

Identificación de zonas de inundación a partir de imágenes (SAR) y de eventos históricos de inundación: caso de estudio Santiago de Cali, Colombia

MARIA EUGENIA SEVILLANO RODRIGUEZ¹ | LUIS CARLOS BRAVO PEÑA² |
LUIS CARLOS ALATORRE CEJUDO³ | ELKIN DE JESÚS SALCEDO HURTADO⁴

Recibido: 28/06/2019 | Aceptado: 06/04/2020

Resumen

El objetivo de este trabajo fue identificar zonas de inundación en la ciudad de Santiago de Cali Colombia, mediante imágenes de RADAR e información histórica. Durante el proceso se utilizaron imágenes Sentinel 1 pre y post evento y reportes de fenómenos hidrometeorológicos (1986-2018). El método empleado precisó un abordaje desde diferentes ángulos, en lo que se enmarca como complementariedad metodológica. Consistió en una revisión documental, reconocimiento de campo, y el tratamiento digital de datos a partir de clasificación supervisada. Los resultados de la revisión documental y el trabajo de campo indican la ocurrencia de 766 eventos asociados a inundación que han afectado a 186 barrios en un periodo de 32 años. Además de esto, el procesamiento digital de las imágenes identificó 2082, 25 hectáreas inundables, con fiabilidad global del 89 por ciento e índice Kappa de 0.76 por ciento. Es importante resaltar que la mayoría de áreas inundables se localizaron en zonas adyacentes a los ríos Cauca, Cali y a los canales Interceptor Sur y Oriental.

Palabras clave: Inundación urbana; Imágenes SAR; Clasificación basada en objetos; cartografía de eventos históricos de inundación

Abstract

Identification of flood zones from images (SAR) and historical flood events: case study Santiago de Cali, Colombia

The objective of this work was to identify flood zones in the city of Santiago de Cali Colombia, through historical information and RADAR images. During the process Sentinel 1 images pre and post event were used, and reports of hydrometeorological phenomena (1986-2018) were revisited. The method used corresponds to the framework named methodological complementarity and was carried out with the documentary review, fieldwork and the digital treatment of data based on supervised classification. The results of documentary review and fieldwork indicate the occurrence of 766 events associated with floods that have affected 186 neighborhoods in a period of 32 years. In addition to this, digital image processing identified 2082, 25 hectares of flood-

1. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México, mariasevillano14@hotmail.com

2. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México, luis.bravo@uacj.mx

3. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México, luis.alatorre@uacj.mx

4. Universidad del Valle, Colombia, elkin.salcedo@univalle.edu.co

plains, with overall reliability of 89 percent. Kappa index of 0.76 percent. It is important to note that the majority of water plates were located in areas adjacent to the Cauca, Cali and Interceptor Sur and Oriental channels.

Keywords: Urban flood; SAR images; Classification based on objects; methodological complementarity

1. Introducción

Colombia es uno de los países de América Latina y el Caribe con mayor pérdidas humanas y materiales a causa de inundaciones (Fernández, 1996). En nuestro país el 28% del territorio se encuentra en peligro por eventos hidrológicos (Banco Mundial & GFDRR, 2012). De ahí que, la población expuesta a inundaciones y movimientos en masa en un periodo de precipitaciones extremas durante 2010 y 2011 fue de 3 120 268 personas (CEPAL & BID, 2012). Esta situación empeora debido al crecimiento constante de las ciudades, la falta de estudios asociados a riesgos, las ausencias en el ordenamiento territorial y la estrecha relación entre la manifestación del desastre y la vulnerabilidad social (Banco Mundial & GFDRR, 2012). En un contexto general, el análisis de riesgo de inundación ha avanzado de estudios descriptivos, hacia trabajos de aplicación territorial de amenaza, vulnerabilidad y riesgo (Perles-Roselló, Olcina-Cantos, & Mérida-Rodríguez, 2018).

La amenaza o peligrosidad es la posibilidad de ocurrencia de un evento físico que puede causar algún tipo de daño a la sociedad (Lavell, 1996). La amenaza por inundación debe representar el comportamiento espacial del fenómeno en un asentamiento humano, que depende generalmente de causas climatológicas e hidrodinámicas, posibles de estudiar mediante diferentes técnicas. Los métodos más utilizados para su identificación corresponden a: *históricos, geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos* (Bescos-Atín & Camarasa-Belmonte, 2000; Degioanni-Sasia et al., 2002; Materón et al., 2006; Perles-Roselló et al., 2006; Benito, 2007; Barrantes-Castillo & Vargas-Bogantes, 2011; Gobierno de España-Ministerio de Medio Ambiente & Medio Rural Marino, 2011; Morales, 2012; Rodríguez-Gaviria, 2016; Cartaya & Mantuano-Duarte, 2016). Y, en menor medida los asistidos por *percepción remota*, debido en la mayoría de casos a los costos altos de las imágenes (Belmonte & Caamaño, 2009; Delgado & Quintero, 2013; Lorenzo & Hernández, 2018).

Sin embargo, la búsqueda de herramientas eficaces ha ocasionado que en los últimos años se dispongan geoportales de dirección libre para información de avanzada que pueden ir desde la fotografía obtenida mediante sensores aéreos hasta imágenes adquiridas a partir de satélites. El empleo creciente de sensores de vigilancia terrestre se origina en la cantidad y calidad de la información sobre el territorio, además de la posibilidad de acceso en tiempo real (en algunos casos), esto hace posible el análisis integrado de datos y la interpretación rápida y económica (Chuvienco, 2008). A causa de esto, la percepción remota y la utilización de datos poco convencionales permiten delimitar inundaciones en distintas zonas. En el desarrollo de estos procedimientos, las imágenes SAR son un insumo importante, ya que proveen información útil para la resolución de problemas en el ámbito territorial, incluyen aplicaciones de localización potencial de inundaciones, modelamiento de flujo de ríos y tasación de los daños después de un desastre (Céspedes & Pérez, 2008).

A su vez, estudiosos y entidades gubernamentales han tenido el interés de abordar el riesgo de desastres asociados a inundación implementando procesos semi-automatizados utilizando imágenes de satélite de alta resolución. Así por ejemplo: Se realizó una aplicación basada en imágenes SAR para monitorear y prevenir inundaciones en Argentina (Belmonte y Caamaño, 2009); se aplicó la teledetección para monitorear eventos hídricos superficiales mediante imágenes Cosmo SkyMed (Edrosa, 2009); se utilizó la teledetección para interpretar zonas inundables en Boyacá, Colombia (Delgado & Quintero, 2013); se compararon los resultados de imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2 en la detección y delineación de información de crisis de desastres naturales (Donezar-Hoyos, et al., 2017). Asimismo, en la guía para la elaboración de mapas de inundación, se señala que se pueden crear distintos tipos de cartografía dependiendo de la información disponible y las fuentes para su construcción pueden ser, en algunos casos imágenes de satélites debidamente interpretadas y verificadas (República de Colombia-IDEAM, 2017); en Acapulco de Juárez, Guerrero-México, se obtuvo cartografía de áreas inundadas utilizando imágenes de radar TanDEM-X (Lorenzo & Hernández, 2018). Dicho lo anterior, la utilidad de sensores remotos para reconocer áreas de peligro urbano ante inundaciones ha sido previamente demostrada.

El objetivo de este trabajo fue identificar zonas de inundación a partir de imágenes (SAR) y de eventos históricos de inundación en Cali, Colombia. Se abordó, un método de clasificación supervisada y análisis de registros de inundación utilizando imágenes radar de apertura sintética (SAR - Synthetic Aperture Radar), este sistema tiene iluminación lateral que emite energía en el intervalo de frecuencias de microondas. La ventaja de un satélite SAR es que puede proveer imágenes durante el día y la noche en cualquier condición meteorológica. Además de esto, la señal puede penetrar a través del suelo (dependiendo de la longitud de onda), proporcionando información sobre la presencia de inundación (Zozaya & Pino, 2020). Desde esta perspectiva, se expone, la metodología, los resultados, la discusión y finalmente las conclusiones.

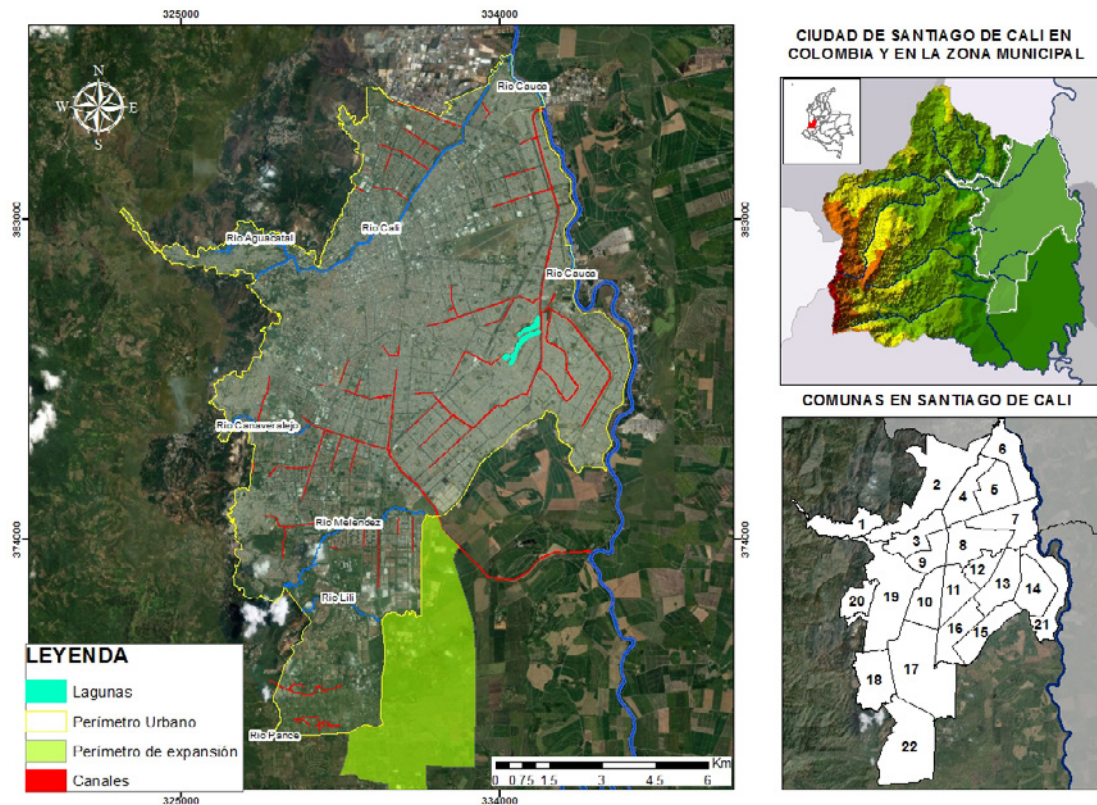
2. Metodología

La realización del proceso metodológico parte de la complementariedad entre métodos. El apartado se desarrolló en ocho etapas en las cuales se describe la zona de estudio, los aspectos generales de la técnica, el procesamiento de imágenes de satélite, las fuentes de revisión documental, el trabajo de campo y la integración de resultados.

2.1. Zona de estudio

Santiago de Cali, es la capital del departamento del Valle del Cauca y la tercera ciudad más poblada de Colombia, cuenta con una población de 2 227 642 habitantes, de los cuales 2 172 527 residen en la zona urbana (República de Colombia-DANE, 2018). En la ciudad se identifican dos grandes unidades geológicas y geomorfológicas. La primera, localizada en la parte occidental donde se ubica la franja montañosa; la segunda en la línea oriental que corresponde al valle aluvial del río Cauca, conformado por depósitos aluviales que integran una planicie extendida por abanicos que han favorecido la edificación de viviendas (Jiménez, 2005). A esto, se suman los ríos Meléndez, Lili, Cali, Aguacatal, Pance, Cauca y Cañaveralejo que atraviesan la ciudad (Alcaldía de Santiago de Cali-DAGMA, 2010; Alcaldía Municipal de Santiago de Cali, 2018). El uso de suelo del municipio se encuentra organizado en urbano, de expansión y rural (Alcaldía Municipal de Santiago de Cali, 2014). En este trabajo se tendrá en cuenta el área urbana que se encuentra interiormente delimitada por 22 comunas y 337 barrios (las unidades de planificación urbana más pequeñas) (Ver *Figura 1*).

Figura 1. Ubicación Santiago de Cali, Colombia



Fuente: Elaboración propia basado en cartografía de Alcaldía Municipal de Santiago de Cali, 2014

2.2. Inundaciones en Cali

De acuerdo a Jiménez (2005), Cali ha crecido hacia la zona de ladera y en las áreas bajas inundables, sectores ocupados inicialmente de manera informal. Así que, los desastres aumentaron debido a la vulnerabilidad de la población y a la intensificación de los fenómenos. Según la Alcaldía Municipal de Santiago de Cali, una de las situaciones más graves se originó por el crecimiento desordenado del distrito de Agua Blanca (al Oriente de la ciudad), debido a las características morfológicas de los terrenos (terrenos bajos, altos niveles freáticos entre otros determinantes ambientales). Las zonas ubicadas en pendientes medias (al Occidente de la ciudad) tienen afectaciones en invierno por arrastre de sedimentos y residuos sólidos. En otras zonas (Centro y Sur) hay inundaciones por la incapacidad del sistema de colectores y la falta de mantenimiento a sumideros (Alcaldía Municipal de Santiago de Cali, 2014).

A causa de esto, la inundación urbana se ha dado en dos modalidades: Inundación fluvial ocasionada por el desbordamiento de ríos: Cauca, Cali, Meléndez, Cañaveralejo, Pance, Lili, Aguacatal y tributarios e inundación pluvial provocada por la insuficiencia de colectores de lluvias que atraviesan varios sectores de la ciudad y que en algunos casos direccionan la red hídrica (canal Interceptor Sur). Desde 1970, las inundaciones han ocurrido en todos los años (excepto en 1991, año de escasez de lluvias por fenómeno El Niño 1991-1992) (Alcaldía Municipal de Santiago de Cali, 2014). De ahí que, en Cali se reportaron 1308 inundaciones durante 1950 y 2012, de las cuales 1293 ocurrieron en la zona urbana, afectando a 38 893 personas aproximadamente. Causando 28 muertes y el daño de 7728 viviendas (DESINVENTAR, 2018).

2.3. Aspectos generales del método

Para la obtención del objetivo de este trabajo se siguió un método de clasificación supervisada, revisión documental y trabajo de campo, que se integraron mediante la complementariedad metodológica. En un primer momento, se revisaron las inundaciones pasadas en la ciudad de Santiago de Cali en los últimos tres años (2016-2019) con la intención de seleccionar dos capturas (*las fechas de las imágenes debían ser: 1. Muy cercanas a la fecha exacta de inundación, 2. Con características climáticas contrarias a la primera imagen, 3. Deben haber sido registradas por periódicos locales debido a los daños ocasionados*). Se eligieron las fechas con base en la disponibilidad de imágenes SAR gratuitas y la calidad para identificar zonas de inundación conforme a su clasificación espectral. Después de obtener el área de inundación fue necesario validar los resultados.

En la validación, se revisaron los registros históricos y fotográficos de inundaciones pasadas; este procedimiento se ejecutó porque esta investigación se realizó mucho tiempo después de la inundación real. Se recurrió a utilizar la información de eventos de los últimos 32 años (1986-2018). La selección de dicho periodo para el análisis de reportes de inundación se debió a que el estudio de un único año, no refleja el verdadero comportamiento espacial de peligro (se puede representar solo en un nivel de barrios, lo cual no indica que todo el barrio se inundó realmente), ya que éstos se basan en la información de organismos de socorro (Cruz Roja, Defensa Civil, etc.) y de personas que viven en el lugar.

El periodo a estudiar se determinó a partir de los años ochenta por iniciarse en ese momento la construcción de viviendas en el valle aluvial del río Cauca ubicado en el sector oriental (Sevillano-Rodríguez & Bravo-Peña, 2018), los barrios ubicados en este lugar se encuentran en terrenos bajos, tienen altos niveles freáticos y afectaciones en invierno por arrastre de sedimentos (Alcaldía Municipal de Santiago de Cali, 2014). Además, se recorrieron los lugares cartografiados previamente, preguntando directamente a los habitantes acerca de los eventos ocurridos. Finalmente, se recurrió a la complementariedad metodológica para comparar la cartografía resultante de las imágenes SAR y el mapa de reportes de inundación teniendo en cuenta las anotaciones hechas en los recorridos.

2.4. Procesamiento de imágenes para la modelación de áreas inundables utilizando clasificación supervisada

En este apartado, se utilizaron imágenes Sentinel-1 de la Agencia Espacial Europea adquiridas en polarización (VH) y (VV) para detectar zonas inundadas. Las escenas seleccionadas corresponden a (WRS/Row 9/58) georeferenciadas en el sistema UTM 18 Norte con Datum WGS84 y se obtuvieron del portal (*Alaska satellite facility*) (NASA, 2018). La selección de las fechas se hizo a partir de los registros de inundación obtenidos de fuentes hemerográficas, considerando un antes (30/07/2017) y un después (15/11/2017), ambas imágenes con una resolución espacial de 10 metros. La primera toma, corresponde a uno de los meses de verano o temporada seca que para el caso incluye el mes de Julio. La segunda, se trató de una inundación que ocurrió en invierno (temporada de lluvias) ocasionando desbordamiento de algunas fuentes hídricas que atraviesan la ciudad, además de la obstrucción de colectores de manejo de aguas lluvias, afectación a familias y viviendas localizadas en el área.

2.4.1. Pre-procesamiento de imágenes corrección radiométrica y geométrica

Consistió en dos procedimientos: Corrección radiométrica y corrección geométrica. La corrección radiométrica para equilibrar los valores y corregir imperfecciones presentes en los píxeles, generada en la adquisición de datos y por los potenciales fallos en la calibración de los sensores. La corrección geométrica para determinar adecuadamente la posición territorial. En vista de que las imágenes SAR poseen un ruido (speckle) inherente a su proceso de captura y formación, fue necesario aplicar un *filtro espacial* que consistió en mover una ventana de dimensiones pequeñas sobre cada píxel de la imagen, aplicando un cálculo matemático (media) y utilizando el software SNAP. Como resultado se obtuvieron imágenes con características que favorecen la separación espectral de objetos.

2.4.2. Clasificación de imágenes

El método utilizado fue clasificación supervisada basada en objetos, desarrollado en el procesamiento semi-automatizado de imágenes de satélite (Chuvienco, 2008; Burnett & Blaschke, 2003). Este procedimiento permitió segmentar zonas de interés considerando píxeles similares entre sí, según las características de color, tamaño, forma, textura y del contexto que lo rodea.

2.4.3. Procedimiento

Las imágenes Sentinel 1 fueron procesadas en el software SNAP, utilizando la interface Supervised classification - Random forest classifier. Seguida de una edición semiautomática. Para facilitar la interpretación se realizó una combinación de las polarizaciones (VV) y (VH), entre las imágenes del antes y después del evento. Resultando que las zonas expuestas al estancamiento de agua se sombrean de un color más intenso, lo cual favoreció la clasificación de las imágenes. Se seleccionaron muestras para cada cobertura con el fin de obtener su valor espectral, espacial y temporal. Se determinó un valor numérico a partir de las condiciones dadas en cada escena consiguiendo el entrenamiento de las imágenes.

En la clasificación se definieron tres clases: *Agua permanente* (ríos, lagunas, quebradas), área inundada (agua estacional no permanente producto de condiciones fluviométricas y pluviométricas) y área no inundada (área con vegetación o construida sin presencia de agua estacional). El sistema se manipuló mediante la instrucción *Random Forest Classifier* y se priorizó a partir de la varianza espectral, el tamaño de píxeles corresponde a un mínimo de (2) y a un máximo de (7), respectivamente.

2.5. Revisión Documental

Para analizar el componente histórico de riesgo asociado a fenómenos hidrometeorológicos, fue necesario recurrir a fuentes de información bibliográfica. Los principales insumos corresponden a: Registros históricos desde 1986 hasta 2018 (DESINVENTAR, 2018; República de Colombia-UNGRD, 2018). En la *Tabla 1*, se clasificaron los datos en cuatro momentos. El punto inicial corresponde a 1986 (se verificaron inundaciones de un único año en ese caso). Posteriormente, se especificaron tres periodos acordes a lo propuesto en el análisis multitemporal de la expansión física en la ciudad de Santiago de Cali, Colombia (Sevillano-Rodríguez & Bravo-Peña).

Tabla 1: Ocurrencia histórica de inundación clasificada en años

AÑO	FUENTES	TIPO DE DATOS
1986	(DESINVENTAR, 2018)	Número de eventos ocurridos por año
1987 - 1998		
1999 - 2008		
2009 - 2018	(DESINVENTAR, 2018; República de Colombia-UNGRD, 2018)	

Fuente: Elaboración propia

Después de organizar la información por años, se integraron los datos con las unidades de planificación urbana (barrios y comunas) para ser presentados de manera cartográfica. Con la necesidad de avanzar en el trabajo de campo se delimitó la ruta de trabajo, equiparada con la semejanza de lugares inundables mediante imágenes SAR y los registros históricos de inundación provenientes de fuentes hemerográficas. Esto implicó hacer recorridos rápidos en los sectores considerados con menores afectaciones y detenernos mucho más en los barrios con presencia de ríos, canales y humedales.

2.6. Trabajo de campo

Considerando los resultados de los mapas de inundación, se decidió realizar la inspección de las zonas inundables en campo. En los recorridos se contactó líderes de la comunidad, quienes nos acompañaron en varios de los sitios visitados. Conforme se avanzaba en los barrios se preguntaba acerca de la forma en que se habían presentado las inundaciones y la altura del agua (se llevó a cabo sin eventos cercanos de inundación). Asimismo, los barrios que se visitaron con mayor detalle se ubican al oriente de la ciudad, en el valle aluvial del río Cauca (el río más grande que hace parte de la dinámica urbana) y están cerca de canales principales (Canal Interceptor y canal Oriental) (Alcaldía Municipal de Santiago de Cali, 2014).

2.7. Complementariedad metodológica

La complementariedad metodológica es una propuesta de integración de métodos de investigación para el estudio de un objeto a través de la utilización de diferentes técnicas y procedimientos de recolección y análisis de datos (Blanco & Pirela, 2016). En la zona de estudio esto comprende la identificación de un área de inundación mediante percepción remota y la revisión previa de reportes comunitarios de inundación. En este sentido, la estrategia utilizada se fundamentó en la triangulación con la aplicación de un diseño multimétodo. Para Blanco y Pirela (2016), la triangulación es definida como una práctica en la cual se utilizan varios métodos de investigación para un solo objeto de estudio. La triangulación es posible entendiendo que los métodos se comprenden sistemáticamente y se usan rigurosamente, los puntos de encuentro se pueden identificar cuando ambos tipos de métodos estén abordando el mismo fenómeno (Fielding & Schreier, 2001).

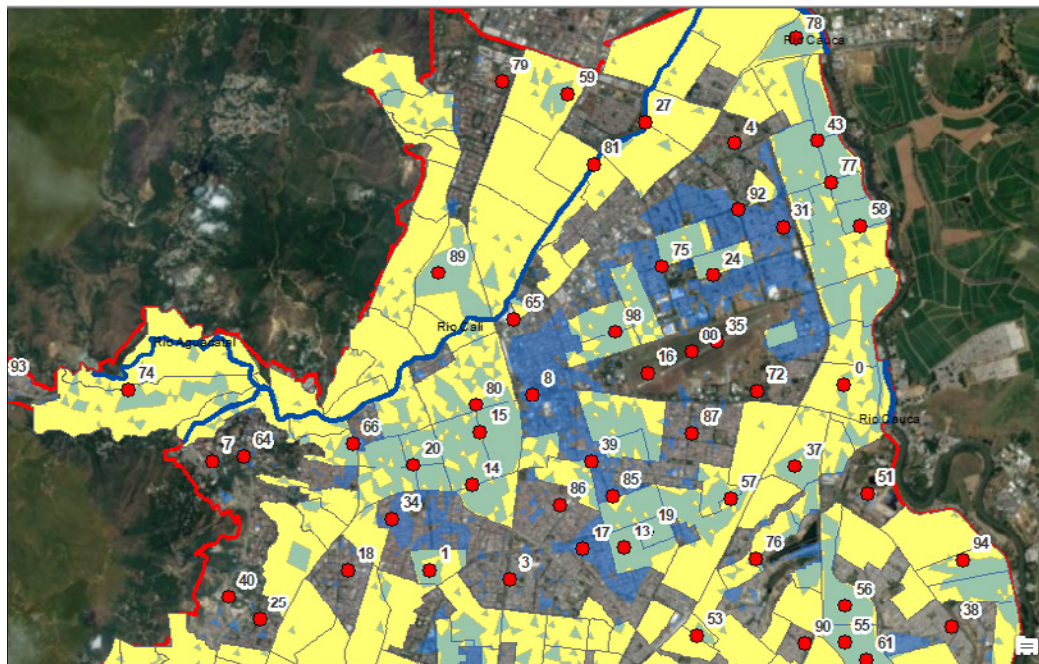
En el caso particular, ambos procedimientos generaron salidas cartográficas que permitieron valorar los resultados desde una perspectiva real e integral del mismo fenómeno: Mapa de área inundable y Mapa de inundación histórica. El mapa de inundación histórica refleja el comportamiento espacial ante el evento hidrometeorológico proyectando información en unidades de planificación (barrios, comunas), mientras que el mapa de área inundable determina zonas de

peligro de inundación a partir de imágenes de satélite que permiten establecer la superficie de afectación en una fecha de ocurrencia. En consecuencia, ambos resultados indican la inundación urbana en la ciudad. Es por esto que la triangulación aprueba la validación mutua de los resultados obtenidos a partir de diferentes métodos (modelo de validez), además de ser un medio para obtener una imagen más amplia y completa del fenómeno (el modelo de complementariedad) (Fielding & Schreier, 2001). En este estudio, el área de inundación identificada mediante imágenes SAR, es validada con un mapa de reportes históricos de inundación.

2.8. Evaluación de fiabilidad global

Para evaluar la fiabilidad del método se comparó un mapa de eventos históricos elaborado a partir de los reportes de inundación con los resultados de la clasificación supervisada de imágenes Sentinel 1. En este proceso se distribuyeron cien puntos al azar (Chuvienco, 2008; SKhorran, et al., 2000). En la *Figura 2*, se muestran los puntos de verificación distribuidos en la zona de estudio.

Figura 2: Distribución de puntos de verificación en área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la distribución aleatoria simple, fueron extraídos para aplicar la matriz de confusión en la que se comparó la clasificación de la imagen con la verdad de terreno. La exactitud global se calculó como el número de unidades clasificadas correctamente, sobre el número total de unidades consideradas. Se consigue sumando los elementos de la diagonal divididos por el total de observaciones para lo cual se empleó la siguiente fórmula:

$$\text{Exactitud Global} = VP \div \text{TOTAL DE MUESTRA}$$

Donde:

VP = Cantidad de positivos que fueron clasificados correctamente por el modelo

De manera posterior se calculó el índice Kappa de COHEN. El estadístico Kappa (K), delimita el ajuste debido a la exactitud de la clasificación y se determinó a partir de esta ecuación:

$$\hat{\kappa} = \frac{n \sum_{i=1, n} X_{ii} - \sum_{i=1, n} X_{i+} X_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1, n} X_{i+} X_{+i}}$$

n = Sería el tamaño de la muestra; X_{ij} = El acuerdo observado; (X_j, X_{+j}) = El producto de los marginales;
 i = Aparece en la diagonal de la matriz.

Al obtener el índice (k), se estableció la concordancia de acuerdo al modelo propuesto por (Ladis & G.Koch, 1977) : Kappa (κ) Grado de acuerdo < 0,00 Sin acuerdo; 0,00-0,20 Insignificante; 0,21-0,40 Mediano; 0,41-0,60 Moderado; 0,61-0,80 Sustancial; 0,81-1,00 Casi perfecto. Para facilitar la interpretación de los resultados se aplicó el método de optimización de Jenks y se eliminó de la placa de agua las zonas inundadas con menos de 1.5 hectáreas. La integración del modelo se realizó en el software ArcMap. Así, los datos en formato raster se convirtieron en archivos vectoriales. Para ser explorados y analizados se ajustaron al sistema de coordenadas local: MAGNA_Cali_Valle_del_Cauca_2009.

3. Resultados y Discusión

En la sección de resultados, se identificó el área de inundación urbana proveniente de un proceso semiautomatizado de percepción remota mediante un método de clasificación supervisada (mapa de inundación a partir de imágenes SAR). Durante el proceso se acudió a registros históricos y trabajo de campo para validar la información resultante y facilitar el análisis. La aplicación del método se sustentó en la triangulación metodológica (Blanco & Pirela, 2016), que consistió en la complementariedad entre el área inundable, la revisión hemerográfica y los recorridos en campo. A continuación, se presentan los resultados de la identificación de zonas inundables a partir de imágenes (SAR) y de eventos históricos en Santiago de Cali, Colombia.

3.1. Clasificación espectral

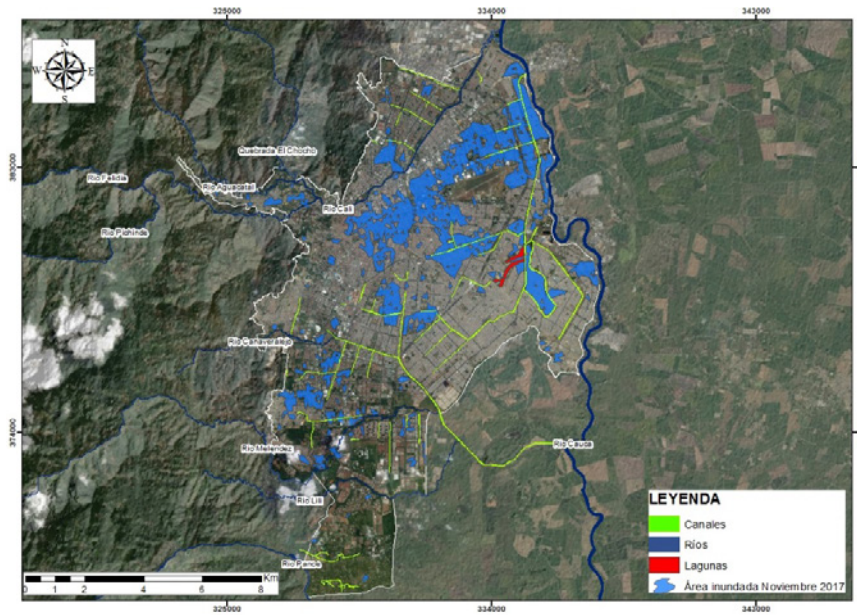
Siguiendo el proceso semi-automatizado para la identificación de áreas inundadas mediante imágenes Sentinel (1), se adquirió la imagen 1 día después de la ocurrencia, lo cual favoreció la detección de inundación. El área que abarca la superficie inundable corresponde a 2082, 25 hectáreas afectando a 225 barrios. En Cali, además de siete ríos, circulan un sistema de canales construidos para la mitigación de inundaciones que paradójicamente se han desbordado en varias ocasiones (Jiménez, 2005). En la *Figura 3*, se muestra la inundación de noviembre de 2017 y la localización de canales y ríos.

3.2. Revisión Documental

Mediante el análisis de historicidad de fenómenos hidrometeorológicos, se estableció que durante el periodo 1986-2018 se produjeron 766 inundaciones en la ciudad de Cali ocasionando daños en 186 barrios. En la *Figura 4*, las comunas más afectadas corresponden a: Comuna 2, comuna 6 y comuna 10 respectivamente.

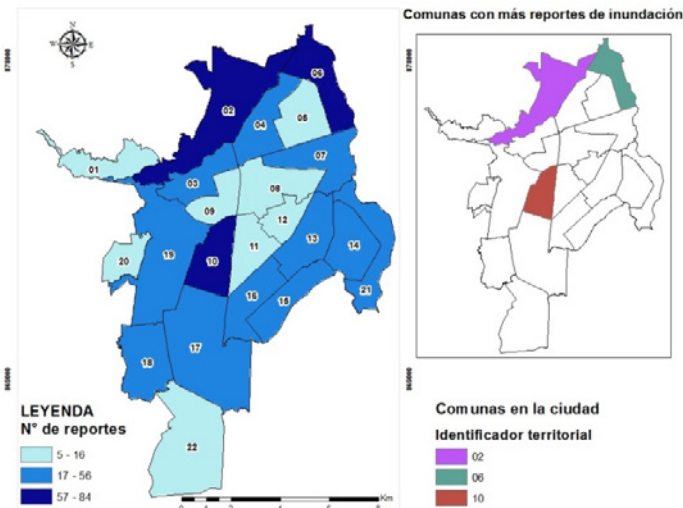
Los barrios con ocurrencias por estos eventos suman 186. En la *Figura 5*, los sectores que se inundaron entre 7 y 12 veces: El Guabal, Cristóbal Colón, El Ingenio, Antonio Nariño, Comuneros I, Alfonso Bonilla Aragón, Petecuy III, Ciudadela Floralia, Los Guadales y Brisas de los Alamos.

Figura 3. Mapa de evento de inundación noviembre de 2017



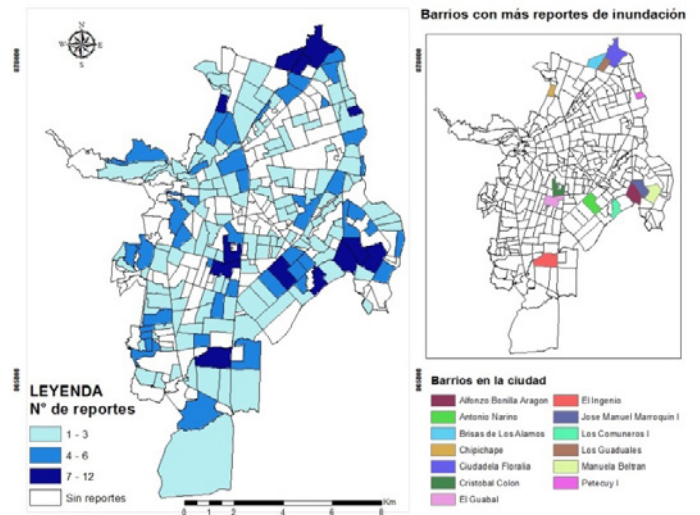
Fuente: Elaboración propia

Figura 4. Reportes de inundación en comunas en el periodo 1986-2018



Fuente: Elaboración propia con base en reportes de DESINVENTAR, 2018

Figura 5. Reportes históricos de inundación por barrios

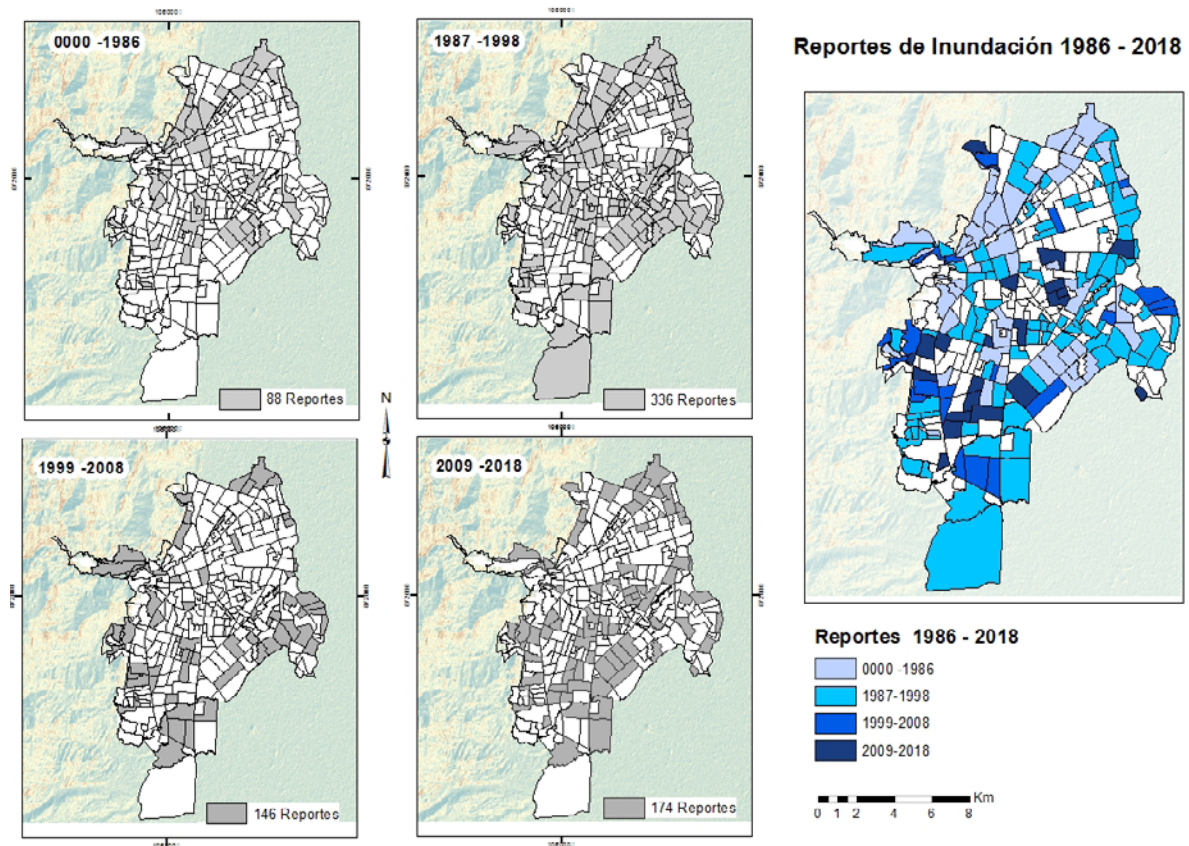


Fuente: Elaboración propia con base en reportes de DESINVENTAR, 2018

A partir de la información general proveniente de los datos históricos se determinó el comportamiento espacial en cuatro periodos de tiempo: 0000-1986, 1987-1998, 1999-2008 y 2009-2018 (Ver *Figura 6*)

- Primera etapa 1986: En este primer momento el análisis correspondió a un año y se reportaron 88 ocurrencias en 17 comunas de la ciudad.
- Segunda etapa 1987-1998: Se reportaron 336 ocurrencias en 21 comunas de la ciudad.
- Tercera etapa 1999-2008: Se reportaron 146 ocurrencias en 19 comunas de la ciudad.
- Cuarta etapa 2009-2018: Se reportaron 174 ocurrencias en 20 comunas de la ciudad.

Figura 6: Etapas de inundación histórica 1986-2018



Fuente: Elaboración propia con base en reportes de DESINVENTAR, 2018; República de Colombia-UNGRD, 2018.

Acorde con esto, se exploraron fuentes hemerográficas que sustentaron aún más los resultados obtenidos. En la *Figura 7*, imágenes de inundaciones ocurridas en la ciudad. La primera, al Oriente en el barrio Puerto Nuevo, el día 13 de mayo de 2017 (comuna 7). La segunda, al Nor-Oriente de la ciudad el 15 de noviembre de 2017 en el barrio Petecuy (comuna 6).

Figura 7. Inundaciones en los barrios Puerto Nuevo y Petecuy



Fuente: EL TIEMPO, 2017

3.3. Trabajo de campo

La verificación previa de un área inundable y el registro histórico de inundación permitió trazar una ruta de campo para recurrir a fuentes de información primaria que sustentaran la cartografía obtenida. En la *Figura 8*, el registro fotográfico de una inundación camino a Puerto Mallarino (antiguo puerto ubicado al Oriente de la ciudad) ocasionada en 1935 por el desbordamiento del río Cauca.

Figura 8. Inundación por el desbordamiento del río Cauca



Fuente: Municipio de Santiago de Cali-Biblioteca Departamental, 2019

A partir de los recorridos y el análisis documental, se pudo establecer que la afectación es mayor en la zona Oriental donde convergen los canales principales (interceptor Sur y Oriental) y el río Cauca. Esto se infiere de relatos suministrados por habitantes en relación con los daños a viviendas y a la altura del agua en el momento de la inundación. En la *Figura 10*, el mapa en azul corresponde con el área de inundación obtenida mediante teledetección y el mapa en rojo a los reportes históricos de inundación en la comuna 6, al Oriente. En esta misma figura se puede apreciar la altura de inundación en el momento de la ocurrencia señalada por personas de la comunidad.

Figura 10. Mapas de peligro y reportes históricos de inundación en la comuna 6

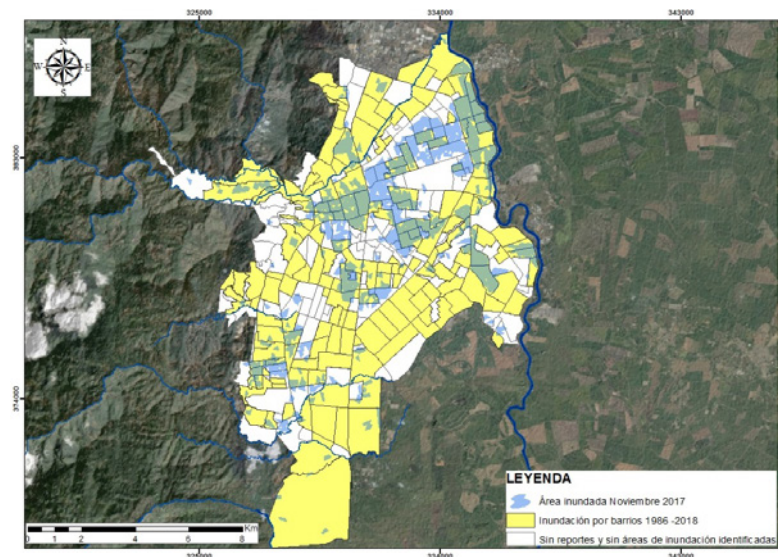


Fuente: Elaboración propia, trabajo de campo, 2018

3.4. Comparación de la cartografía obtenida a partir de los registros documentales históricos y la resultante de imágenes SAR

Las derivaciones adquiridas de historicidad en comunas y barrios 1986-2018, facilitaron la complementariedad y validación de los resultados de la clasificación espectral (Fielding & Schreier, 2001). En la *Figura 11*, se muestra el mapa integrado de registros históricos 1986-2018 y el evento de inundación a partir de imágenes SAR, con delimitación por comunas y barrios, donde el tono amarillo equivale a la historicidad realizada a partir de reportes y el tono azul delimita el área de inundación a partir de clasificación espectral.

Figura 11: Superposición de zona inundable y reportes históricos en área urbana



Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes SAR pre y post evento y registro histórico 1986-2018

Tal como lo plantean Fielding y Schreier (2001), la triangulación puede darse bajo la compresión metódica, al considerar un mismo objeto de estudio. En consecuencia, al comparar los registros históricos con la zona inundable, se obtuvo la exactitud global. En la *Tabla 2*, la exactitud es de 89 por ciento. Esto resultó de utilizar reportes históricos de inundación para validar un área inundable adquirida a partir del procesamiento de imágenes de satélite Sentinel 1. Acorde con esto, el resultado del índice de Kappa (K) es de 0.76 siendo un grado de concordancia sustancial (Ladis & Koch, 1977)

Tabla 2: Matriz de confusión para imagen clasificada

		Valores Terreno				Exactitud global
		2	3	Total		
Clasificación	1	62	0	1	63	
	2	0	5	0	5	
	3	10	0	22	32	
	Total	72	5	23	100	
						89%

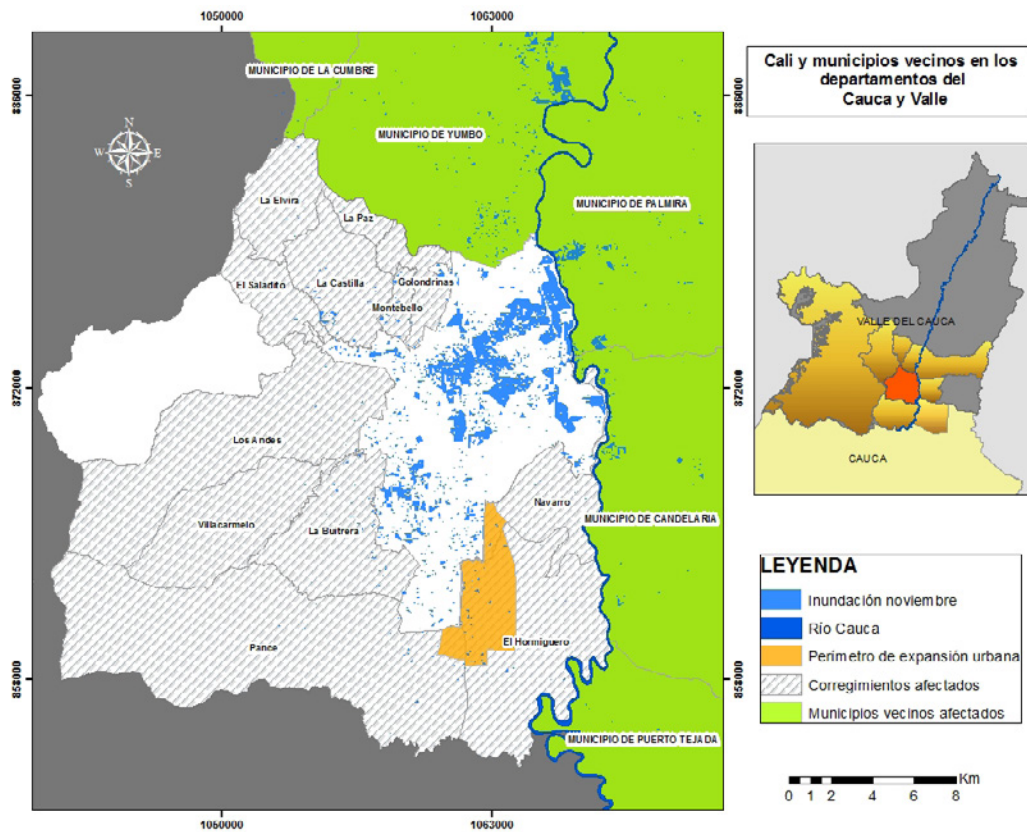
1= Áreas inundadas, 2=Agua permanente, 3=Áreas no inundadas. Fuente: Elaboración propia

Asimismo, se verificó con la superposición de las capas de historicidad (reportes por barrios) y de inundación determinadas a partir de imágenes SAR, que la zona inundable coincide en la mayoría de casos con los reportes de inundación hechos durante el periodo de estudio, con afectación mayor en el sector Oriental (al margen izquierdo del río Cauca en el sector Oriental, los humedales el Pondaje y Charco Azul y el canal Oriental) y al Occidente al margen derecho e izquierdo del río Cali. Después de hacer un recuento de datos referentes a la presencia del fenómeno a escala urbana es relevante reconocer el comportamiento espacial de la inundación en un plano municipal y regional teniendo como punto de partida el peligro de inundación determinado a partir de noviembre de 2017.

3.5. Afectación a municipios y corregimientos vecinos

En la *Figura 12*, se realizó una superposición de capas de la zona inundable, zona de expansión urbana, corregimientos y municipios vecinos. De ahí que, resultan cuatro municipios afectados, tres en el departamento del Valle (La Cumbre, Yumbo, Palmira, Candelaria) y uno en el departamento del Cauca (Puerto Tejada). En cuanto a los corregimientos, todos presentan desbordamientos exceptuando Felidia, la Leonera y Pichindé (en este caso, los registros históricos para corregimientos solo refieren a Navarro, Hormiguero, Pance y Montebello). En el perímetro de expansión urbana se muestra pequeñas manchas de agua asociadas a la ocurrencia de noviembre de 2017.

Figura 12: Afectación a municipios y corregimientos vecinos



Fuente: Elaboración propia a partir de clasificación de imágenes SAR.

4. Discusión

Como se indicó en resultados, el área inundable obtenida mediante el procesamiento de imágenes Sentinel fue muy importante en términos de su cobertura (2082,25 hectáreas) y las implicaciones potenciales a la población que habita en las zonas que sufrieron el evento (225 barrios). Si bien es cierto que el método empleado en este trabajo no es novedoso, la relevancia de estos hallazgos radica en la utilidad que tienen para la gestión del riesgo a inundación en zonas como la ciudad de Cali, ubicadas en la confluencia de ríos, y donde las condiciones geográficas y climáticas no permiten el análisis con imágenes espectrales convencionales. Las imágenes de radar permiten el mapeo de áreas inundables en zonas cuyas condiciones climáticas impiden el paso de la luz solar a la superficie terrestre (Liao & Wen, 2020). El manejo de inundaciones en zonas urbanas tiene mucha importancia para la gestión de riesgo y la planeación urbana, pero los procedimientos para identificar áreas inundables a menudo se sustentan en la simulación de lluvia en tormentas de diseño, cálculo de gastos y modelación de planicies inundables (Yu et al., 2018) a daily simulation time step and a continuous time marching limit the application of the SWAT model for detailed, event-based flood simulation. In addition, SWAT uses a basin level parameter that is fixed for the whole catchment to parameterize the unit hydrograph (UH).

Dichos métodos generan una hipótesis cartográfica usualmente precisa, pero requieren de complejas mediciones en el terreno, y los resultados se vuelven obsoletos ante cualquier cambio de la infraestructura urbana (construcción de nuevas alcantarillas, camellones, muros, banquetas, etc.)

que modifique las condiciones originales de flujo (Du et al., 2019). En ese sentido, el análisis de imágenes SAR para la detección de áreas inundables también ha probado ser una herramienta apropiada para la identificación de sitios afectados por fenómenos de esta naturaleza. (Pluto-Kossakowska et al., 2017; Anusha & Bharathi, 2019). La utilidad del método radica en que el área inundable no se modela, sino que es cartografiada mediante el procesamiento de la información proporcionada por el sensor, llegando incluso a estimaciones de la profundidad del área inundada (Cian et al., 2018) great losses are usually registered in terms of both impacts on people (i.e., fatalities and injuries). La información generada permite la gestión del riesgo urbano, al identificar las zonas que son más vulnerables, o donde la columna de agua alcanza mayor profundidad (Liao & Wen, 2020).

Sin embargo, uno de los retos asociados a esta forma de mapeo de áreas inundables, radica en la necesidad de integrar procedimientos que permitan robustecer los resultados, en particular por la existencia de fuentes de interferencia que enmascaran la respuesta del radar, como edificios, árboles, e infraestructura (Mason et al., 2018). Al igual que la modelación directa con métodos semi-automatizados de hidrología de superficie, la extracción de información a partir de imágenes SAR aún debe perfeccionarse; por lo que la integración de fuentes complementarias de información, para triangular y validar inundaciones es un recurso válido, sobre todo en abordajes como el de este trabajo, cuando se busca identificar áreas inundables en imágenes y eventos históricos (Macchione et al., 2019) 2019. La literatura reporta ejercicios parecidos a este trabajo, en otras latitudes del mundo. Se han identificado y cartografiado áreas inundables mediante imágenes de radar en sitios tan distintos como Crotona (Italia), Houston (USA), y Uttar Pradesh (India) (Anusha & Bharathi, 2019; Li et al., 2019; Macchione et al., 2019) 2019; mostrando que el método es una alternativa válida para el mapeo de estos eventos.

En el caso concreto de la Ciudad de Cali, nuestros resultados constituyen un insumo adicional al mostrado por estudios previos para la gestión del riesgo urbano. Como se ha referido en secciones anteriores de este documento, el tema es de suma importancia para la Alcaldía de Cali y otros actores locales, quienes han generado elementos para la prevención y manejo de inundaciones urbanas (Alcaldía de Cali, 2010, 2011, 2018; Corporación OSSO y Royal HaskoningDHV, 2013). Dichos estudios aportan datos valiosos acerca de flujos, gastos, capacidades, posibles zonas de afectación por inundación; pero ninguno mapea el área inundable a una escala de ciudad, ni válida con datos históricos y reconocimiento *in situ*, como si se hizo en el presente trabajo.

La validación sugiere que nuestro mapa corresponde en un 89 % a la inundación observada en campo, lo cual es aceptable bajo los estándares de fiabilidad requeridos en la generación de cartografías temáticas (Acharya et al., 2018) the threshold is a fixed value, but can be challenging in the case of environmental noise, such as shadow, forest, built-up areas, snow, and clouds. One such challenging scene can be found in Nepal where no such evaluation has been done. Taking that in consideration, this study evaluates the performance of the most widely used water indices: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Aquí es importante notar que la comparación se hizo contra sitios efectivamente inundados (concordancia con inundabilidad que indica áreas mediante imágenes Sentinel 1), y no contra la totalidad del polígono correspondiente a barrios y comunas inundadas. Esto fue así, pues la inundación histórica suele reportarse a escala de toda la unidad administrativa, aunque la zona inundada solo represente una fracción de esta.

Esta previsión evitó que el valor de fiabilidad global se sesgara por una sobreestimación del área inundada históricamente, otorgando mayor confiabilidad a los hallazgos. Por otro lado, aunque

el traslape de mapas reveló que las comunas y barrios inundadas históricamente corresponden en general con las áreas que nuestro trabajo reporta, los contornos de la zona inundada no corresponden en un cien por ciento con el límite de estos polígonos administrativos. Entendemos esta discrepancia entre ambas cartografías como una evidencia más de la complementariedad que aportan nuestros datos, pues reflejan la severidad y alcance espacial de la inundación al interior de dichas comunas y barrios. Puesto que la confiabilidad de nuestro mapa es alta, la discrepancia permite inferir que porcentaje de la comuna o del barrio se inundó, o incluso puede utilizarse para estimar la profundidad que alcanzó el agua cuando el evento se presentó.

Lo anterior revela que la triangulación metodológica, o el uso de varios métodos para incrementar la confianza en los resultados, es un recurso válido para el análisis de eventos históricos de inundación. Macchione *et al.* (2019) por ejemplo, tuvieron un enfoque parecido al nuestro para identificar áreas inundables, incorporando además levantamiento de información mediante encuestas y entrevistas. Al igual que en nuestro caso, sus hallazgos mediante teledetección adquirieron mayor confiabilidad al cruzarse y relacionarse con otras fuentes de datos. Este enfoque también es totalmente coherente con lo planteado por Fielding y Schreier (2001), quienes indican que la triangulación de métodos otorga mayor confiabilidad a los hallazgos. Comparar los registros históricos de inundación con el resultado de técnicas de percepción remota, permite una validación adecuada de la cartografía, trascendiendo de una hipótesis cartográfica, a una cartografía confiable del evento que se ha estudiado. Dicho evento no obedece solamente a causas físicas. Como todo riesgo, es un fenómeno socialmente construido con prácticas inadecuadas de apropiación del espacio, en un contexto geográfico y climático no acorde con estas prácticas.

Las inundaciones pluviales y fluviales en la zona de estudio están relacionadas con la expansión física que ha experimentado la ciudad (Alcaldía Municipal de Santiago de Cali, 2014), pues entre 1986 y 2016 incrementó su área construida en 23%, con una densidad de población muy alta (22 849, 6 habitantes por kilómetro cuadrado). Este crecimiento, fue mayor durante el periodo 1986-1998 y se dio gracias a políticas urbanas de promoción de vivienda (Sevillano-Rodríguez & Bravo-Peña, 2018) que a menudo no consideraron el riesgo que se estaba generando. Por ejemplo, parte importante de la ampliación urbana se promovió sobre zonas inadecuadas, en particular la llanura aluvial del río Cauca. Los registros históricos indican que este río se ha desbordado en numerosas ocasiones (1950, 1960, 1966, 1971, 1974, 1975, 1984 y 1999) gracias al aporte de sus afluentes, ocasionando daños a viviendas e infraestructura urbana debido a la configuración topográfica del relieve, incluso en zonas muy alejadas del cauce (Alcaldía Municipal de Santiago de Cali, 2014).

Precisamente por esta configuración topográfica, y por la ausencia de una estrategia ordenada de ocupación territorial y de habilitación de infraestructura en el polígono urbano, se vuelve muy difícil la identificación de superficies inundables con técnicas distintas a la teledetección. Si bien existen métodos de hidrología de superficie que permiten la modelación de áreas inundables en plataforma de sistemas de información geográfica, la ciudad tiene una complejidad espacial que vuelve prácticamente imposible la construcción de un modelo de áreas inundables confiable a la escala y cobertura en la que se generó la cartografía obtenida en este trabajo. Por el contrario, la teledetección no precisa de complejos cálculos del flujo y gasto en el drenaje pluvial de la ciudad, que se compone de infraestructura construida para ello, pero también de obras y encauzamientos irregulares que drenan los escurrimientos en eventos de gran escorrentía. Partiendo de esa limitante, en este trabajo se optó por procesar las imágenes SAR, y el resultado obtenido se superpuso a los mapas de inundación histórica. Como se observó en la sección de resultados, la mancha de

agua coincide en la mayoría de casos con los reportes de inundación hechos durante el periodo de estudio, con afectación mayor en el sector oriental (Al margen izquierdo del río Cauca en el sector oriental, los humedales el Pondaje y Charco Azul y el canal Oriental) y al Occidente al margen derecho e izquierdo del río Cali.

Estas secciones de la ciudad crecieron sobre antiguos meandros y cauces inactivos, que se activan al aumentar las precipitaciones (República de Colombia - INGEOMINAS-DAGMA, 2005). En algunos casos se han modificado con obras de ingeniería que intentan facilitar o regular el tránsito de superficie (Jiménez, 2005), pero su capacidad de transporte es superada por la lluvia, y suelen desbordarse antes de terminar el vertimiento de sus aguas en el punto de encuentro sobre el río Cauca. A esto se suma la insuficiencia de la estructura de alcantarillado y las instalaciones domiciliarias que de manera improvisada (ilegal) desembocan en los canales sin ningún tratamiento previo. Así, Cali se ha convertido en una ciudad entre ríos y canales, a pesar de que el gobierno municipal ha intentado resolver las emergencias presentadas con obras de infraestructura post desastre, que aparecen y reaparecen en la medida que las estrategias sociales de ocupación del territorio, son más fuertes que la ordenación y la regulación urbana.

Todo esto hace suponer que el fenómeno de inundación continuará. Nuevas modificaciones en la zona urbana, bajo un modelo caótico de ampliación de la ciudad y de habilitación de infraestructura de drenaje pluvial, sugieren la prevalencia del riesgo en los años futuros. Frente a este riesgo será necesario el diseño de respuestas orientadas a la protección de vidas humanas e infraestructura, siendo el mapeo de áreas inundables una fase fundamental en la implementación de estrategias de contención, entre las que deberá considerarse el ordenamiento territorial de la ciudad y sus áreas de influencia. Puesto que la modelación hidrológica parece muy difícil por el momento, será necesario continuar con un abordaje como el propuesto por este estudio, que integre alternativas de mapeo sustentadas en teledetección, pero también enfoques complementarios de levantamientos de datos y validación. El procesamiento de imágenes SAR, el registro pormenorizado de eventos a escala de comuna y barrio, y el cruce de información proveniente de diversas fuentes, puede fortalecer la construcción de un insumo básico para generar políticas de respuesta.

5. Conclusiones

En este trabajo se obtuvo el área inundable en la Ciudad de Cali Colombia, bajo un abordaje que integra metodologías y datos de distintas fuentes. El área inundable obtenida mediante el procesamiento de imágenes SAR fue muy importante en términos de su cobertura (2082, 25 hectáreas), con grandes implicaciones potenciales a la población que habita en las zonas que sufrieron el evento (225 barrios). La relevancia de estos hallazgos radica en la utilidad que tienen para la gestión del riesgo a inundación en zonas como la ciudad de Cali, donde las condiciones del medio físico no permiten el análisis con imágenes espectrales convencionales. El análisis de imágenes SAR para la detección de áreas inundables, complementado con la consulta de información histórica y documental, probó ser una herramienta apropiada para la identificación de sitios afectados y afectables por el fenómeno de inundación.

Como pudo documentarse, las inundaciones pluviales y fluviales en la zona de estudio están relacionadas con la expansión física desordenada que ha experimentado la ciudad, en un contexto geográfico caracterizado por su gran complejidad topográfica e hidrológica. Precisamente por esta configuración topográfica, y por la ausencia de una estrategia ordenada de ocupación terri-

torial y de habilitación de infraestructura en el polígono urbano, se vuelve muy difícil la identificación de superficies inundables con técnicas distintas a la teledetección. Esto hace necesario y pertinente un enfoque como el abordado por este trabajo, que integra alternativas de mapeo sustentadas en teledetección, pero también enfoques complementarios de levantamientos de datos y validación. Ello permite la construcción de un insumo básico para generar políticas de respuesta: el mapa de inundación y de zonas afectables.

Cali se ha convertido en una ciudad entre ríos y canales. Adolece de una estrategia ordenada de ampliación urbana, y esto amplifica la peligrosidad de un evento como la inundación. Frente a esto será necesario el diseño de respuestas orientadas a la protección de vidas humanas e infraestructura, entre estas, además del mapeo de zonas inundables, deberá considerarse el ordenamiento territorial de la ciudad y sus áreas de influencia. Solamente así podrá revertirse una tendencia de ampliación espacial de la mancha urbana, que ha generado condiciones de riesgo para sus habitantes. Así que, el siguiente paso deberá ser zonificar el área inundable para estimar distintas condiciones de peligro que permitan abordar estrategias de mitigación y ordenamiento territorial.

6. Agradecimientos

El presente documento hace parte de los avances parciales de investigación para obtener el grado de Doctora en Estudios Urbanos por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Se agradece al CONACYT por la beca brindada a la doctorante, al grupo de líderes que nos acompañaron en los recorridos de campo y demás apoyos de investigación.

7. Bibliografía

- Acharya, T. D., Subedi, A., & Lee, D. H. (2018). Evaluation of water indices for surface water extraction in a landsat 8 scene of Nepal. *Sensors*, 18 (8), 2580. doi: 10.3390/s18082580.
- Alcaldía Municipal de Santiago de Cali. (2014). *Plan de ordenamiento territorial del municipio de Santiago de Cali*. Santiago de Cali, Colombia: Departamento Administrativo de planeación.
- Alcaldía Municipal de Santiago de Cali. (2010). *Balance hídrico de las aguas subterráneas*. Santiago de Cali, Colombia: DAGMA.
- Alcaldía Municipal de Santiago de Cali. (2011). *Estudio hidrológico e hidráulico río Aguacatal a su paso por el área urbana de Santiago de Cali*. Santiago de Cali, Colombia: DAGMA.
- Alcaldía Municipal de Santiago de Cali. (2018). *Inventario de humedales zona urbana*. Santiago de Cali, Colombia: DAGMA.
- Anusha, N., & Bharathi, B. (2019). Flood detection and flood mapping using multi-temporal synthetic aperture radar and optical data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 191, 760 (2019). doi: 10.1016/j.ejrs.2019.01.001.
- Banco Mundial & GFDRR. (Eds). (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas*. Recuperado de <http://gestiondelriesgo.gov.co/sigpad/archivos/gestion-delriesgoweb.pdf>.
- Belmonte, L., & Caamaño, S. (2009). *Una aplicación basada en imágenes SAR para el monitoreo y prevención de las inundaciones en Argentina* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.
- Benito, G. (2007). Riesgo de inundaciones: Tendencias históricas y perspectivas de acuerdo con el Cambio Climático. *Cuaternario y Geomorfología*, 20 (3-4), 29-44. Recuperado de <https://recyt.fecyt.es/index.php/CUGEO/article/view/16988/10403>.

- Bescos-Atín, A., & Camarasa-Belmonte, A. M. (2000). Elaboración de cartografía de zonas inundables. Aplicación al llano de inundación del río Arga (Navarra). *Serie Geográfica*, 2000 (9), 219-236. Recuperado de/ <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/1088>.
- Blanco, N., & Pirela, J. (2016). La complementariedad metodológica: Estrategia de integración de enfoques en la investigación social. *Espacios Públicos*, 19 (45), 97-111. Recuperado de/ <https://www.redalyc.org/jatsRepo/676/67646966005/html/index.html>.
- Burnett, C., & Blaschke, T. (2003). A multi-scale segmentation/object relationship modelling. *Ecological Modelling*, 168 (3), 233-249. doi:10.1016/S0304-3800(03)00139-X.
- Cartaya, S., & Mantuano-Duarte, R. (2016). Identificación de zonas en riesgo de inundación mediante la simulación hidráulica en un segmento del río Pescadillo, Manabí, Ecuador. *Revista de investigación*, 4 (89), 158-170. Recuperado de/ <http://www.redalyc.org/pdf/3761/376156280009.pdf>.
- CEPAL & BID. (Eds.). (2012). *Valoración de daños y pérdidas. Ola invernal en Colombia 2010-2011*. Recuperado de/ <https://www.cepal.org/es/publicaciones/37958-valoracion-danos-perdidas-ola-invernal-colombia-2010-2011>.
- Céspedes, J. E., & Pérez, J. N. (2008). LIDAR, una tecnología de última generación, para planeación y desarrollo urbano. *Ingeniería*, 13 (1), 67-76. Recuperado de/ <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/reving/article/view/2090/2750>.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental, 3 edición Actualizada*. Barcelona, España: Ariel, S. A.
- Cian, F., Marconcini, M., Ceccato, P., & Giupponi, C. (2018). Flood depth estimation by means of high-resolution SAR images and lidar data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18 (11), 1-25. doi: 10.5194/nhess-18-3063-2018.
- Corporación OSSO y Royal HaskoningDHV. (2013). Diagnóstico y recomendaciones para el jarillón de Aguablanca en el municipio de Cali.
- Degioanni-Sasia, A., Cisneros, J. M., Cantero-Gutiérrez, A., & Camarasa-Belmonte, A. (2002). Las inundaciones en la Provincia de Córdoba (Argentina) y las tecnologías de información geográfica: Ejemplos de Aplicación. *Serie Geográfica*, 2001-2002 (10), 143-163. Recuperado de/ https://www.researchgate.net/publication/285068321_Las_inundaciones_en_la_Provincia_de_Cordoba_Argentina_y_las_tecnologias_de_informacion_geografica_Ejemplos_de_Aplicacion.
- Delgado, J. F., & Quintero, O. Y. (2013). Aplicación de la teledetección y los sistemas de información geográfica en la interpretación de zonas inundables. Caso de estudio: Río Soapaga, Sector Paz de río Boyacá. *Universidad Militar Nueva Granada - Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 23 (2), 55-76. doi: 10.18359/rcin.223.
- DESINVENTAR. (2018). Inventario histórico de eventos de inundación. En *DESINVENTAR*. Recuperado de/ https://online.desinventar.org/desinventar/#COL-1250694506-colombia_inventario_historico_de_desastres.
- Donezar-Hoyos, U., Larrañaga-Urien, A., Tamés-Noriega, A., Sánchez-Gil, C., Albizua-Huarte, L., Ciriza-Labiano, R., & Barrio-Arellano, F. d. (2017). Aplicación de imágenes sentinel-1 y sentinel-2 en la detección y delineación de información de crisis de desastres naturales en el marco de los servicios Copernicus EMS. *Revista de Teledetección* (50), 49-57. Recuperado de/ <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6230376>.
- Du, J., Cheng, L., Zhang, Q., Yang, Y., & Xu, W. (2019). Different flooding behaviors due to varied urbanization levels within river Basin: A case study from the Xiang river Basin, China. *International Journal of Disaster Risk Science*, 10 (1), 89-102. doi:10.1007/s13753-018-0195-4.
- Edrosa, R. M. (2011). *Aplicación de la teledetección para el monitoreo de eventos hídricos superficiales mediante imágenes SkyMed* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Córdoba: Córdoba.
- [Fotografía de EL TIEMPO]. (Barrio Puerto Nuevo, 2017). Archivos fotográficos del periódico El TIEMPO, Santiago de Cali, Colombia.
- [Fotografía de EL TIEMPO]. (Barrio Petecuy, 2017). Archivos fotográficos del periódico El TIEMPO, Santiago de Cali, Colombia.
- [Fotografía de Biblioteca Departamental]. (Camino Puerto Mallarino, 1935). Archivos fotográficos de Biblioteca Departamental código 0100005, Santiago de Cali, Colombia.
- Fielding, N., & Schreier, M. (2001). Introduction: On the compatibility between qualitative and quantitative research methods. *FORUM: Qualitative social research sozialforschung*, 2 (1), Art. 4. doi: 10.17169/fqs-2.1.965.
- Gobierno de España-Ministerio de Medio Ambiente & Medio Rural Marino. (2011). *Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables*. Recuperado de/ <http://www.gisandbeers.com/RRSS/Publicaciones/Guia-cartografia-de-zonas-inundables.pdf>.

- Jiménez, N. (2005). *Elementos históricos y urbanos en la generación de desastres por inundaciones y deslizamientos en Cali 1950 - 2000* (Tesis de pregrado). Universidad del Valle: Santiago de Cali.
- Ladis, J. R., & G.Koch, G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33 (1), 159-174. Recuperado de/ <http://www.jstor.org/stable/2529310>.
- Lavell, A. (1996). Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación. En M. Fernández (Coord), *Ciudades en riesgo: Degradación ambiental, riesgos urbanos y desastres* (pp. 1-140). LA RED.
- Li, Y., Martinis, S., & Wieland, M. (2019). Urban flood mapping with an active self-learning convolutional neural network based on TerraSAR-X intensity and interferometric coherence. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 152, 178–191. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2019.04.014.
- Liao, H.-Y., & Wen, T.-H. (2020). Extracting urban water bodies from high-resolution radar images: Measuring the urban surface morphology to control for radar's double-bounce effect. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 85, 102003, 1-13. doi: 10.1016/j.jag.2019.102003.
- Lorenzo, P. F., & Hernández, N. D. (2018). Mapeo de áreas inundadas utilizando imágenes de radar TanDEM-X en Acapulco de Juárez, Guerrero-México. *Terra Digitalis*, 2 (1), 1-7. Recuperado de/ http://terradigitalis.igg.unam.mx/html/ojs3/index.php/terra_digitalis/article/view/36/85.
- Macchione, F., Costabile, P., Costanzo, C., & De Lorenzo, G. (2019). Extracting quantitative data from non-conventional information for the hydraulic reconstruction of past urban flood events. A case study. *Journal of Hydrology*, 576, 443-465. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.06.031.
- Mason, D. C., Dance, S. L., Vetra-Carvalho, S., & Cloke, H. L. (2018). Robust algorithm for detecting floodwater in urban areas using synthetic aperture radar images. *Journal of Applied Remote Sensing*, 12(4), 045011, 1-21. doi: 10.1117/1.JRS.12.045011.
- Materón, H., García, J. L., Arango, D., & Parra, D. (2006). Modelación hidrológica e hidráulica aplicada a estudios de inundabilidad en cauces naturales caso de estudio: Urbanización río Nima. *Ingeniería de recursos naturales del ambiente*, (5), 27-38. Recuperado de/ <https://www.redalyc.org/pdf/2311/231117589003.pdf>.
- Morales, A. P. (2012). Estado actual de la cartografía de los riesgos de inundación y su aplicación en la ordenación del territorio. Caso de la región Murcia. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (58), 57-84. doi: 10.21138/bage.2059.
- NASA. (2018). Imágenes sentinel 1. En *Geoportal NASA-EARTHDATA*. Recuperado de/ <https://www.asf.alaska.edu/>.
- Perles-Roselló, M. J., Gallejos-Reina, A., & Cantero-Prados, F. (2006). Análisis del ajuste del área inundable obtenida mediante evaluación integrada de peligrosidad de inundación y peligros asociados. *Baetica. Estudios de Arte, Geografía e Historia*, (28), 527-545. doi: 10.24310/BAETICA.2006.v1i28.272.
- Perles-Roselló, M. J., Olcina-Cantos, J., & Mérida- Rodríguez, M. (2018). Balance de las políticas de gestión del riesgo de inundaciones en España. De las acciones estructurales a la ordenación territorial. *Ciudad y territorio: Estudios territoriales*, 4 (197), 417-438. Recuperado de/ <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6685391>.
- Pluto-Kossakowska, J., Łoś, H., Osińska-Skotak, K., & Beata, W. (2017). "The concept of SAR satellite data use for flood risk monitoring in Poland". En 2017 Signal Processing Symposium (SPSymposium). Conferencia llevada a cabo en Jachranka, Poland.
- República de Colombia - DANE. (2018). *Censo general de población 2019*. En Departamento Nacional de Estadística (DANE). Recuperado de/http://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/MICRODATOS/about_collection/2/3.
- República de Colombia - INGEOMINAS-DAGMA. (2005). *Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali*. En Repositorio gestión del riesgo. Recuperado de/<https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/19833>.
- República de Colombia-IDEAM. (2017). *Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación*. En Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Recuperado de/http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023774/GUIA_METODOLOGICA_MAPAS_INUNDACION_MARZO_2018.pdf.
- República de Colombia-UNGRD. (2018). *Reportes de inundación por municipios 2013-2018*. En Unidad Nacional para la gestión del riesgo de desastres (UNGRD). Recuperado de/ <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/>.
- Rodríguez-Gaviria, E. M. (2016). *Diseño metodológico para la evaluación de riesgo por inundación con información escasa* (Tesis de doctorado). Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

- Sevillano-Rodríguez, M. E., & Bravo-Peña, L. C. (2018). Análisis multitemporal de la expansión física en la ciudad de Santiago de Cali, Colombia. *DECUMANOS*, 3 (3), 28-43. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/328544778_Analisis_multitemporal_de_la_expansion_fisica_en_la_ciudad_de_Santiago_de_Cali_Colombia.
- SKhorran, S., Knight, J., Cakir, H., Yuan, H., Mao, Z., & Dai, X. (2000). "Improving estimates of the accuracy of thematic maps when using aerial photos as the ground reference source", proceedings of the ASPRS Symposium". En Actas de Simposio de Geociencias y Teledetección. Conferencia llevada a cabo en Washington, Estados Unidos. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/228831155_Improving_estimates_of_the_accuracy_of_thematic_maps_when_using_aerial_photos_as_the_ground_reference_source.
- UNISDR, AECID, Corporación OSSO. (Eds). (2015). *Impacto de los desastres en América Latina y el Caribe 1990-2013: Tendencias estadísticas para 22 países*. Recuperado de http://osso.org.co/docu/proyectos/corpo/2016/informe_desastres_2016/impactodesastresamericalatinacaribe.pdf.
- Yu, D., Xie, P., Dong, X., Hu, X., Liu, J., Li, Y., Peng, T., Ma, H., Wang, K., & Xu, S. (2018). Improvement of the SWAT model for event-based flood simulation on a sub-daily timescale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(9), 5001-5019. doi:10.5194/hess-22-5001-2018.
- Zozaya, A., & Pino, P. D. (2020). Design of an antenna array for a LFM-CW synthetic aperture radar prototype. *DYNA*, 87(212), 96-101. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/79862/74004>

Sobre los autores

MARÍA EUGENIA SEVILLANO RODRÍGUEZ

Master en Planificación y Desarrollo Urbano por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez México; Especialista en Gerencia Ambiental por la Escuela Superior de Administración Pública, Colombia; Geógrafa por la Universidad del Cauca, Colombia. Actualmente es candidata a doctora en el programa de Estudios Urbanos de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

LUIS CARLOS BRAVO PEÑA.

Profesor-Investigador de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Secretario del capítulo México de la Sociedad de Especialistas Latinoamericanos en Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial (SELPER A.C.). Con publicaciones en el tema, artículos y capítulos de libro, y coordinador de distintas obras sobre análisis geoespacial.

LUIS CARLOS ALATORRE CEJUDO

Doctor en Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Presidente de SELPER-México. Profesor Investigador de Tiempo Completo Titula C SNI Nivel 1. Líder del Cuerpo Académico UACJ-CA-094. Miembro del Registro CONACYT de Evaluadores Acreditados (RCEA), en el Área 1

ELKIN DE JESÚS SALCEDO HURTADO

Doctor en Física y Matemáticas de la Universidad de Estatal de Moscú (Rusia), Magíster en Gestión en la Industria de los Hidrocarburos de la Universidad Viña del Mar (Chile), Especialista en Estadística de la Universidad del Valle (Colombia), Licenciado en Matemáticas y Física de la Universidad Tecnológica del Chocó (Colombia). Laboró en el Servicio Geológico Colombiano (SGC) como Coordinador de Programa de Investigación. Profesor Titular del Departamento de Geografía de la Universidad del Valle y Director del Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente. Docente del Doctorado en Ciencias Ambientales, de la Maestría en Gestión Integral de los Recursos Hídricos, y Coordinador de la línea de Gestión del Riesgo de la Maestría en Desarrollo Sustentable de la misma institución.