fuente: Elaboración propia

En principio la finalidad fue extraer de los registros históricos de las estaciones de control del IDEAM la lectura con la mayor profundidad de flujo o nivel máximo diario (NMD) asociado a la época de lluvia, propósito que fue posible para la mayoría de estaciones donde se observó que entre los meses de julio y octubre se presentaron las mayores elevaciones en la lámina de agua del río Sinú y la ciénaga grande del bajo Sinú.

El denominado punto de control ubicado en el municipio de San Bernardo del Viento, donde no existe estación de monitoreo por parte del IDEAM, localizado específicamente en cercanías a la desembocadura sobre el mar caribe, obedece a un punto geográfico de suma importancia para el momento en que se vaya a generar el proceso de interpolación de las elevaciones de la lámina de agua sobre el nivel del mar según el numeral 6.9. Tal importancia se deriva de la necesidad de poder generar la interpolación en la mayor extensión de área para la zona de estudio. Por lo anterior, la necesidad de medir topográficamente en campo para la época de lluvia, específicamente el mes de agosto, la profundidad de flujo o NMD en este sector. Se debe resaltar que las coordenadas de localización del punto de control, obedecen a un sector de

fácil acceso, de allí su selección. La Ilustración 12 muestra la estación limnimétrica de Sabana Nueva.



Ilustración 12 Nivel máximo diario (NMD) detectado en la estación Sabana Nueva

Fuente: Elaboración propia

6.9. Calculo de elevaciones de la lámina de agua (SNMM)

Posterior a la identificación de la profundidad de flujo o nivel máximo diario (NMD) asociados a la época de estudio, según registros históricos del IDEAM, se realizaron levantamientos batimétricos para la asignación de altura sobre el nivel del mar a la lámina de agua dependiente del lecho de los cuerpos de agua (rio Sinú y ciénaga grande del bajo Sinú). Para lograr tal finalidad, se siguieron los siguientes pasos mediante un trabajo de campo realizado entre los meses de julio y agosto del 2022:

- i. Se empleó tecnología GPS RTK para asignar coordenadas y alturas sobre el nivel del mar a la ubicación de cada estación limnimétrica y limnigráfica según métodos de (Sánchez & Martínez, 1997) empleando los datos abiertos de la red pasiva y activa, (Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, 2022)
- ii. Durante el trabajo de campo, también se midió con levantamiento batimétrico la elevación en metros sobre el nivel del mar (msnm) del lecho o fondo del rio (E_g) para cada estación

de monitoreo, la elevación hallada se asoció al nivel máximo diario histórico seleccionado que depende de la profundidad de flujo (D) para la época de lluvia según registro del IDEAM; de esta forma, se encontró la elevación de la lámina de agua en msnm (E_w). Lo anterior, mediante la Ecuación 6 y como se muestra en la Ilustración 13

$$\text{Ecuación 6, } E_w = E_g + D$$

Donde:

E_w = elevación lámina de agua, msnm
 E_g = elevación del lecho del río, msnm
 D = NMD = profundidad de flujo, m

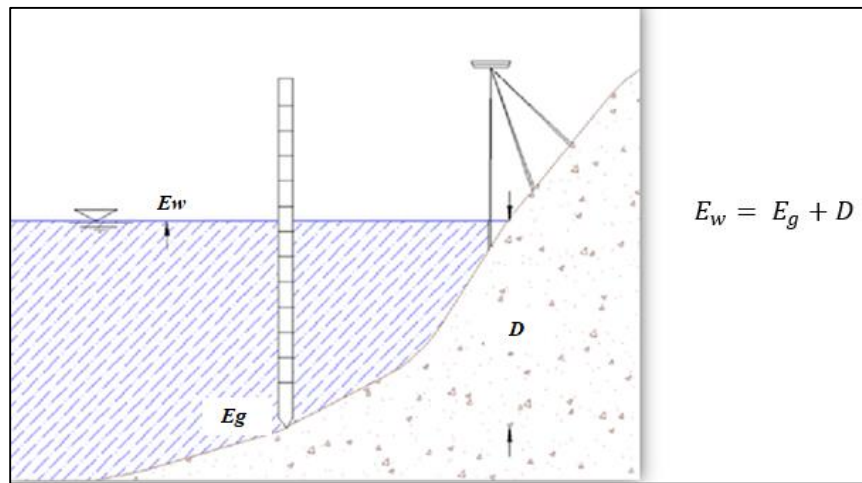


Ilustración 13. Ilustración cálculo de la profundidad de flujo en las estaciones del IDEAM

Fuente: Elaboración propia

- iii. Con el procedimiento anterior, se logró asignar elevación a la lámina de agua o nivel máximo diario para la época de lluvia en msnm; información fundamental para poder generar un mapa de contornos de elevaciones mediante procesos de interpolación. Por último, se garantiza que el datum de elevación del mapa de niveles máximo diario de agua se encuentre en el mismo sistema que el datum de elevación del DSM seleccionado según el numeral 6.11.

6.10. Interpolación, generación de contornos de elevaciones de la lámina de agua

Definidas las elevaciones de la lámina de agua para la época de lluvia, se procedió a generar los contornos que representan espacialmente tales valores. Para poder generar los contornos, fue necesario realizar un proceso de interpolación empleando herramientas SIG, cuya entrada fueron los valores de elevaciones en msnm de las diferentes estaciones analizadas asociados a la época de lluvia. Durante la generación de los contornos, se emplearon los métodos de interpolación determinísticos como, el método IDW (Inverse Distance Weighted) y RBF (Radial Basis Functions), (Vargas, Santos, Cárdenas, & Obregón, 2011). Los contornos que predominaron y el método seleccionado, fue el que presentó el menor valor asociado al error medio cuadrático (EMC), que fue el método RBF, (Aragón-Hernández, Aguilar-Martínez, Velázquez-Ríos, Jiménez-Magaña, & Maya-Franco, 2019) y con los cuales se generó el mosaico de elevaciones o lámina de agua asociado al nivel máximo de agua en msnm.

6.11. Selección del modelo digital de superficie y validación de su precisión

Como complemento para el mosaico de áreas inundadas y el mosaico de elevaciones de la lámina de agua, se empleó un modelo digital de superficie (DSM) el cual fue integrado a los productos acá mencionados.

El DSM seleccionado desde la plataforma de GGE, fue el ALOS Global Digital Surface Model, producto encontrado en la colección JAXA/ALOS/AW3D30/V3_2, el cual su conjunto de datos los provee el Centro de Investigación de Observación de la Tierra JAXA, (ALOS, 2022).

Una vez fue limitado el DSM a la región de estudio, se continuo con un proceso de validación de las elevaciones que contiene el DSM (valor estimado); para ello, se emplearon los puntos de la red pasiva de Colombia, (Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, 2022),

específicamente los vértices que se encontraron dentro del área de interés, los cuales permitieron conocer la elevaciones de referencia que sirvió como (valor observado) para el cálculo del error medio cuadrático EMC del modelo digital de superficie. De esta forma fue posible conocer la precisión y posible influencia del DSM durante la superposición y generación del mapa de profundidad de inundaciones asociando las elevaciones de los niveles de la lámina de agua para identificar zonas afectadas.

Según (Arenas, Haeger, & Jordano, 2011), este coeficiente permite medir la cantidad de error entre un valor predicho y un valor observado (valor de referencia y valor estimado) en un conjunto de datos. Para este caso particular predecir el error de elevaciones.

$$\text{Ecuación 7, EMC} = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Q_o - Q_e)^2}{Q_o} \right|^{\frac{1}{2}}$$

Donde

EMC = error medio cuadrático, *m*

Q_o = valor observado

Q_e = valor estimado

6.12. Generación del mosaico de profundidad de inundación

Contando con el mosaico de elevaciones asociado a las elevaciones de la lámina de agua y con el modelo digital de superficie DSM, se procedió a calcular la profundidad de inundación mediante la diferencia de estos dos mosaicos como se muestra en la Ecuación 2; durante este procedimiento se tuvo en cuenta:

- i. Se consideró en primera instancia como área de análisis, el área de cada municipio objeto de estudio.
- ii. Seguido, el cálculo se realizó restando los valores de elevaciones de los píxeles del mosaico del nivel de elevación de la lámina de agua a los valores de las elevaciones del mosaico DSM el cual actúa como superficie y en cuerpos de agua como lecho del mismo.

- iii. Los píxeles encontrados mediante la diferencia de los dos mosaicos deben arrojar un valor positivo ya que por ningún motivo una zona inundada puede tener la elevación del nivel máximo de agua por debajo de la elevación de la superficie o lecho.
- iv. Por último, los píxeles que arrojen valores negativos, servirán como una máscara de píxeles que no representen áreas inundadas y pueden obedecer a valores de píxeles anómalos, nubes, fenómenos atmosféricos o simplemente zonas que no son propensas a inundación.

6.13. Cálculo de áreas inundadas y reclasificación de la profundidad de inundación

Una vez generado el producto fusionado de imágenes SAR con imágenes ópticas, con el cual se logró delimitar las zonas inundadas en época de lluvia según numeral 6.7, y conociendo el mosaico de profundidad de flujo o inundación para cada municipio según numeral 6.12, se procedió a intersectar estos dos mapas, permitiendo asociar y conocer cuál fue la extensión y profundidad de inundación alcanzada en las zonas que fueron afectadas durante la presente ola invernal que afectó esta región del país. De esta forma y para cada municipio se generó un mapa de profundidad y extensión de inundación asociado a las áreas afectadas por las inundaciones.

Con el fin de únicamente poder clasificar la extensión y profundidad de inundación y categorizar la problemática para una posible respuesta ante una futura emergencia que se pueda presentar por una situación similar de inundaciones en los próximos años, se empleó el código de colores para los niveles de alerta que están establecidos en la (Guía Metodológica Estrategias Territoriales para la Respuesta a Emergencias, 2018), ver Ilustración 14.

NIVEL DE ALERTA	SIGNIFICADO	APLICACIÓN EN RIESGOS	ACCIONES DEL CMGRD
VERDE	Normalidad.	Todos los riesgos.	Adelantan acciones de preparación, capacitación, equipamiento, elaboración de protocolos y procedimientos, simulacros, etc.
AMARILLO	Cambio/señales de peligros o incremento de susceptibilidad (temporadas de huracanes, de lluvias, secas, etc).	Todos los riesgos excepto Sismo.	Se realiza la revisión de las capacidades existentes, la verificación de las comunicaciones y los protocolos definidos. Se fortalecen los procesos de información a la comunidad y la promoción de acciones de prevención y para estar mejor preparados. El CMGRD se reúne para realizar esta revisión y se verifican y fortalecen los mecanismos de monitoreo.
NARANJA	Alerta por señales de peligro identificadas que indica que podrían desencadenarse el evento en términos de semanas o días (incremento de vientos, actividad volcánica, lluvias, temperaturas, etc).	Erupción Volcánica Tsunami de origen lejano Depresión Tropical / Tormenta Tropical Incendio Forestal Inundación	Se activa el CMGRD. Se evalúan los posibles escenarios de afectación y los protocolos de respuesta, haciéndose los respectivos alistamientos para el manejo de los posibles impactos. Se activa la sala de crisis 24 horas y se establecen turnos de trabajo. Se continúan fortaleciendo las acciones de información a la comunidad, indicando las señales de peligro y sus acciones como primera respuesta, números de emergencia, etc. Para algunos eventos en este espacio de alerta se realizan evacuaciones preventivas, con el fin de garantizar la vida.
ROJO	Evento inminente o en curso, se esperan efectos en termino de días u horas.	Erupción Volcánica Tsunami de origen cercano Ciclón Tropical / Huracán Incendio Forestal Deslizamiento Inundación Sismo*	Se activa el protocolo de respuesta para el evento respectivos. Se evalúa la magnitud para acorde a ésta dar la respuesta identificada. Se evalúan riesgos asociados y se toman las medidas correspondientes. Se realiza información a la comunidad en general acerca de lo sucedido, medidas implementadas y gestiones requeridas. Atención inmediata priorizando 'salvar vidas', evitar complicaciones y mantener la institucionalidad.

Ilustración 14. Niveles de alerta establecidos para una ERE municipal o distrital

Fuente: (Guía Metodológica Estrategias Territoriales para la Respuesta a Emergencias, 2018)

7. RESULTADOS

En este capítulo se consignan los resultados obtenidos según la metodología propuesta y se considera el municipio de Purísima como referencia, los resultados de los otros municipios se consignan como anexos.

7.1. Selección de imágenes ópticas y generación de mosaicos

Los mosaicos analíticos normalizados se generaron a nivel de reflectancia superficial por cada municipio; para la época de sequía se generaron entre los meses de febrero y marzo y para la época de lluvia entre los meses de julio y octubre, ver Ilustración 15 y el Anexo 1.

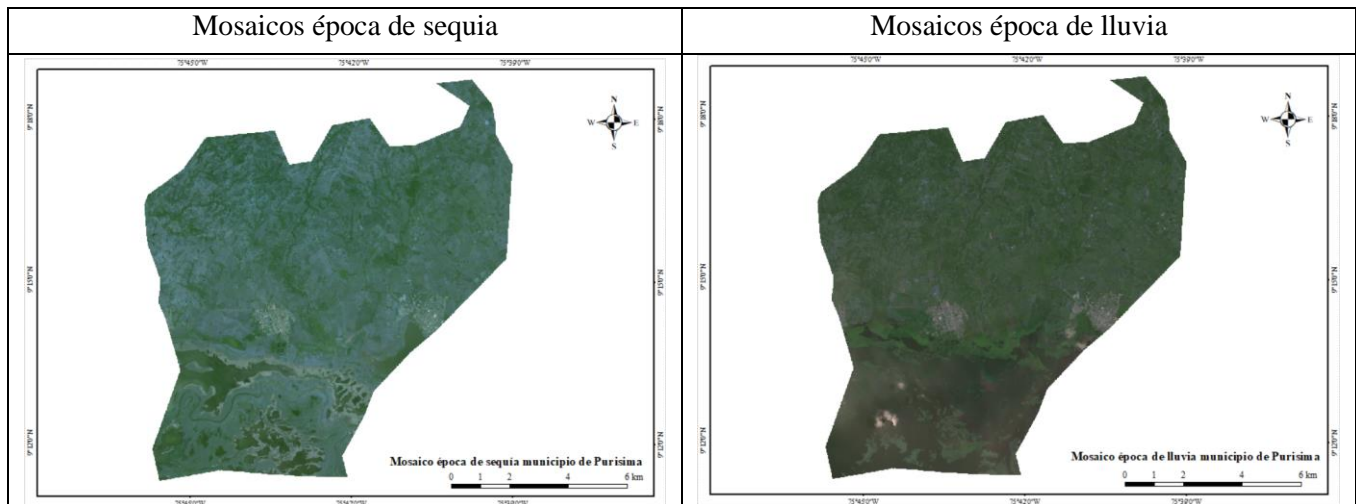


Ilustración 15 Mosaicos analíticos normalizados a nivel de reflectancia superficial

Fuente: Elaboración propia, GGE y Arc-Gis 10.6

7.2. Selección de imágenes SAR y generación de mosaicos filtrados

Seleccionada el área de estudio se realizó un procesó de filtrado de las imágenes SAR con el fin de reducir el efecto sal y pimienta o moteado. Para lograr tal propósito se aplicó un Kernel circular de 50 m.

En la Ilustración 16 se evidencia la mejora en la resolución de la imagen y la reducción del efecto antes mencionado y en la Ilustración 17 se observa como el histograma de frecuencia

una vez aplicado el filtro a la imagen, se comprimen los valores de la retrodispersión eliminando el ruido.

Por último en la Ilustración 18 se consigna el mosaico corregido y filtrado para las dos épocas polarización VH; de igual forma en la Ilustración 19 el mosaico con polarización VV. El resto de los resultados se visualiza en el Anexo 3 y Anexo 4.

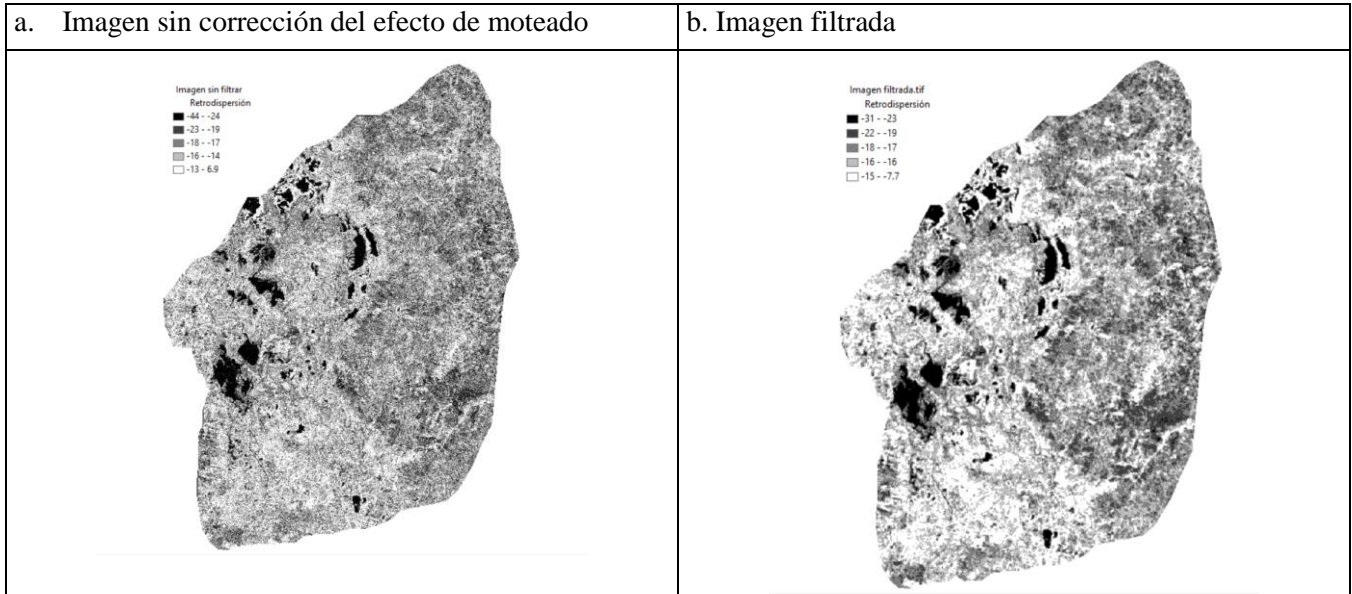


Ilustración 16 Visualización de corrección por filtrado de una imagen SAR

Fuente: Elaboración propia, GGE y Arc-Gis 10.6

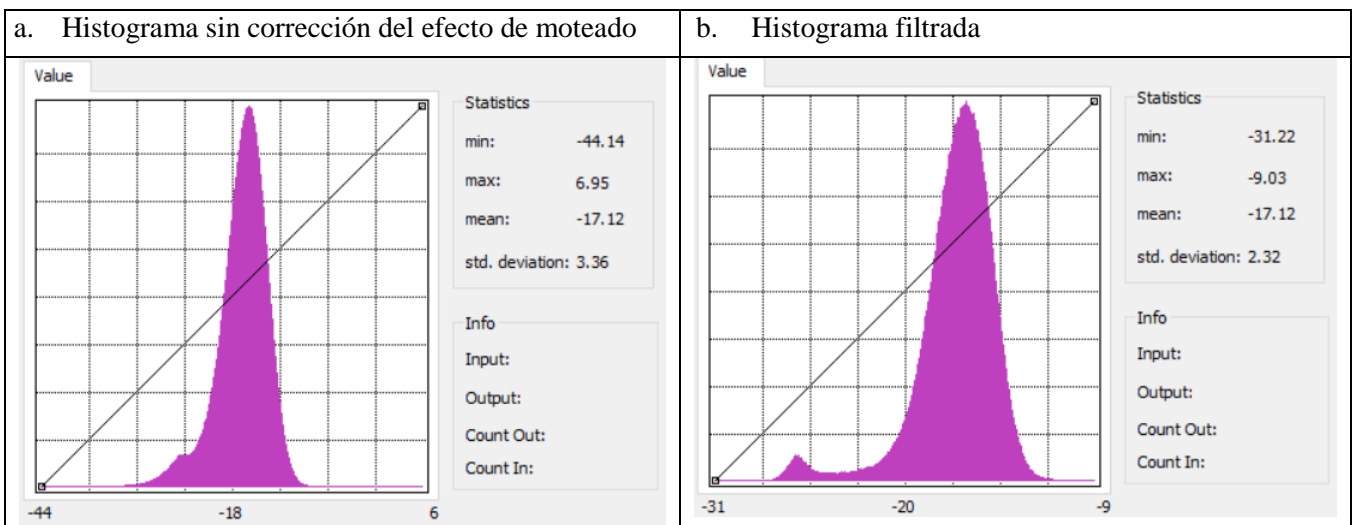


Ilustración 17 Visualización del histograma antes y después de filtrar la imagen SAR

Fuente: Elaboración propia, Arc-Gis 10.6

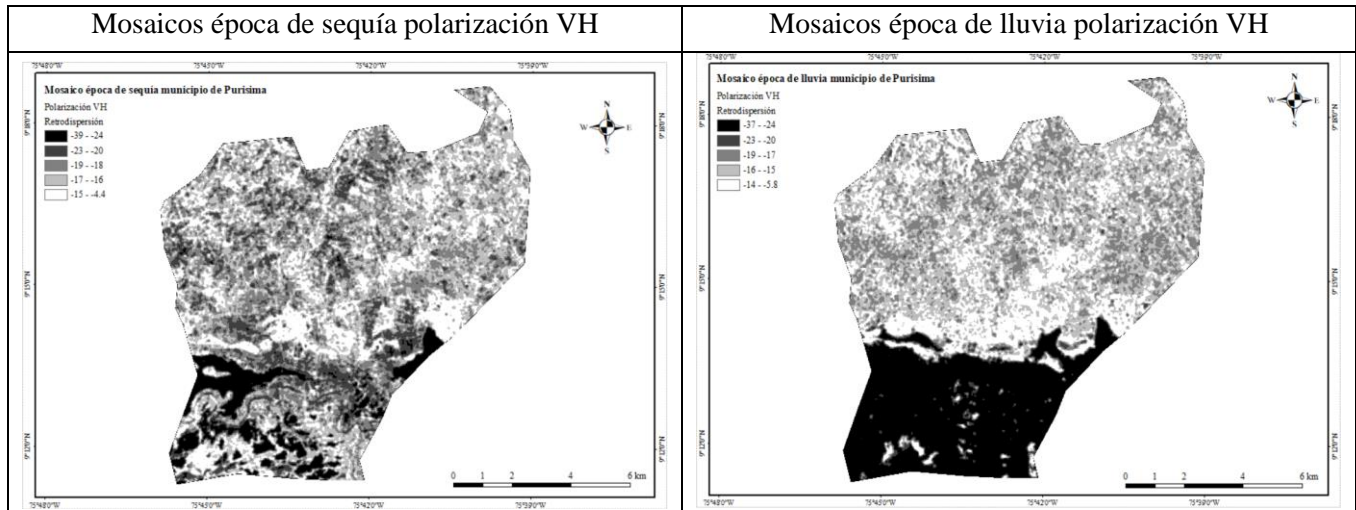


Ilustración 18 Mosaicos empleando imágenes SAR polarización VH

Fuente: Elaboración propia, GGE y Arc-Gis 10.6

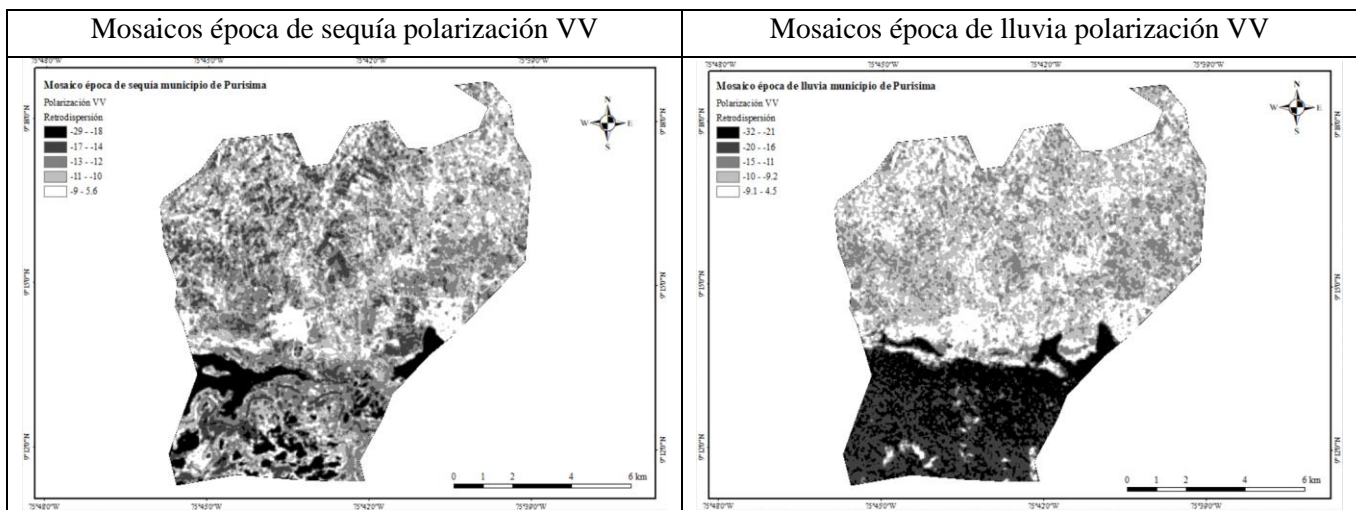


Ilustración 19 Mosaicos empleando imágenes SAR polarización VV

Fuente: Elaboración propia, GGE y Arc-Gis 10.6

7.3. Cálculo del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)

Una vez se conocen los mosaicos a nivel SR para cada época, se calculó el NDWI desde el motor de GGE, para lo cual se emplearon las bandas del verde y del NIR. La Ilustración 20 consigna los resultados hallados al igual que el Anexo 5.

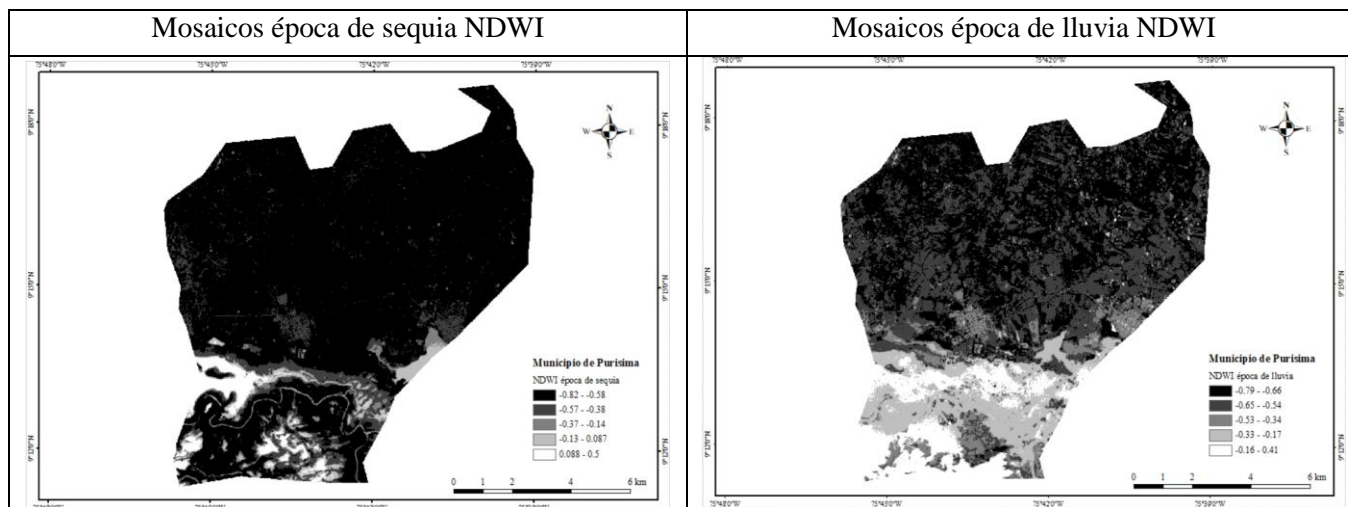


Ilustración 20 Mosaicos NDWI época de sequía y de lluvia

Fuente: Elaboración propia, GGE y Arc-Gis 10.6

7.4. Reclasificación del NDWI

En este numeral se muestran los valores de la reclasificación del NDWI, umbral definido mediante la clasificación de Jenks, tomando como referencia los productos presentados en la Ilustración 20 para la época de lluvia. Los valores obtenidos para la reclasificación se observan en la Tabla 7.

Municipio	Otras coberturas		Agua
San Bernardo del Viento	-0.97	-0.38	1.00
Lorica	-1.00	-0.43	0.59
Purísima	-0.79	-0.42	0.41
Momil	-0.86	-0.44	0.81
Chimá	-0.89	-0.44	0.89
San Pelayo	-0.91	-0.43	1.00
Cereté	-0.84	-0.40	0.40
Montería	-1.00	-0.40	0.81

Tabla 7 Umbrales de reclasificación NDWI según clasificación de Jenks

Fuente: Elaboración propia

Los puntos de para la validación del umbral definido por el método de clasificación de Jenks se consignan en el Anexo 6. La matriz de confusión, el cálculo de la precisión general y la precisión según Kappa se consignan en la Tabla 8.

Clases	No agua	Agua	Total	Error de comisión
No agua	27	0	27	0
Agua	5	99	104	5
Total	32	99	131	
Error de omisión	5	0		

Overall Accuracy (OA)	0.96	96.18%
Coefficiente de Kappa (K)	0.89	89.09%

Tabla 8 Matriz de confusión, verificación de la precisión general y coeficiente de Kappa

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 8 se puede decir que la precisión general es de un alto grado de confiabilidad y según el coeficiente de Kappa y los límites de estimación de grado de acuerdo, el resultado es de acuerdo muy bueno.

Posteriormente se realizó la reclasificación con los valores encontrados por municipio de la siguiente manera: valores menores a los registrados a los umbrales en la Tabla 7 (otras coberturas), valores mayores a los presentados en la misma tabla (agua). Los resultados se consignan en la Ilustración 21 y el Anexo 7.

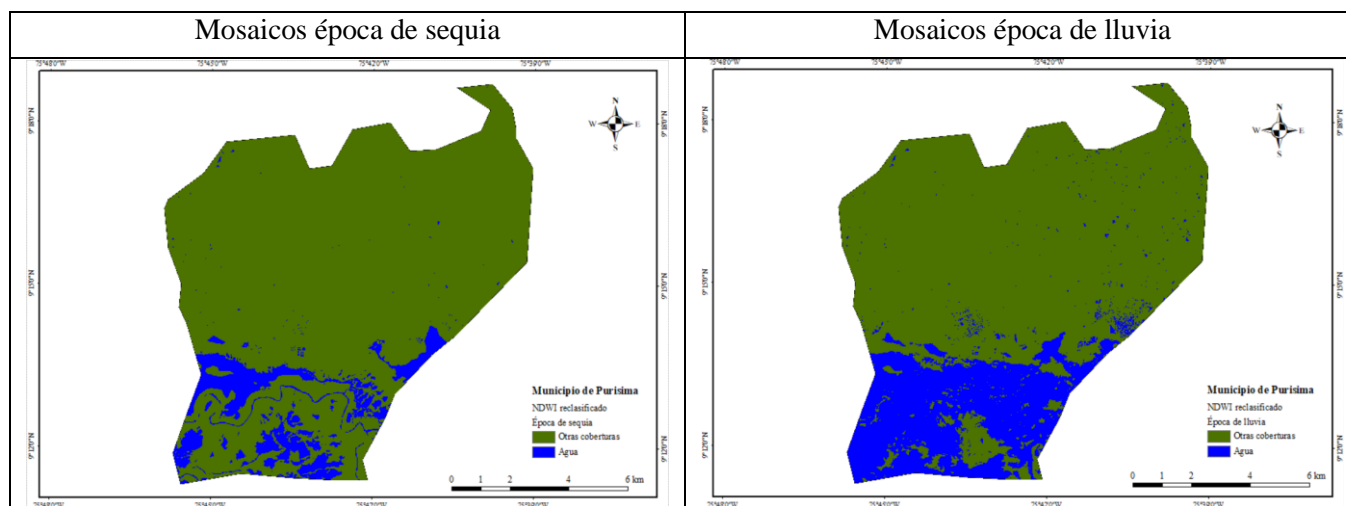


Ilustración 21 Cálculo del NDWI reclasificado para las épocas de estudio

Fuente: Elaboración propia, GGE y Arc-Gis 10.6

7.5. Detección de cambios y cálculo de áreas afectadas desde imágenes ópticas

Realizado el proceso de reclasificación, en la Tabla 9 se representa la aplicación de la diferencia de los valores asignados en el proceso de reclasificación según la Tabla 7.

	Relación	Valor	Detección de cambios	Convención
Otras coberturas	- Otras coberturas	0	Sin cambios	
Otras coberturas	- Agua	-1	Inundado	
Agua	- Otras coberturas	1	Fenómenos antrópicos	
Agua	- Agua	0	Sin cambios	

Tabla 9 Diferencia de épocas para algebra de mapas

Fuente: Elaboración propia

El procesamiento para calcular la diferencia de los mosaicos reclasificados (época de lluvia – época de sequía) se ejecutó desde la plataforma de GGE, los mosaicos obtenidos que representan en mapas que se consignan en la Ilustración 22 y el Anexo 8.

Por último, se calculó por cada municipio el área según las categorías encontradas, los resultados se consignan en la Tabla 10.

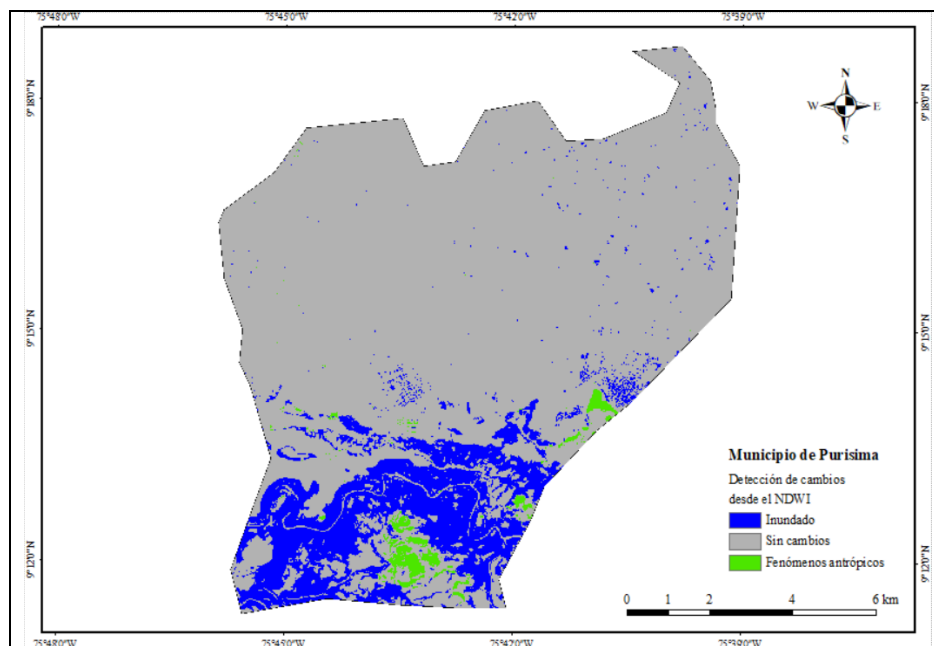


Ilustración 22 Cálculo áreas afectadas aplicando detección de cambios con imágenes ópticas

Fuente: Elaboración propia, GGE y Arc-Gis 10.6

La detección de fenómenos antrópicos se puede inducir que corresponde a zonas en donde la respuesta del índice NDWI arroja en época de sequía valores espectrales (0.015) mayores que para la época de lluvia (-0.43), como se ve en el mosaico (a y b) de la Ilustración 23 respectivamente.

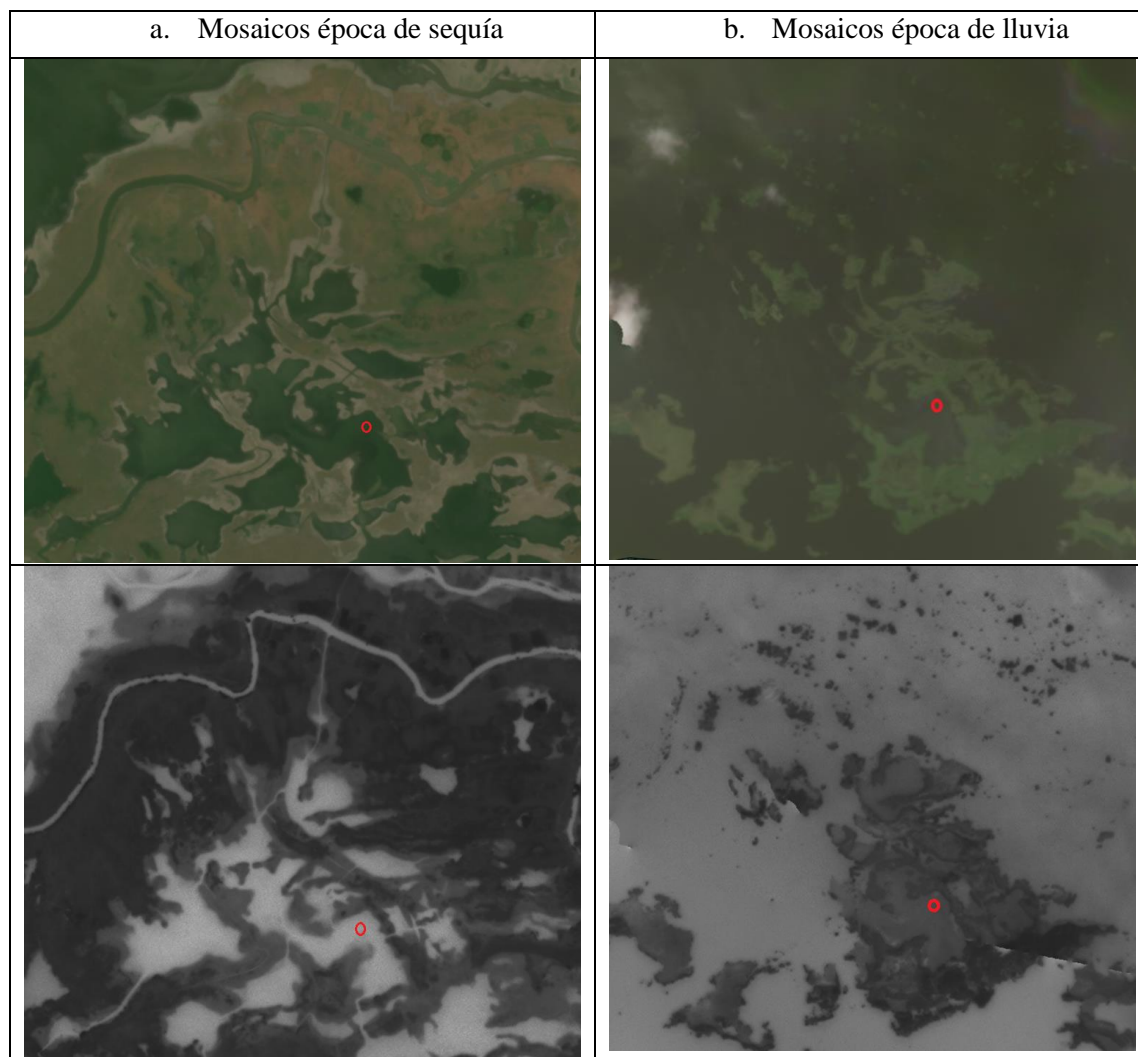


Ilustración 23 Identificación de fenómenos antrópicos desde el NDWI

Fuente: Elaboración propia y GGE

Municipio	Área calculada según detección de cambios en ha			Área total
	Inundado	Sin cambios	Fenómenos antrópicos	
San Bernardo del Viento	2003.13	32754.90	19.36	34777.39
Lorica	8428.24	88737.40	978.93	98144.57
Purísima	1616.68	9357.69	146.97	11121.35

Municipio	Área calculada según detección de cambios en ha			Área total
	Inundado	Sin cambios	Fenómenos antrópicos	
Momil	1074.94	10240.81	415.69	11731.43
Chimá	3628.09	29193.63	319.84	33141.56
San Pelayo	417.47	47910.54	16.32	48344.33
Cereté	122.76	24149.99	9.28	24282.03
Montería	2765.37	300170.04	552.11	303487.52
Sumatoria	20056.68	542514.99	2458.51	565030.18

Tabla 10 Cálculo de áreas afectadas por las inundaciones

Fuente: Elaboración propia

Se puede deducir que la diferencia a la respuesta espectral antes mencionada se está dando en zonas de aguas estacionarias y puede ser causada por aguas que, en época de lluvia, la turbidez, su contenido de sedimentos o estacionamiento de especies nativas, de algas u otra vegetación sobre la lámina de agua, afectó los niveles de reflectancia superficial capturados en la imagen. Por lo tanto, esta clasificación no fue considerada durante el análisis.

7.6. Detección de cambios desde imágenes (SAR)

Contando con las imágenes filtradas, se generaron los mosaicos que contienen la detección de cambios para posteriormente detectar las áreas inundadas. En la Ilustración 24 y el Anexo 9 están consignados los mosaicos generados desde la relación de las imágenes de época de lluvia y época de sequía para una polarización VH y VV.

Cuando se realizó la división de los valores de retrodispersión de la época de lluvia y época de sequía, las zonas inundadas presentaron los mayores valores de retrodispersión representadas con color blanco o grises claros atendiendo la diferencia de cobertura para una época seca (vegetación u otra) y época de lluvia (agua). Las zonas que no presentaron cambios y se visualizan píxeles en colores grises, puede obedecer a zonas que no se inundaron; por lo cual en las dos épocas no se detectó cambios. Por último las zonas que presentan píxeles de colores oscuros o negros, se puede decir que son aguas permanentes.

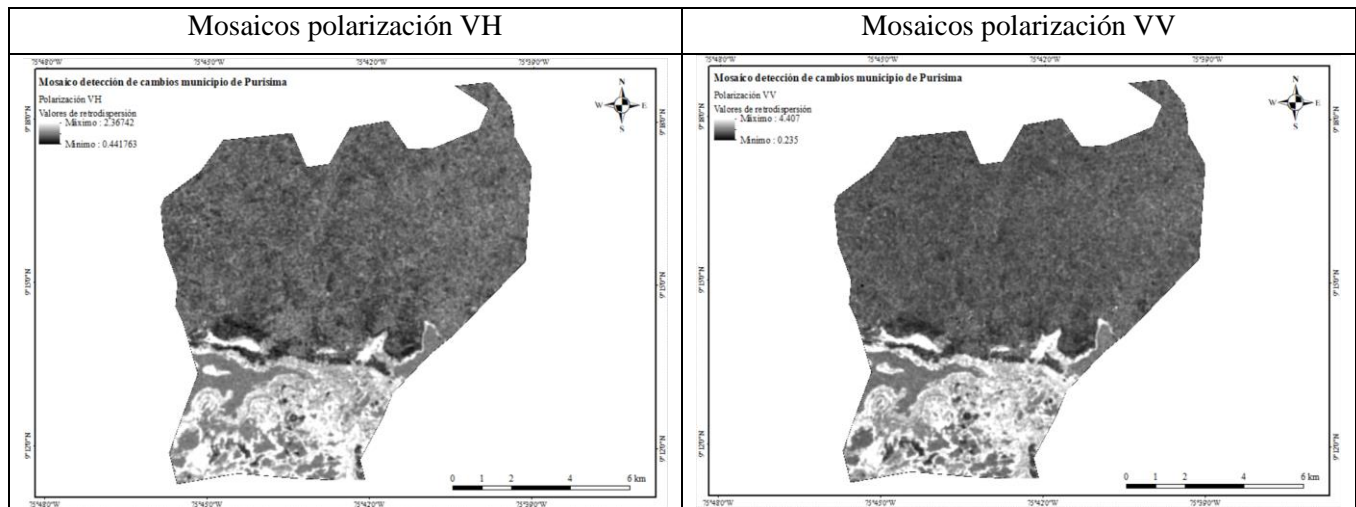


Ilustración 24 Detección de cambios empleando imágenes SAR

Fuente: Elaboración propia, GGE y Arc-Gis 10.6

7.7. Generación de mosaicos y cálculo de áreas afectadas desde imágenes activas (SAR)

Siguiendo el paso a paso descrito en el numeral 6.6, usando los productos obtenidos durante el procesamiento de imágenes SAR, en este capítulo se calcularon las zonas no inundadas para detectar las áreas inundadas empleando el motor de GGE. De esta forma se obtuvieron los resultados que se visualizan en la Ilustración 25 y Anexo 10 para polarización VH y VV y en la Tabla 11 se consolidan los resultados de áreas inundadas para las dos polarizaciones.

Municipio	Área calculada según detección de cambios empleando imágenes SAR en ha			
	Polarización VH		Polarización VV	
	Inundado	Sin cambios	Inundado	Sin cambios
San Bernardo del Viento	878,00	33.899,39	1.910,00	32.867,39
Lorica	7.890,00	90.254,57	11.793,00	86.351,57
Purísima	1.774,00	9.957,43	2.135,00	9.596,43
Momil	1.584,00	10.147,43	1.787,00	9.944,43
Chimá	4.494,00	28.647,56	5.930,00	27.211,56
San Pelayo	492,00	47.852,32	1.644,00	46.700,32
Cereté	342,00	23.940,02	1.291,00	22.991,02
Montería	893,00	302.594,52	3.959,00	299.528,52

Tabla 11 Áreas inundadas obtenidas desde imágenes SAR polarización VH y VV

Fuente: Elaboración propia y GGE

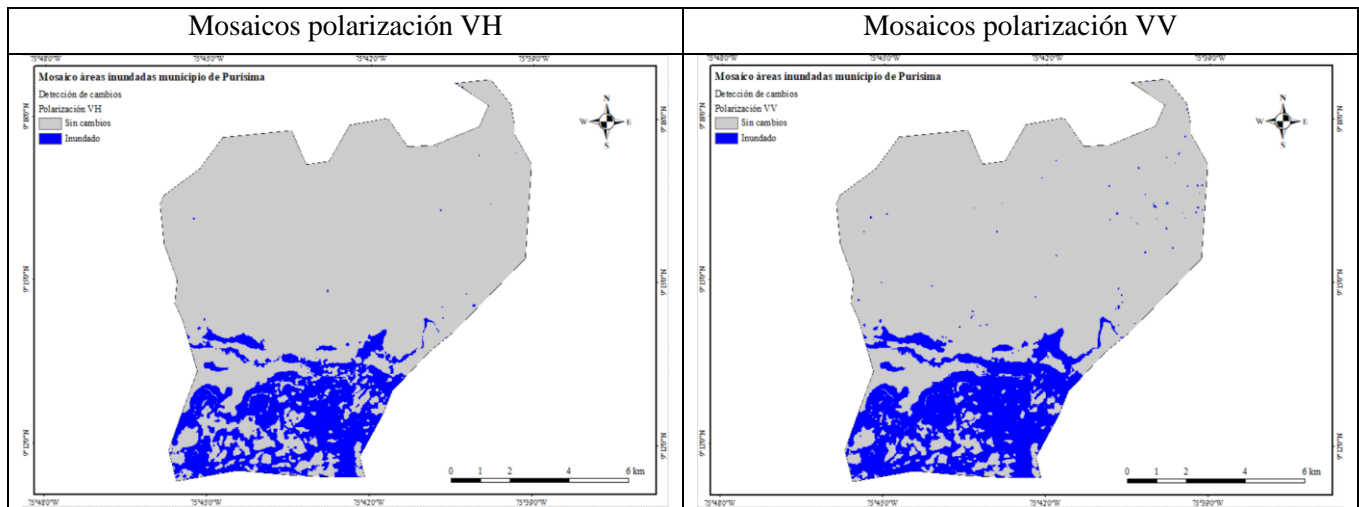


Ilustración 25 Detección de áreas inundadas empleando imágenes SAR

Fuente: Elaboración propia, GGE y Arc-Gis 10.6

7.8. Fusión de imágenes ópticas y SAR para la obtención de áreas inundadas

Como se mencionó en el capítulo 6.7, durante la obtención de las áreas inundadas empleando imágenes ópticas y SAR, cada procesamiento brinda sus beneficios y desventajas:

Como beneficios se puede decir que:

- i. Desde el NDWI se pudo detectar la extensión de la lámina de agua sobre el río Sinú, identificando sobre la margen izquierda y derecha hasta donde asciende el nivel del agua como se observa en la Ilustración 26.

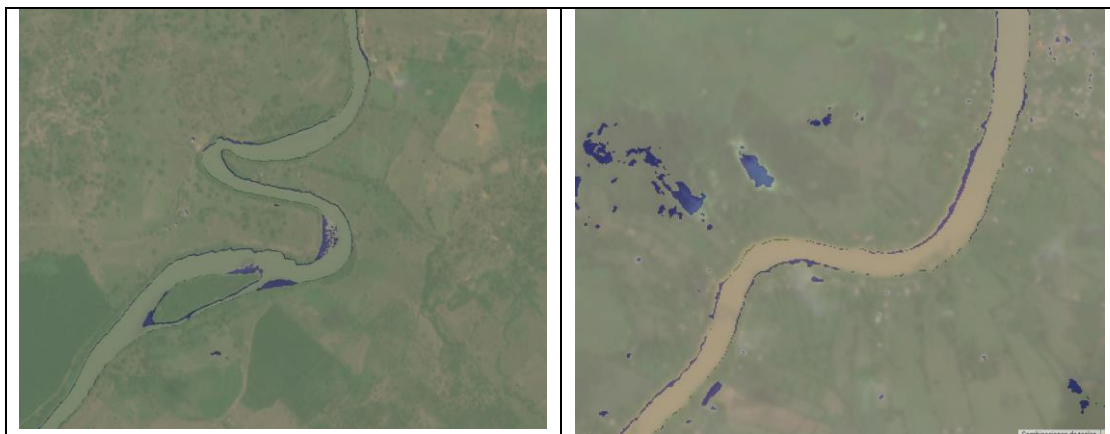


Ilustración 26 Extensión de la lámina de agua sobre el río Sinú

Fuente: Elaboración propia, GGE

- ii. Desde imágenes SAR se contó con la ventaja que al emitir el pulso de radar y según la rugosidad del agua, se registró un retorno muy bajo medido en valores de retrodispersión expresado gráficamente en color negro, siendo capaz de pasar la cobertura vegetal e identificar áreas inundadas en época de lluvia. En época de sequía presentó valores mucho mayores de retrodispersión en tonalidades de grises y por eso al ser relacionado el valor de retrodispersión para las dos épocas en el mismo punto, se observaron valores mayores a 1, que en la medida que aumentó el valor relacionado, las áreas inundadas se detectaron con color blanco en el mapa de áreas inundadas, ver Ilustración 27.

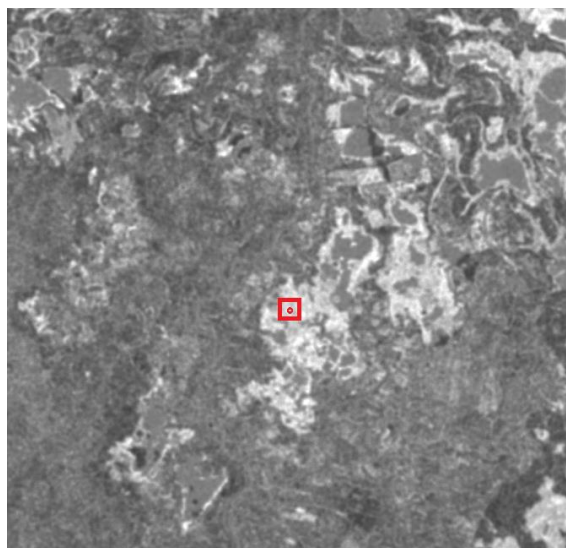


Ilustración 27 Áreas detectadas como zonas inundadas mediante SAR

Fuente: Elaboración propia, GGE

A modo de ejemplo se toma un punto inundado y se tiene:

Valor de retrodispersión época de sequía $VH = -14.94$

Valor de retrodispersión época de lluvia $VH = -26.47$

Valor relación época de lluvia con época de sequía $= 1.77$

Como desventaja se obtuvo:

- iii. Algunas áreas que no corresponden a zonas inundadas si no a nubes desde el NDWI, fueron reclasificadas como agua desde las imágenes ópticas por la similitud de los valores de reflectancia, ver Ilustración 28.

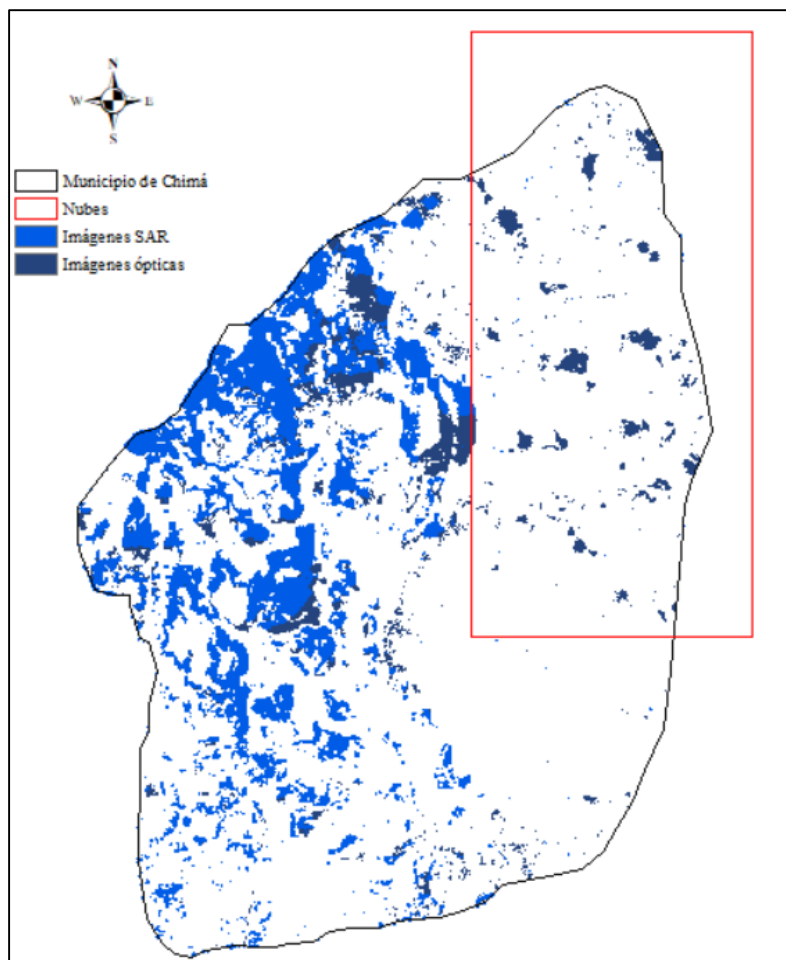


Ilustración 28 Fusión de áreas inundadas detectadas desde imágenes ópticas y SAR

Fuente: Elaboración propia, GGE y Arc-Gis 10.6

- iv. Cuando se comparó los resultados hallados desde cada polaridad (VH y VV), arrojaron valores muy diferentes de retrodispersión, lo que generó incertidumbre a la hora de determinar con qué resultados trabajar. Se toma como referencia el mismo punto identificado según Ilustración 27.

Valor de diferencia de épocas VH = 2.16

Valor de diferencia de épocas VV = 1.77

Conociendo las bondades y debilidades de las técnicas empleadas, se validó la fusión de imágenes mediante la precisión general y el coeficiente de Kappa como se observa en la Tabla 13 y Tabla 12.

Polarización VH SAR -Sentinel 1	Planet - NICFI		Area total	Error de comisión %
	Sin cambios	Inundado		
Sin cambios	544973.50	1563.94	546537.44	0.29%
Inundado	145.74	18347.00	18492.74	0.79%
Area total	545119.23	19910.94	565030.18	
Error de omisión %	0.03%	7.85%		

Overall Accuracy (OA)	1.00	99.70%
Coefficiente de Kappa (K)	0.95	95.39%

Tabla 12 Validación fusión de imágenes ópticas – SAR VH

Fuente: Elaboración propia y GGE

Polarización VV SAR -Sentinel 1	Planet - NICFI		Area total	Error de comisión %
	Sin cambios	Inundado		
Sin cambios	535191.24	6443.55	541634.79	1.20%
Inundado	3338.71	20056.68	23395.39	14.27%
Area total	538529.95	26500.23	565030.18	
Error de omisión %	0.62%	24.32%		

Overall Accuracy (OA)	0.98	98.27%
Coefficiente de Kappa (K)	0.79	79.49%

Tabla 13 Validación fusión de imágenes ópticas – SAR VV

Fuente: Elaboración propia y GGE

Se encontró que los resultados obtenidos mediante la fusión de imágenes y la polarización VH presentó una mayor asociación con un valor de OA = 99.70% y un valor K de 0.95; en comparación con la fusión mediante la polarización VV (OA = 98.27% y K=0.79). De lo anterior, la fusión de imágenes de áreas inundadas se realizó con los resultados calculados desde el NDWI y la polarización VH como se evidencia en la Ilustración 29 y Anexo 11.

En el capítulo 7.12 se expresan los resultados ajustados de las zonas inundadas y se expresa como se depuró el problema de nubosidad y otras coberturas que afectada el resultado de detección de áreas inundadas.

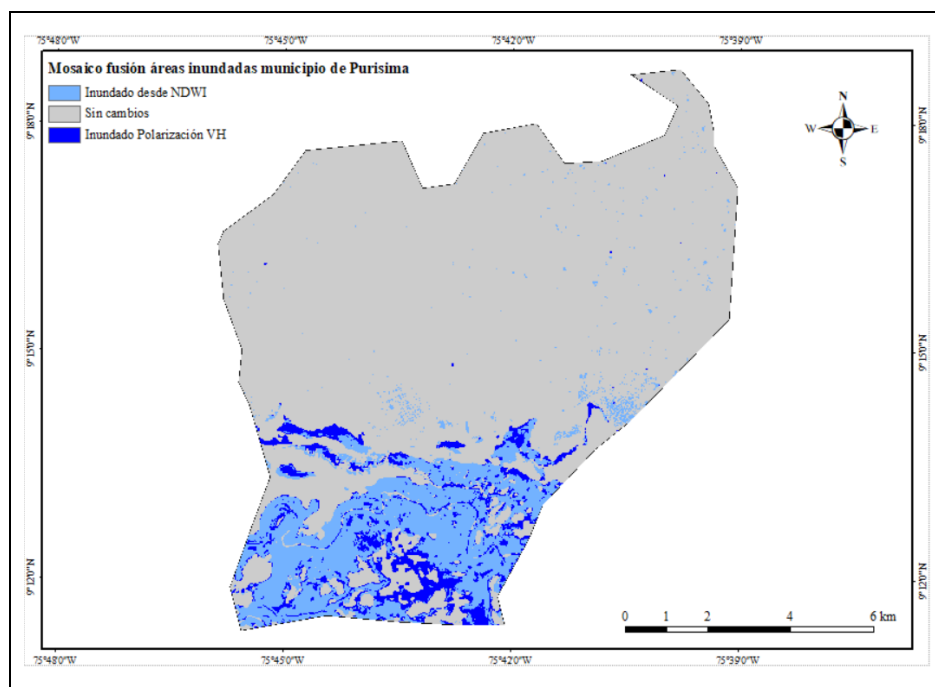


Ilustración 29 Mosaicos fusión áreas inundadas imágenes ópticas y SAR

Fuente: Elaboración propia, Arc-Gis 10.6

7.9. Procesamiento de estaciones limnimétricas y limnigráficas

La Tabla 14 condensa los resultados de nivel máximo diario o profundidad de inundación para cada estación o punto de control referente a la época de lluvia y la Tabla 15 consigna los valores de la elevación del nivel máximo de agua para la época de lluvia para cada estación del IDEAM según resultados del levantamiento batimétrico.

Estación	Fecha lectura NMD	NMD (m)	Observación
Carrizola - aut	5/07/2022	4.61	Lectura IDEAM
Nueva Colombia	5/07/2022	5.21	Lectura IDEAM
Montería Aut	5/07/2022	5.10	Lectura IDEAM
El Monton	5/08/2022	7.28	Lectura IDEAM
Sabana Nueva	6/07/2022	6.05	Lectura IDEAM
Cotoca Abajo Aut	16/08/2022	6.14	Lectura IDEAM
La Doctrina	15/08/2022	3.65	Lectura IDEAM
Punto de Control	16/08/2022	1.33	Lectura de campo
Maracayo	5/07/2022	4.42	Lectura IDEAM
Betancí	5/07/2022	5.21	Lectura IDEAM
Ciénaga de Oro	14/08/2022	2.25	Lectura IDEAM
Momil	14/08/2022	6.06	Lectura IDEAM

Estación	Fecha lectura NMD	NMD (m)	Observación
Lorica	14/08/2022	6.59	Lectura IDEAM

Tabla 14 Calculo del nivel máximo diario (NMD) época de lluvia

Fuente: Elaboración propia y GGE

Estación	NMD (m)	Elevación fondo (msnm)	Elevación lámina de agua (msnm)
Carrizola - aut	4.61	47.00	51.61
Nueva Colombia	5.21	19.29	24.50
Montería Aut	5.10	10.13	15.23
El Monton	7.28	5.08	12.36
Sabana Nueva	6.05	3.47	9.52
Cotoca Abajo Aut	6.14	-0.44	5.70
La Doctrina	3.65	0.13	3.78
Punto de Control	1.33	0.30	1.63
Maracayo	4.42	21.17	25.59
Betancí	5.21	19.29	24.50
Ciénaga de Oro	2.25	6.49	8.74
Momil	6.06	-0.32	5.74
Lorica	6.59	-0.46	6.13

Tabla 15 Calculo de la elevación lámina de agua época de lluvia estaciones del IDEAM

Fuente: Elaboración propia

Donde:

$NMD = \text{profundidad de inundación o nivel máximo diario época de lluvia, m}$

7.10. Generación de mapa de elevaciones lámina de agua época de lluvia

Empleando los resultados de localización de las estaciones de monitoreo consignados en la Tabla 6 y los resultados obtenidos en la Tabla 15 se generó un mapa de contornos que representan las elevaciones de la lámina de agua para la época de lluvia como se visualiza en la Ilustración 30.

Durante este proceso, se emplearon dos métodos de interpolación asistido por el software Arg-Gis 10.6 y la herramienta de análisis geoestadístico; el método predictivo para determinar el

modelo más apropiado fue el error medio cuadrático. En la Tabla 16 se consigna los resultados obtenidos y los métodos de interpolación empleados.

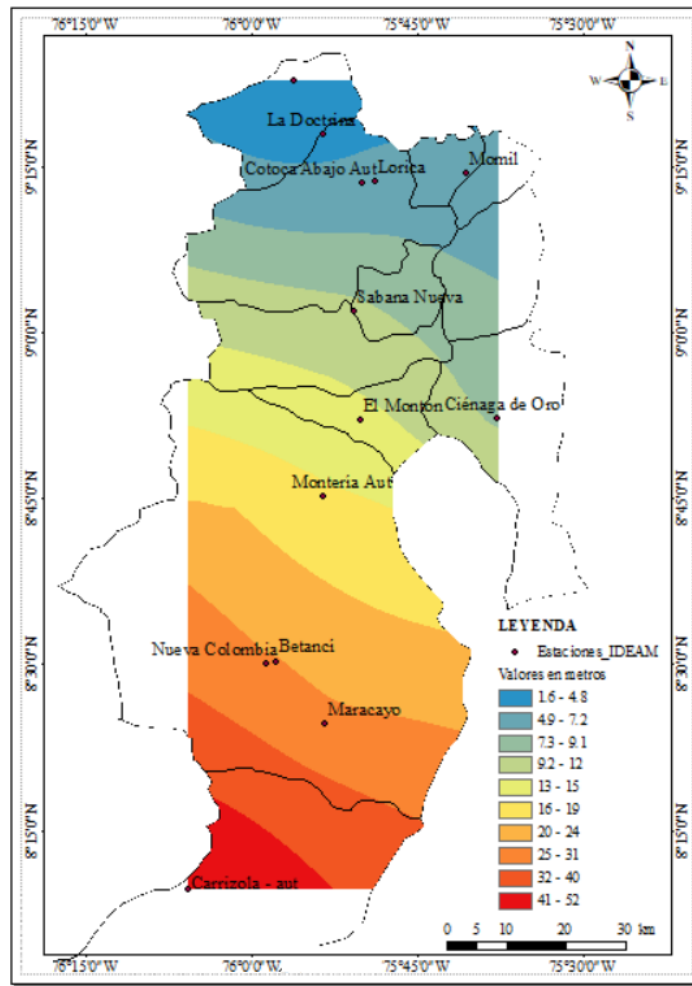


Ilustración 30 Mapa de elevaciones lámina de agua época de lluvia

Fuente: Elaboración propia, Arc-Gis 10.6

Regression function	$0.547011670759894 * x + 5.0890149387708$	Inverse Distance Weighting, IDW
Prediction Errors		
Samples	13 of 13	
Mean	-1.706855	
Root-Mean-Square	7.381349	
Regression function	$0.578964969827896 * x + 5.08625171792542$	Radial Basis Functions, RBF
Prediction Errors		
Samples	13 of 13	
Mean	-1.230245	
Root-Mean-Square	7.360752	

Tabla 16 Resultados métodos interpolación para generar mapa de elevación lámina de agua

Fuente: Elaboración propia y Arc-Gis 10.6

Según los resultados anteriores, el método que mejor bondad de ajuste presentó fue el RBF el cual presentó el menor valor de error medio cuadrático $EMC = 7,360$ unidades cuadradas, el cual fue empleado para generar el mapa de elevaciones de la lámina.

7.11. Modelo digital de superficie y validación de su precisión

La selección de los mosaicos del DSM se realizó por municipio de manera independiente y sirvió como insumo para calcular la profundidad de inundación. El modelo digital de elevación empleado pertenece al conjunto de datos ALOS Global Digital Surface Model, que se encuentra en la plataforma de GGE como una colección de imágenes denotada “JAXA/ALOS/AW3D30/V3_2”. La base de datos de la colección antes mencionada cuenta con una resolución espacial de 30 m; en la Ilustración 31 y Anexo 12 se consolidaron los mosaicos por municipio.

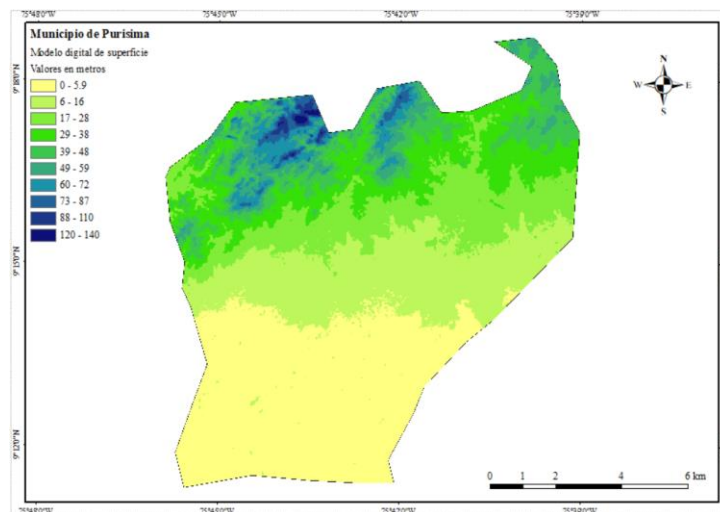


Ilustración 31 Mosaicos modelos digitales de superficie

Fuente: Elaboración propia, GGE y Arc-Gis 10.6

Durante el proceso de validación de la precisión del DSM en cuanto a elevación se refiere, el EMC hallado fue de 1.268 m. Para este ejercicio, se consideró la altura sobre el nivel

del mar de los vértices del IGAC como valores de referencia y se midió en el mismo punto coordinado de la red del IGAC la elevación del DSM en GGE (valor observado); en la Tabla 17.

Vertices IGAC	Municipio	Latitud	Longitud	Elevación vértices IGAC (msnm)	Elevación del DSM (msnm)	Dif (m)
SAZ-GPS-D-CR-001	Montería	8,8297	-75,8307	12,30	10,00	2,300
GPS-D-CR-001	Montería	8,8254	-75,8268	12,45	11,00	1,447
GPS-D-CR-003	Montería	8,7215	-75,8909	15,10	15,00	0,100
SAZ-GPS-D-CR-003	Montería	8,7216	-75,8905	14,90	15,00	-0,100
A1-BE-2	Montería	8,7508	-75,8778	15,41	16,00	-0,591
SAZ-GPS-D-CR-002	Montería	8,7636	-75,8672	14,90	16,00	-1,100
GPS-D-CR-002	Montería	8,7629	-75,8670	14,80	16,00	-1,200
2-BE-2	Montería	8,7411	-75,8639	14,03	15,00	-0,975
GPS-CR-T-6	Montería	8,7731	-75,8796	15,60	15,00	0,600
21-BE-1	Lorica	9,1609	-75,8303	5,17	5,00	0,169
CRX-241	Lorica	9,1537	-75,8363	6,10	6,00	0,100
A29-BE-1	Lorica	9,2672	-75,8229	65,02	66,00	-0,983
GPS-CR-T-3	Lorica	9,2482	-75,8124	26,00	28,00	-2,000
GPS-CR-T-4	Lorica	9,2429	-75,8129	16,70	18,00	-1,300
1A-BE-1	Cereté	8,8910	-75,7979	12,81	14,00	-1,194
31-CB-3	Cereté	8,8858	-75,7856	11,56	13,00	-1,437
CRX-119	Cereté	8,8678	-75,7804	10,48	11,00	-0,520
36-CB-1	Purisima	9,2409	-75,7400	8,67	9,00	-0,335
GPS-CR-T-25	Purisima	9,2419	-75,7267	11,40	10,00	1,400
GPS-CR-T-26	Purisima	9,2417	-75,7336	9,60	9,00	0,600
GPS-CR-T-31	San Bernardo del Viento	9,3560	-75,9595	4,00	6,00	-2,000
GPS-CR-T-32	San Bernardo del Viento	9,3544	-75,9645	4,40	7,00	-2,600

n	22
EMC (m)	1,268

Tabla 17 Resultados cálculo del EMC del DSM desde vértices del IGAC

Fuente: Elaboración propia

Del resultado hallado se puede decir que la precisión del modelo digital de superficie es de 1.26 m si se considera que los vértices pertenecientes a la red pasiva del IGAC fueron procesados mediante métodos analíticos y matriciales que permitieron obtener alturas sobre el nivel del mar con grados de precisión centimétricos como lo propone la guía metodológica para la obtención de alturas sobre el nivel medio del mar utilizando el sistema GPS, (Sánchez & Martínez, 1997). El EMC acá calculado podría disminuir en caso de contar con un DSM o DEM

de mayor precisión, obteniendo resultados más precisos a la hora de calcular la profundidad de inundación.

Es importante resaltar que la metodología empleada por el IGAC para asignar elevación a los vértices de la red pasiva, es la misma que se empleó en este caso de estudio para asignar elevación a las estaciones de monitoreo del IDEAM y que corresponde al mismo sistema del DSM, lo que garantiza la confiabilidad de validación del DSM empleado para la superposición con el mapa de elevaciones de la Ilustración 30.

7.12. Generación de mosaicos y cálculo de la extensión y profundidad de inundación

Generados los mapas de elevaciones de la lámina de agua para la época de lluvia y el modelo digital de superficie para cada municipio, se procedió a calcular la profundidad de inundación para lo cual se empleó la Ecuación 2. Durante este proceso, se asumió que la lámina de agua es igual a la superficie del agua y el DSM es equivalente al lecho o fondo de la superficie; por consiguiente, los valores de profundidad de inundación en todo momento fueron positivos y se calcularon interceptando el mosaico o mapa de áreas inundadas resultante de la fusión de imágenes ópticas y SAR presentado en la Ilustración 29.

Durante el procesamiento de imágenes raster y empleando la calculadora raster de Arc-Gis, se pudo reclasificar el mapa resultante del procedimiento acá mencionado; con lo cual fue posible crear una máscara a los valores con resultados negativos, los cuales no correspondían a zonas inundadas si no a nubes, zonas urbanas y otras coberturas, valores que estaban afectando la reclasificación de áreas inundadas desde el procesamiento de imágenes ópticas.

De esta forma, se logró obtener la extensión de áreas inundadas asociadas a una profundidad de inundación y su reclasificación según los niveles de alerta según la (Guía

Metodológica Estrategias Territoriales para la Respuesta a Emergencias, 2018) como se muestra en la Ilustración 32 y Anexo 13.

De los resultados obtenidos se puede interpretar inicialmente que, los municipios de Montería, Cereté y San Pelayo no fueron afectados de manera considerable por la temporada invernal para el año 2022, que de las 2011 ha inundadas, en su mayoría corresponden a estancamientos de aguas lluvias sobre terrenos espacialmente alejados del río Sinú y sin ninguna relación con la ciénaga grande del bajo Sinú. Seguidamente se visualiza que los municipios de Momil, Purísima y Chimá se vieron considerablemente afectados por la temporada invernal, principalmente por los desbordamientos que se presentaron en los alrededores de la ciénaga grande de bajo Sinú, afectando más de 9064 ha del territorio de los tres municipios; para estos municipios, el río Sinú no tiene incidencia. Por último, las 11391.09 ha que se inundaron entre los municipios de Lórica y San Bernardo del Viento tienen relación directa a desbordamientos y acumulaciones de flujo entre el río Sinú y la ciénaga grande del bajo Sinú, siendo el municipio de Lórica el más afectado con 10437.79 ha inundadas.

Finalmente se obtuvieron de manera efectiva, en intervalos de 1 m de profundidad de flujo, las áreas afectadas por las inundaciones presentadas en la región del bajo Sinú, departamento de Córdoba para el año 2022 entre los meses de julio y octubre como se muestra en la Tabla 18.

Municipio	Profundidad de flujo (m) asociada a las áreas inundadas (ha)				
	0 - 1 m	1 - 2 m	2 - 3 m	>3 m	Total
San Bernardo del Viento	633.61	269.74	43.65	6.31	953.30
Lórica	1102.55	1991.69	3196.57	4146.97	10437.79
Purísima	52.15	431.00	1319.64	294.44	2097.23
Momil	394.43	614.85	525.56	228.06	1762.91
Chimá	370.96	1044.44	1935.71	1853.03	5204.15
San Pelayo	67.63	94.74	95.59	104.82	362.77
Cereté	88.12	87.46	51.22	73.39	300.19

Municipio	Profundidad de flujo (m) asociada a las áreas inundadas (ha)				
	0 - 1 m	1 - 2 m	2 - 3 m	>3 m	Total
Montería	376.02	449.79	311.16	211.28	1348.24

Tabla 18 Cálculo de áreas inundadas para los municipios del bajo Sinú

Fuente: Elaboración propia

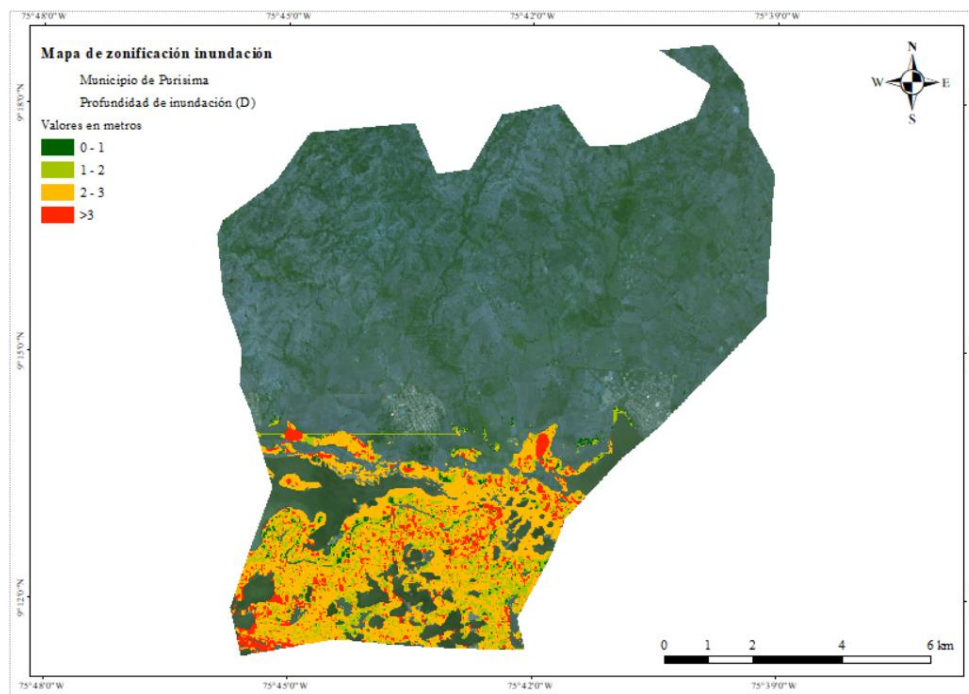


Ilustración 32 Mosaicos profundidad de inundación

Fuente: Elaboración propia y Arc-Gis 10.6.

8. DISCUSIONES

Para la identificación de áreas afectadas por las inundaciones empleando la fusión de imágenes ópticas e imágenes SAR, considerando las épocas de análisis tanto de sequía como de lluvia. Se obtuvieron resultados consignados en la Ilustración 29 y en la Tabla 18 que obedecen a las áreas calculadas desde el procesamiento con imágenes ópticas mediante el NDWI e imágenes SAR con polarización VV y VH. La fusión de imágenes se realizó con las inundaciones detectadas desde el NDWI (valor de referencia) y la polarización VH (valor medido) ya que fue durante el proceso de ajuste de bondad el que presentó el menor valor del EMC con 985 ha. Lo anterior quiere decir que, para este caso en particular, la polarización VV no es adecuada para la fusión de imágenes ya que la diferencia cuando se comparó con la polarización VV (valor medido), el valor del EMC hallado fue de 1795 ha lo que disminuye la precisión en la detección de áreas inundadas. Esta metodología es respaldada por (Anusha & Bharathi, 2020), quienes emplearon imágenes de apertura sintética SAR e imágenes ópticas durante su investigación que tenía como finalidad mapear y encontrar las áreas inundadas presentadas durante el ascenso de los ríos Rapti y Ghaghara en el estado de Uttar Pradesh, India para el mes de agosto de 2017. De igual forma, (Agnihotri, Ohri, Gaur, Shivam, & Mishra, 2019), caracterizaron áreas inundadas en la llanura media del Ganges de los ríos Ganges y Ramganga en la llanura del Ganga para lo cual definieron que la mejor polarización fue la VV validando con una imagen óptica Sentinel-2 mediante el coeficiente de Kappa. Por lo anterior, haciendo un análisis de los resultados, se puede observar que la fusión de imágenes juega un papel importante en la delimitación de áreas inundadas y permite mejorar la definición de los límites de las mismas. Aprovechando las bondades que unas u otras imágenes brindan, se puede realizar la fusión de imágenes ópticas e imágenes SAR de polarización VV o VH según la bondad de ajuste. Sin embargo, puede existir la limitación de no contar con imágenes de igual resolución espacial y las mismas épocas de

análisis antes y después del evento. Por lo cual, contar con información de constelaciones satelitales que suministren imágenes para la misma época de análisis, con resolución espacial similar y hallando la mejor polarización, se puede mapear mejor el territorio para detectar áreas inundadas.

Cuando se seleccionan los niveles máximos diarios de agua registrados en las estaciones limnimétricas y limnigráficas que se encuentran a lo largo de los cuerpos de agua y asociados a la época de lluvia. Se obtuvieron 13 estaciones de monitoreo espacialmente distribuidas a lo largo del río Sinú, la ciénaga grande del río Sinú y un punto de control en el municipio de San Bernardo del Viento, cerca de la desembocadura del mar caribe. Se tomó como variable de medición el nivel máximo diario NMD y se encontraron valores de la profundidad medida hasta el lecho del cauce de 7.28 m de profundidad en la estación El Monton localizada en el municipio de Montería dentro del cauce del río Sinú, pasando por valores de profundidad de flujo de 6.59 m, 6.14 m y 6.06 m en las estaciones de Lorica, Cotocá Abajo y Momil localizadas en el municipio de Lorica y Momil, sobre el río Sinú y la ciénaga grande del río Sinú respectivamente. Por último, se identificó la estación La Doctrina y el punto de control con profundidades de 3.65 m y 1.33 m respectivamente en el municipio de San Bernardo del Viento. De lo anterior se puede interpretar que si bien la estación del Monton localizada en la ciudad de Montería registró el mayor valor, este se encontró dentro del cauce del río Sinú sin desbordamiento en esta zona de la subregión, a diferencia de las estaciones localizadas en la intersección del río y la ciénaga donde los valores registrados si generaron desbordamientos e inundaciones que afectaron considerablemente los municipios que son rodeados por los cuerpos de agua y que si bien, en San Bernardo del Viento los valores de los registros de NMD no fueron muy altos, si lo suficiente para afectar este municipio con zonas inundadas. La metodología es respaldada por

(Bhatt & Rao, 2016), quienes para las inundaciones del río Ganga en Uttar Pradesh para el 2010, recolectaron información de la biblioteca de datos hidrológicos que tienen que ver con niveles del río para la época de análisis. De igual forma, (Liang & Liu, 2020), propusieron que los medidores que se encuentran sobre los ríos son útiles ya que proporcionan información de la altura del agua aunque estos se encuentren escasamente distribuidos. Por tal motivo, contar con datos hidrológicos y medidores de alturas de la lámina de agua sobre los ríos y cuerpos de agua, se puede utilizar para generar medidores o mapas de contornos que permitan mediante la interpolación conocer el comportamiento de la lámina de agua a lo largo del territorio. En cuanto a lo que concierne a la ubicación de las estaciones de monitoreo, el no contar con medidores densamente ubicados a lo largo de los cuerpos de agua, siempre limitará la precisión de la información a la escasa existencia de estos medidores.

Al obtener productos que permitieron detectar la profundidad de flujo o inundación asociados a las áreas afectadas para las épocas de lluvia. Se generó un mapa de profundidad de flujo por cada municipio con 4 categorías, con valores que van desde (0.1 a 1 m), (1 a 2 m), (2 a 3 m) y (> a 3 m). Por último, se encontró un área total afectada por la inundación de 22466 ha, siendo los municipios de Lorica, Momil, Chimá y Purisima los más afectados con un área total de 19502 ha, el 86.8 % del total de la afectación por el fenómeno climático. Estos productos permitieron categorizar las profundidades de inundación y el área asociada a la categorización según el código de colores relacionados a una atención y respuesta a la emergencia. Es así como (Dang & Kumar, 2017), durante su investigación combinaron técnicas de teledetección y modelos hidrológicos para la identificación del riesgo de inundaciones en la ciudad de Ho Chi Minh, Vietnam. Los autores categorizaron el riesgo en no problemático y problemático. Al igual (Gao, Shen, Zhou, & Li, 2018), quienes cuando calcularon la extensión y profundidad de

inundación, con sus resultados, proporcionaron un insumo efectivo y eficaz para el trabajo de rescate por los entes competentes. Por lo anterior, contar con un mapa que involucre la profundidad de inundación, su categorización y la extensión hacia las zonas afectadas, se convierte en un insumo de gran ayuda para apoyar y mitigar el impacto de los desastres causados por estos fenómenos. Este estudio podría ser el complemento para generar un análisis de amenaza por inundaciones para futuras investigaciones en esta región del país, ya que se conoce el territorio afectado y su afectación para el año 2022, año que podría ser considerado como base o referencia. De esta forma involucrando la Ilustración 14, se puede establecer las acciones para mitigar el riesgo según los niveles de alerta locales.

9. CONCLUSIONES

En este trabajo se calculó la profundidad de flujo en zonas afectadas por inundaciones presentadas a lo largo del río Sinú y la ciénaga grande del bajo Sinú en la subregión de la sabana colombiana para el año 2022 asociando técnicas de teledetección y los niveles de lámina de agua.

Lo más importante del cálculo realizado cuando se aplicaron las técnicas de sensoramiento remoto, fue el poder conocer las zonas afectadas por las inundaciones la extensión de la afectación; para lo cual, cobró gran relevancia la fusión de imágenes ópticas e imágenes SAR porque permitió detectar de manera muy acertada en la región áreas inundadas cuando se contrastó la época de sequía y la época de lluvia. Lo que más ayudó en el procesamiento digital de imágenes fue hacer uso de la plataforma de para el procesamiento digital Google Earth Engine porque permitió analizar de manera rápida, progresiva y lógica los diferentes procedimientos esperados, facilitando la obtención de los productos necesarios para la fusión de imágenes. Lo más difícil en el cálculo de áreas afectadas durante la fusión de imágenes fue el enmascarar las nubes porque cuando se calculó el NDWI, los valores del índice espectral hallados en ellas, eran muy similares a los encontrados en los cuerpos de agua.

No menos importante durante el proceso para el cálculo de la profundidad de flujo, fue contar con los registros históricos de niveles máximos diarios (NMD) de agua que reporta el IDEAM de las diferentes estaciones limnimétricas y limnigráficas que se encuentran instaladas a lo largo y ancho del río Sinú y la ciénaga grande del bajo Sinú respectivamente porque con los valores de NMD que se reportaron para la época de lluvia, se pudo construir un mapa de niveles máximos alcanzados, asociados a la época acá nombrada y a las elevaciones respecto al nivel medio del mar cuando se complementó con levantamientos batimétricos y procesos de georreferenciación. Sin embargo, existió cierta dificultad durante el proceso de interpolación para la generación del mapa de elevaciones de NMD porque la cantidad de estaciones de

monitoreo actualmente activas, son escasas para la extensión de análisis y se encuentran ampliamente espaciada una de la otra, lo que limita la precisión del modelo generado.

Seguidamente, contar con las áreas afectadas por las inundaciones y el mapa de elevaciones de NMD fue muy importante para el cálculo de la profundidad de flujo porque cuando se realizó el proceso de superposición de los productos antes mencionados, se logró limitar de manera eficaz la problemática de inundación en cuanto a extensión territorial se refiere con los niveles de agua alcanzados. Siendo de mucha ayuda como complemento en la superposición de productos, el emplear un modelo digital de superficie DSM porque permitió conocer la profundidad de flujo o inundación alcanzada en las zonas afectadas cuando se realizó la diferencia de los niveles máximos de agua y la elevación calculada en el mismo punto del modelo digital de superficie. Durante este proceso, lo más difícil se encontró en la validación de la precisión del DSM ya que estos productos cuentan con una resolución espacial media y pueden generar diferencias respecto al datum de elevación de la región. Sin embargo, con el fin de verificar los resultados encontrados del DSM, se verificó su precisión mediante un proceso de comparación y validación empleando como validador el error medio cuadrático EMC, tomando como referencia las elevaciones de los vértices de la red pasiva del IGAC identificados dentro del área de estudio; de esta forma se pudo conocer la precisión del DSM.

Por último, se pudo calcular la profundidad de flujo para los 8 municipios seleccionados en la subregión de la sabana cordobesa, permitiendo mapear el territorio y generar unos productos en los cuales se identifican las áreas afectadas por las inundaciones presentadas en el año 2022 entre los meses de julio y octubre. Adicionalmente, se detectó la extensión territorial afectada y la reclasificación de las profundidades de flujo alcanzadas desde la lámina de agua hasta el lecho de la superficie.

10. REFERENCIAS

- Abdelkarim, A., Gaber, A. F., & Youssef, A. M. (2019). Flood hazard assessment of the urban area of Tabuk City, Kingdom of Saudi Arabia by integrating spatial-based hydrologic and hydrodynamic modeling. *Sensors*, 19(5), 1024.
- Acharya, T. D., Subedi, A., & Lee, D. H. (2018). Evaluation of water indices for surface water extraction in a Landsat 8 scene of Nepal. *Nepal. Sensors*, 18(8), 2580.
<https://doi.org/10.3390/s18082580>.
- Agnihotri, A. K., Ohri, A., Gaur, S., Shivam, D. N., & Mishra, S. (2019). Flood inundation mapping and monitoring using SAR data and its impact on Ramganga River in Ganga basin. *Environmental monitoring and assessment.*, 191, 1-16.
<https://doi.org/10.1007/s10661-019-7903-4>.
- Alfieri, L., Burek, P. D., Krzeminski, B., Muraro, D., Thielen, J., & Pappenberger, F. (2013). GloFAS—global ensemble streamflow forecasting and flood early warning. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(3), 1161-1175. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1161-2013>.
- ALOS. (2022). *JAXA, Centro de Investigación de Observación de la Tierra*. Obtenido de https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm
- Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S. A., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S. M., & Brisco, B. (2020). Google earth engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: A comprehensive review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 5326-5350. doi: 10.1109/JSTARS.2020.3021052.

- Amaya, D. P., Hernandez, N. A., & Prado, M. L. (2018). Determinación de cambio climático y su registro en los procesos de colmatación en las ciénagas continentales (VVM ejemplo de caso). *BISTUA Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 16(1), 97-102. <https://doi.org/10.24054/01204211.v1.n1.2018.551>.
- Anusha, N., & Bharathi, B. (August de 2020). Flood detection and flood mapping using multi-temporal synthetic aperture radar and optical data. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(2), 273-281. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2019.01.001>.
- Aragón-Hernández, J. L., Aguilar-Martínez, G. A., Velázquez-Ríos, U., Jiménez-Magaña, M. R., & Maya-Franco, A. (2019). Distribución espacial de variables hidrológicas. Implementación y evaluación de métodos de interpolación. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 20(2), 0-0. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n2.023>.
- Arenas, S., Haeger, J. F., & Jordano, D. (2011). Aplicación de técnicas de teledetección y GIS sobre imágenes Quickbird para identificar y mapear individuos de peral silvestre (*Pyrus bourgeana*) en bosque esclerófilo mediterráneo. *Revista de teledetección*, 35, 55-71.
- Bhatt, C. M., & Rao, G. S. (2016). Ganga floods of 2010 in Uttar Pradesh, north India: a perspective analysis using satellite remote sensing data. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(2), 747-763. <https://doi.org/10.1080/19475705.2014.949877>.
- Chow, V. T. (1988). *Hidrología Aplicada, 1a ed.* Nueva York, Ny, Estados Unidos: McGraw-Hill:.
- Clement, M. A., & Kilsby, C. G. (2018). Multi-temporal synthetic aperture radar flood mapping using change detection. *Journal of Flood Risk Management*, 11(2), 152-168. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12303>.

- Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge –CVS. (2020). 206 *puntos criticos por erosión e inundación en la cuenca del río Sinú*. Obtenido de <https://cvs.gov.co>.
- Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge – CVS. (2014). *Informe sobre las amenazas de erosión fluvial e inundaciones de la cuenca del río Sinú, departamento de Córdoba*. Subdirección de Gestión Ambiental, Grupo de Gestión del Riesgo. Montería - Córdoba - Colombia.
- Coulson, M. R. (1987). In the matter of class intervals for choropleth maps: with particular reference to the work of George F Jenks. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 24(2), 16-39. DOI: 10.3138/U7X0-1836-5715-3546.
- Crews, K. A., & Peralvo, M. F. (2008). Segregation and fragmentation: Extending landscape ecology and pattern metrics analysis to spatial demography. *Population Research and Policy Review*, 27, 65-88. <https://doi.org/10.1007/s11113-007-9054-5>.
- CVS, C. A.-P. (2004). *Diagnóstico Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del Río Sinú. Delimitación, Extensión, Localización y Situación Ambiental*. Obtenido de <https://cvs.gov.co>.
- Dang, A. T., & Kumar, L. (2017). Application of remote sensing and GIS-based hydrological modelling for flood risk analysis: a case study of District 8, Ho Chi Minh city, Vietnam. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1792-1811. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1388853>.

- Domeneghetti, A., Schumann, G. J.-P., & Tarpanelli, A. (2019). Preface: Remote sensing for flood mapping and monitoring of flood dynamics. *Remote Sensing*, 11(8), 943.
<https://doi.org/10.3390/rs11080943>. doi:10.3390/rs11080943
- Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W., & Li, X. (2016). Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band. *Remote Sensing*, 8(4), 354.
<https://doi.org/10.3390/rs8040354>.
- Echeverri-Díaz, J., Coronado-Hernández, Ó. E., Gatica, G. L., & Méndez-Anillo, R. D.-H. (2022). Sensitivity of Empirical Equation Parameters for the Calculation of Time of Concentration in Urbanized Watersheds. *Water*, 14(18), 2847.
<https://doi.org/10.3390/w14182847>.
- Elhag, M., & Abdurahman, S. G. (2020). Advanced remote sensing techniques in flash flood delineation in Tabuk City, Saudi Arabia. *Natural Hazards*, 103(3), 3401-3413.
<https://doi.org/10.1007/s11069-020-04135-0>.
- Elkhrachy. (2015). Flash flood hazard mapping using satellite images and GIS tools: a case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA). *he Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(2), 261-278. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.06.007>.
- Erazo, C. R., & Obando, G. A. (2019). Actualización de la cobertura de suelo mediante teledetección para la estimación del umbral de escorrentía en la Cuenca del Río Chimborazo. *Ciencia Digital*, 3(2.6), 39-59.
<https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i2.6.517>.

- Escamilla, B. A., & López, Á. L. (2017). Zonas con potencial agroturístico en la región citrícola de Nuevo León, México: un análisis a partir del álgebra de mapas. *Cuadernos de Turismo*, (39), 17-40. <https://doi.org/10.6018/turismo.39.290371>.
- FAO Map Catalog. (2015). Obtenido de <https://data.apps.fao.org/map/catalog/srv/eng/catalog.search?id=12691#/home>
- Fuentes, J. E., Bolaños, J. A., & Rozo, D. M. (2012). Modelo digital de superficie a partir de imágenes de satélite Ikonos para el análisis de áreas de inundación en Santa Marta, Colombia. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 251-266. <http://hdl.handle.net/1834/6679>.
- Gao, W., Shen, Q., Zhou, Y., & Li, X. (2018). Analysis of flood inundation in ungauged basins based on multi-source remote sensing data. *Environmental monitoring and assessment*, 190, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6499-4>.
- González, M. L., Escobar, Y. C., & Jiménez, H. (2007). La gestión integrada de los recursos hídricos como estrategia de adaptación al cambio climático. *Ingeniería y competitividad*, 9(1), 19-29. <https://doi.org/10.25100/iyc.v9i1.2492>.
- Gui, R., Song, W., Pu, X., Lu, Y., Liu, C., & Chen, L. (2022). A river channel extraction method based on a digital elevation model retrieved from satellite imagery. *Water*, 14(15), 2387. <https://doi.org/10.3390/w14152387>.
- Guía Metodológica Estrategias Territoriales para la Respuesta a Emergencias. (2018). Obtenido de <http://www.gestiondelriesgo.gov.co>.
- Gulácsi, A., & Kovács, F. (2015). Drought monitoring with spectral indices calculated from MODIS satellite images in Hungary. *Journal of Environmental Geography*, 8(3-4), 11-20. <https://doi.org/10.1515/jengeo-2015-0008>.

- Guzmán, D., Ruiz, J. F., & Cadena, M. (2014). Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través análisis de componentes principales (ACP). *IDEAM: Bogotá, Colombia*, <http://dhime.ideam.gov.co>.
- Huang, M., & Jin, S. (2020). Rapid flood mapping and evaluation with a supervised classifier and change detection in shouguang using sentinel-1 sar and sentinel-2 optical data. *Remote Sensing*, 12(13), 2073. <https://doi.org/10.3390/rs12132073>.
- Hussain, M., Chen, D., Cheng, A., Wei, H., & Stanley, D. (2013). Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 80, 91-106. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.03.006>.
- Hydrosheds. (2022). <https://www.hydrosheds.org/>.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2022). Obtenido de <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. (2022). Obtenido de <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-geodesia>.
- Klemas, V. V. (2015). Coastal and environmental remote sensing from unmanned aerial vehicles: An overview. *Journal of coastal research*,, 1260-1267. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00005.1>.
- Labs, NICFI Program - Satellite Imagery and Monitoring - Planet. (2022). Obtenido de https://asse.planet.com/docs/NICFI_Basemap_Spec_Addendum.pdf
- Lasso, C. A., Morales-Betancourt, M. A., González-Cañón, G., Ajiaco-Martínez, R. E., Valderrama Barco, M., Hernández Barrero, S., & Zapata-Padilla, L. A. (2011). II. Pesquerías continentales de Colombia: cuencas del Magdalena-Cauca, Sinú, Canalete,

- Atrato, Orinoco, Amazonas y vertiente del Pacífico. *Comunicaciones del III Coloquio de la Red de Investigación Sobre la Ictiofauna Amazónica-RIIA*, 52.
- Liang, J., & Liu, D. (2020). Estimating Daily Inundation Probability Using Remote Sensing, Riverine Flood, and Storm Surge Models: A Case of Hurricane Harvey. *Remote Sensing*, 12(9), 1495. <https://doi.org/10.3390/rs12091495>.
- Marchionni, D. S., & Cavayas, F. (2014). La teledetección por radar como fuente de información litológica y estructural: Análisis espacial de imágenes SAR de RADARSAT-1. *Geoacta*, 39(1), 62-89. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/74667>.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International journal of remote sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.
- Monterroso-Tobar, M. F., Londoño-Bonilla, J. M., & Samsonov, S. (2018). Determination of glacier retreat at Nevado del Ruiz, Santa Isabel and Tolima volcanoes, Colombia through optical image and Din-SAR. *Dyna*, 85(206), 329-337. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.66570>.
- Morsy, S., Shaker, A., El-Rabbany, A., & LaRocque, P. E. (2016). Airborne multispectral lidar data for land-cover classification and land/water mapping using different spectral indexes. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3, 217-224. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-3-217-2016>.
- Muñoz Artigues, J. (2020). Plataforma para la adquisición, procesado y extracción de información de un radar.

Pandey, P., Kington, J., Kanwar, A., & Curdoglo, M. A. (2021). *Addendum to Planet Basemaps Product Specifications: NICFI Basemaps*, Tech. rept. Revision: v02. Planet Labs.

Obtenido de https://assets.planet.com/docs/NICFI_Basemap_Spec_Addendum.pdf

Pekel, J. F., Cottam, A. G., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418-422.

<https://doi.org/10.1038/nature20584>.

Quiroga Olarte, L. J. (2018). Análisis de detección de cambios en el espacio empleando interpretación de imágenes satelitales y estadística espacial. *Escuela de Posgrados*, <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69853>.

Rahman, M. R., & Thakur, P. K. (2018). Detecting, mapping and analysing of flood water propagation using synthetic aperture radar (SAR) satellite data and GIS: A case study from the Kendrapara District of Orissa State of India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21, S37-S41. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.10.002>.

Rahman, M. S., & Di, L. (Jan de 2017). The state of the art of spaceborne remote sensing in flood management. *Natural Hazards*, 85(2), 1223-1248. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2601-9>. doi:DOI 10.1007/s11069-016-2601-9

Rao, R. S. (1994). Role of remote sensing in flood management-the May 1990 cyclone.

International Journal of Remote Sensing, 15(8), 1557-1558.

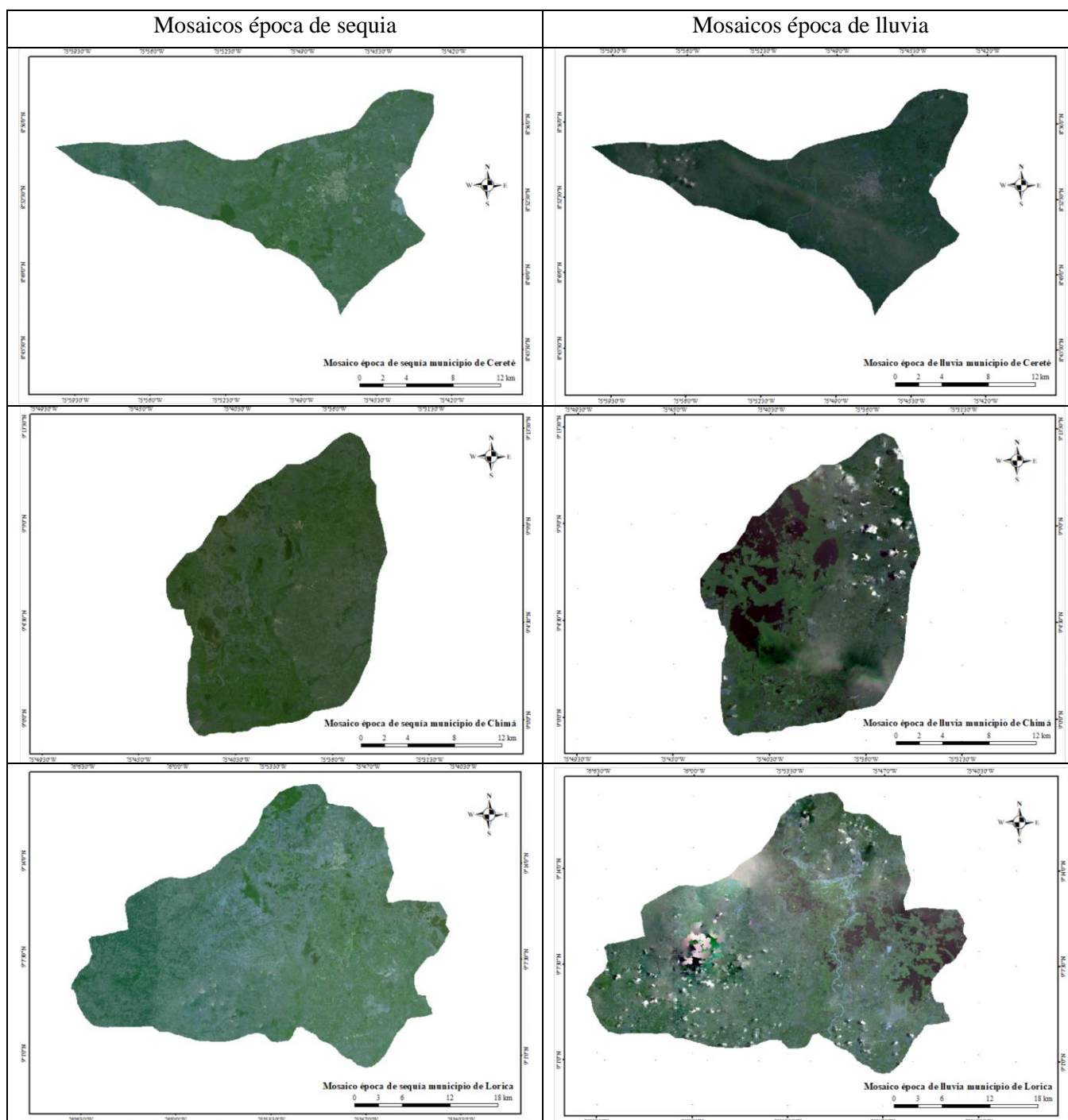
<https://doi.org/10.1080/01431169408954190>.

Ruiz Fernández, L. Á., Rey Pérez, A. D., Estornell Cremades, J., & Ruiz Marín, R. (2007). La teledetección como herramienta de análisis del crecimiento urbano y su representación en 3D. *ACE: Arquitectura, Ciudad y Entorno*, núm. 4, Junio 2007. DOI: 10.5821/ace.v2i4.2396.

- SAC, A. T. (2018). *Plan de conservación de estaciones limnimétricas e hidrometeorológicas del Proyecto Hidrovías Amazónicas del Perú*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4347>
- Sánchez, L., & Martínez, W. (1997). Guía Metodológica para la obtención de alturas sobre el nivel medio del mar utilizando sistemas GPS. *Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi*, <https://www.igac.gov.co>.
- Sandholt, I., Nyborg, L., Fog, B., Lô, M., Bocoum, O., & Rasmussen, K. (2003). Remote sensing techniques for flood monitoring in the Senegal River Valley. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 103(1), 71-81. <https://doi.org/10.1080/00167223.2003.10649481>.
- Sanyal, J., & Lu, X. X. (2004). Application of remote sensing in flood management with special reference to monsoon Asia: a review. *Natural Hazards*, 33(2), 283-301. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000037035.65105.95>.
- Sasia, A. D., Cisneros, J. M., Gutiérrez, A. C., & Camarasa, A. (2002). Las inundaciones en la provincia de Córdoba (Argentina) y las tecnologías de información geográfica: ejemplos de aplicación. *Serie Geográfica*, (10), 143-163. [oai:dSPACE.uah.es:10017/1168](https://oai.dspace.uah.es/10017/1168).
- Thirumurugan, P., & Krishnaveni, M. (2019). Flood hazard mapping using geospatial techniques and satellite images—a case study of coastal district of Tamil Nadu. *Environmental monitoring and assessment*, 191, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7327-1>.
- Twele, A., Cao, W., Plank, S., & Martinis, S. (2016). Sentinel-1-based flood mapping: a fully automated processing chain. *International Journal of Remote Sensing*, 37(13), 2990-3004. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1192304>.

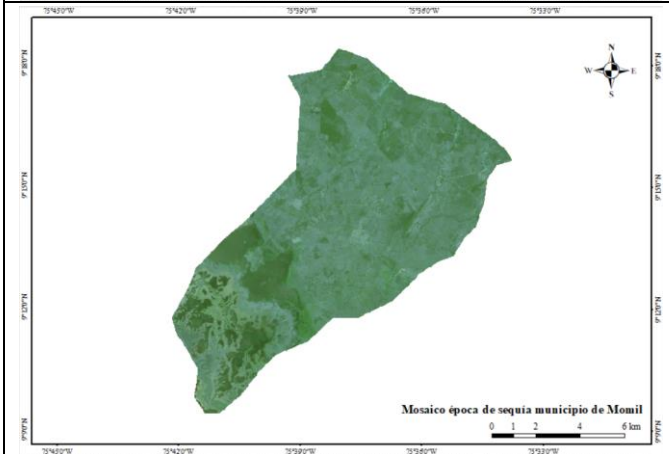
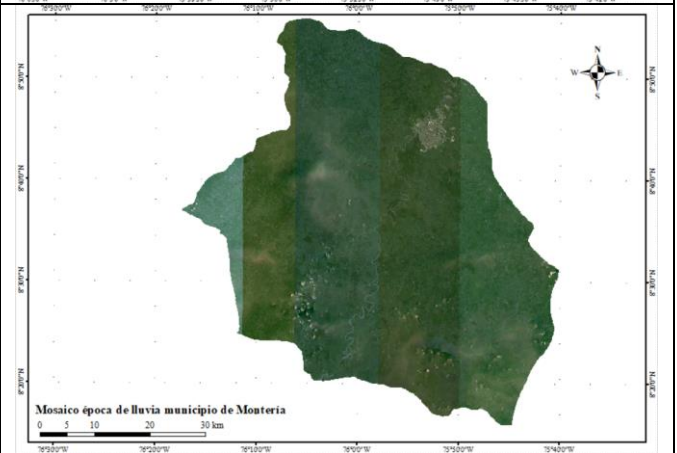
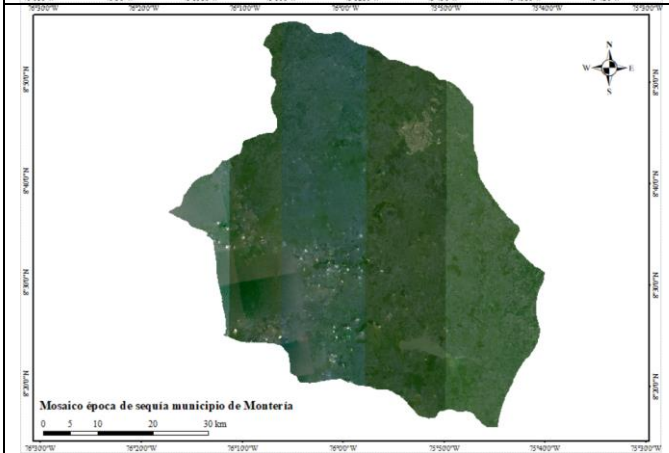
- Vargas, A., Santos, A. N., Cárdenas, E., & Obregón, N. (2011). Análisis de la distribución e interpolación espacial de las lluvias en Bogotá, Colombia. *Dyna*, 78(167), 151-159. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/37792>.
- Voigt, S. M., & Schneiderhan, T. (2009). Extraction of flood masks using satellite based very high resolution SAR data for flood management and modeling. *RIMAX Contributions at the 4th International Symposium on Flood Defence (ISFD4)*. Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ.
- Yonghong, Y., Xiuwan, C. H., & Huan, W. (2005). An algorithm for inundated depth calculation of flood based on remotely sensed data. *Geography and Geo-Information Science*, 21(3), 26-29.
- Yuan, C., Wang, F., Wang, S., & Zhou, Y. (2019). Accuracy evaluation of flood monitoring based on multiscale remote sensing for different landscapes. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 1389-1411. <https://doi.org/10.1080/19475705.2019.1580224>.

Anexo 1 Mosaicos analíticos normalizados a nivel de reflectancia superficial



Mosaicos época de sequia

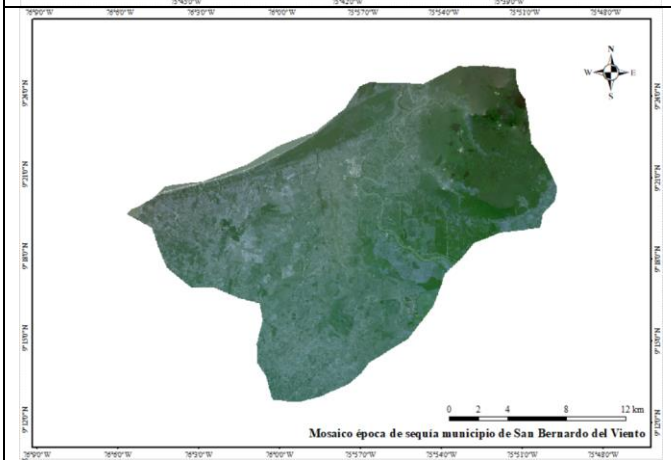
Mosaicos época de lluvia



Mosaicos época de sequia



Mosaicos época de lluvia

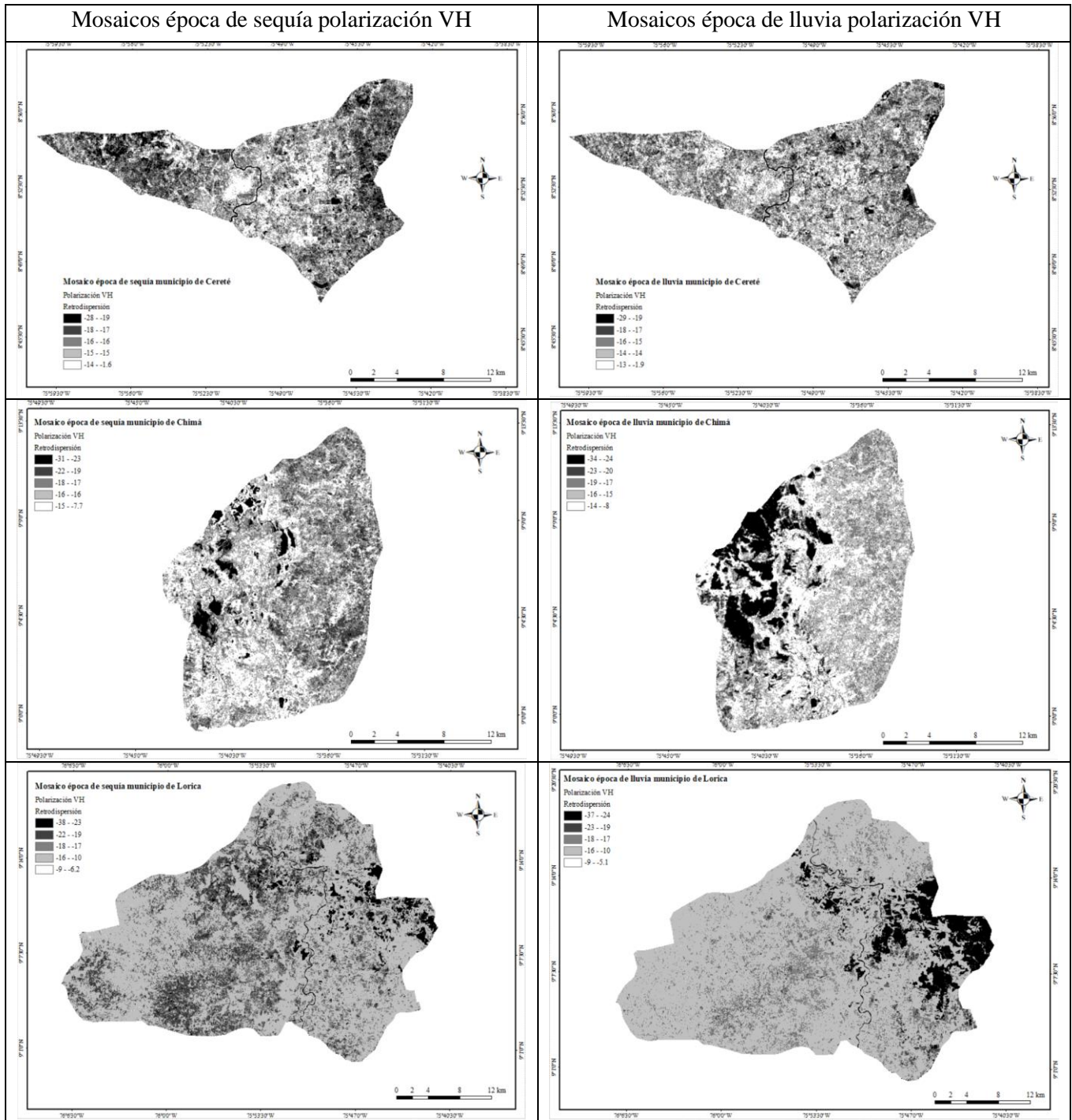


Anexo 2 Colección de imágenes SAR municipio de Montería

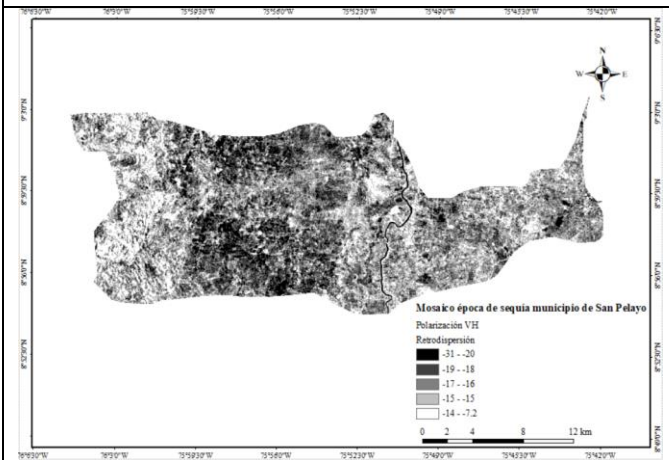
Orbita descendente polarización VV y VH			
1	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220223T105012_20220223T105037_042039_0501F5_34B6		
2	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220223T105037_20220223T105102_042039_0501F5_68C5		
3	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220307T105012_20220307T105037_042214_0507E4_D0DA		
4	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220307T105037_20220307T105102_042214_0507E4_35E5		
5	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220319T105012_20220319T105037_042389_050DD3_CF3C		
6	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220319T105037_20220319T105102_042389_050DD3_DEA7	Época de sequía	
7	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220331T105012_20220331T105037_042564_0513C4_7E69		
8	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220331T105037_20220331T105102_042564_0513C4_6FBC		
9	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220412T105012_20220412T105037_042739_0519A4_2C4C		
10	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220412T105037_20220412T105102_042739_0519A4_C01A		
11	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220424T105013_20220424T105038_042914_051F76_A82C		
12	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220424T105038_20220424T105103_042914_051F76_FE7F		
13	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220705T105018_20220705T105042_043964_053F7D_0D4C		
14	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220705T105043_20220705T105107_043964_053F7D_77DE		
15	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220717T105018_20220717T105043_044139_0544BD_721C		
16	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220717T105043_20220717T105108_044139_0544BD_CE79		
17	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220729T105019_20220729T105044_044314_0549E3_EDD8		
18	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220729T105044_20220729T105109_044314_0549E3_3F7A		
19	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220810T105020_20220810T105045_044489_054F1C_A0A5		
20	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220810T105045_20220810T105110_044489_054F1C_C742	Época de lluvia	
21	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220822T105020_20220822T105045_044664_0554FD_CADA		
22	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220822T105045_20220822T105110_044664_0554FD_BBA8		
23	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220903T105021_20220903T105046_044839_055AE6_46FB		
24	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220903T105046_20220903T105111_044839_055AE6_6143		
25	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220915T105021_20220915T105046_045014_0560C5_5C5D		
26	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220915T105046_20220915T105111_045014_0560C5_BF84		
27	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220927T105022_20220927T105047_045189_0566AB_72A0		
28	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220927T105047_20220927T105112_045189_0566AB_7F33		
Orbita ascendente polarización VV y VH			
1	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220204T232332_20220204T232401_041770_04F889_B523		
2	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220216T232307_20220216T232336_041945_04FEB1_F648		
3	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220216T232336_20220216T232401_041945_04FEB1_EC29		
4	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220223T231500_20220223T231529_042047_050233_A5AF		
5	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220223T231529_20220223T231554_042047_050233_7B20		
6	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220228T232307_20220228T232336_042120_0504AE_70D3		
7	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220228T232336_20220228T232401_042120_0504AE_8762		
8	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220307T231500_20220307T231529_042222_050824_3145		
9	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220307T231529_20220307T231554_042222_050824_B8F5		
10	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220312T232307_20220312T232336_042295_050AA1_6EB7		
11	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220312T232336_20220312T232401_042295_050AA1_3570		
12	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220319T231500_20220319T231529_042397_050E11_D9C2		

13	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220319T231529_20220319T231554_042397_050E11_6D24	
14	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220324T232307_20220324T232336_042470_051095_E3AB	
15	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220324T232336_20220324T232401_042470_051095_6578	
16	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220331T231500_20220331T231529_042572_0513FD_E6AF	
17	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220331T231529_20220331T231554_042572_0513FD_12F0	
18	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220405T232308_20220405T232337_042645_051681_C458	
19	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220405T232337_20220405T232402_042645_051681_6FBD	
20	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220412T231500_20220412T231529_042747_0519E5_E44B	
21	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220412T231529_20220412T231554_042747_0519E5_0015	
22	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220417T232308_20220417T232337_042820_051C62_009B	
23	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220417T232337_20220417T232402_042820_051C62_6D7C	
24	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220429T232309_20220429T232338_042995_05221D_B463	
25	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220429T232338_20220429T232403_042995_05221D_7F62	
<hr/>		
26	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220705T231506_20220705T231535_043972_053FB5_36AA	
27	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220705T231535_20220705T231600_043972_053FB5_BAC8	
28	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220710T232313_20220710T232342_044045_0541E3_5E98	
29	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220710T232342_20220710T232407_044045_0541E3_4F65	
30	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220717T231506_20220717T231536_044147_0544F3_30F1	
31	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220717T231536_20220717T231601_044147_0544F3_A439	
32	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220722T232314_20220722T232343_044220_05471D_B873	
33	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220722T232343_20220722T232408_044220_05471D_4F2B	
34	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220729T231507_20220729T231536_044322_054A1D_3B9E	
35	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220729T231536_20220729T231601_044322_054A1D_7ADC	
36	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220803T232315_20220803T232344_044395_054C49_632D	
37	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220803T232344_20220803T232409_044395_054C49_37F9	
38	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220810T231508_20220810T231537_044497_054F59_ABB9	
39	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220810T231537_20220810T231602_044497_054F59_9A03	Época de lluvia
40	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220815T232316_20220815T232345_044570_0551CB_9F70	
41	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220815T232345_20220815T232410_044570_0551CB_EA21	
42	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220822T231509_20220822T231538_044672_05553D_3ACA	
43	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220822T231538_20220822T231603_044672_05553D_OCAB	
44	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220827T232316_20220827T232345_044745_0557B6_3586	
45	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220827T232345_20220827T232410_044745_0557B6_FEEF	
46	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220903T231509_20220903T231538_044847_055B26_A45A	
47	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220903T231538_20220903T231603_044847_055B26_4C8D	
48	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220915T231509_20220915T231539_045022_056105_76FE	
49	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220915T231539_20220915T231604_045022_056105_9ECC	
50	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220920T232316_20220920T232345_045095_056380_5461	
51	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220920T232345_20220920T232410_045095_056380_FFC0	
52	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220927T231510_20220927T231539_045197_0566EA_4AE8	
53	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220927T231539_20220927T231604_045197_0566EA_59CA	

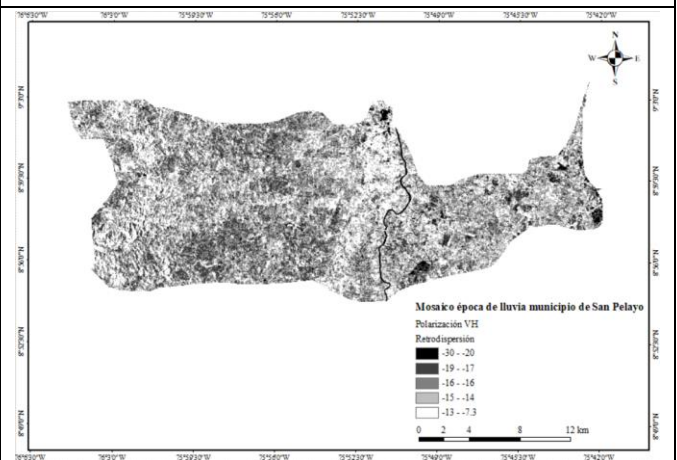
Anexo 3 Mosaicos empleando imágenes SAR polarización VH



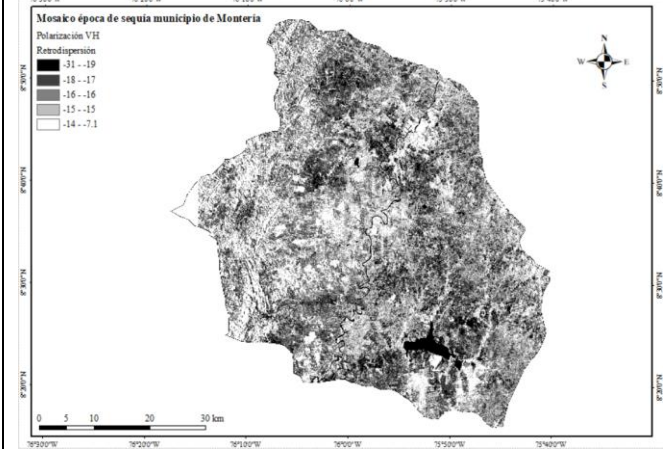
Mosaicos época de sequía polarización VH



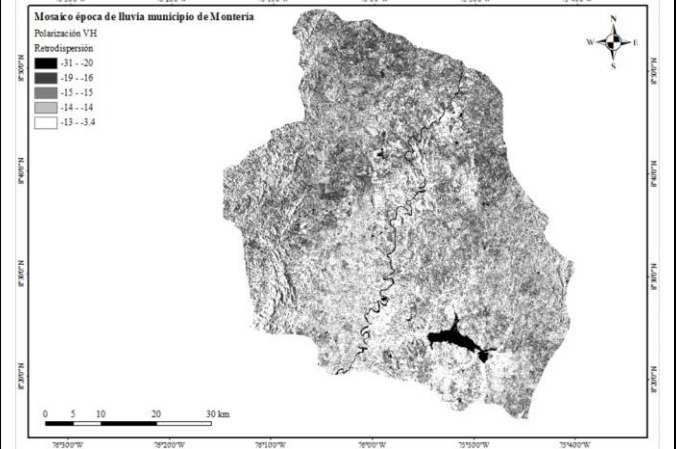
Mosaicos época de lluvia polarización VH



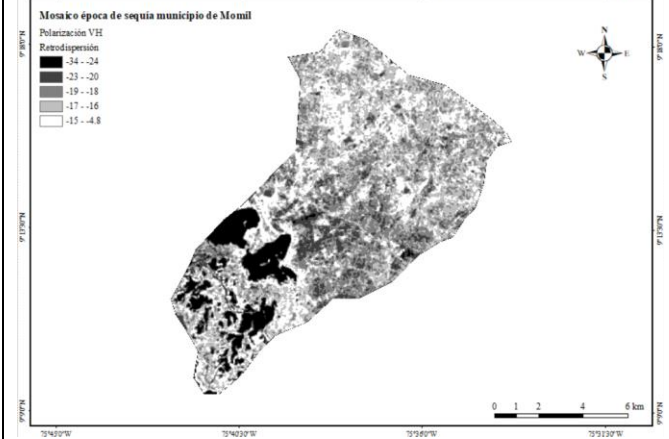
Mosaico época de sequía municipio de Montería



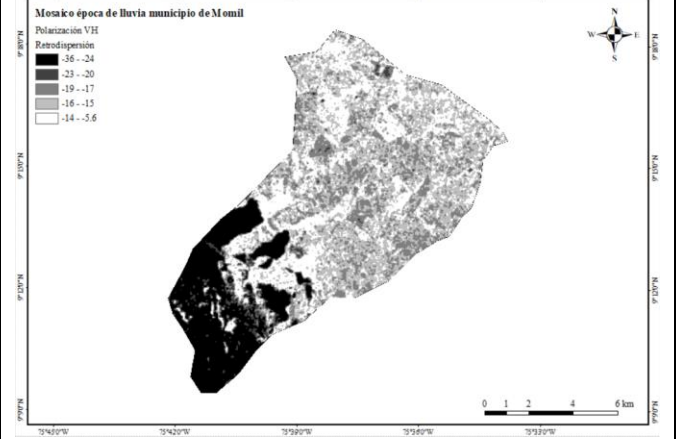
Mosaico época de lluvia municipio de Montería



Mosaico época de sequía municipio de Momil

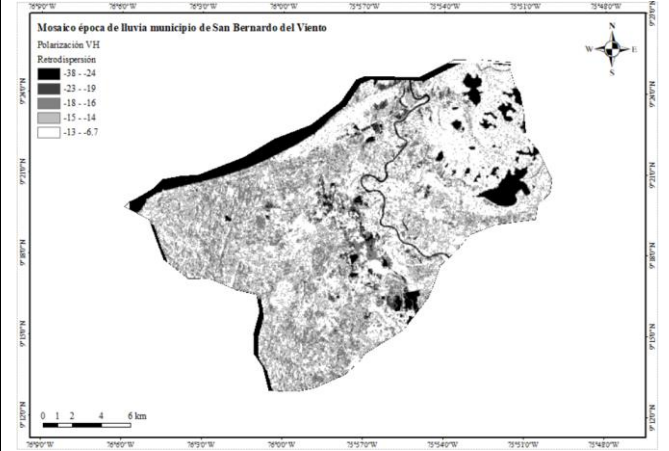
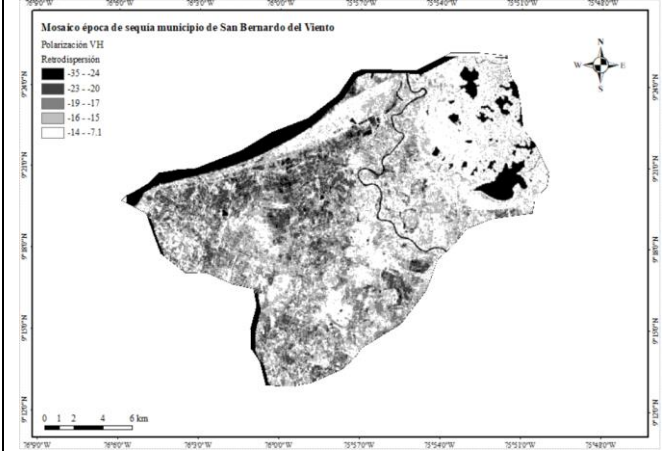


Mosaico época de lluvia municipio de Momil

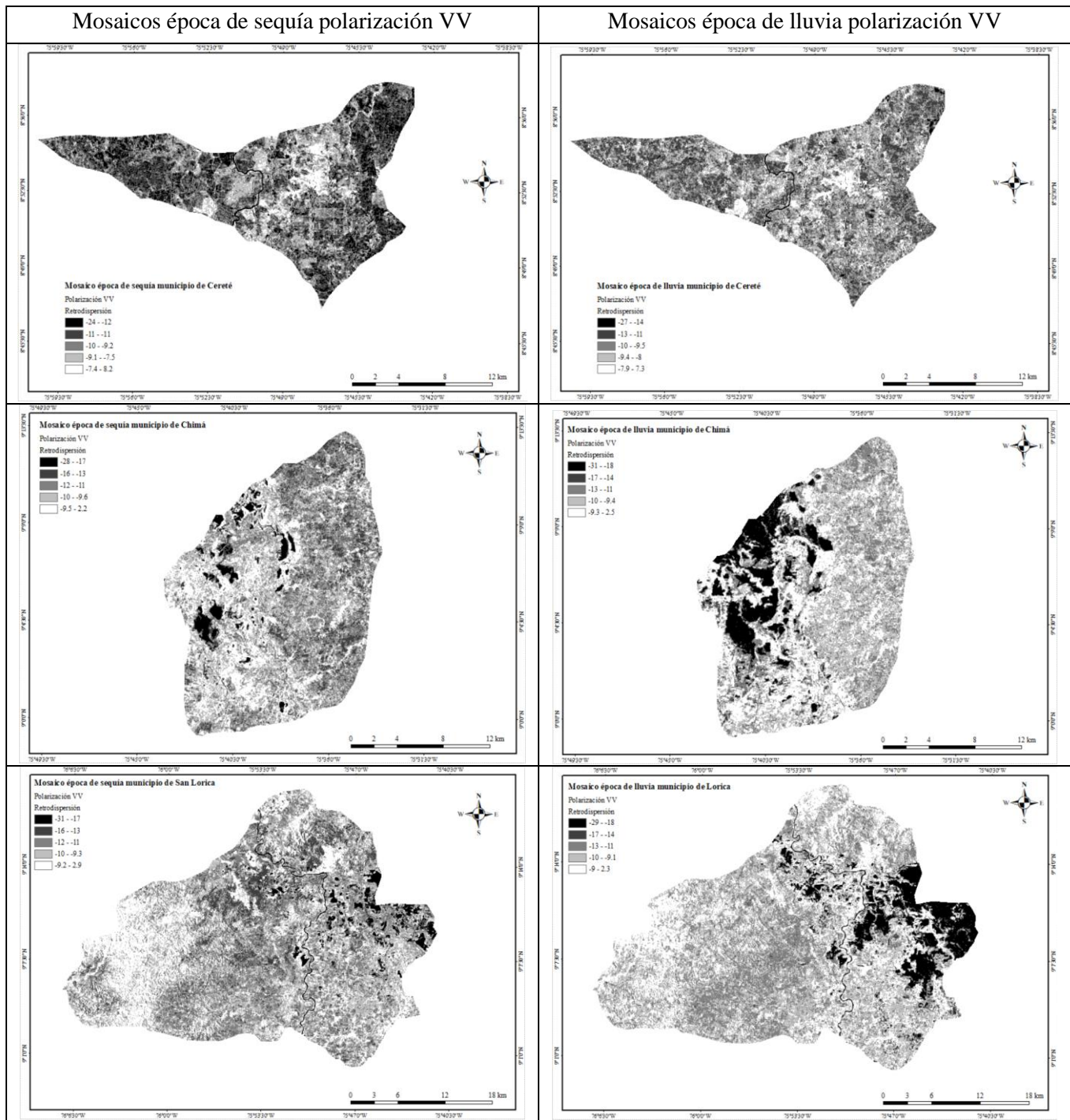


Mosaicos época de sequía polarización VH

Mosaicos época de lluvia polarización VH

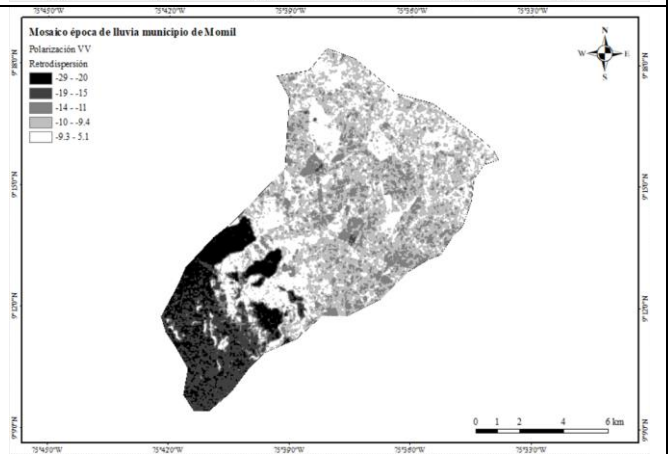
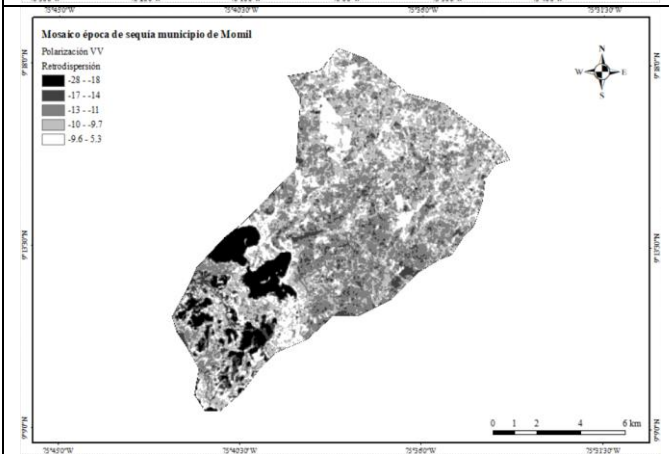
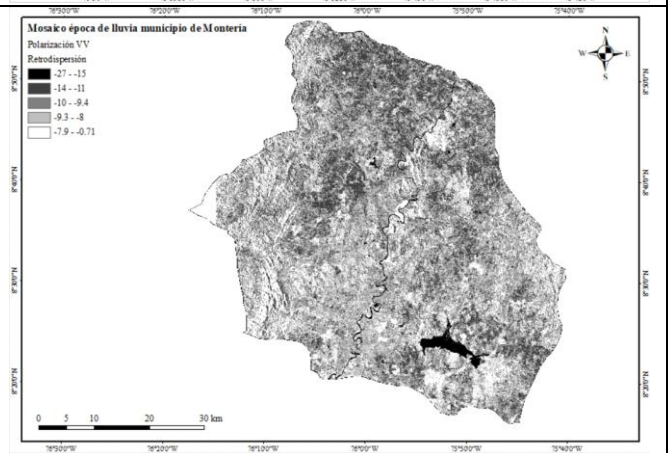
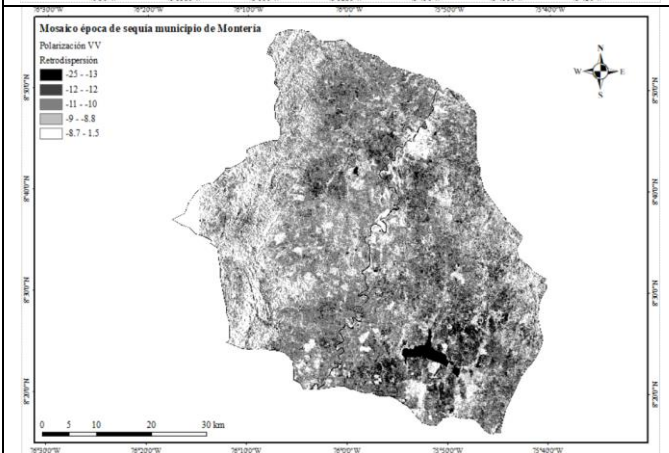
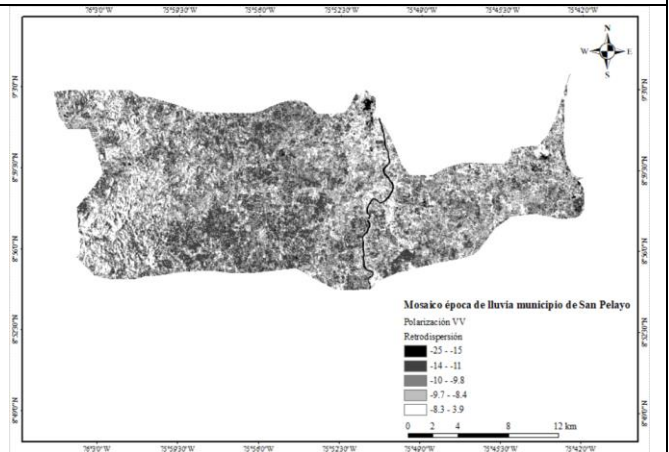
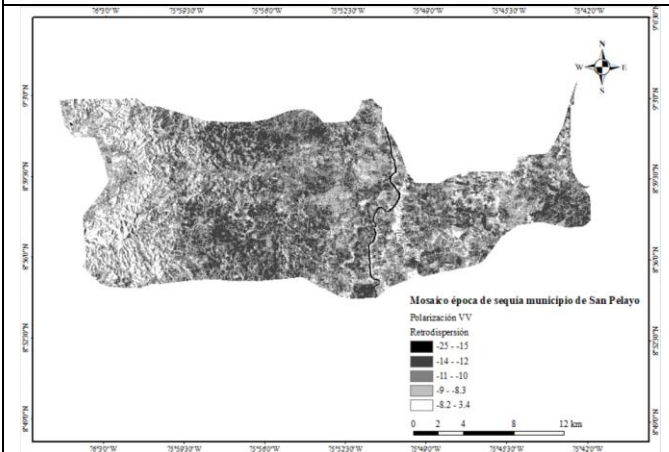


Anexo 4 Mosaicos empleando imágenes SAR polarización VV



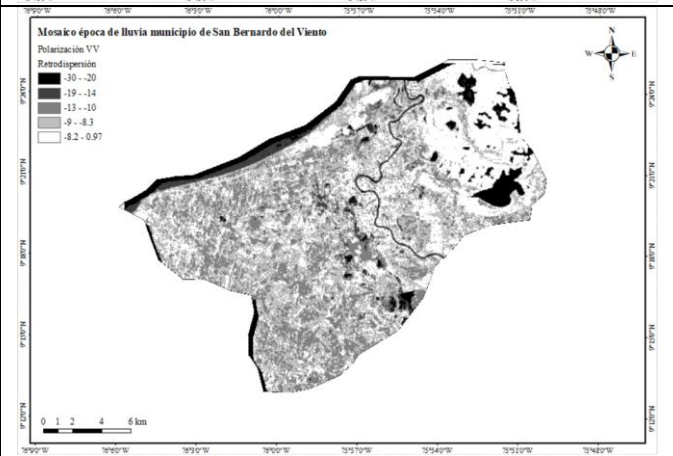
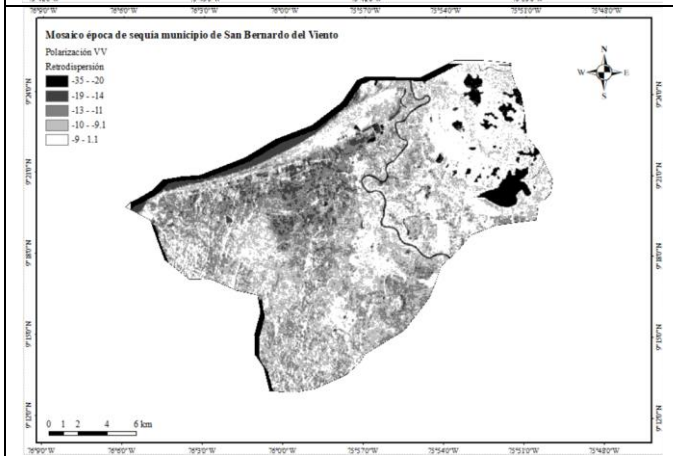
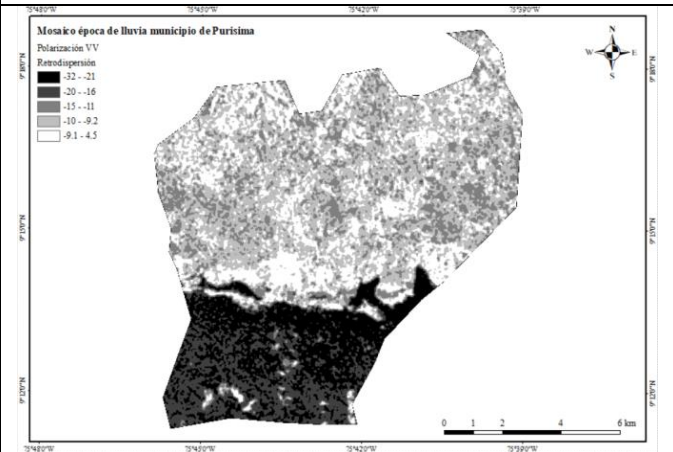
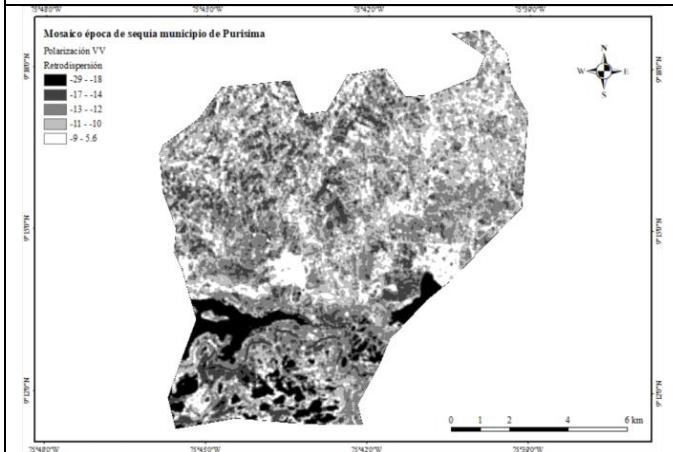
Mosaicos época de sequía polarización VV

Mosaicos época de lluvia polarización VV

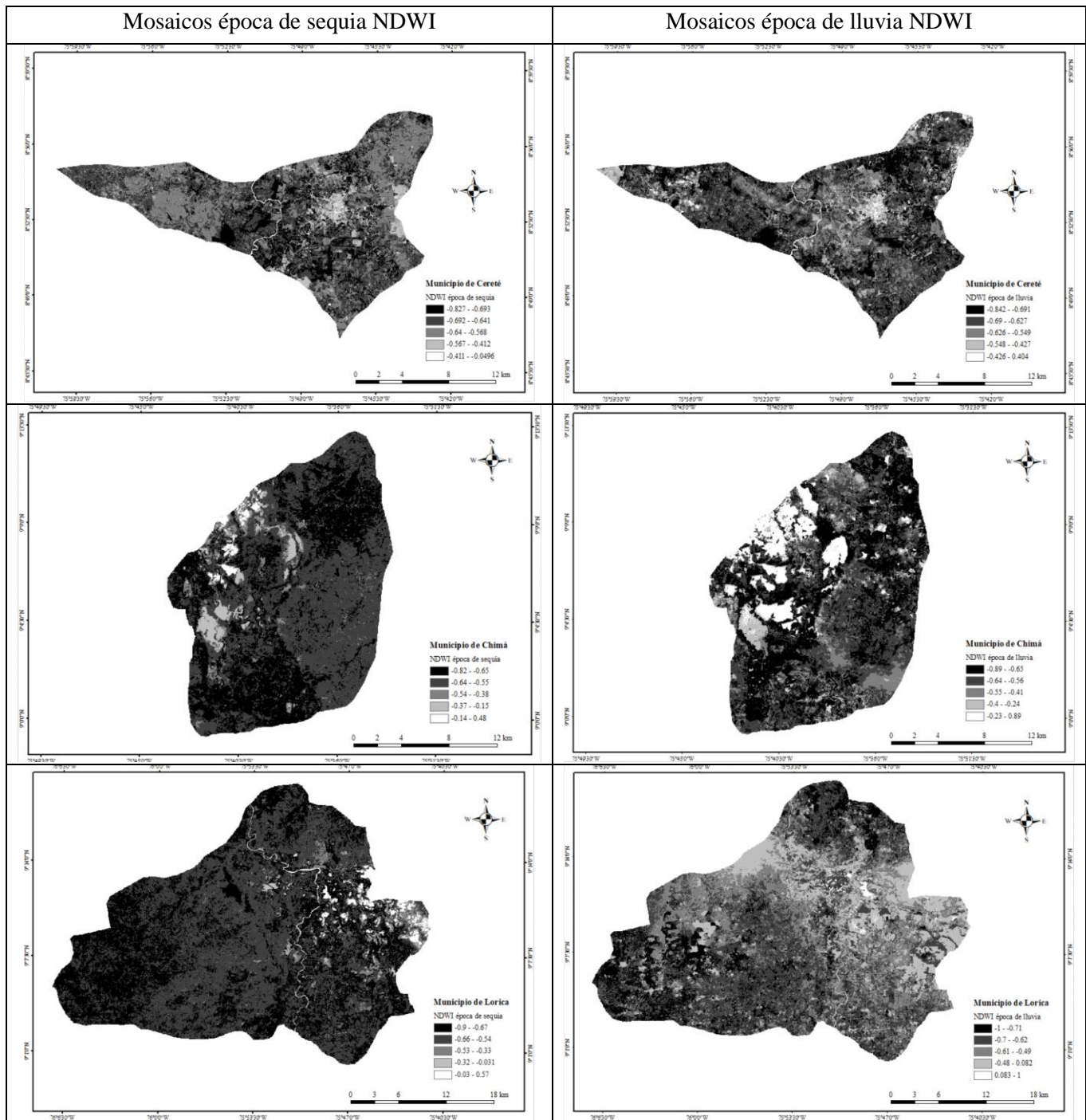


Mosaicos época de sequía polarización VV

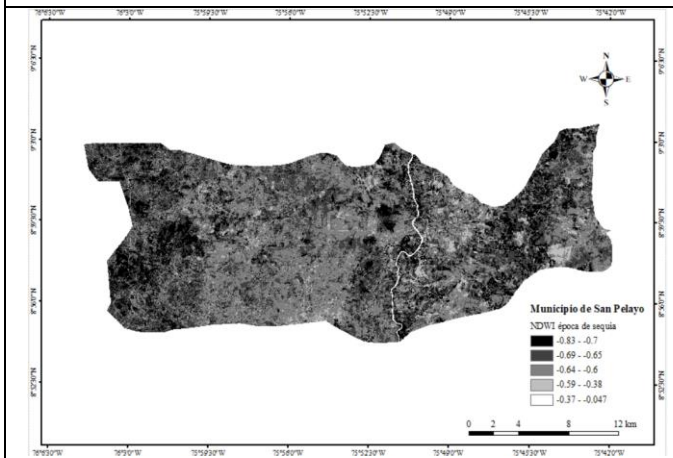
Mosaicos época de lluvia polarización VV



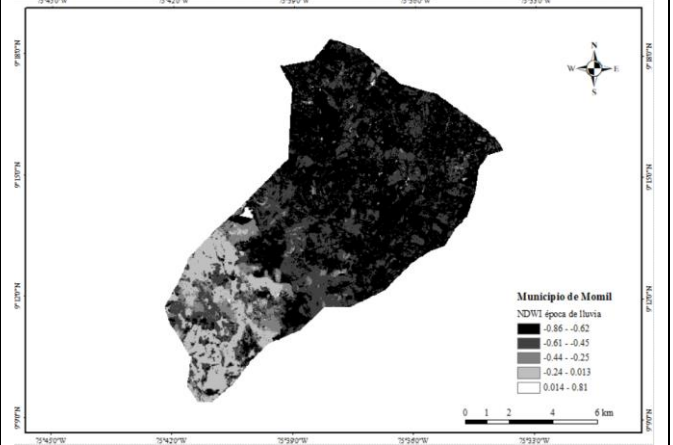
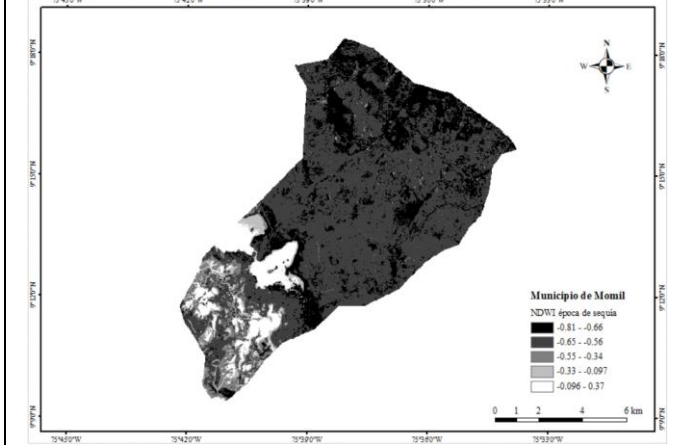
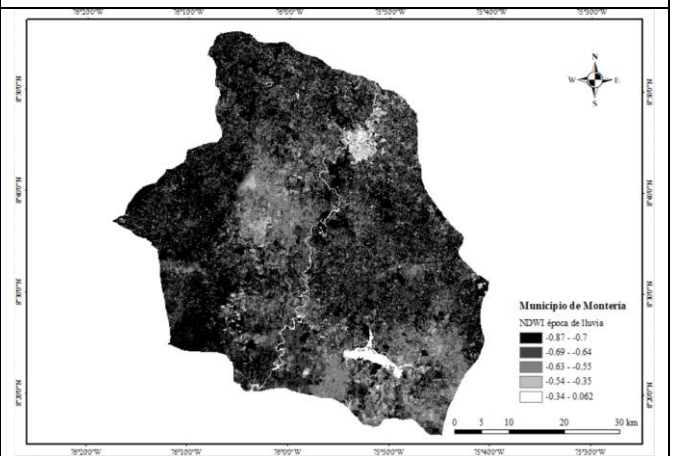
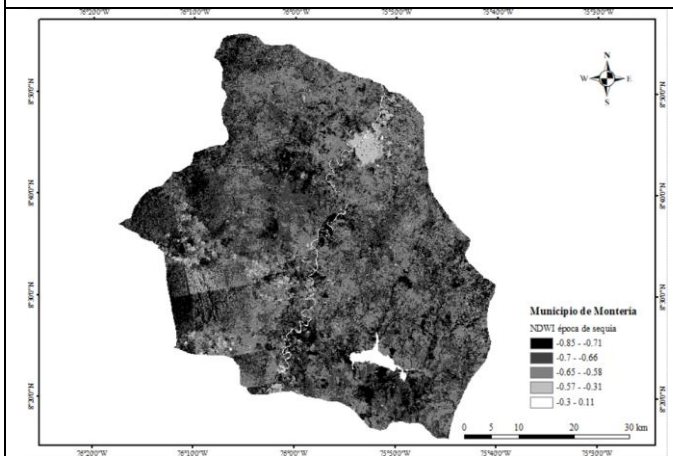
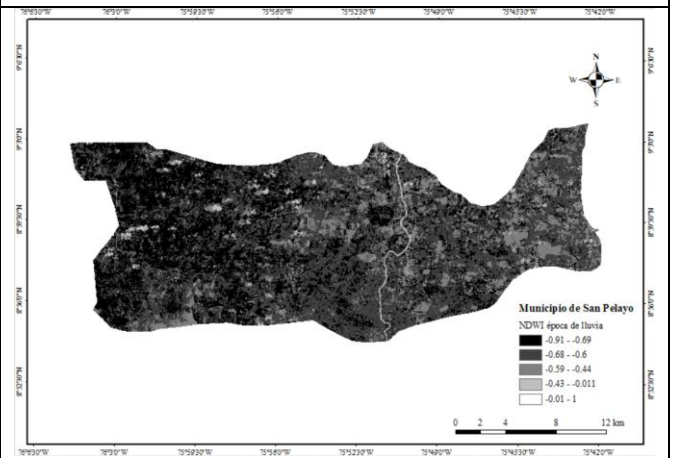
Anexo 5 Mosaicos NDWI época de sequía y de lluvia



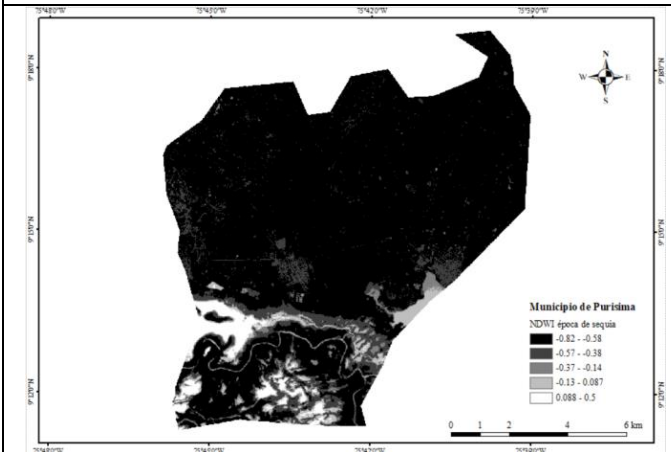
Mosaicos época de sequia NDWI



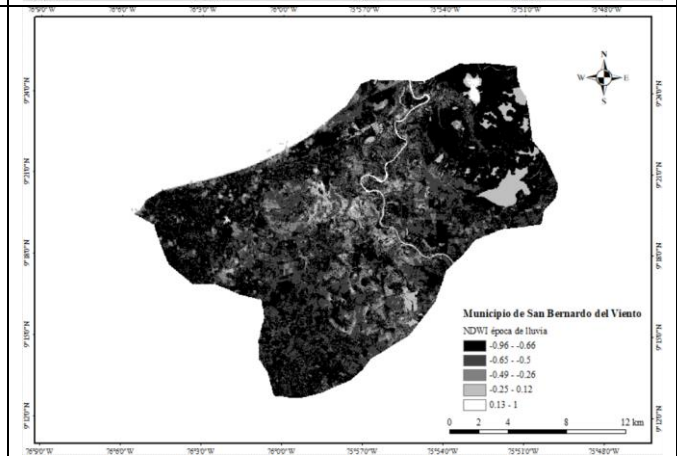
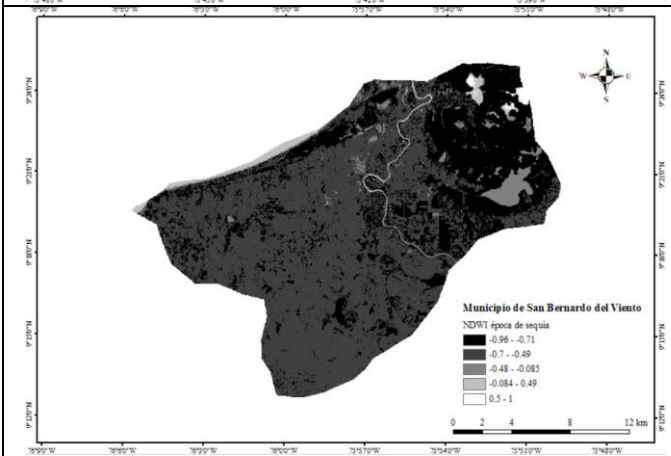
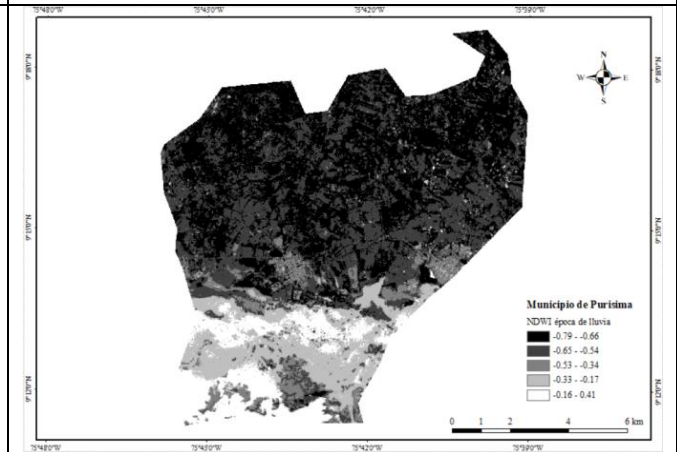
Mosaicos época de lluvia NDWI



Mosaicos época de sequia NDWI



Mosaicos época de lluvia NDWI



Anexo 6 Puntos para validación método de clasificación de Jenks

ID	Época de lluvia NDWI	Latitud	Longitud	Píxeles validación Google Earth	Píxeles clasificación Jenks	Fecha imagen Google Earth	Municipio
1	-0.456	-75.664363	9.075887	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	Chimá
2	-0.469	-75.683802	9.067704	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	Chimá
3	-0.453	-75.710794	9.101774	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	Chimá
4	-0.462	-75.712656	9.121331	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	Chimá
5	-0.466	-75.659677	9.084994	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	Chimá
6	-0.486	-75.681430	9.103245	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	Chimá
7	-0.679	-75.705988	9.070454	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	Chimá
8	-0.381	-75.843840	9.043087	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
9	-0.392	-75.845814	9.053550	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
10	-0.534	-75.840793	9.062334	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	Lorica
11	-0.311	-75.830710	9.068692	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
12	-0.194	-75.829677	9.078182	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
13	-0.387	-75.844401	9.084532	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
14	-0.348	-75.841433	9.101273	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
15	-0.371	-75.834007	9.115344	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
16	-0.389	-75.830750	9.126148	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
17	-0.319	-75.843041	9.139754	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
18	-0.340	-75.837154	9.164164	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
19	-0.288	-75.822593	9.178602	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
20	-0.179	-75.818478	9.195923	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
21	-0.157	-75.823414	9.202404	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
22	-0.102	-75.821730	9.206471	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
23	-0.102	-75.816387	9.205666	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
24	-0.143	-75.819262	9.205475	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
25	-0.164	-75.818011	9.204438	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
26	-0.134	-75.821309	9.217800	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
27	-0.012	-75.840696	9.221538	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
28	0.197	-75.850008	9.217853	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
29	-0.185	-75.849021	9.212939	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica

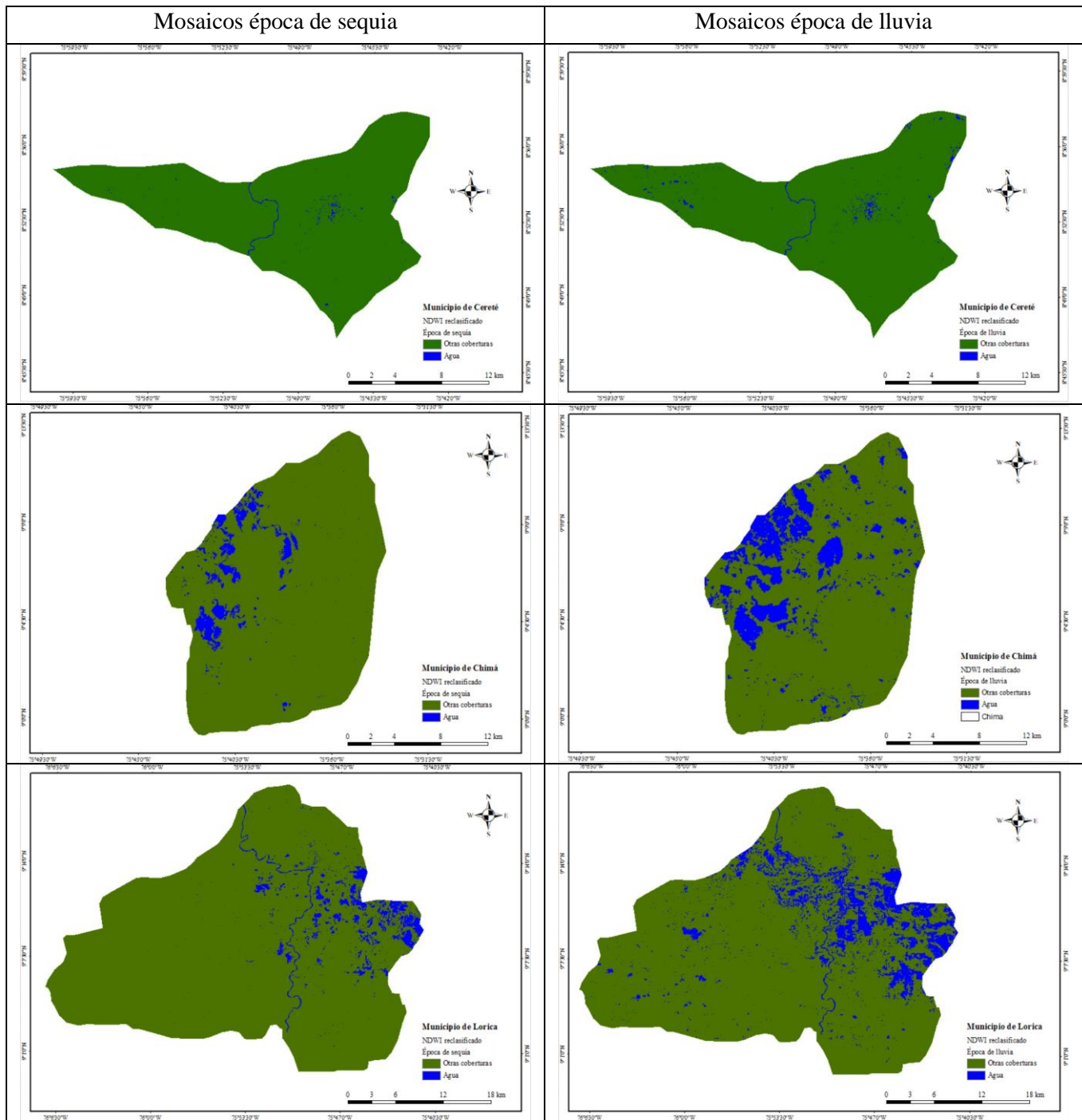
ID	Época de lluvia NDWI	Latitud	Longitud	Píxeles validación Google Earth	Píxeles clasificación Jenks	Fecha imagen Google Earth	Municipio
30	0.002	-75.854257	9.221030	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
31	-0.333	-75.851549	9.222447	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
32	-0.117	-75.883363	9.244900	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
33	-0.258	-75.876990	9.243661	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
34	-0.233	-75.880105	9.244519	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
35	-0.355	-75.890402	9.264460	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
36	-0.383	-75.897527	9.264259	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
37	-0.464	-75.896501	9.297624	Agua	Otras coberturas	Julio de 2022	Lorica
38	-0.179	-75.829058	9.158372	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
39	-0.079	-75.808330	9.151381	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
40	-0.158	-75.816055	9.157652	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
41	-0.385	-75.754320	9.115031	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
42	-0.277	-75.767406	9.175212	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
43	-0.298	-75.790666	9.168179	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
44	0.198	-75.813603	9.183914	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
45	0.070	-75.815938	9.183943	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
46	-0.148	-75.816469	9.184361	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
47	0.004	-75.811258	9.183757	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
48	-0.217	-75.766152	9.201687	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
49	-0.237	-75.773876	9.189655	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
50	-0.202	-75.799293	9.203402	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
51	-0.232	-75.796407	9.210413	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
52	-0.207	-75.715211	9.188766	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
53	-0.192	-75.881575	9.240514	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
54	-0.349	-75.884482	9.235569	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
55	-0.413	-75.905511	9.246942	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
56	-0.209	-75.756505	9.226543	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
57	-0.378	-75.773757	9.230525	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
58	0.111	-75.818325	9.210382	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
59	-0.043	-75.830491	9.214216	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica

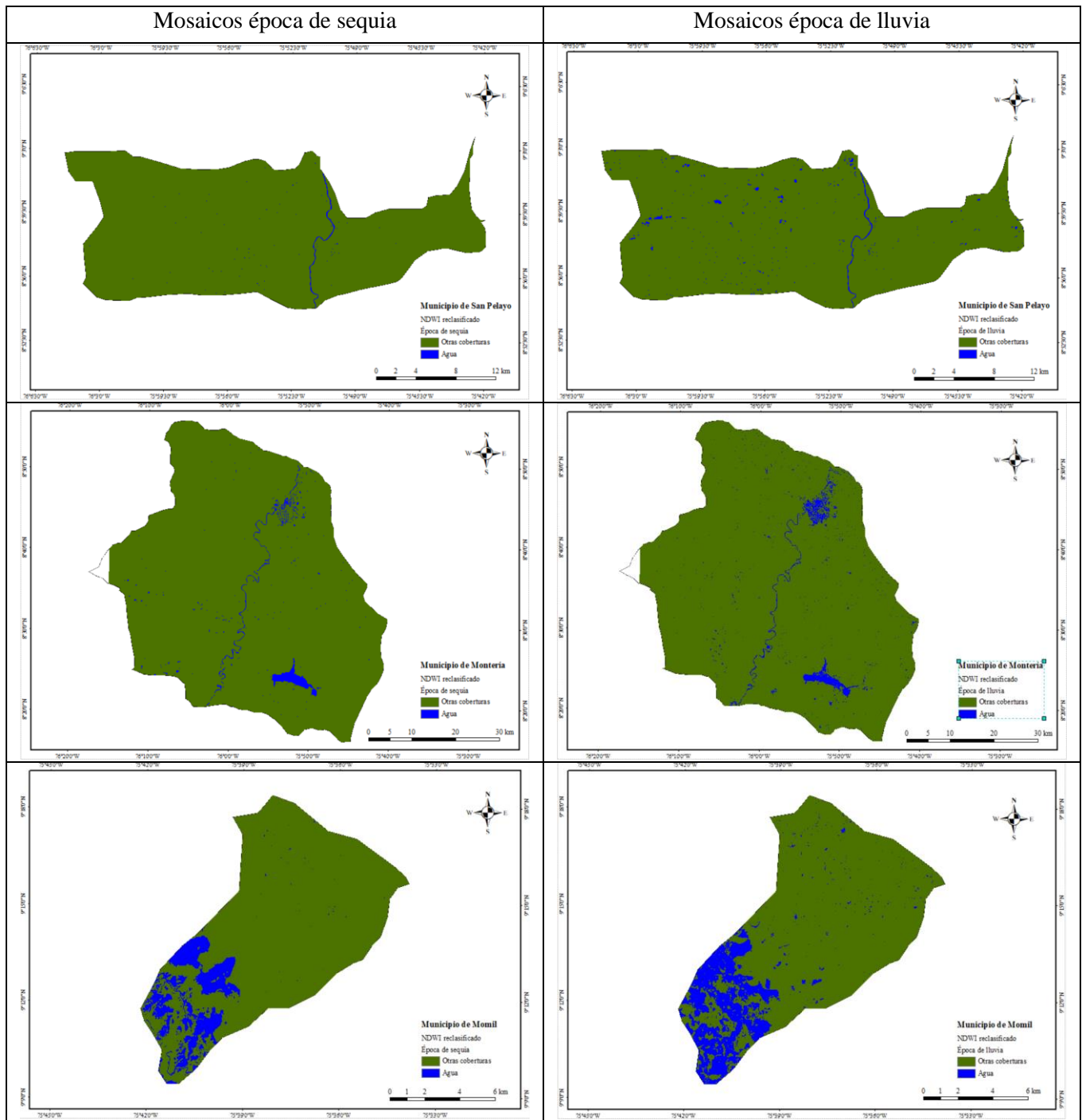
ID	Época de lluvia NDWI	Latitud	Longitud	Píxeles validación Google Earth	Píxeles clasificación Jenks	Fecha imagen Google Earth	Municipio
60	-0.378	-75.715684	9.129284	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
61	-0.206	-75.749163	9.169180	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
62	-0.206	-75.793612	9.184554	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
63	-0.324	-75.785372	9.183516	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
64	-0.105	-75.804727	9.188452	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
65	-0.229	-75.768420	9.187435	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
66	-0.374	-75.760481	9.182139	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
67	-0.208	-75.872287	9.215565	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
68	-0.424	-75.880827	9.200866	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
69	-0.087	-75.861129	9.180149	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
70	-0.320	-75.853919	9.196672	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
71	0.019	-75.844821	9.199806	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
72	0.028	-75.841688	9.198663	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
73	-0.039	-75.836238	9.203767	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
74	-0.213	-75.833213	9.206161	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
75	-0.040	-75.824436	9.203407	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
76	-0.160	-75.847310	9.209952	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
77	0.047	-75.844006	9.207877	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
78	0.003	-75.862631	9.209169	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
79	-0.349	-75.874079	9.205400	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
80	-0.155	-75.821081	9.226205	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
81	-0.153	-75.817128	9.225538	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
82	-0.184	-75.837374	9.223389	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
83	-0.232	-75.835345	9.224776	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
84	-0.440	-75.847013	9.221934	Agua	Otras coberturas	Julio de 2022	Lorica
85	-0.350	-75.863931	9.233326	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
86	-0.175	-75.862500	9.237007	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
87	-0.089	-75.864185	9.235630	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
88	-0.359	-75.875780	9.236461	Agua	Agua	Julio de 2022	Lorica
89	-0.476	-75.892589	9.290264	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	Lorica

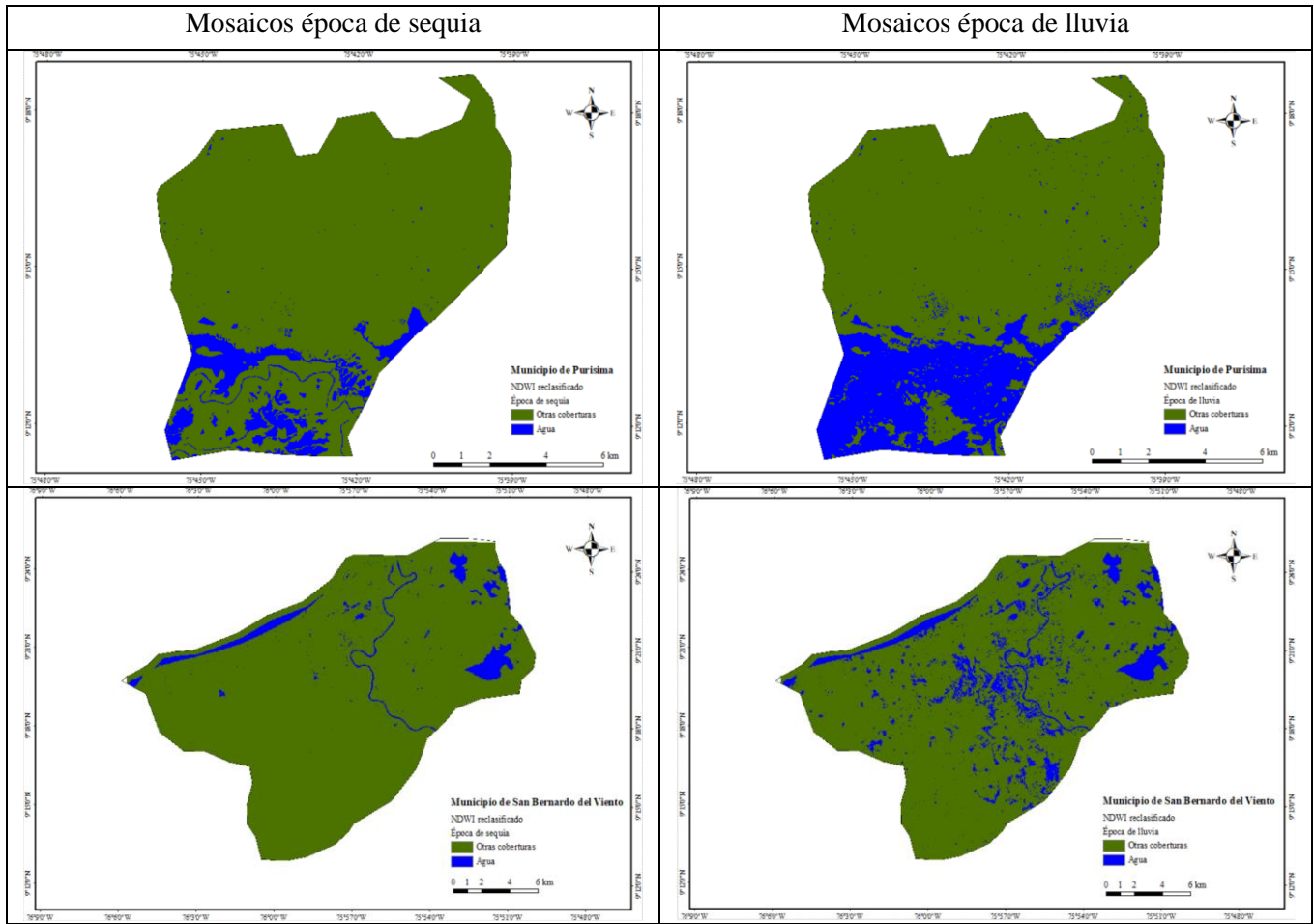
ID	Época de lluvia NDWI	Latitud	Longitud	Píxeles validación Google Earth	Píxeles clasificación Jenks	Fecha imagen Google Earth	Municipio
90	-0.480	-76.012022	8.432525	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	Montería
91	-0.457	-75.974133	8.463091	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	Montería
92	-0.481	-75.966063	8.577691	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	Montería
93	-0.144	-75.905332	8.742255	Agua	Agua	Julio de 2022	Montería
94	-0.385	-75.874010	8.783276	Agua	Agua	Julio de 2022	Montería
95	-0.274	-75.858683	8.801554	Agua	Agua	Julio de 2022	Montería
96	-0.273	-75.858988	8.818385	Agua	Agua	Julio de 2022	Montería
97	-0.119	-75.884821	8.765506	Agua	Agua	Julio de 2022	Montería
98	-0.438	-75.863789	8.793531	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	Montería
99	-0.169	-75.890573	8.757066	Agua	Agua	Julio de 2022	Montería
100	-0.550	-75.971551	8.588719	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	Montería
101	-0.490	-76.010656	8.380986	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	Montería
102	-0.470	-75.878330	8.406292	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	Montería
103	-0.280	-75.925118	8.715484	Agua	Agua	Julio de 2022	Montería
104	-0.277	-75.848849	8.829919	Agua	Agua	Julio de 2022	Montería
105	-0.099	-75.852586	8.831747	Agua	Agua	Julio de 2022	Montería
106	-0.291	-75.862973	8.809014	Agua	Agua	Julio de 2022	Montería
107	-0.372	-75.935159	8.699411	Agua	Agua	Julio de 2022	Montería
108	-0.432	-75.748548	9.234488	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	Purisima
109	-0.333	-75.750394	9.228621	Agua	Agua	Julio de 2022	Purisima
110	-0.389	-75.753784	9.191830	Agua	Agua	Julio de 2022	Purisima
111	-0.350	-75.749718	9.195230	Agua	Agua	Julio de 2022	Purisima
112	-0.254	-75.748108	9.200493	Agua	Agua	Julio de 2022	Purisima
113	-0.382	-75.756221	9.190177	Agua	Agua	Julio de 2022	Purisima
114	-0.391	-75.894007	9.295933	Agua	Otras coberturas	Julio de 2022	San Bernardo del Viento
115	-0.406	-75.933226	9.315829	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	San Bernardo del Viento
116	-0.466	-75.932242	9.317409	Agua	Otras coberturas	Julio de 2022	San Bernardo del Viento
117	-0.380	-75.939967	9.319622	Agua	Otras coberturas	Julio de 2022	San Bernardo del Viento
118	-0.441	-75.938049	9.329093	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	San Bernardo del Viento
119	-0.422	-75.868346	9.341539	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	San Bernardo del Viento

ID	Época de lluvia NDWI	Latitud	Longitud	Píxeles validación Google Earth	Píxeles clasificación Jenks	Fecha imagen Google Earth	Municipio
120	-0.249	-75.865691	9.392156	Agua	Agua	Julio de 2022	San Bernardo del Viento
121	-0.345	-75.856743	9.403016	Agua	Agua	Julio de 2022	San Bernardo del Viento
122	-0.035	-75.879365	9.409960	Agua	Agua	Julio de 2022	San Bernardo del Viento
123	-0.760	-75.951171	9.333619	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	San Bernardo del Viento
124	-0.710	-75.940658	9.338410	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	San Bernardo del Viento
125	-0.570	-75.947482	9.338357	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	San Bernardo del Viento
126	-0.346	-75.841016	8.987345	Agua	Agua	Julio de 2022	San Pelayo
127	-0.319	-75.839878	9.003952	Agua	Agua	Julio de 2022	San Pelayo
128	-0.248	-75.843704	9.019085	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	San Pelayo
129	-0.219	-75.844690	9.035658	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	San Pelayo
130	-0.266	-75.836592	8.977009	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	San Pelayo
131	-0.307	-75.850066	8.969997	Otras coberturas	Otras coberturas	Julio de 2022	San Pelayo

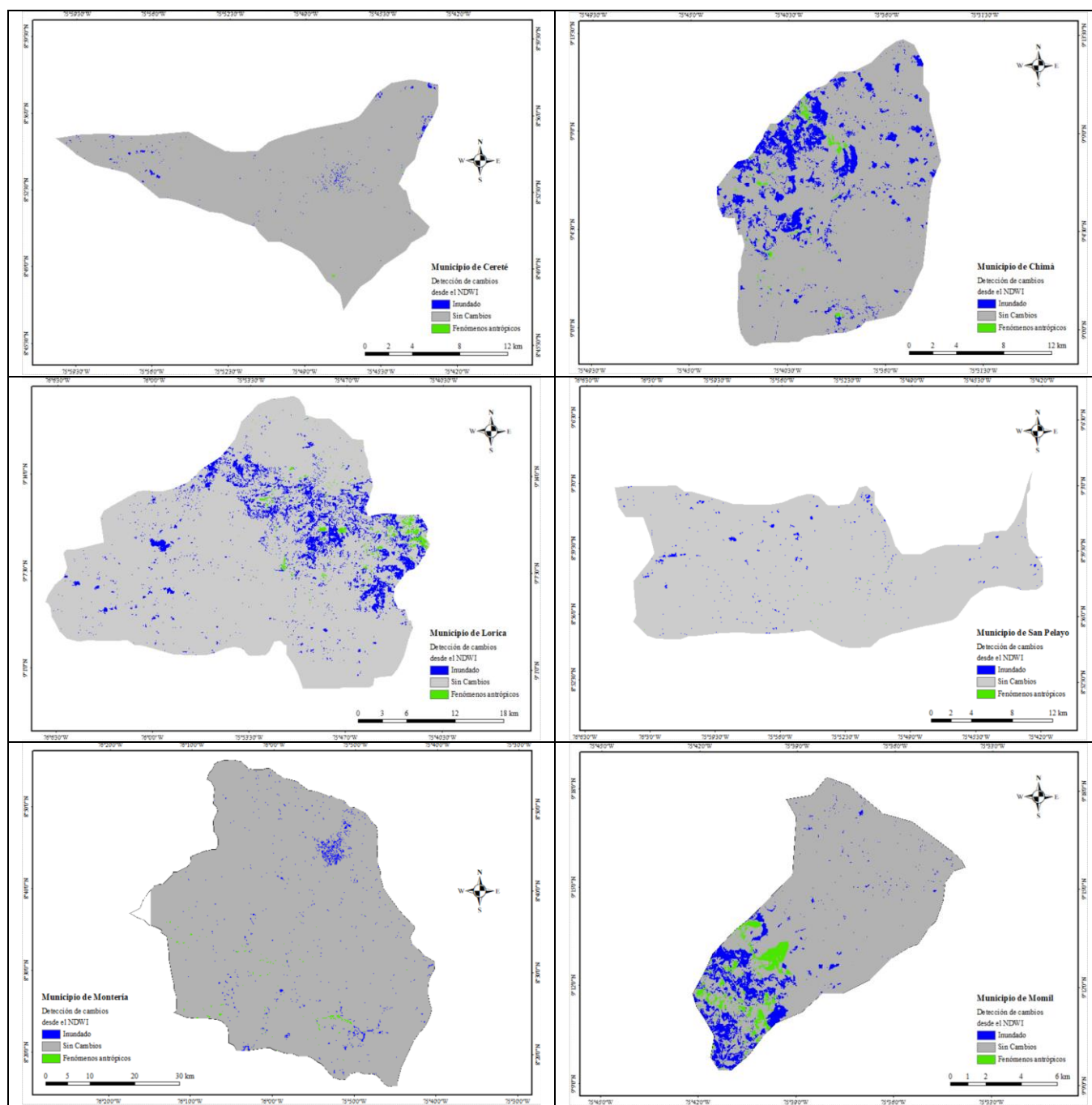
Anexo 7 Calculo del NDWI reclasificado para las épocas de estudio

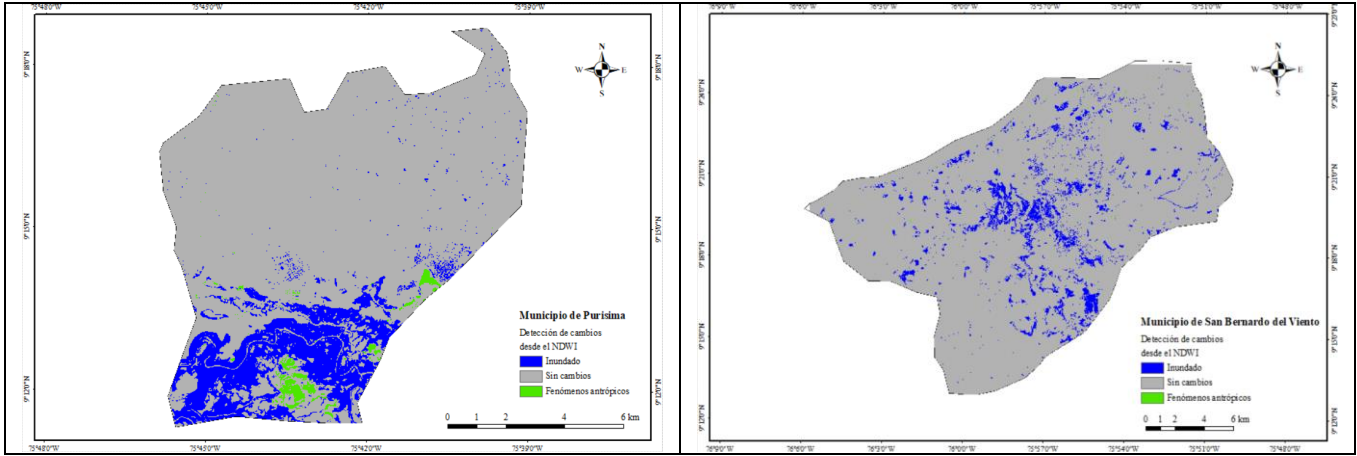




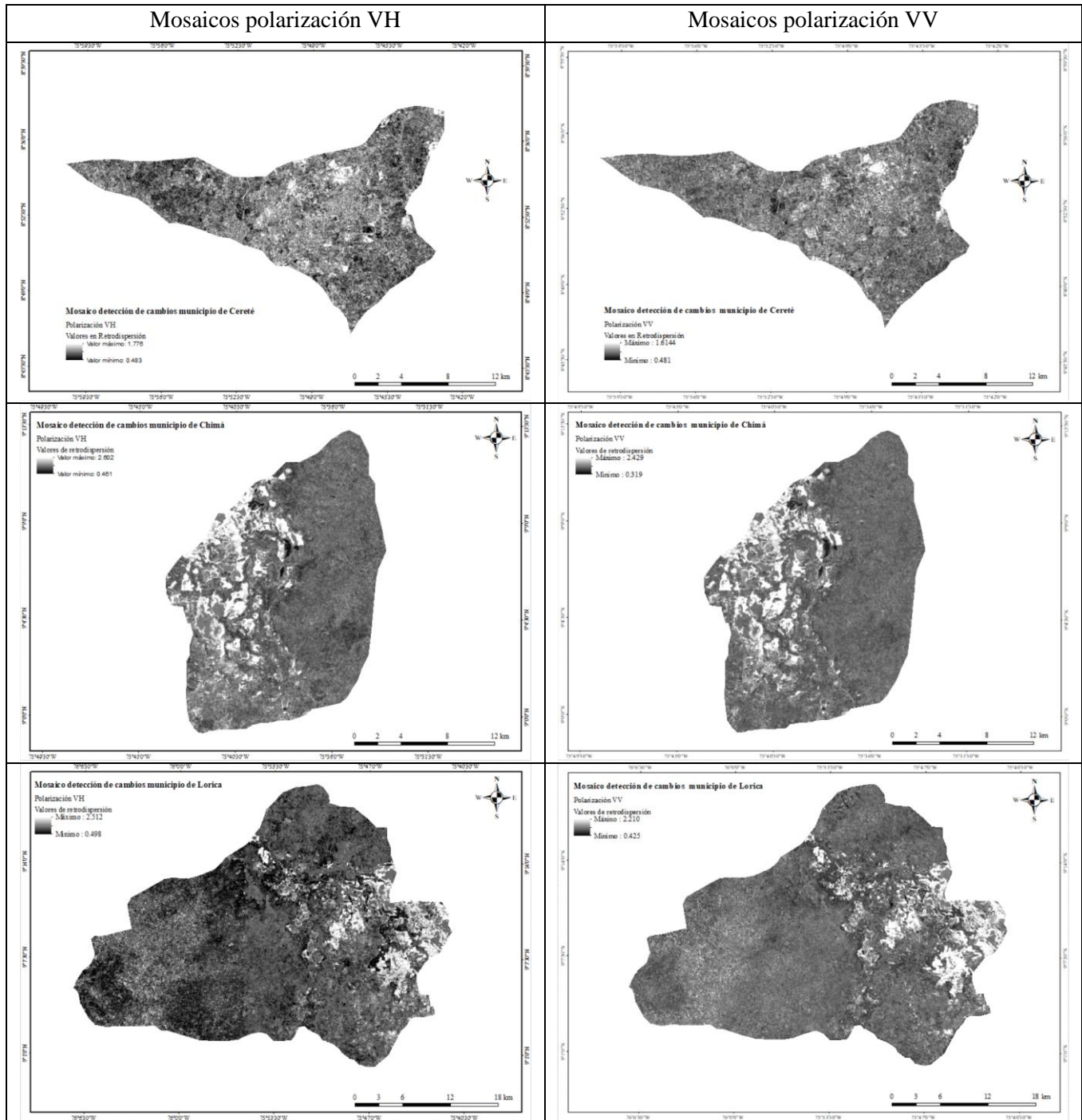


Anexo 8 Cálculo áreas afectadas aplicando detección de cambios con imágenes ópticas



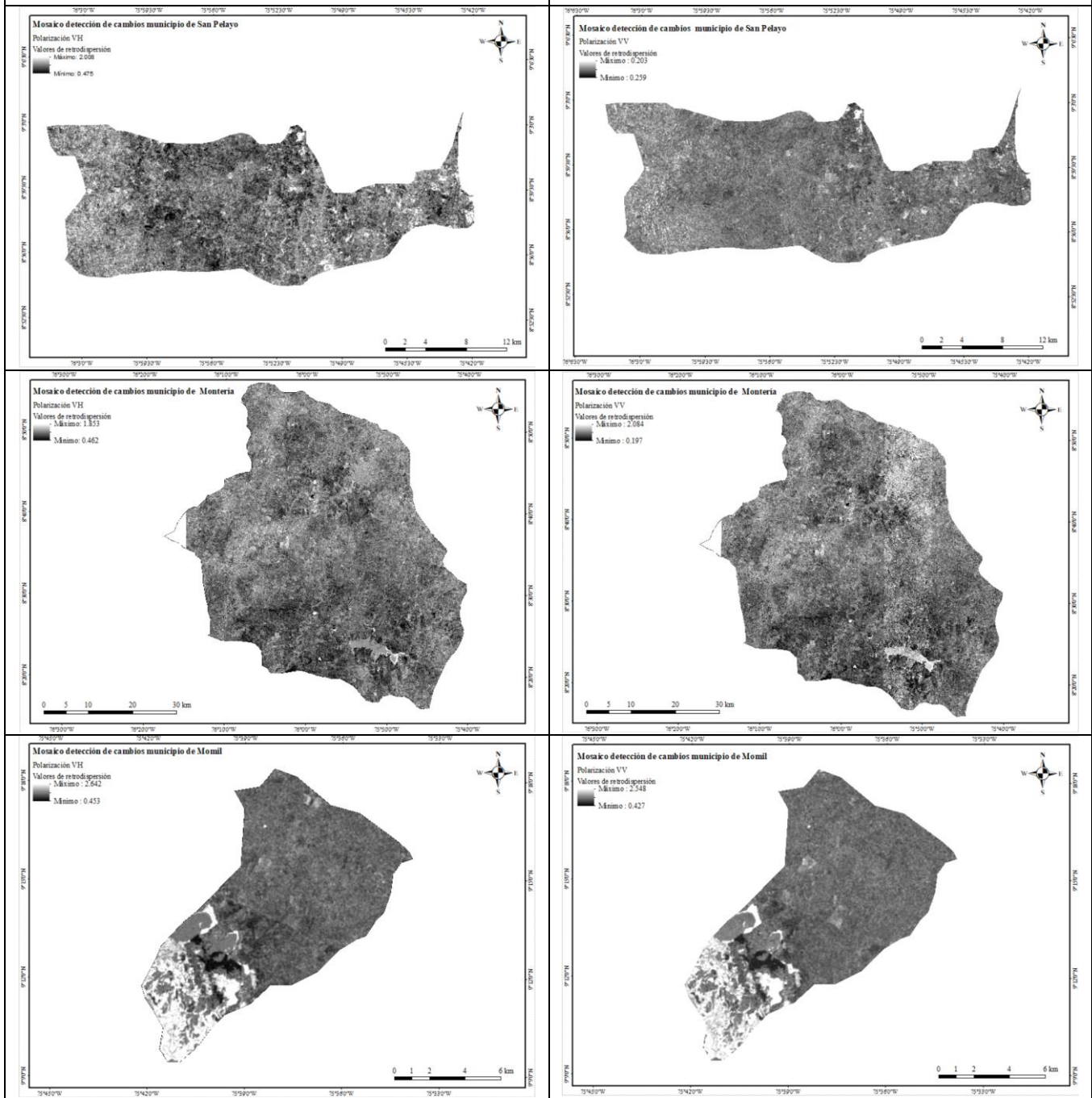


Anexo 9 Detección de cambios empleando imágenes SAR

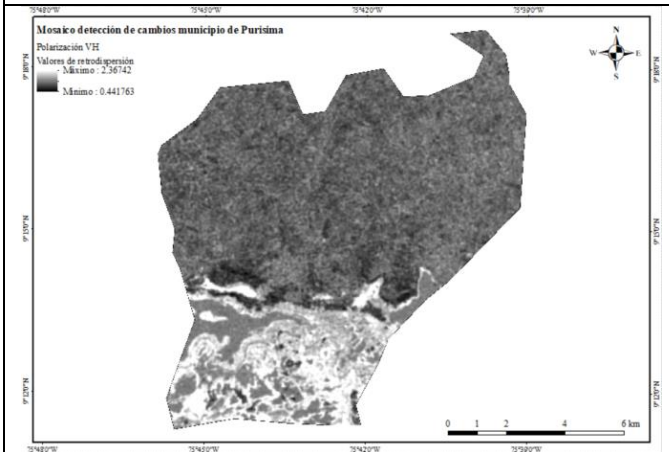


Mosaicos polarización VH

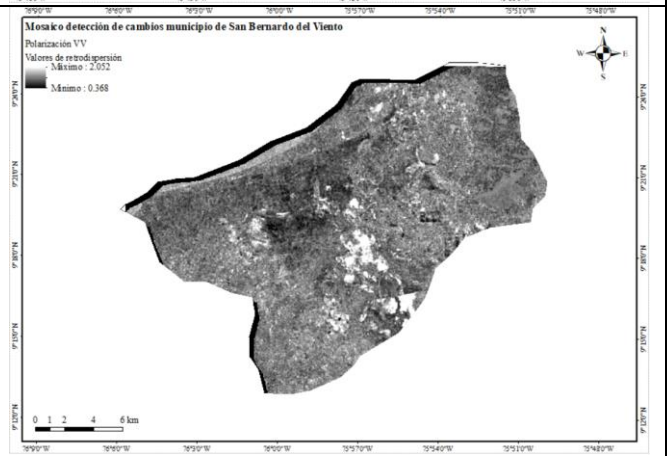
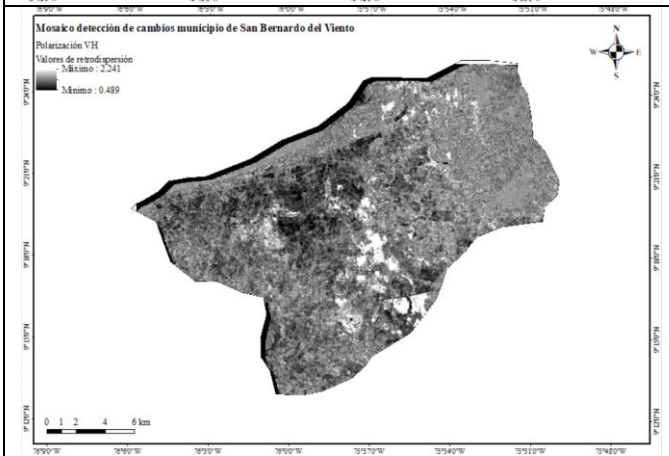
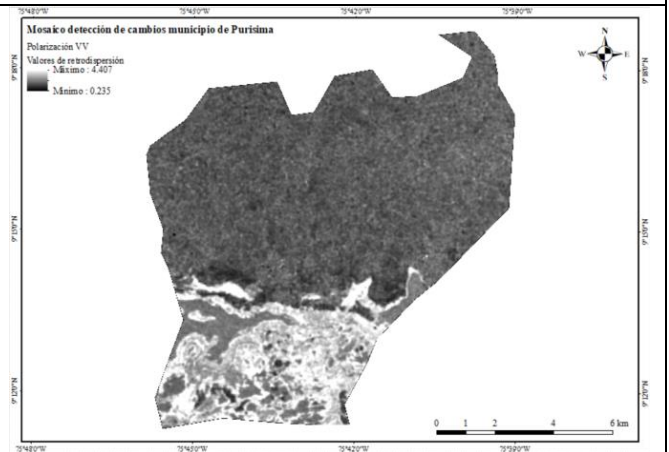
Mosaicos polarización VV



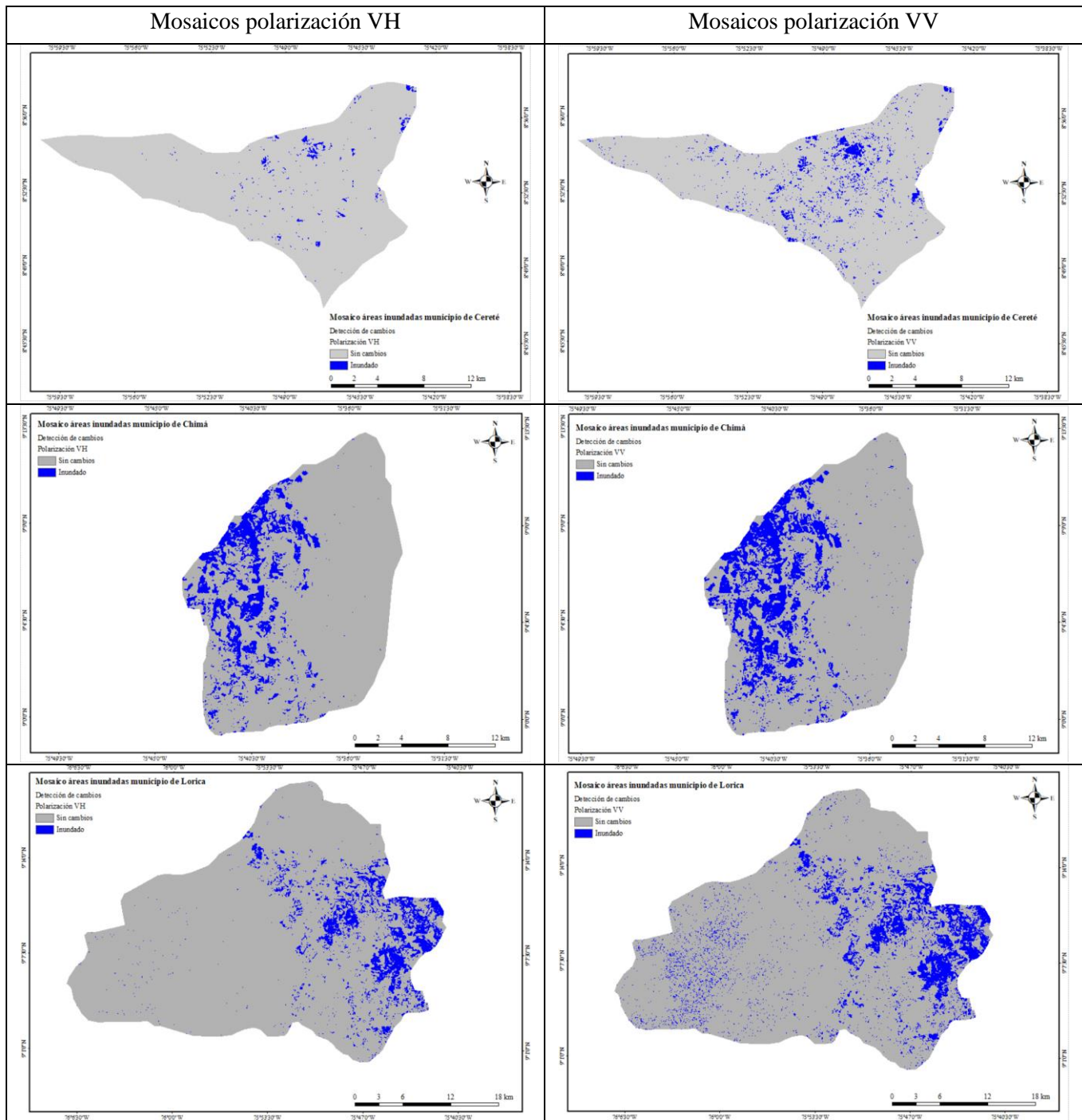
Mosaicos polarización VH

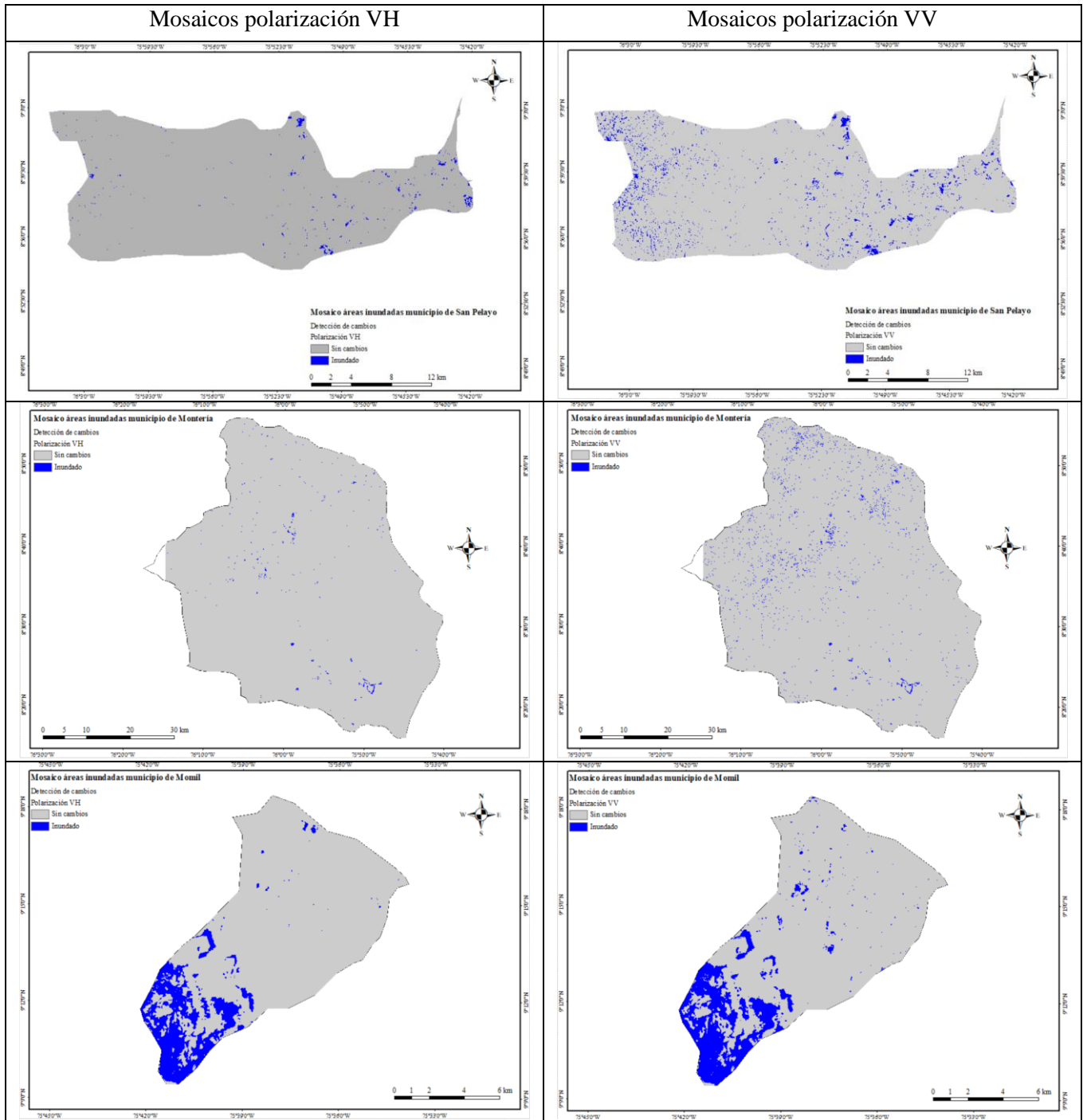


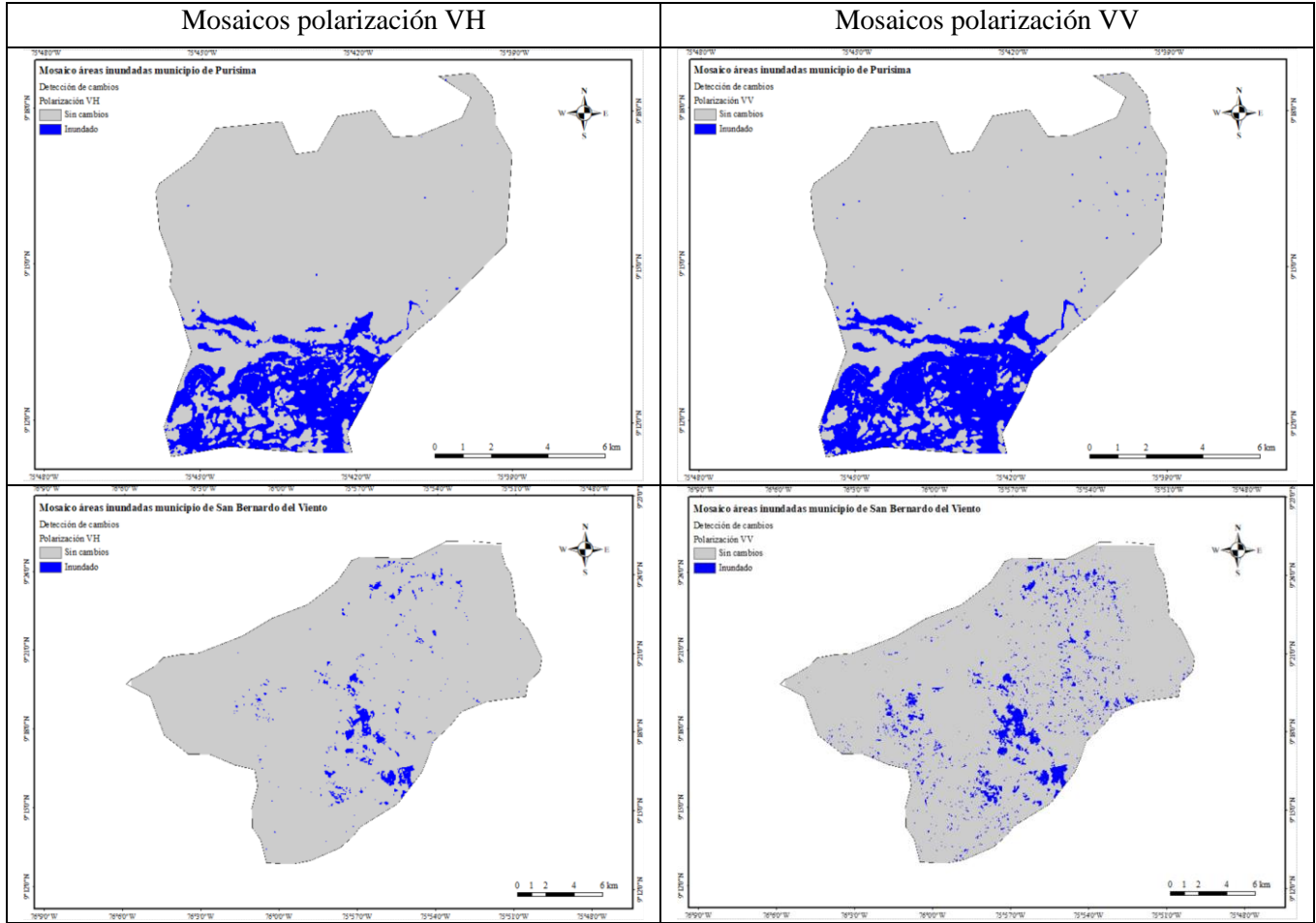
Mosaicos polarización VV



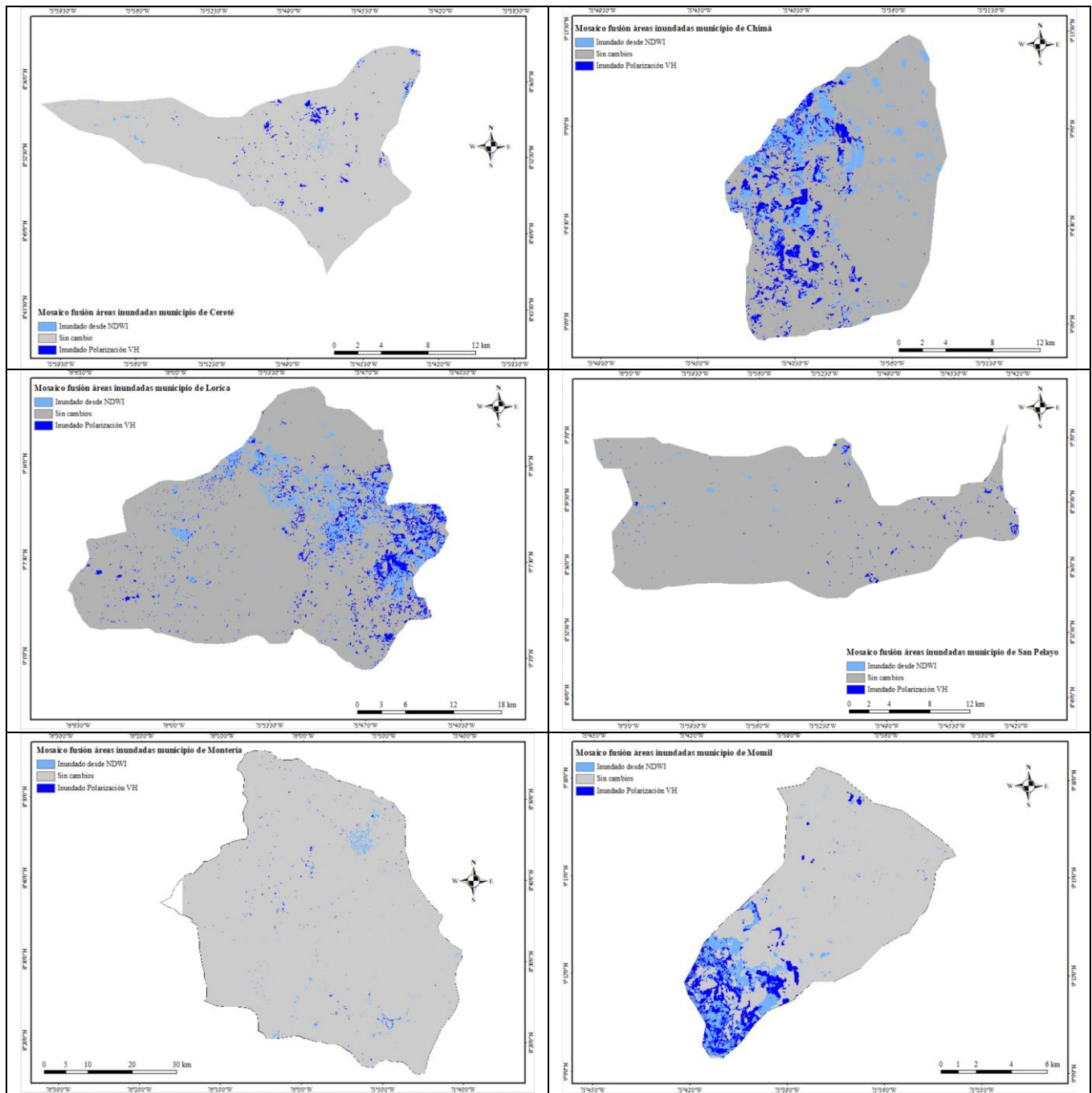
Anexo 10 Detección de áreas inundadas empleando imágenes SAR

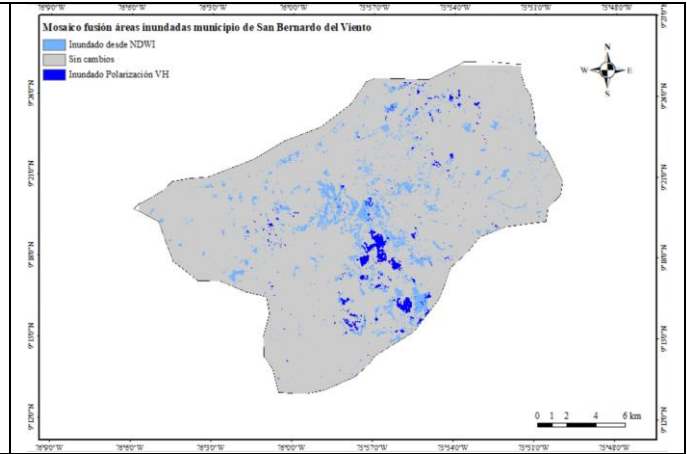
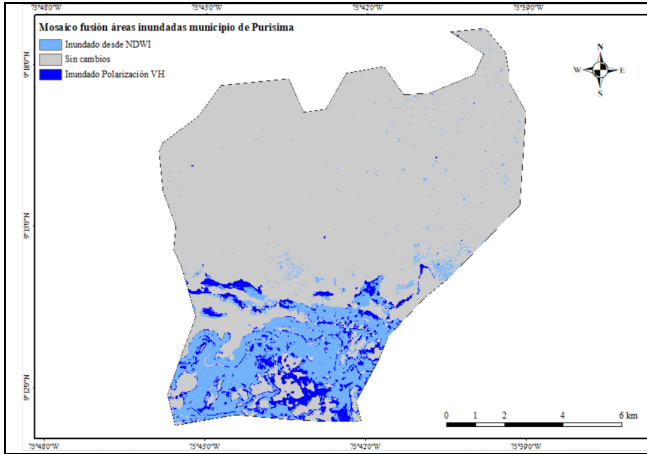




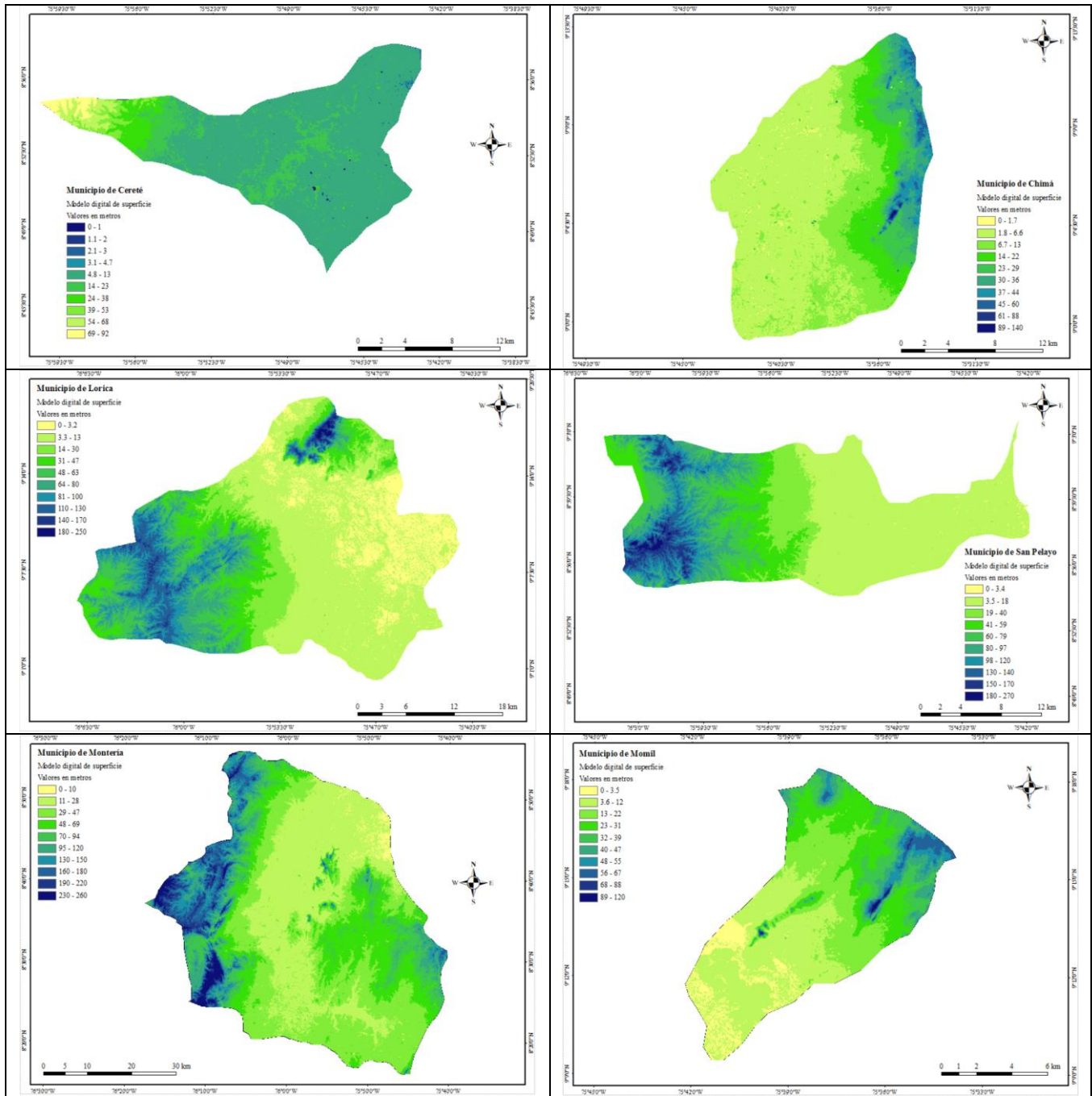


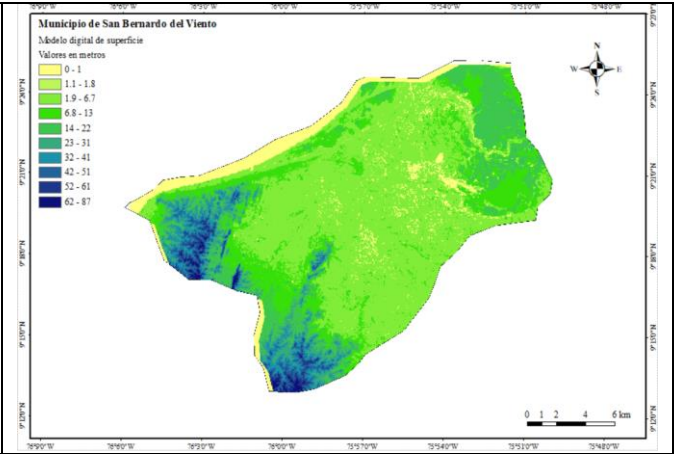
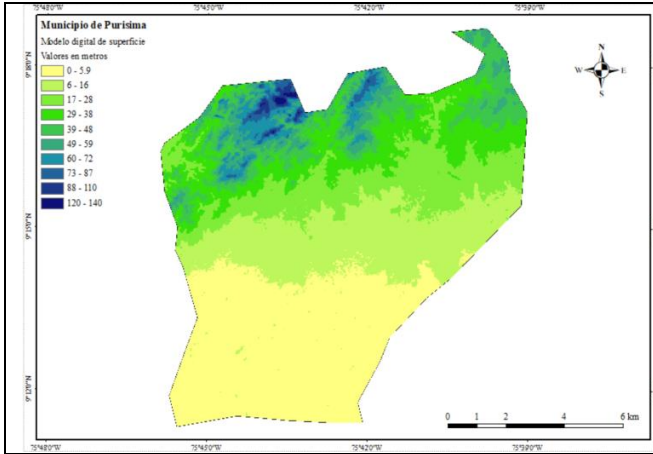
Anexo 11 Mosaicos fusión áreas inundadas imágenes ópticas y SAR



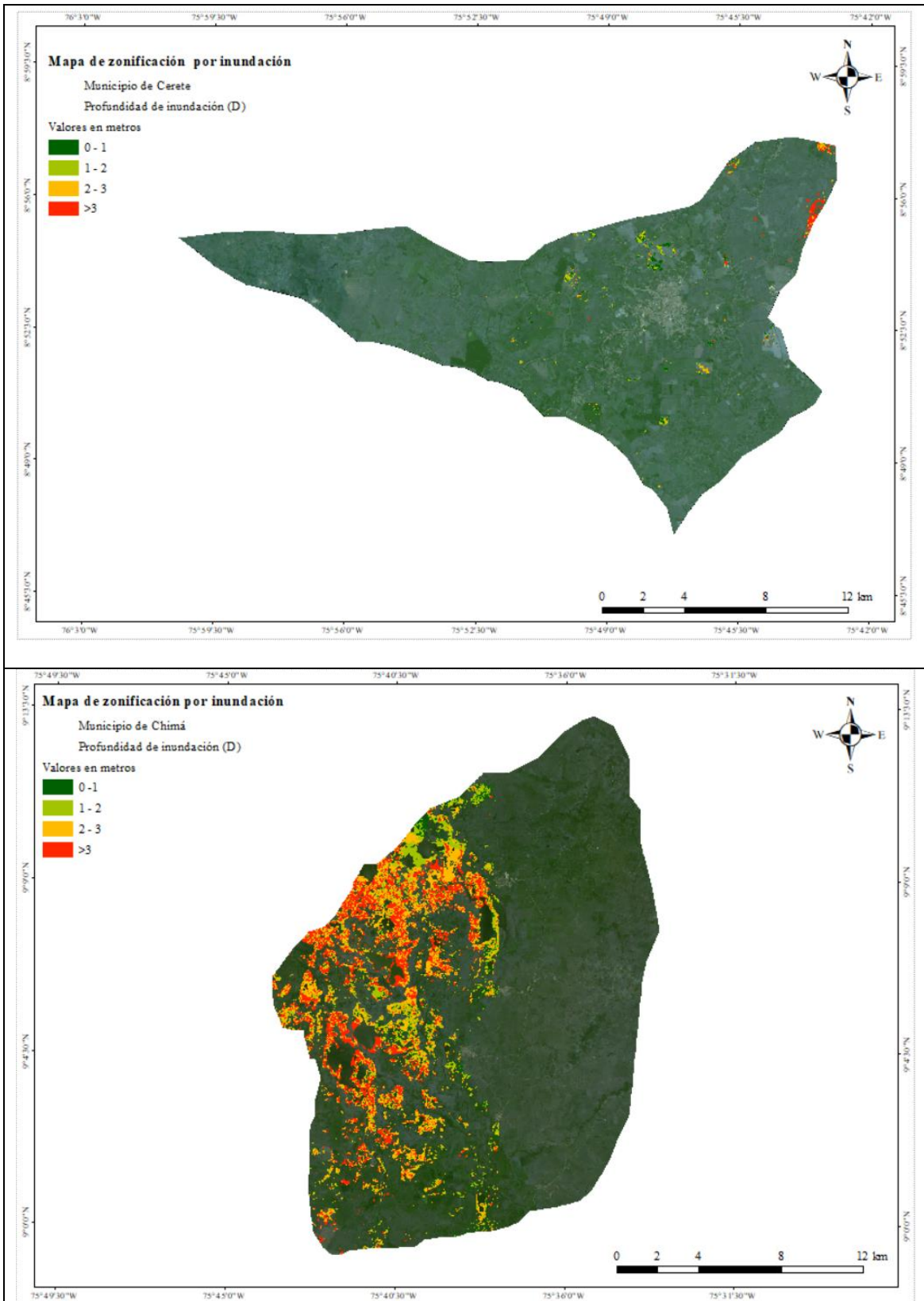


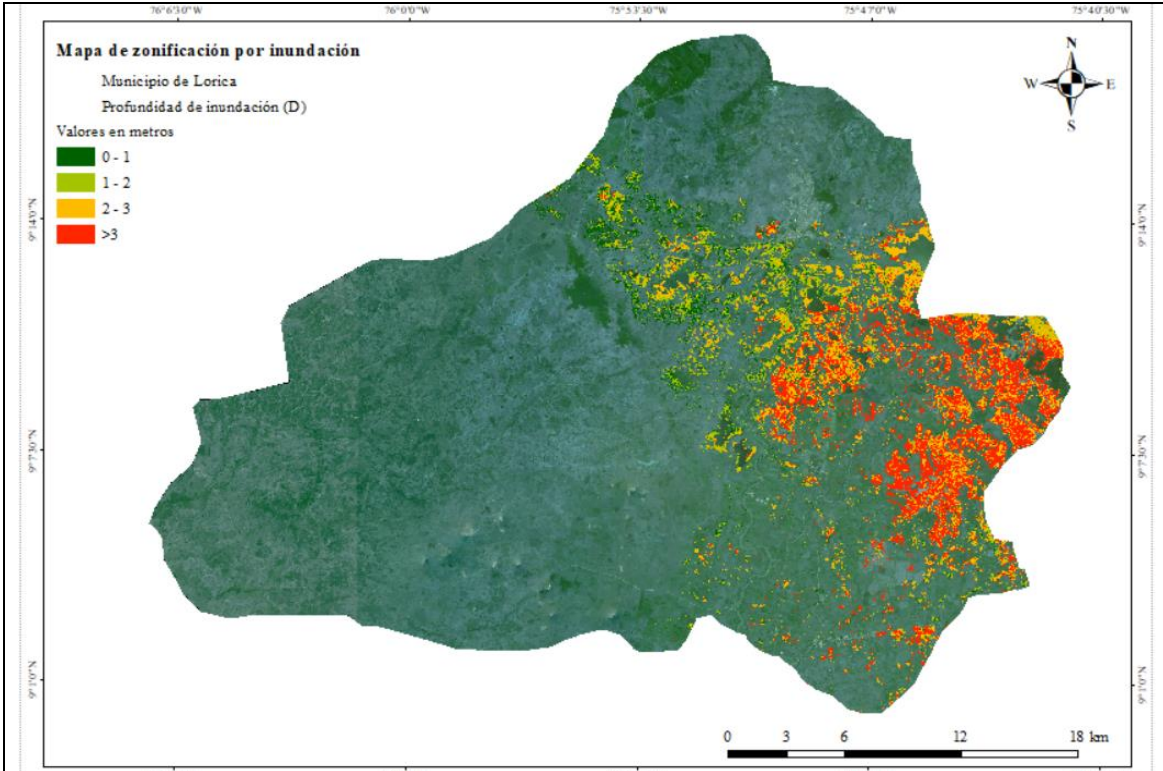
Anexo 12 Mosaicos modelos digitales de superficie

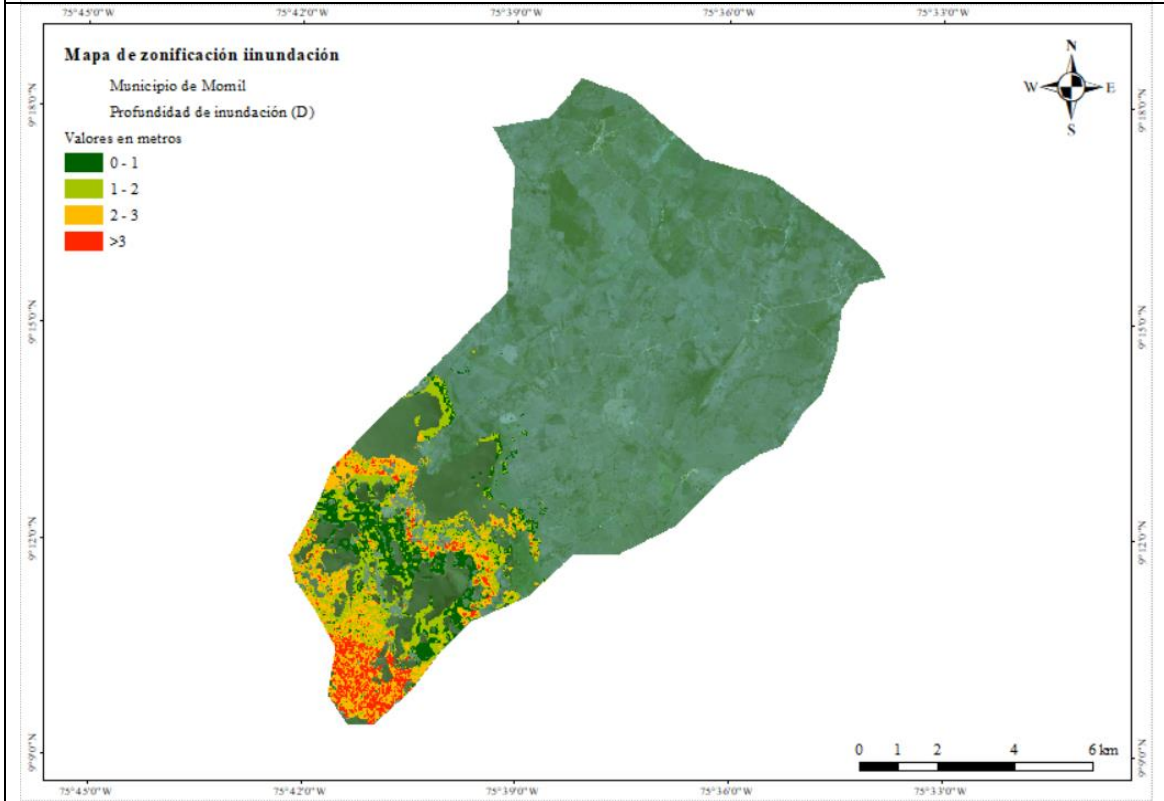
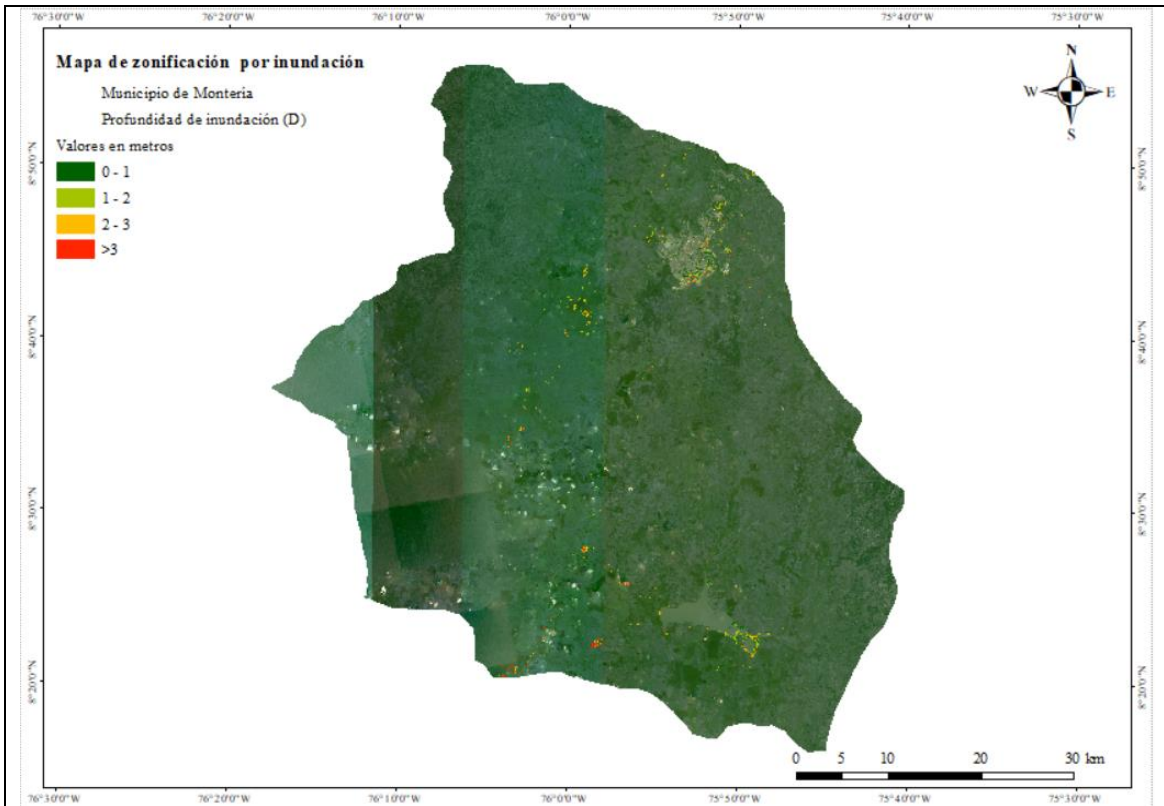


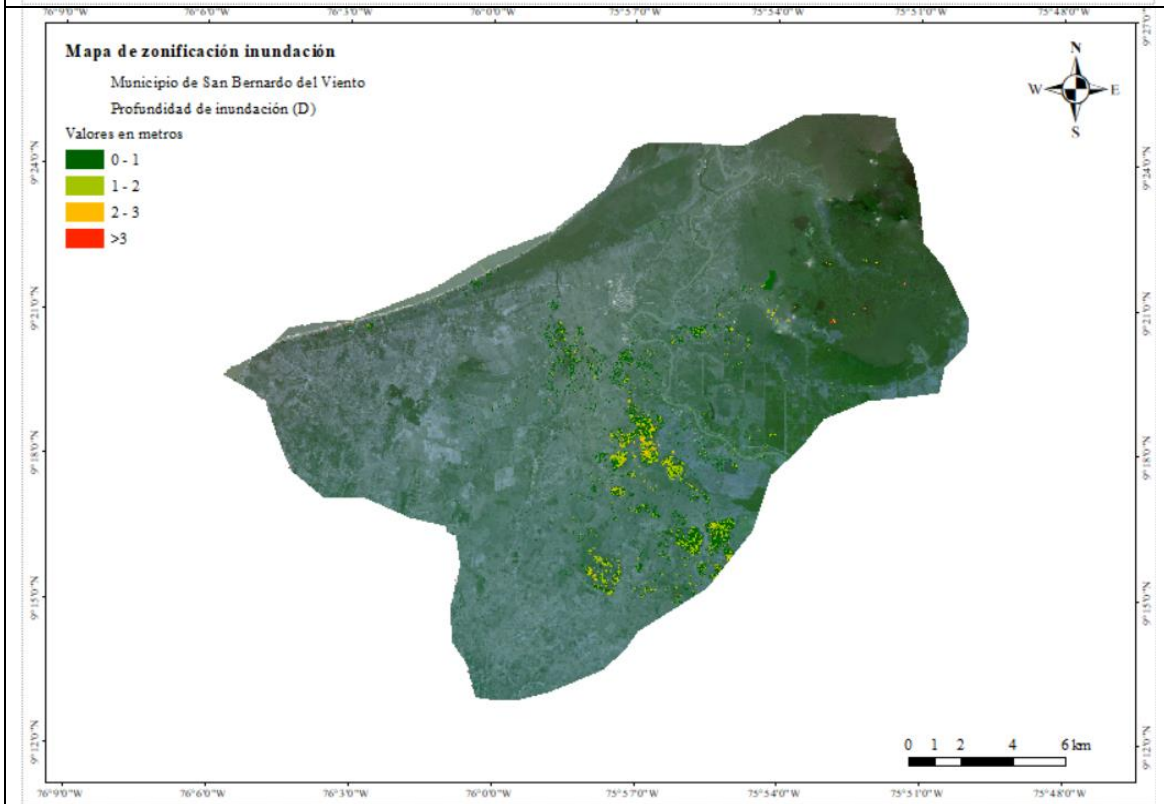
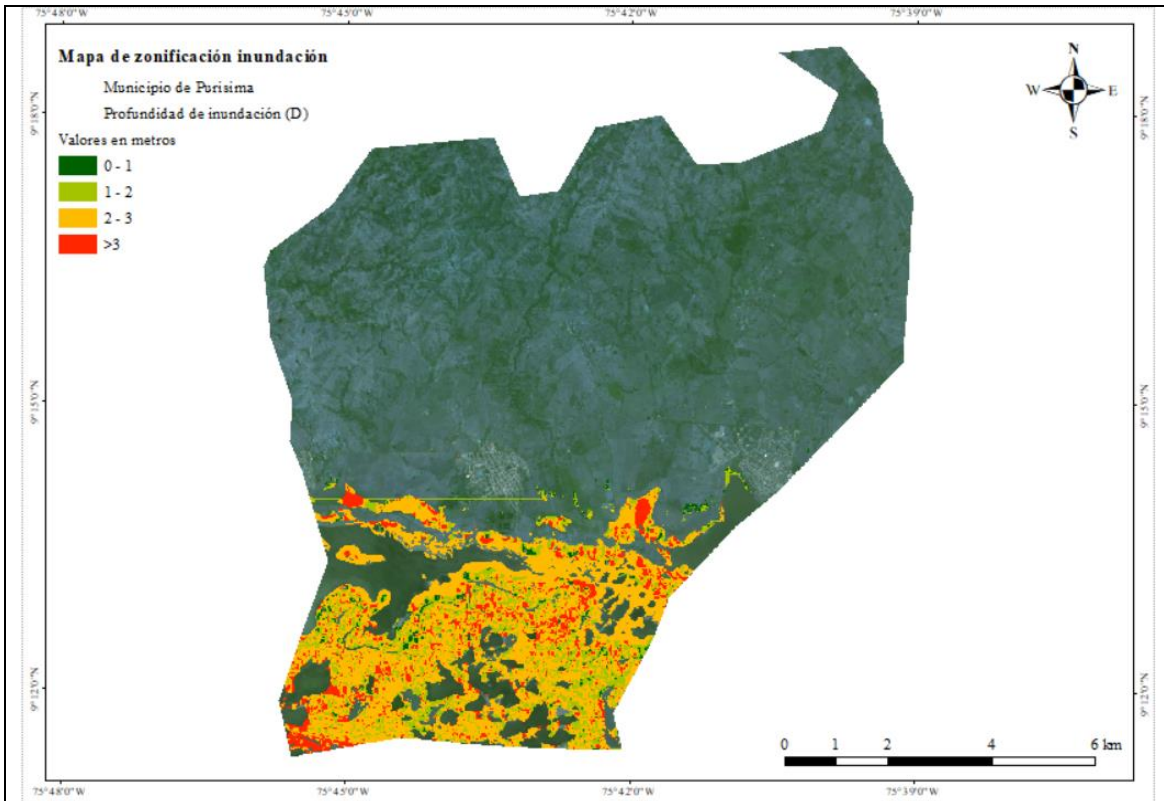


Anexo 13 Mosaicos profundidad de inundación









Anexo 14 Procesamiento digital desde GGE empleando imágenes ópticas

```
Imports (5 entries)
var nicfi: ImageCollection "Planet & NICFI Basemaps for Tropical Forest Monitoring - Tropical Americas"
var Table: Table FAO/GAUL/2015/level2
var dsm: Image "ALOS DSM: Global 30m" (6 bands)
var Agua: FeatureCollection (35 elements)
var table: Table projects/ee-jediaz16/assets/NPs_Purisima

//*****//
/*ANÁLISIS DE AMENAZA POR INUNDACIONES ASOCIANDO TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN
Y LA PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN EN LA SUBREGIÓN DEL BAJO SINÚ, CÓRDOBA, COLOMBIA*/

/*DEFINICIÓN DEL AREA DE ESTUDIO*/

/* Para la definición del área de estudio nombrada como AOI, se hace a partir de
la Capa de Unidades Administrativas Globales (GAUL), la cual compila las unidades
administrativas para todos los países del mundo. El GAUL siempre mantiene capas globales
con un sistema de codificación unificado, primero (Nivel 0: Países, Nivel:1
Departamentos o estados y Nivel 2: Municipios o distritos). EL procedimiento se muestra
a continuación*/

//1. Se selecciona el país de interés el cual está compilado en las unidades
administrativas, nivel 0
var Pais = 'Colombia';

//2. Se selecciona el departamento de estudio el cual contiene la subregión de la
sabana cordobesa, nivel 1
var Departamento = 'Cordoba';

/*3. Como primera medida se selecciona el municipio de interés nivel 2 y se crea
la variable (municipio n, se crea una variable (AOIn) con la colección filtrada de los
límites administrativos por país, departamento y municipio, la se imprime en la consola
de GGE; por último, se imprime el mapa de la variable (AOIn)*/
var Municipio_Purisima = 'Purisima';
var AOI1= Table.filter(ee.Filter.eq('ADM0_NAME', Pais))
    .filter(ee.Filter.eq('ADM1_NAME', Departamento))
    .filter(ee.Filter.eq('ADM2_NAME', Municipio_Purisima));
print (AOI1, 'Área de Interés:' + Municipio_Purisima + ' ' + Departamento + ' ' +
Pais);
Map.addLayer(AOI1,0);

/*4. se crea una capa o imagen vacía que contendrá el municipio, se adiciona un
vector del municipio de interés el cual se carga en la capa vacía. Por último, se genera
el mapa según los límites definidos en el vector el cual trae el nombre de los límites
administrativos*/
var Purisima_vacia = ee.Image().byte();
var Purisima_vector = Purisima_vacia.paint({
  'featureCollection': AOI1,
  'color': 1,
  'width': 1.5});
Map.addLayer(Purisima_vector, {'palette': '0204ff'}, 'Área de Interés:' +
Municipio_Purisima + ' ' + Departamento + ' ' + Pais, 0);
Map.centerObject(AOI1);

/*SELECCIÓN ÉPOCAS DE ESTUDIO*/

/*Las épocas de estudio seleccionadas, corresponden a épocas de sequía y de
lluvia del año 2022, las cuales corresponden a los meses entre febrero - abril y julio -
octubre respectivamente, épocas según el régimen monomodal climático que se presenta en
la subregión del bajo Sinú en el departamento de Córdoba*/

//5. Se definen las épocas de sequia y epoca de lluvia
var epoca_sequia_inicio= '2022-02-01';
var epoca_sequia_fin='2022-04-01';

var epoca_lluvia_inicio= '2022-07-15';
var epoca_lluvia_fin='2022-10-15';
```

```

                /*SELECCIÓN DE LA COLECCIÓN DE IMÁGENES*/
/*PROCESO DE FILTRADO DE IMÁGENES POR ÉPOCAS DE ESTUDIO Y IMAGEN MENOS NUBLADA*/

/* Se genera el mosaico con la colección (Planet Scope - Planet & NICFI Basemaps
for Tropical Forest Monitoring - Tropical Americas. -El siguiente es el link para ver
información de la colección y el código. //https://developers.google.com/earth-
engine/datasets/catalog/projects_planet-nicfi_assets_basemaps_americas//
-El siguiente link permite inscribirse para acceder a la colección según el
acuerdo de Noruega //https://account.planet.com/signin//

/*6. Se genera la variable del mosaico y se filtra para la época de sequía
asociado a la colección y área de estudio con la imagen menos nublada. Posteriormente se
centra la salida al área de estudio y se imprime la variable del mosaico*/
var Mosaico_epoca_sequia=
nicfi.filter(ee.Filter.date(epoca_sequia_inicio,epoca_sequia_fin)).first().clip(AOI1);
Map.centerObject((AOI1), 10);
print(Mosaico_epoca_sequia, 'Mosaico_epoca_sequia');

/*7. se genera una nueva banda RGB, se definen los valores máximos y mínimos de
reflectancia superficial y se imprime el mapa*/
var vis = {"bands":["R","G","B"],"min":64,"max":5454,"gamma":1.8};
Map.addLayer(Mosaico_epoca_sequia, vis, '2022 mosaico epoca sequia',0);

/*8. Se genera la variable del mosaico y se filtra para la época de sequía
asociado a la colección y área de estudio con la imagen menos nublada. Posteriormente se
centra la salida al área de estudio y se imprime la variable del mosaico*/
var Mosaico_epoca_lluvia=
nicfi.filter(ee.Filter.date(epoca_lluvia_inicio,epoca_lluvia_fin)).first().clip(AOI1);
Map.centerObject((AOI1), 10);
print(Mosaico_epoca_lluvia, 'Mosaico_epoca_lluvia');

/*9. se genera una nueva banda RGB, se definen los valores máximos y mínimos de
reflectancia superficial y se imprime el mapa*/
var vis = {"bands":["R","G","B"],"min":64,"max":5454,"gamma":1.8};
Map.addLayer(Mosaico_epoca_lluvia, vis, '2022 mosaico epoca lluvia',0);

                /*CALCULO DEL NDWI PARA LA ÉPOCA DE SEQUÍA Y ÉPOCA DE LLUVIA*/

/*10a. Se calcula el índice NDWI para la época de sequía, se imprimen los valores
en la consola de GGE, se agrega una banda con el índice NDWI para la época de sequía y
se genera el mapa*/
var ndwi_epoca_sequia = Mosaico_epoca_sequia.normalizedDifference(['G', 'N']);
print(ndwi_epoca_sequia, 'ndwi_epoca_Sequia');

var banda_ndwi_epoca_sequia = function(image) {
var ndwi_epoca_sequia = image.normalizedDifference(['G',
'N']).rename('banda_ndwi_epoca_sequia',false);
return image.addBands(banda_ndwi_epoca_sequia));
print(ndwi_epoca_sequia,'banda_ndwi_epoca_sequia');
Map.addLayer(ndwi_epoca_sequia,{min: -1, max: 1},'Epoca Sequia NDWI',false);

/*10b. Se calcula el índice NDWI para la época de lluvia, se imprimen los valores
en la consola de GGE, se agrega una banda con el índice NDWI para la época de lluvia y
se genera el mapa*/
var ndwi_epoca_lluvia = Mosaico_epoca_lluvia.normalizedDifference(['G', 'N']);
print(ndwi_epoca_lluvia, 'ndwi_epoca_lluvia');

var banda_ndwi_epoca_lluvia = function(image) {
var ndwi_epoca_lluvia = image.normalizedDifference(['G',
'N']).rename('banda_ndwi_epoca_lluvia',false);
return image.addBands(banda_ndwi_epoca_lluvia));
print(ndwi_epoca_lluvia,'banda_ndwi_epoca_lluvia');
Map.addLayer(ndwi_epoca_lluvia,{min: -1, max: 1},'Epoca Lluvia NDWI',false);

                /*PUNTOS DE CONTROL POR COBERTURAS*/

/* En este parte del código, se genera una serie de puntos de control por
cobertura de agua. Definida la cobertura, se crean puntos de entrenamiento que

```

permitirán reclasificar los valores del NDWI. Los puntos de control para el agua se definen tomando como referencia el río Sinú (bordes hasta donde se extendió la lámina de agua en época de lluvia), embalses y la ciénaga grande de Loricá.*/*

/*11. Se define la geometría de puntos para agua. La geometría queda como una colección de puntos, se genera una variable con la colección de puntos para la cobertura, se genera un mapa de la variable y se exportan los puntos con sus respectivas coordenadas*/

```
var Cobertura_agua= Agua;
Map.addLayer(Cobertura_agua, {color: '#480ed6'}, 'Cobertura_agua',0);
Export.table.toDrive({
  'collection': Cobertura_agua,
  'description': 'Cobertura_agua',
  'fileNamePrefix': 'Agua',
  'fileFormat': 'CSV'});
```

/*12a. Definidos los puntos de control, se convierten en puntos de entrenamiento donde la colección de puntos de la colección, se cruzan con la variable NDWI para asignar valores del índice en época de sequía a cada punto, se imprimen para visualizar en la consola los valores de NDWI por cada punto de entrenamiento y se exportan*/

```
var Puntos_entrenamiento_agua_epoca_sequia = ndwi_epoca_sequia.sampleRegions({
  collection: Cobertura_agua,
  properties: ['CID'],
  scale: 10});
print('Puntos_entrenamiento_agua_epoca_sequia',Puntos_entrenamiento_agua_epoca_sequia);
Export.table.toDrive({
  'collection': Puntos_entrenamiento_agua_epoca_sequia,
  'description': 'Cobertura_agua_epoca_sequia',
  'fileNamePrefix': 'Agua',
  'fileFormat': 'CSV'});
```

/*12b. Definidos los puntos de control, se convierten en puntos de entrenamiento donde la colección de puntos de la colección, se cruzan con la variable NDWI para asignar valores del índice en época de lluvia a cada punto, se imprimen para visualizar en la consola los valores de NDWI por cada punto de entrenamiento y se exportan*/

```
var Puntos_entrenamiento_agua_epoca_lluvia = ndwi_epoca_lluvia.sampleRegions({
  collection: Cobertura_agua,
  properties: ['CID'],
  scale: 10});
print('Puntos_entrenamiento_agua_epoca_lluvia',Puntos_entrenamiento_agua_epoca_lluvia);
Export.table.toDrive({
  'collection': Puntos_entrenamiento_agua_epoca_lluvia,
  'description': 'Cobertura_agua_epoca_lluvia',
  'fileNamePrefix': 'Agua',
  'fileFormat': 'CSV'});
```

/*UMBRALES PARA RECLASIFICACIÓN, RECLASIFICACIÓN DESDE EL NDWI PARA LA ÉPOCA DE SEQUÍA Y ÉPOCA DE LLUVIA Y GENERACIÓN DE MAPA SEGÚN LA RECLASIFICACIÓN REALIZADA*/

/*Calculado el NDWI, creada la nueva banda del NDWI para las dos épocas de estudio, definidos los puntos de entrenamiento, se realiza el proceso de reclasificación para las dos épocas de estudio. Con los campos de entrenamiento, se definen los umbrales de las coberturas (agua y no agua (otras coberturas)).

/*13a. Se realiza la reclasificación para la época de sequía, se imprime en la consola de GGE los valores reclasificados y se genera el mapa reclasificado para cada época de estudio*/

```
var reclasificacion_ndwi_epoca_sequia = ee.Image(0)
  .where(ndwi_epoca_sequia.gt(-1).and(ndwi_epoca_sequia.lte(-0.414)), 0)
  .where(ndwi_epoca_sequia.gt(-0.414).and(ndwi_epoca_sequia.lte(1)), 1);
print(reclasificacion_ndwi_epoca_sequia,'reclasificacion_ndwi_epoca_sequia');
Map.addLayer(reclasificacion_ndwi_epoca_sequia.clip(AOI1), {min: 0, max :1,
palette:['green','blue']}, 'Epoca Sequia NDWI Reclasificacion',0);
```


/*13b. Se realiza la reclasificación para la época de lluvia, se imprime en la consola de GGE los valores reclasificados y se genera el mapa reclasificado para cada época de estudio*/

```
var reclasificacion_ndwi_epoca_lluvia = ee.Image(0)
  .where(ndwi_epoca_lluvia.gt(-1).and(ndwi_epoca_lluvia.lte(-0.414)), 0)
  .where(ndwi_epoca_lluvia.gt(-0.414).and(ndwi_epoca_lluvia.lte(1)), 1);

print(reclasificacion_ndwi_epoca_lluvia,'reclasificacion_ndwi_epoca_lluvia');
Map.addLayer(reclasificacion_ndwi_epoca_lluvia.clip(AOI1), {min: 0, max :1,
palette:['green', 'blue']}, 'Epoca Lluvia NDWI Reclasificacion',0);
```

/*APLICACIÓN DE ALGEBRA DE MAPAS EN FUNCIÓN DE LA RECLASIFICACIÓN, DETECCIÓN DE CAMBIOS Y ZONAS INUNDADAS (ÉPOCA DE SEQUÍA Y LLUVIA) Y GENERACIÓN MAPA DE INUNDACIONES*/

/*14. En el numeral anterior, se realizó el proceso de reclasificación según los umbrales definidos; en el proceso de reclasificación se le asignó a la cobertura de vegetación el ID 0 y a la cobertura de agua el ID 1. Con los anteriores valores, se realizó el álgebra de mapas y se analiza la detección de cambios mediante la diferencia de la época de sequía y época de lluvia identificando las zonas inundadas. Por último, se imprime en la consola los valores obtenidos según el álgebra de mapas y se genera el mapa de zonas inundadas*/

```
var diferencia_epocas_ndwi =
reclasificacion_ndwi_epoca_sequia.subtract(reclasificacion_ndwi_epoca_lluvia);
print(diferencia_epocas_ndwi, 'Diferencia Epocas NDWI, Zonas Inundadas');
Map.addLayer(diferencia_epocas_ndwi.clip(AOI1), {min: -1, max :1,
palette:['blue','white','green']}, 'Mapa con zonas inundadas');
```

//CALCULO DE ÁREAS CON LOS CAMBIOS DETECTADOS Y ÉPOCA DE LLUVIA//

//15. En primera instancia, se configura los parámetros de presentación para los gráficos según detección de cambios

```
var titulos_grafico_deteccion_cambios = {
  lineWidth: 1,
  pointSize: 2,
  hAxis: {title: 'Coberturas'},
  vAxis: {title: 'Area Ha'},
  title: 'Area con los cambios detectados',
  series: {
    0: { color: 'blue'}, //Inundado//
    1: { color:'gray'}, //Sin Cambios//
    2: { color:'green'}, //Fenomenos antropicos//
  }
};
```

/*16. Se calcula el área por cada cobertura reclasificada en función de la detección de cambios*/

```
var calculo_area_deteccion_cambios = ui.Chart.image.byClass({
  image: ee.Image.pixelArea().divide(10000).addBands(diferencia_epocas_ndwi),
  classBand: 'constant',
  region: AOI1,
  scale: 30,
  reducer: ee.Reducer.sum()
}).setOptions(titulos_grafico_deteccion_cambios)
.setSeriesNames(['Inundado','Sin Cambios','Fenomenos Antropicos']);
print(calculo_area_deteccion_cambios,'Cálculo de área según detección de cambios en Ha');
```

/*SELECCIÓN DEL DSM, PROCESAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL UMBRAL SEGÚN NIVELES DE INUNDACIÓN*/

/*Se selecciona el conjunto de datos del modelo digital de superficie ALOS PALSAR y se define el umbral de referencia, el cual está en función de los niveles de inundación detectados para la época de lluvia*/

/*17. Se utiliza la opción que permite calcular la elevación de cada pixel del DSM seleccionado*/

```

var Elevacion = dsm.select('AVE').clip(AOI1);

/*18. Se cargan los NPs del IGAC para verificar las elevaciones del DSM
comparando con las elevaciones de los NPs certificados por el IGAC. De esta forma
definir el error medio cuadratico. Para esta operación, se asocia la variable
elevación con la colección de NPS*/
var NPs_chequeo = table;
print('NPs_Chequeo',table);
Map.addLayer(table, {color: 'red'}, 'NPs_Chequeo', 0);

var Puntos_control_NP = Elevacion.sampleRegions({
  collection: table,
  properties: ['CID'],
  scale: 10});
print('Puntos_control_NP',Puntos_control_NP);

/*19. Se crea la opción que permite en caso de ser necesario, elevar o bajar el
DSM. Para lo anterior, se puede realizar un chequeo de elevaciones considerando las
elevaciones referenciadas al nivel medio del mar y el de los NPs de la red pasiva del
IGAC. Se imprime en la consola de GGE la opción de visualizar los valores de elevación*/
var Elevar_Bajar_DSM = Elevacion.add(0); //Se puede elevar o bajar el DSM//
var Color2 = ['green'];
Map.addLayer(Elevar_Bajar_DSM, {min: 0, max: 1000, palette: Color2}, 'Mapa
elevaciones del DSM',0);

/*20. En este apartado, se utiliza un método estático para un cálculo más
complejo, permitiendo crear un mapa de sombreado. Se imprime para descubrir qué bandas
hay allí*/
var Terrain = ee.Terrain.products(Elevacion);
print('Terrain', Terrain);
Map.addLayer(Terrain, {bands: 'hillshade',"gamma":1.8,'Opacity':0.68,min: 161.53,
max: 199.76}, 'Mapa Sombreado',0);

/*21. Esta operación permite encontrar lugares en función de las elevaciones. Por
último, se imprime el DSM y se genera el mapa con el umbral según el nivel de
inundación de la época de lluvia (NMA). Elevaciones inferiores a nivel época de lluvia
en metros, se inunda. La opción (updateMask) Este es un truco útil. Establece todos los
píxeles cero en enmascarados (sin datos).*/
var Elevacion_inundacion_epoca_lluvia =
Elevacion.lt(12).rename('Elevación_inundacion_epoca_lluvia');
Elevacion_inundacion_epoca_lluvia =
Elevacion_inundacion_epoca_lluvia.updateMask(Elevacion_inundacion_epoca_lluvia);
Map.addLayer(Elevacion_inundacion_epoca_lluvia, {palette: ['blue']}, 'Áreas
inundables f(DSM y NMA)',0);

/*IDENTIFICACIÓN DE POSIBLE ÁREA DE INUNDACIÓN*/

/*22 Se calcula el área de la posible zona expuesta a inundaciones en función de
las elevaciones inferiores al nivel de inundación antes calculado. */
var Area_expuesta_inundacion = Elevacion_inundacion_epoca_lluvia
.multiply(ee.Image.pixelArea().divide(10000))
.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry:AOI1,
  scale: 30});
print('Área_expuesta_inundación, Ha', Area_expuesta_inundacion);

/*23. Adicionalmente, se calcula la pendiente media de la zona de estudio. */
var Pendiente_media = Terrain.select('slope').reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  geometry: AOI1,
  scale: 30});
print('Pendiente media:',Pendiente_media);

/*24. Se exportan los mosaicos.*/

Export.image.toDrive({image: Mosaico_epoca_sequia, description:
'Mosaico_epoca_sequia',
scale: 4, region: AOI1, fileFormat: 'GeoTIFF',});

```

```
    Export.image.toDrive({image: Mosaico_epoca_lluvia, description:
'Mosaico_epoca_lluvia',
    scale: 4, region: AOI1, fileFormat: 'GeoTIFF',});

    Export.image.toDrive({image: ndwi_epoca_sequia, description: 'ndwi_epoca_sequia',
    scale: 4, region: AOI1, fileFormat: 'GeoTIFF',});

    Export.image.toDrive({image: ndwi_epoca_lluvia, description: 'ndwi_epoca_lluvia',
    scale: 4, region: AOI1, fileFormat: 'GeoTIFF',});

    Export.image.toDrive({image: reclasificacion_ndwi_epoca_sequia, description:
'reclasificacion_ndwi_epoca_sequia',
    scale: 4, region: AOI1, fileFormat: 'GeoTIFF',});

    Export.image.toDrive({image: reclasificacion_ndwi_epoca_lluvia, description:
'reclasificacion_ndwi_epoca_lluvia',
    scale: 4, region: AOI1, fileFormat: 'GeoTIFF',});

    Export.image.toDrive({image: diferencia_epocas_ndwi, description:
'diferencia_epocas_ndwi',
    scale: 4, region: AOI1, fileFormat: 'GeoTIFF',});

    Export.image.toDrive({image: Elevar_Bajar_DSM, description:
'Mapa_elevaciones_del_DSM',
    scale: 4, region: AOI1, fileFormat: 'GeoTIFF',});
```

Anexo 15 Procesamiento digital desde GGE empleando imágenes SAR

```
Imports (5 entries)
▸ var Table: Table FAO/GAUL/2015/level2
▸ var DEM: Image "WWF HydroSHEDS Void-Filled DEM, 3 Arc-Seconds" (1 band)
▸ var imageVisParam: VV from 0.8084186383799002 to 1.1979333920970117
▸ var Clip: Polygon, 4 vertices
▸ var table: Table projects/ee-jediaz16/assets/NPs_Chima

//*****//

/*ANÁLISIS DE AMENAZA POR INUNDACIONES ASOCIANDO TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN
Y LA PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN EN LA SUBREGIÓN DEL BAJO SINÚ, CÓRDOBA, COLOMBIA*/

/*DEFINICIÓN DEL AREA DE ESTUDIO*/

/* Para la definición del área de estudio nombrada como AOI, se hace a partir de la Capa
de Unidades Administrativas Globales (GAUL), la cual compila las unidades
administrativas para todos los países del mundo. El GAUL siempre mantiene capas globales
con un sistema de codificación unificado, primero (Nivel 0: Países, Nivel 1
Departamentos o estados y Nivel 2: Municipios o distritos). EL procedimiento se muestra
a continuación*/

//1. Se selecciona el país de interés el cual está compilado en las unidades
administrativas, nivel 0
var Pais = 'Colombia';

//2. Se selecciona el departamento de estudio el cual contiene la subregión de la sabana
cordobesa, nivel 1
var Departamento = 'Cordoba';

/*3. Como primera medida se selecciona el municipio de interés nivel 2 y se crea la
variable (municipio n), se crea una variable (AOIn) con la colección filtrada de los
límites administrativos por país, departamento y municipio, la se imprime en la consola
de GGE; por último, se imprime el mapa de la variable (AOIn)*/
var Municipio_Monteria = 'Chima';
var AOI1= Table.filter(ee.Filter.eq('ADM0_NAME', Pais))
    .filter(ee.Filter.eq('ADM1_NAME', Departamento))
    .filter(ee.Filter.eq('ADM2_NAME', Municipio_Monteria));
print (AOI1, 'Área de Interés:' + Municipio_Monteria + ' ' + Departamento + ' ' + Pais);
Map.addLayer(AOI1,0);

/*4. se crea una capa o imagen vacía que contendrá el municipio, se adiciona un vector
del municipio de interés el cual se carga en la capa vacía. Por último, se genera el
mapa según los límites definidos en el vector el cual trae el nombre de los límites
administrativos*/
var Monteria_vacia = ee.Image().byte();
var Monteria_vector = Monteria_vacia.paint({
  'featureCollection': AOI1,
  'color': 1,
  'width': 1.5});
Map.addLayer(Monteria_vector, {'palette': '0204ff'}, 'Área de Interés:' +
Municipio_Monteria + ' ' + Departamento + ' ' + Pais, 0);

/*SELECCIÓN ÉPOCAS DE ESTUDIO*/

/*Las épocas de estudio seleccionadas, corresponden a épocas de sequía y de lluvia del
año 2022, las cuales corresponden a los febrero - abril y julio - octubre
respectivamente, épocas según el régimen bimodal climático que se presenta en la
subregión de la sabana en el departamento de Córdoba*/

//5. Se definen las épocas de sequía y épocas de lluvias
var epoca_sequia_inicio= '2022-02-01';
var epoca_sequia_fin='2022-04-01';

var epoca_lluvia_inicio= '2022-07-15';
var epoca_lluvia_fin='2022-10-15';

/*SELECCIÓN DE LA COLECCIÓN DE IMÁGENES*/
```

*/*se seleccionó la colección Sentinel-1, GRD a nivel 1, con un modo de adquisición de amplia franja interferométrica (IW) en banda C, tanto para orbitas descendientes y ascendentes y polarizaciones VH y VV, obteniendo diferentes alternativas de imágenes para las diferentes épocas pre y post al evento.*/*

//6a. Se carga la colección Sentinel-1 C-band SAR Ground Range (escala logarítmica, VV, descendente)

```
var collectionVV = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S1_GRD')
  .filter(ee.Filter.eq('instrumentMode', 'IW'))
  .filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation', 'VV'))
  .filter(ee.Filter.eq('orbitProperties_pass', 'DESCENDING'))
  .filterMetadata('resolution_meters', 'equals', 10)
  .filterBounds(AOI1)
  .select('VV');
print(collectionVV, 'Collection VV');
```

//6b. Se carga la colección Sentinel-1 C-band SAR Ground Range (escala logarítmica, VV, ascendente)

```
var collectionVV = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S1_GRD')
  .filter(ee.Filter.eq('instrumentMode', 'IW'))
  .filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation', 'VV'))
  .filter(ee.Filter.eq('orbitProperties_pass', 'ASCENDING'))
  .filterMetadata('resolution_meters', 'equals', 10)
  .filterBounds(AOI1)
  .select('VV');
print(collectionVV, 'Collection VV');
```

//6c. Se carga la colección Sentinel-1 C-band SAR Ground Range (escala logarítmica, VH, descendente)

```
var collectionVH = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S1_GRD')
  .filter(ee.Filter.eq('instrumentMode', 'IW'))
  .filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation', 'VH'))
  .filter(ee.Filter.eq('orbitProperties_pass', 'DESCENDING'))
  .filterMetadata('resolution_meters', 'equals', 10)
  .filterBounds(AOI1)
  .select('VH');
print(collectionVH, 'Collection VH');
```

//6d. Se carga la colección Sentinel-1 C-band SAR Ground Range (escala logarítmica, VH, ascendente)

```
var collectionVH = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S1_GRD')
  .filter(ee.Filter.eq('instrumentMode', 'IW'))
  .filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation', 'VH'))
  .filter(ee.Filter.eq('orbitProperties_pass', 'ASCENDING'))
  .filterMetadata('resolution_meters', 'equals', 10)
  .filterBounds(AOI1)
  .select('VH');
print(collectionVH, 'Collection VH');
```

//7. Se filtran los datos de Sentinel-1 por fecha y se crea un mosaico con las imágenes antes del evento y la imagen después del evento.

```
var epoca_sequia_VV = collectionVV.filterDate(epoca_sequia_inicio,
  epoca_sequia_fin).mosaic().clip(AOI1);
var epoca_lluvia_VV = collectionVV.filterDate(epoca_lluvia_inicio,
  epoca_lluvia_fin).mosaic().clip(AOI1);
var epoca_sequia_VH = collectionVH.filterDate(epoca_sequia_inicio,
  epoca_sequia_fin).mosaic().clip(AOI1);
var epoca_lluvia_VH = collectionVH.filterDate(epoca_lluvia_inicio,
  epoca_lluvia_fin).mosaic().clip(AOI1);
```

//8. Se muestra en la consola de GEE las imágenes seleccionadas y creadas en el mosaico

```
print(epoca_sequia_VV, 'epoca_sequia_VV');
print(epoca_lluvia_VV, 'epoca_lluvia_VV');
print(epoca_sequia_VH, 'epoca_sequia_VH');
print(epoca_lluvia_VH, 'epoca_lluvia_VH');
```

```

/*9. Se realiza una corrección de moteado aplicando un Kernel mediante un círculo
predeterminado en metros. Este proceso de corrección se realizó para las imágenes
obtenidas en las diferentes orbitas antes mencionadas con polarización VV y VH. De esta
forma se obtuvieron mosaicos de cada época corregidos que permitió calcular valores de
intensidad de retrodispersión*/
var smoothing_radius = 50;
var epoca_sequia_filtrado_VV = epoca_sequia_VV.focal_mean(smoothing_radius,'circle',
'meters');
var epoca_lluvia_filtrado_VV = epoca_lluvia_VV.focal_mean(smoothing_radius, 'circle',
'meters');
var epoca_sequia_filtrado_VH = epoca_sequia_VH.focal_mean(smoothing_radius,'circle',
'meters');
var epoca_lluvia_filtrado_VH = epoca_lluvia_VH.focal_mean(smoothing_radius, 'circle',
'meters');

//-----CÁLCULO DE LA EXTENSIÓN DE INUNDACIÓN -----//

/*10. Se calcula la relación entre las imágenes de antes y después del evento
var diferencia_epocas_VV = epoca_lluvia_filtrado_VV.divide(epoca_sequia_filtrado_VV);
var diferencia_epocas_VH = epoca_lluvia_filtrado_VH.divide(epoca_sequia_filtrado_VH);

/*11. Se aplica el umbral de diferencia predefinido y cree la máscara de extensión de
inundación. Se empleó una máscara de estacionalidad de agua superficial mediante la cual
se pudieron separar aquellos píxeles que se detectaron como agua después de la inundación
y agua permanente*/
var diferencia_epocas_threshold = 1.2;
var threshold = diferencia_epocas_threshold;
var diferencia_binaria_VV = diferencia_epocas_VV.gt(threshold);
var diferencia_binaria_VH = diferencia_epocas_VH.gt(threshold);
print('diferencia_binaria_VV',diferencia_binaria_VV);
print('diferencia_binaria_VH',diferencia_binaria_VH);

// Se refina el resultado de la inundación usando conjuntos de datos adicionales

/*12. Se incluye la capa JRC en la estacionalidad del agua superficial para enmascarar
los píxeles de inundación de las áreas de agua "permanente" (donde hay agua > 4 meses
del año del análisis*/
var swater = ee.Image('JRC/GSW1_0/GlobalSurfaceWater').select('seasonality');
var Mascara_agua = swater.gte(4).updateMask(swater.gte(4));

/*13. Capa inundada donde los cuerpos de agua son permanentes (agua > 4 meses/año) se le
asigna un valor 0
var Mascara_areas_inundadas_VV = diferencia_binaria_VV.where(Mascara_agua,0);
var Mascara_areas_inundadas_VH = diferencia_binaria_VH.where(Mascara_agua,0);

/*14. Se definen las áreas inundadas finales sin píxeles en cuerpos de agua permanentes
mediante una máscara donde se incluyen los píxeles reclasificados como 0 (aguas
permanentes) */
var Areas_inundadas_VV =
Mascara_areas_inundadas_VV.updateMask(Mascara_areas_inundadas_VV);
var Areas_inundadas_VH =
Mascara_areas_inundadas_VH.updateMask(Mascara_areas_inundadas_VH);

/*15. Se computa la conectividad de los píxeles para eliminar aquellos conectados a 8 o
menos vecinos Esta operación reduce el ruido del producto de la extensión de la
inundación*/
var connections_VV = Areas_inundadas_VV.connectedPixelCount();
var Areas_inundadas_VV= Areas_inundadas_VV.updateMask(connections_VV.gte(8));
var connections_VH = Areas_inundadas_VH.connectedPixelCount();
var Areas_inundadas_VH = Areas_inundadas_VH.updateMask(connections_VH.gte(8));

/*16. las zonas con pendiente menor al 5% obedecieron a zonas inundadas y las zonas con
pendiente mayor al 5% se enmascararon tomando como referencia un modelo digital de
elevación. */
var terrain = ee.Algorithms.Terrain(DEM);
var slope = terrain.select('slope');
var Areas_inundadas_VV = Areas_inundadas_VV.updateMask(slope.lt(5));
var Areas_inundadas_VH = Areas_inundadas_VH.updateMask(slope.lt(5));

```

```

//17. Se calcula el área de extensión de la inundación y se crea una capa ráster que
contiene la información del área de cada pixel
var polarization_VV = "VV";
var Areas_inundadas_por_pixel_VV = Areas_inundadas_VV.select(polarization_VV)
    .multiply(ee.Image.pixelArea());
var polarization_VH = "VH";
var Areas_inundadas_por_pixel_VH = Areas_inundadas_VH.select(polarization_VH)
    .multiply(ee.Image.pixelArea());

/*18. Se suman las áreas de píxeles inundados, por defecto se establece en 'bestEffort:
true' para reducir el tiempo de cálculo. Para un resultado más preciso, se establece
bestEffort en falso y aumenta 'maxPixels'. */
var flood_stats_VV = Areas_inundadas_por_pixel_VV.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: AOI1,
  scale: 10, // native resolution
  //maxPixels: 1e9,
  bestEffort: true
});
var flood_stats_VH = Areas_inundadas_por_pixel_VH.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: AOI1,
  scale: 10, // native resolution
  //maxPixels: 1e9,
  bestEffort: true
});

//19. Se convierte la extensión de la inundación a hectáreas (los cálculos del área se
dan originalmente en metros)
var Areas_inundadas_ha_VV = flood_stats_VV
    .getNumber(polarization_VV)
    .divide(10000)
    .round();
print('Areas_inundadas_ha_VV',Areas_inundadas_ha_VV);

var Areas_inundadas_ha_VH = flood_stats_VH
    .getNumber(polarization_VH)
    .divide(10000)
    .round();
print('Areas_inundadas_ha_VH',Areas_inundadas_ha_VH);

/*20. Se cargan los NPs del IGAC para verificar las elevaciones del DSM comparando con
las elevaciones de los NPs certificados por el IGAC. De esta forma definir el error
medio cuadrático. Para esta operación, se asocia la variable elevación con la colección
de NPS*/
var NPs_chequeo = table;
print('NPs_Chequeo',table);
Map.addLayer(table, {color: 'red'}, 'NPs_Chequeo', 0);

var Puntos_control_NP = DEM.sampleRegions({
  collection: table,
  properties: ['CID'],
  scale: 10});
print('Puntos_control_NP',Puntos_control_NP);
Export.table.toDrive({
  'collection': Puntos_control_NP,
  'description': 'Puntos_control_NP',
  'fileNamePrefix': 'NP_Control',
  'fileFormat': 'CSV'});

//----- GENERACIÓN DE MAPAS -----//

//21a. Se visualizan los mapas. Antes y después de la inundación en un mosaico SAR
Map.centerObject(AOI1, 7);
Map.addLayer(epoca_sequia_VV, {min:-25,max:-5}, 'epoca_sequia_VV', 0);
Map.addLayer(epoca_lluvia_VV, {min:-25,max:-5}, 'epoca_lluvia_VV', 0);
Map.addLayer(epoca_sequia_VH, {min:-25,max:-5}, 'epoca_sequia_VH', 0);
Map.addLayer(epoca_lluvia_VH, {min:-25,max:-5}, 'epoca_lluvia_VH', 0);

```

```

//21b. Se visualizan las imágenes filtradas. Antes y después de la inundación en un
mosaico SAR
Map.addLayer(epoca_sequia_filtrado_VV, {min:-15,max:0}, 'epoca_sequia_filtrado_VV', 0);
Map.addLayer(epoca_lluvia_filtrado_VV, {min:-15,max:0}, 'epoca_lluvia_filtrado_VV', 0);
Map.addLayer(epoca_sequia_filtrado_VH, {min:-25,max:0}, 'epoca_sequia_filtrado_VH', 0);
Map.addLayer(epoca_lluvia_filtrado_VH, {min:-25,max:0}, 'epoca_lluvia_filtrado_VH', 0);

//21c. Se visualizan las imágenes en composición de color RGB VV y VH
Map.addLayer(epoca_lluvia_filtrado_VV.addBands(epoca_sequia_filtrado_VV).addBands(epoca_
lluvia_filtrado_VV), {min: -15, max: -8}, 'AVV/BVV1/AVV2_composite_RGB_VV', 0);
Map.addLayer(epoca_lluvia_filtrado_VH.addBands(epoca_sequia_filtrado_VH).addBands(epoca_
lluvia_filtrado_VH), {min: -25, max: -8}, 'AVH/BVV1/AVH2_composite_RGB_VH', 0);

//21d. Se visualizan las imágenes de la diferencia de épocas o detección de cambios.
Map.addLayer(diferencia_epocas_VV, {min:0,max:2}, "diferencia_epocas_VV", 0);
Map.addLayer(diferencia_epocas_VH, {min:0,max:2}, "diferencia_epocas_VH");

//21e. Se visualizan las áreas inundadas.
Map.addLayer(Areas_inundadas_VV, {palette:"blue"}, 'Areas_inundadas_VV', 0);
Map.addLayer(Areas_inundadas_VH, {palette:"blue"}, 'Areas_inundadas_VH');

//21f. Se visualizan los mapas de sombreado y el modelo digital de elevación
Map.addLayer(terrain.clip(AOI1), {bands: 'hillshade', "gamma":1.8, 'Opacity':0.68, min:
161.53, max: 199.76}, 'Mapa_Sombreado', 0);
Map.addLayer(DEM.clip(AOI1), {min: 0, max: 1000, palette: 'blue'},
'Mapa_elevaciones_del_DEM', 0);

//----- PRODUCTOS A EXPORTAR -----//
//22. Se exportan los diferentes productos generados durante el procesamiento digital de
imágenes
Export.image.toDrive({image: epoca_sequia_filtrado_VV, description:
'epoca_sequia_filtrado_VV', scale: 4, region: AOI1, fileFormat: 'GeoTIFF',});
Export.image.toDrive({image: epoca_lluvia_filtrado_VV, description:
'epoca_lluvia_filtrado_VV', scale: 4, region: AOI1, fileFormat: 'GeoTIFF',});
Export.image.toDrive({image: epoca_sequia_filtrado_VH, description:
'epoca_sequia_filtrado_VH', scale: 4, region: AOI1, fileFormat: 'GeoTIFF',});
Export.image.toDrive({image: epoca_lluvia_filtrado_VH, description:
'epoca_lluvia_filtrado_VH', scale: 4, region: AOI1, fileFormat: 'GeoTIFF',});
Export.image.toDrive({image: diferencia_epocas_VV, description: 'diferencia_epocas_VV',
scale: 4, region: AOI1, fileFormat: 'GeoTIFF',});
Export.image.toDrive({image: diferencia_epocas_VH, description: 'diferencia_epocas_VH',
scale: 4, region: AOI1, fileFormat: 'GeoTIFF',});
Export.image.toDrive({image: Areas_inundadas_VV, description: 'Areas_inundadas_VV',
scale: 4, region: AOI1, fileFormat: 'GeoTIFF',});
Export.image.toDrive({image: Areas_inundadas_VH, description: 'Areas_inundadas_VH',
scale: 4, region: AOI1, fileFormat: 'GeoTIFF',});
Export.image.toDrive({image: DEM, description: 'Modelo_Digital_Elevacion', scale: 4,
region: AOI1, fileFormat: 'GeoTIFF',});

```




Universidad[®]
Católica
de Manizales

VIGILADA MINEDUCACIÓN

*Obra de Iglesia
de la Congregación*



Hermanas de la Caridad
Dominicas de La Presentación
de la Santísima Virgen

Universidad Católica de Manizales
Carrera 23 # 60-63 Av. Santander / Manizales - Colombia
PBX (6)8 93 30 50 - www.ucm.edu.co