

IV. Inclusión de la dimensión del riesgo en la planificación territorial: Dos casos de éxito en Colombia

FREDY BOLÍVAR GÓMEZ*

TOBÍAS LEYVA PINTO**

HÉCTOR MAURICIO RAMÍREZ DAZA***

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.218.04>

Resumen

Este artículo aborda la importancia de considerar la dimensión del riesgo en la planificación territorial mediante el uso de geotecnologías de observación de la tierra. Se centra en dos casos exitosos en Colombia: El primero ocurrió después de una avenida torrencial en la ciudad de Mocoa, en el departamento de Putumayo; y el segundo caso sucedió en el río Cauca, en el municipio de San Jacinto del Cauca, donde la ruptura de un dique natural generó una inundación que afectó a unas 50 000 personas durante más de dos años.

En ambos casos, se utilizaron datos de sensores remotos (radar, LiDAR, sensores ópticos) y se complementaron con trabajo de campo para validar la información obtenida. A partir de estas observaciones, se pudieron establecer acciones de planificación territorial para la reconstrucción de Mocoa y para el direccionamiento de obras en el caso de Caregato.

* Maestro en Teledetección. CEO de Cuatro Conceptos S.A.S., Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2603-0219>

** Doctorando en Geografía. Coordinador de Ordenamiento y Gestión Territorial de Cuatro Conceptos S.A.S., Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4503-0230> ; Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58125715400>

*** Maestro en Geografía. Director de Proyectos de Cuatro Conceptos S.A.S., Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1672-4076> ; Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57195258259>

Adicionalmente, los trabajos incluyeron fases de análisis de campo que permitieron determinar cuáles eran los mejores sensores remotos a emplear para cada uno de los diferentes tipos de actividades, como el levantamiento de información predial, geológica, de cobertura vegetal, edafológica e hidrológica, entre otras.

Los resultados obtenidos permiten evidenciar que el trabajo combinado en la obtención de datos de tecnologías geoespaciales y su procesamiento técnico, junto con el conocimiento empírico de las comunidades mediante procesos pedagógicos, es base fundamental para la generación de información útil para la toma de decisiones inteligentes en la planeación territorial de cara a un nuevo modelo de ocupación, que tenga en cuenta las amenazas naturales presentes y armonice las necesidades de la comunidad, para el desarrollo sostenible de los espacios naturales que necesariamente deben tener un manejo que privilegie la conservación.

Toda esta información permitió a los tomadores de decisiones llevar a cabo acciones sobre su territorio de manera informada, eficiente y oportuna, lo que resultó en un abordaje adecuado en torno a la gestión del riesgo de desastre.

Palabras clave: *Gestión del riesgo de desastres, radar, índice de turbidez, geotecnologías, LiDAR, Sentinel, Mocoa, Caregato, Colombia.*

Introducción

Dentro de la gestión del riesgo de desastres, las inundaciones y las sequías son los eventos hidrometeorológicos de mayor magnitud e impacto a nivel global por su impacto económico y por las pérdidas que ocasiona (Dominguez-Calle *et al.*, 2014), por lo cual a lo largo de los años se han realizado importantes avances para el monitoreo de estos eventos implementando desarrollos tecnológicos de mayor envergadura en cada ocasión.

Ejemplo de esto, son algunos ejercicios para medir el nivel máximo de áreas inundables intermitentes con sensores del tipo LiDAR (*light detection and ranging*) mediante la creación de modelos digitales del terreno (MDT) de alta calidad (Hall *et al.*, 2019), o que combinan múltiples herramientas

como sensores ópticos y el mencionado sensor laser Huang *et al.*, 2014; LaRocque *et al.*, 2020), existen adicionalmente otros trabajos que incorporen además de las herramientas ya mencionadas, tecnologías de imágenes de radar para la medición de las inundaciones (Geudtner *et al.*, 1996; LaRocque *et al.*, 2020; Matgen *et al.*, 2011; Mleczko y Mróz, 2018; Refice *et al.*, 2013).

En general, la predicción, atención y respuesta ante los eventos amenazantes ha evolucionado tecnológicamente con el paso del tiempo, impulsado por las múltiples herramientas disponibles en cada una de las fases de la respuesta ante cualquiera de los principales eventos amenazantes (Calvello *et al.*, 2014; Frigerio *et al.*, 2014; Ponziani *et al.*, 2023; Ramesh, 2014; Roy *et al.*, 2022), este texto abordará algunos ejemplos que se benefician de la mejora en los aspectos tecnológicos disponibles actualmente.

La gestión del riesgo de desastres también ha venido evolucionando fuertemente en Colombia, motivada, desafortunadamente, por la sucesión de eventos catastróficos que se dan en el territorio nacional y cuyos orígenes son muy variados, pero que siempre generan un gran impacto sobre las poblaciones afectadas por tales eventos.

Solo por citar algunos ejemplos, pueden señalarse la erupción del Volcán Nevado del Ruiz en 1985 (Flórez, 2009) que provocó más de 20 000 muertos; el terremoto de la ciudad de Cúcuta con más 5 000 víctimas letales; el terremoto del Eje Cafetero con alrededor de 1 250 fallecidos; los fenómenos de remoción en masa provocados por un evento sísmico en el municipio de Páez, Cauca, en 1994 con un número superior de 1 100 fallecidos; el deslizamiento de la población de Villatina para 1994 que superó los 600 muertos (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2007).

Por supuesto, cada uno de estos eventos tuvo implicaciones económicas considerables al punto de afectar gravemente el PIB colombiano, en el caso del eje cafetero se estimó un impacto del 2.2% (PNUD NU y Cepal 1999) y los esfuerzos de reconstrucción para la población de Mocoa se han cifrado en 1'181,433 millones de pesos según el documento CONPES 3904 para la reconstrucción de ese municipio (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2017).

Precisamente, en el marco de esta última emergencia en la población de Mocoa en el departamento del Putumayo, una de las falencias detectadas

posterior a la avalancha, fue la no aplicación de herramientas metodológicas adecuadas para el manejo de cuencas hidrológicas, esto propició la expedición de la resolución 957 de 2018 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible denominada: Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia, y cuya implementación implica un mayor conocimiento de las condiciones de riesgo predominante en las zona de trabajo, y por ende, una mayor preparación ante los eventos de desastre.

Con estas consideraciones en mente, las autoridades locales de la población de Mocoa (Putumayo), solicitaron el desarrollo de una investigación que partió desde el conocimiento del territorio a través de la toma de datos detallados como imágenes de sensores remotos aerotransportados y LiDAR, lo que permitió entender las dinámicas físicas del paisaje lo cual, junto a la participación de las comunidades locales, permitió un entendimiento del territorio a tal grado que tanto autoridades como residentes del sector asumieron su papel en las dinámicas de la cuenca y las acciones a tomar ante futuros escenarios amenazantes.

Esta iniciativa dio como resultado, no solo un profundo conocimiento físico de las características de la cuenca que genero el evento de desastre en el año 2017 para esta población y que son señalados en la resolución 957/2018 como requisito indispensable como resultado de esta guía, sino que también generó un proceso de apropiación social del conocimiento por parte de la comunidad que habita la cuenca y cuyo resultado más tangible fue un producto de difusión de conocimiento, materializado mediante una cartilla de circulación masiva, que resumía las condiciones principales de la cuenca así como el modo de actuar frente a una emergencia y que fue socializada y distribuida en una serie de talleres con los habitantes de la cuenca.

Enmarcados en esta experiencia sobre Mocoa y en la búsqueda de nuevas oportunidades para aplicar los conocimientos adquiridos, se enfrentó un proceso de monitoreo del sector de Caregato en San Jacinto del Cauca en el departamento de Bolívar, en este lugar por la dinámica del río Cauca se produjo una ruptura del dique natural en un proceso de avulsión que inundó gran parte de las tierras bajas entre este punto y la ciénaga de Ayapel, afectando una cifra superior a las 125 000 personas, además de limitar la productividad de la zona (UNGRD, 2021).

A lo largo de dos años se realizaron diferentes acciones para llevar a cabo el cierre de este punto, siendo insuficientes hasta la fecha, pero desde febrero del 2023 se desarrolló un plan de trabajo que involucraba un monitoreo a partir de sensores remotos como complemento al seguimiento en terreno y el cual, permitió orientar las acciones tomadas por parte de la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) y del personal en campo.

Toda la información generada mediante estas herramientas le permitió a la UNGRD adaptarse a un entorno altamente dinámico como lo es el río Cauca y ofrecer respuestas oportunas que requería la comunidad y cuyo apoyo era fundamental para un adecuado desarrollo del proyecto.

En ambas iniciativas, tanto en Mocoa como en Caregato, se utilizaron herramientas tecnológicas de última generación para el monitoreo de un evento de desastre asociado a fenómeno hidrológico extremo y a través de un proceso metodológico muy detallado, se originó un documento orientado hacia la planificación del territorio que permitió integrar en diferentes fases a la comunidad, brindándoles herramientas que les permitieron dimensionar lo que estaba ocurriendo en su territorio así como el modo adecuado de enfrentarlo.

Si bien en ambos casos el apoyo mediante tecnologías geoespaciales ocurrió en momentos diferentes, en Mocoa una vez el evento ya había sucedido y en Caregato cuando el evento estaba en proceso, estas herramientas demostraron su valor y dejaron abierta la posibilidad para continuar desarrollando proyectos donde se pueda recurrir a este tipo de tecnologías de una manera cada vez más presente.

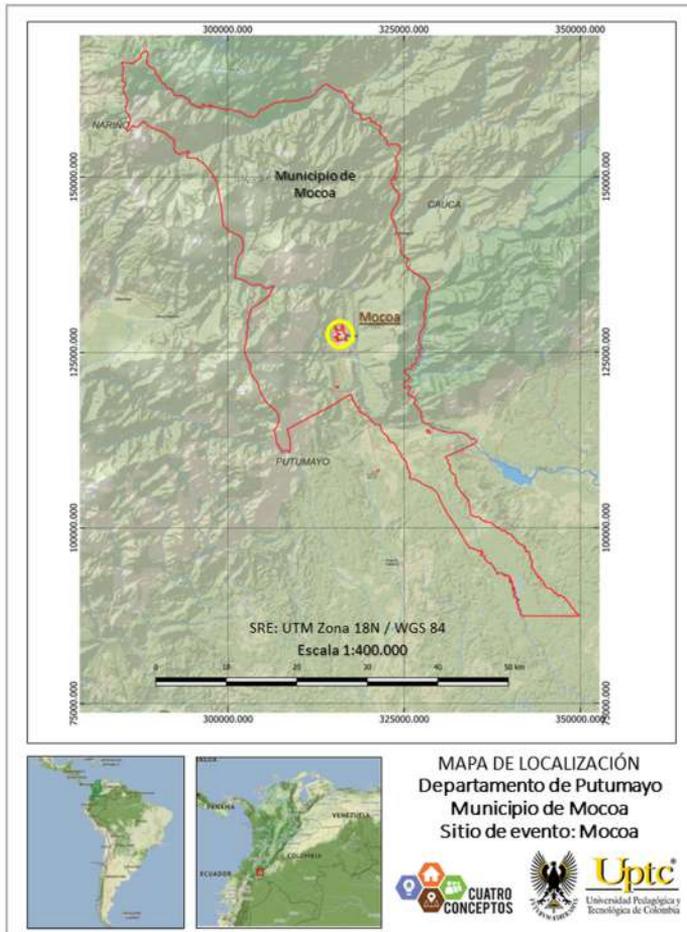
Desarrollo de una herramienta metodológica para mejorar la resiliencia ante desastres fluvio-torrenciales de la población de Mocoa

En la noche del 31 de marzo y 1 de abril de 2017, las lluvias provocaron una avenida torrencial en el municipio de Mocoa en Colombia, que es una entidad administrativa local con un tamaño de 1,263 km². A lo largo de las semanas previas, las lluvias habían ocurrido con relativa frecuencia, pero en la noche mencionada, el pico de precipitación fue tan elevado que produjo una serie de deslizamientos a lo largo de los ríos de la parte alta de la cabecera

municipal, lo que a sus vez desencadenó una serie de represamientos que finalmente generaron una avenida torrencial en la cuenca de los ríos Mulato y Sangoyaco y las quebradas Taruca, Taruquita, Conejo y Almorzadero.

Como resultado, se afectó la cabecera de este municipio y provocó la muerte de 330 personas según datos oficiales, así como 71 desaparecidos y pérdidas económicas que ascendieron a 315 millones de dólares.¹

Figura 1. Localización del área de trabajo, municipio de Mocoa



Fuente: Elaboración propia.

¹ <https://www.larepublica.co/globoeconomia/el-cambio-climatico-le-costo-us-314-5-millones-a-colombia-en-2017-2803808> Consulta realizada el 18 de Julio 2023.

En la evaluación posterior de la tragedia, se encontró que la población no sólo no estaba preparada para un evento de estas dimensiones, sino que tampoco comprendía la dinámica natural de su entorno. Estas condiciones crearon un contexto con baja capacidad de reacción ante fenómenos amenazante, algo que prospectivamente debía corregirse en aras de evitar repetir los errores presentados en el manejo de esta emergencia.

Figura 2. Vista aérea de los efectos de la avenida torrencial de Mocoa



Fotografía: Jhimmy Calvache (2017).

Enmarcado en estas circunstancias y amparado en el Decreto 2245 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), que reglamenta el artículo 206 de la Ley 1450 de 2011 referido al acotamiento de las rondas hídricas se expidió la Resolución 957 de 2018, también del mismo ministerio y denominada “Guía técnica de criterios de acotamiento de las rondas hídricas en Colombia y se dictan otras disposiciones”.

Esta guía considera una visión integral de lo que se denomina rondas hídricas considerando aspectos geomorfológicos, hidrológicos, ecológicos

además de reiterar el involucramiento de los actores sociales para la protección y conservación de las cuencas. Este novedoso enfoque requiere un esfuerzo mucho mayor de tiempo y recursos, pero el resultado debe ofrecer alternativas no solo para evitar tragedias como las de Mocoa, sino también para el aprovechamiento de los recursos disponibles en el área de trabajo.

Con estas consideraciones, se abordó el desafío de realizar el “Estudio para el acotamiento de la ronda hídrica de los ríos Sangoyaco, Rumiyaco, Pepino y las quebradas Taruca, Taruquita y Almorzadero”. Siendo este el primer estudio que se apropiaba de las herramientas brindadas por la resolución 957 de 2018 y que generaba a partir de ellas un modelado sobre un área específica en el país.

Metodología caso 1 (Mocoa)

Inicialmente y como punto de partida, se recreó una línea base sobre el área de estudio que cubría espacialmente el casco urbano municipal y los cauces de las corrientes hídricas involucradas, para ello y para contar con información de muy alta resolución se diseñó y estableció de una red geodésica de orden tres la cual fue nivelada geométricamente, según especificaciones dadas por la resolución 068 del 2005 emitida por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y actualizada posteriormente mediante resolución 715 de 2018 también del IGAC; adicionalmente, se llevó a cabo el proceso de cartografiar cuerpos de agua mediante técnicas convencionales de vadeo y captura de topografía de alta resolución, mediante el uso de sensores LiDAR de 500 kHz.

Adicional a lo anterior, se realizó un levantamiento fotogramétrico y cartográfico, además, siguiendo la metodología propuesta desde el MADS mediante la resolución 957 de 2018, se levantó información geológica, geomorfológica y de coberturas vegetales gracias a aerofotografías de resolución espacial de 8 cm y trabajo de campo que permitió obtener la información fisiográfica faltante.

La obtención de estos datos es crucial al momento de modelar el territorio ya que ellos permiten obtener una mirada del espacio de trabajo muy ajustada a la realidad, pudiendo predecir cualquier anomalía sobre la cuenca

de interés y determinar el impacto de cualquier pequeño cambio que pueda afectar la vida de las personas.

Vale la pena resaltar aquí que, con el avance de la tecnología de sensores remoto para la captura de datos adicional a la facilidad en el proceso de obtención de información, se tiende a dar mayor importancia al procesamiento, rapidez y cubrimiento que a la calidad misma de los datos, factor último que es realmente el punto crítico, ya que este define el adecuado modelamiento de las variables consideradas en cualquier estudio territorial.

En este aspecto es crucial el involucramiento de la población, por lo cual, a lo largo de todo el proyecto se propició un acompañamiento de las diferentes comunidades que habitaban las cuencas de interés, para que participaran activamente en el proceso de caracterización y formulación prospectiva para la ordenación de sus cuencas.

La resolución 957 de 2018 del MADS, también señala como vital el involucramiento de estos actores para las acciones de conservación, protección y manejo, en cuyo caso es siempre deseable que la comunidad conozca su territorio para fortalecer los procesos de apropiación (Ramírez Velázquez y López Levi, 2015).

Respecto a los datos tomados con sensores LiDAR, su uso permitió delimitar la estructura de la vegetación, que es uno de los requisitos de la guía para la delimitación de cuencas. Con el insumo obtenido se procedió a identificar las áreas boscosas y de cultivos que es uno de los factores condicionantes en la ocurrencia de avenidas torrenciales, así como de fenómenos de remoción en masa (Highland y Bobrowsky 2008; Reid *et al.* 2012; Ventura, Vilardo, y Terranova 2013; Calvello *et al.* 2014; Vargas Cuervo 1999).

La clasificación de la vegetación también tuvo un fuerte componente de campo para corroborar la clasificación florística realizada a partir de aerofotografías Visible + Infrarrojo, para la identificación de corredores biológicos y de conectividad en las áreas próximas a la vegetación riparia de las cuencas hidrográficas analizadas.

Estos dos productos facilitaron que la aproximación desde el componente geomorfológico fuera de muy alto detalle, acorde a las indicaciones del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017; Rodríguez Castiblanco *et al.*, 2017), lo que redundó en que el proceso de generación de unidades fuera muy detallado y preciso.

Todos estos insumos fueron la base para el análisis hidrológico e hidráulico en una fase posterior, para determinar el comportamiento de las diferentes cuencas de interés con tasas de retorno de eventos extremos de 5, 10, 15, 25, 50 y 100 años, identificando en ellas tanto el impacto de posibles inundaciones y avenidas torrenciales, así como el área que ocuparía el cauce ante cada uno de las proyecciones de estos eventos de desastre.

Posterior a ello y con la información obtenida, se definieron con exactitud los límites de las unidades de interés, las características intrínsecas a cada una de estas y posterior a los talleres de reconocimiento del territorio, se realizaron eventos de planificación y socialización de los resultados para dar por cerrado el proyecto.

Resultados

El conocimiento del territorio como herramienta para la gestión del riesgo de desastre

Dentro de los productos generados, derivados de este trabajo, el que cobra mayor importancia es un plan de manejo de gestión del riesgo, inmerso dentro del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del municipio y la subsecuente creación de un sistema de alerta temprana ante eventos torrenciales, como el acaecido el 1° de abril en el casco urbano del Mocoa, por lo tanto, los requerimientos a nivel de calidad de la información para este proyecto fueron de la mayor exactitud y calidad posible.

El proyecto debe garantizar que todo el conocimiento generado redunde en la mejora de la calidad de vida de los habitantes del territorio, y en este caso debe verse reflejado en planes y acciones que limiten al máximo la posibilidad de pérdida de vidas humanas o de la infraestructura considerada crítica para el mantenimiento de estas, buscando siempre una interacción con la comunidad que le permita apropiarse de tales instrumentos.

En este sentido las nuevas herramientas tecnológicas, empleadas a lo largo de este proyecto permitieron la captura de información con un altísimo grado de detalle, con una mejora significativa de la precisión de la información disponible para realizar ejercicios de planificación territorial, lo

que aunado a la capacidad de procesamiento y los nuevos desarrollos en software y algoritmos, facilitan los procesos de modelación del territorio en periodos menores y un mayor grado de detalle, que de otro modo serían muy desafiantes de abordar, por lo menos al mismo grado de complejidad.

Estos insumos de alto detalle, como por ejemplo el modelo digital de elevación del terreno (MDT) de muy alta resolución (10 cm), al igual que una red geodésica calibrada localmente en el territorio para asegurar la calidad y precisión de cualquier medición llevada a cabo sobre el área de trabajo, permitieron que las aerofotografías aéreas de 8 cm de resolución, fueran empleadas para generar cartografía a escala 1:1,000 para entornos urbanos y 1:5,000 para los rurales que corresponde a los límites definidos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) para la cartografía de detalle.

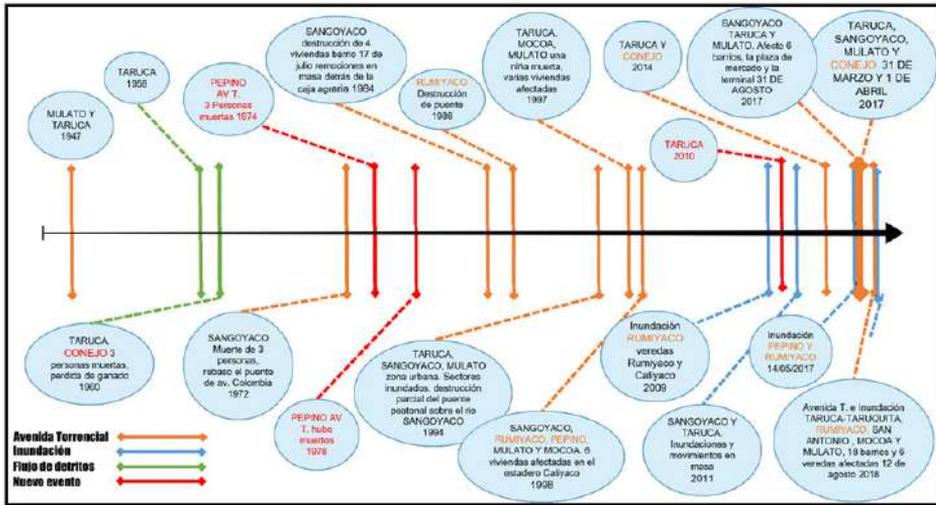
Estos datos también fueron suministrados al componente hidrológico e hidráulico, lo que permitió generar análisis para periodos de retorno de 5, 10, 15, 25, 50 y 100 años en donde se definieron las áreas críticas ante cada escenario de inundación y los impactos derivados de tales eventos, esta información fue puesta a disposición de los diferentes actores territoriales locales.

El facilitarle estas herramientas a la comunidad de una manera estructurada y asequible, permitió que la población misma generará dinámicas diferentes sobre el modelo de ocupación y ordenación del territorio, lo que a su vez facilitó las labores de intervención por parte de los actores administrativos locales, redundando, por supuesto, en un mejor proceso de toma de decisiones acorde a las necesidades de la población, aspecto evidenciado mediante los 38 espacios de participación llevados a cabo en las diferentes cuencas de trabajo, con 1 212 participantes, de los cuales, buena parte de ellos pertenecían a las 41 comunidades indígenas identificadas localmente.

A lo largo de todo este proyecto, la participación de la comunidad se constituyó en un elemento crucial, ya que permitió un acercamiento de primer nivel a la población y en donde se conocieron sus expectativas hacia este desarrollo metodológico, además de establecer otra línea base enfocada en el entorno socio económico e histórico, fruto de esto se obtuvo por ejemplo, la identificación de eventos pasados similares ocurridos en el área de investigación y el impacto que estos fenómenos tuvieron en la comunidad (figura 3), este trabajo fue complementado y corroborado mediante una revisión

bibliográfica de diferentes fuentes, que recopilaban la ocurrencia de eventos de desastre en Mocoa y que permitió abordar la problemática desde un enfoque mucho más social.

Figura 3. Línea de eventos históricos de inundaciones y avenidas torrenciales en el municipio de Mocoa obtenido a partir de revisión bibliográfica y talleres con la comunidad



Fuente: Elaboración propia.

Este proceso con la comunidad a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto se realizó de manera focalizada acorde al lugar de residencia, de los participantes, lo que permitió que grupos sociales con las mismas necesidades e intereses respecto a la cuenca en la que habitaban, pudieran compartir su conocimiento y ofrecer ópticas complementarias a los datos adquiridos por sensores remotos.

Finalmente, estos insumos tecnológicos, aunados al conocimiento del territorio, permitieron individualizar cada cuenca con su aparatado geológico, geomorfológico, hidráulico, ecológico y social, facilitando el desarrollo de planes de manejo individuales para cada cuenca, donde se consideraron todos los actores de la misma, además que, el ejercicio prospectivo llevado a cabo, permitió asimilar la gestión del riesgo de desastre como una dimensión necesaria, para cohabitar en espacios tan dinámicos como en estas cuencas intramontanas.

Con esta información se logró definir el límite físico de las diferentes cuencas de interés, elemento que fue socializado con las comunidades en los talleres realizados, en donde además se les dieron a conocer las razones que motivaron tal definición. Basados en esta información se continuó con un componente de carácter eminentemente social en el cual se llegaron a conocer los diferentes modelos de apropiación del territorio, al igual que los diferentes procesos organizativos y participativos que ocurren en cada cuenca.

Este proceso de reconocimiento territorial a cargo de los diferentes actores, vino acompañado de una evaluación de servicios ecosistémicos disponibles y de la identificación de posibles conflictos ambientales, con el fin de determinar el plan de acción e intervención sobre la cuenca, para a su vez, suministrar insumos identificados con este trabajo como los determinantes ambientales a otros instrumentos normativos como los planes de ordenamiento territorial (POT) o los Planes de Ordenamiento y Manejo de las Cuenas Ambientales (POMCA).

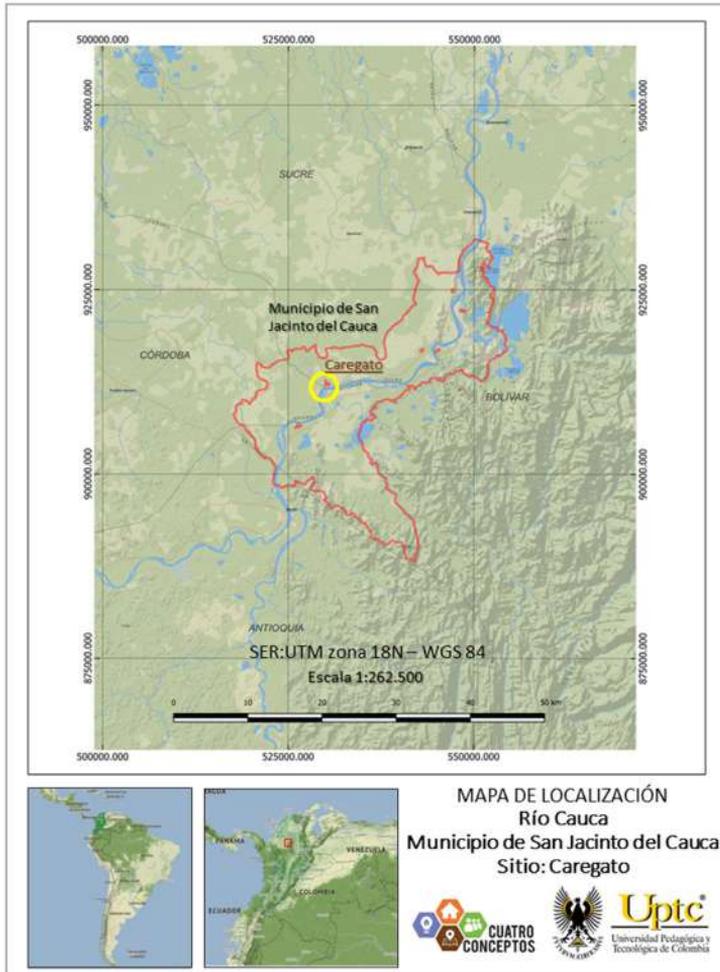
Fortalecimiento de la resiliencia de comunidades fluviales ante los eventos de desastre

El caso de Caregato ilustra un buen ejemplo de la vinculación de datos geospaciales de libre acceso junto a datos de sensores aerotransportados e información de campo y lo que pueden llegar a ofrecer para enfrentar una emergencia; esto en la medida que las imágenes de satélite que se emplean usualmente para establecer la línea base de un proyecto provienen de fuentes abiertas, posteriormente, todos estos análisis son mejorados en escala mediante el uso de sensores de mayor resolución espacial; en este caso en particular, estos datos permitieron tomar acciones encaminadas al cierre del punto de ruptura de Caregato y a la mejora en la capacidad hidráulica del río Cauca mediante la apertura del denominado “Canal de La Esperanza”.

El día 28 de agosto de 2021, después de varios días de intensas precipitaciones el río Cauca rompió el dique natural del sector denominado “Caregato” (figura 4), la grieta, de unas decenas de metros en el momento de

su ruptura, creció de manera continua hasta alcanzar más de 1 600 metros de longitud en unas pocas semanas dificultando su cierre.

Figura 4. Localización del área de trabajo, municipio de San Jacinto del Cauca (sector de Caregato)



Fuente: Elaboración propia.

Este fenómeno generó una inundación, hacia el norte del punto de ruptura, de tierras que se empleaban para cultivos así como suelos de pastoreo; del mismo modo, múltiples viviendas se vieron afectadas por este evento sin contar las implicaciones sanitarias que para la población tuvo el anega-

miento de áreas contiguas a sus lugares de residencia, ni la limitación en los desplazamientos debido a la destrucción de caminos al interior de región de La Mojana y con ello los subsecuentes problemas comerciales o educativos para los habitantes del sector.

En este escenario, la Unidad Nacional para la Gestión de Riesgo de Desastre (UNGRD) pone de manifiesto la necesidad no solo de cerrar el punto de ruptura, sino de evaluar el impacto de las acciones adelantadas en campo para llevar a cabo esta tarea, por lo cual monitorear las condiciones del río de manera semanal y su evolución se hace crucial.

Enmarcado en esos requisitos se desarrolla el presente trabajo, el cual, gracias al uso de diversas herramientas geoespaciales junto a métodos tradicionales, permitió el monitoreo y evaluación de las obras adelantadas en campo, así como el seguimiento continuo del comportamiento del río Cauca, lo cual facilitó a la UNGRD la toma de decisiones informadas soportadas en los datos analizados a lo largo de este trabajo.

A continuación, se presentan los principales aspectos a resaltar fruto del trabajo desarrollado para el control y seguimiento de las obras llevadas a cabo en el sector de Caregato y el impacto que los sensores remotos y su respectiva evaluación, ofrecieron a la UNGRD para la oportuna toma de decisiones.

Metodología caso 2 (Caregato)

El proyecto fue dividido en tres componentes complementarios entre sí, el primero corresponde al de análisis de campo en el cual un profesional se encontraba en las máquinas de dragado dispuestas para tal operación por la UNGRD y era el encargado de brindar día a día informes sobre la situación presente del río, permitiendo obrar en consecuencia o responder a eventos puntuales en territorio.

El segundo equipo fue el encargado del análisis de datos de sensores remotos, esto incluía sensores activos satelitales del tipo radar Sentinel 1 y Cosmo SkyMed que permitían realizar el seguimiento bajo cualquier condición climática, en este grupo de sensores se encuentran también los datos Lidar aerotransportados, que permitieron obtener valores de altura para la posterior generación de un modelo digital de elevación del terreno.

En el grupo de sensores pasivos se trabajó con datos de los satélites Landsat 8 y 9 así como de Sentinel 2 y con esta información se determinó la concentración de sedimentos superficiales. Para complementar estos análisis en el apartado de resolución espacial se usaron datos de los satélites Ónix con 0.5 metros de resolución y se realizó un vuelo para adquirir datos aerofotográficos con hasta 0.08 metros de resolución espacial en longitudes espectrales de visible e infrarrojo.

El tercer grupo de trabajo fue el encargado de realizar los levantamientos batimétricos, así como el modelamiento hidráulico del tramo de estudio. En este caso se programaron dos campañas para realizar un levantamiento completo de las secciones de trabajo y seis monitoreos en diferentes momentos que evidenciaran el avance de la intervención llevada a cabo por las dragas y determinar si estas acciones se ajustaban a lo planeado mediante modelamiento.

Estos tres grupos de trabajo realizaban de esta manera un monitoreo continuo y complementario sobre el territorio de forma diaria, semanal y mensual, cada uno de ellos aportando información diferente para entender la dinámica propia de la zona y ejecutar acciones en concordancia con lo observado para la ampliación del canal de la Esperanza, así como del mantenimiento de la capacidad hidráulica del río Cauca.

Monitoreo de campo

Las labores de monitoreo de campo fueron llevadas por un profesional que a diario acompañaba las dragas hasta su destino sobre el tramo del río Cauca a intervenir mediante acciones de dragado. Estas acciones eran planificadas gracias a los datos obtenidos de sensores remotos en coordinación con la UNGRD y semanalmente se definía en que tramo se intervendría con los respectivos equipos, de esta manera la función primaria de este acompañamiento fue el que se revisara las actividades en la zona que se había planificado.

Además de lo anterior, este profesional estaba encargado de informar cualquier incidencia que afectara el normal desarrollo de las actividades, y tenía la autonomía para situar la draga en donde él identificara que tendría

mayor impacto siempre y cuando fuera dentro de la zona señalada como prioritaria al inicio de la semana.

Una de las labores cruciales de este equipo era escuchar a las comunidades locales, las cuales, debido a la disminución del caudal del canal principal, que fue hasta en un 70% de su flujo original, presentaban problemas con sus desplazamientos sobre algunas zonas y en algunos momentos transmitían sus requerimientos a la UNGRD a través de este personal, con esto se podía atender eventos puntuales y evitar futuras emergencias.

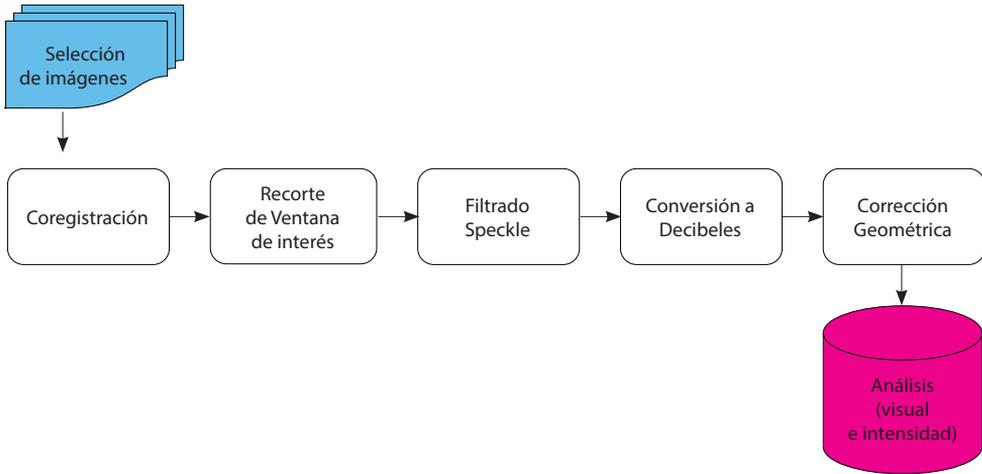
Monitoreo mediante imágenes de sensores remotos

Complementario al monitoreo en campo, se realizó un seguimiento mediante sensores satelitales activos y pasivos del área de trabajo, en este caso se dio prelación a los primeros, en especial al sistema Sentinel 1B de banda espectral C que, por ser un tipo de radar, no se veía afectado por condiciones climáticas adversas y garantizaba un monitoreo de entre 5 o 7 días, acorde al modo de toma de los datos (ascendente o descendente). Adicionalmente, se contó con información de los satélites Cosmo SkyMed de 1 metro de resolución en banda espectral X (Jo *et al.* 2015), para corroborar algunas mediciones respecto al tramo de estudio.

Las imágenes de radar fueron procesadas siguiendo el proceso metodológico sugerido por la Agencia Espacial Europea (ESA) (figura 3) (Sarmap 2007; Ferretti *et al.*, 2007) y el único paso que se omitió es la remoción del ruido termal (*Thermal noise removal*) porque no se encontró una mejora sustancial de las imágenes adicionando este paso, incluso en los cursos de ARSET² no es considerado un paso fundamental para el procesamiento de este tipo de datos.

² Applied Remote Sensing Training Program. <https://appliedsciences.nasa.gov/join-mission/training/spanish/arset-introduccion-al-radar-de-apertura-sintetica> Consulta realizada el 18 de Julio de 2023.

Figura 5. Esquema de procesamiento de datos SAR empleada para los datos Sentinel 1B



Fuente: Elaboración propia.

Las imágenes de radar fueron empleadas para la delimitación de orillas, la identificación de zonas con presencia o ausencia de agua y finalmente para la identificación de carga de sedimentos superficiales en el río Cauca gracias a la retrodispersión del radar. Como ya se señaló anteriormente el sensor Sentinel 1 ofrece una revisita de un punto en ciclos de 5 y 7 días, lo cual es ideal para un control semanal permitiendo ver el impacto de las obras llevadas a cabo, así como proyectar las futuras acciones a realizar para cumplir las metas propuestas por la UNGRD.

La separación entre el terreno anegado y el seco se dio gracias a la constante dieléctrica (Nathanson *et al.*, 1991; Bamler y Hartl 1998; NATO/OTAN, 2004) producto del comportamiento entre las ondas electromagnéticas provenientes del radar y la presencia de agua en este caso. Esta característica permite separar con relativa facilidad los cuerpos de agua de su entorno, lo que resulta crucial a la hora de definir las orillas o los límites del área inundada.

De otro lado, el monitoreo con sensores satelitales pasivos incluyó datos de Landsat 8 y 9, Sentinel 2 e imágenes de Planet Scope, además de aerofotografías en visible + infrarrojo. La resolución de estos datos variaba entre 30 y 0.1 metros. Su importancia radica en que gracias a los mismos fue posible generar el Índice Normalizado Diferencial de Turbidez (NDTI)

(Lacaux *et al.* 2007), el cual permitió monitorear el flujo de sedimentos superficiales en las aguas del río Cauca. El NDTI emplea dos bandas espectrales: verde y rojo, ambas disponibles en los sensores seleccionados.

Monitoreo mediante análisis hidráulico

Este componente del proyecto se realizó en momentos puntuales mediante batimetría de ecosonda y permitió la generación de un modelo digital del fondo del río en el tramo de interés, así como la obtención de secciones batimétricas sobre el río Cauca, sobre otros sectores de interés identificados para la posterior generación de un modelo hidráulico, lo que permitió evaluar el comportamiento de este cuerpo de agua y en función de ello se trazaron las acciones a seguir por parte de la UNGRD.

Las batimetrías fueron realizadas con sondas monohaz en secciones trazadas cada 100 metros, además de lo cual, se tomaron puntos de fotocontrol en áreas próximas al río para la calibración tanto de estos datos, como de las fotografías aéreas tomadas en el componente de sensores remotos. El objetivo de estas batimetrías fue brindar un panorama del lecho del río al inicio del proceso de monitoreo y control y en diferentes momentos a lo largo de la intervención, que permitieran constatar el avance de las acciones realizadas en campo y obrar en consecuencia con las mismas.

Estos datos junto al modelo digital de elevación de terreno (MDT), sirvieron como insumo para que se modelara el comportamiento del río y se proyectara el tipo de intervención a realizar para el cierre del río Cauca en el punto de ruptura.

Resultados

Acciones para la toma informada de decisiones

Administrativamente, el proyecto inicia con la oficialización del proceso de dragado y adecuación hidráulica del río Cauca, con lo cual, la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) se encargó de efectuar

un contrato para la vigilancia de esta obra que no se limitara únicamente al control de la misma, sino que, a través de múltiples herramientas geoespaciales, pudiera realizar, además del procedimiento típico, que es este seguimiento, también determinar el impacto de las acciones llevadas a cabo en campo de manera periódica y en plazos no mayores de una semana, para reorientar sus trabajos cuando así se determinara.

Este nuevo tipo de interacción entre la UNGRD, el contratista y el encargado de supervisar las obras, permitió además una interacción con la comunidad mucho más cercana; con este nuevo enfoque, el plan de trabajo fue socializado con los interesados locales, así como el impacto de las acciones a realizar y de estas interacciones se recogieron las inquietudes de las personas respecto a la intervención puntual de algunas zonas, para facilitar sus desplazamientos en algunos tramo del río Cauca o solventar problemas en zonas específicas, producto de la pérdida de capacidad hidráulica del río.

Con esto, se cumplió el primer componente planteado en el cronograma de trabajo que era el reconocimiento local de la zona y de los interesados en el proyecto. Posterior a ello, se desplazó a campo la comisión de batimetría e hidráulica para obtener información de las condiciones hidrodinámicas del río y poder modelar el comportamiento de este como se indica en la metodología

Paralelo a esto, se obtuvieron las imágenes de satélite previas al evento para establecer una línea base en la que se pudiera verificar como era el comportamiento del río antes del proceso de avulsión y de igual manera se hizo para determinar comportamiento posterior al mismo, además de calcular el índice de turbidez, la información proveniente del sensor satelital de radar Sentinel 1 fue actualizada a partir de esto cada vez que el satélite tomaba una escena de la zona, siendo el plazo máximo cada 7 días, y este proceso se materializó como el componente central del proceso de monitoreo.

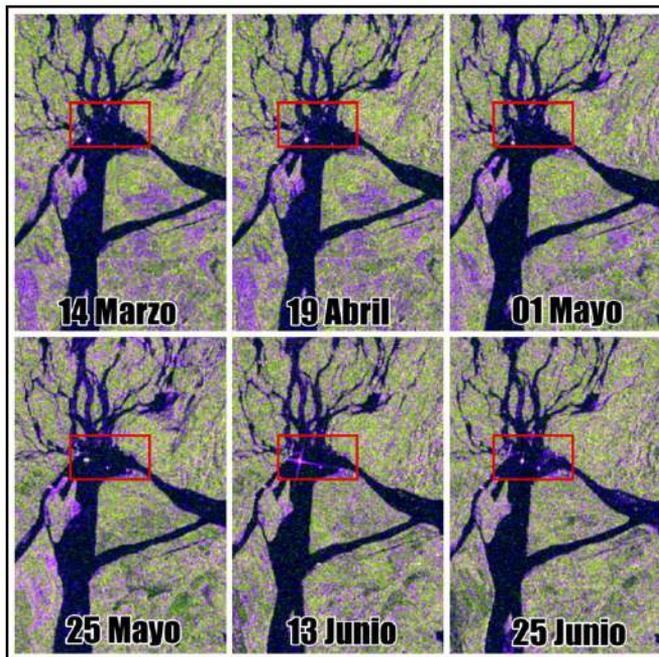
Estos datos fueron suministrados a la UNGRD mediante informes periódicos, y presentaciones en los cuales se les informaba:

- La posición predominante de los sedimentos superficiales mediante el Índice Normalizado Diferencial de Turbidez (NDTI).
- La posición predominante de los sedimentos superficiales mediante interpretación de radar.

- El comportamiento de las barras aluviales en el área de trabajo.
- El comportamiento de las orillas.
- El tamaño del punto de ruptura.
- La localización de las dragas y otros objetos antrópicos capaces de ser identificados mediante sensores remotos.
- Las áreas anegadas de interés en el perímetro de Caregato.
- El comportamiento de las aguas en el punto de avulsión.
- Las necesidades y requerimientos de la comunidad.

Una vez establecida la línea base, se emplearon los datos del satélite Sentinel-1 para hacer el monitoreo del espejo de agua activo, aprovechando la retrodispersión del satélite para identificar de manera superficial, la localización y disposición de los sedimentos en suspensión, así como el cuerpo de agua (figura 6), algo que fue corroborado posteriormente mediante los sensores ópticos y el índice de turbidez (Lacaux *et al.*, 2007).

Figura 6. Comparación de elementos identificados sobre imágenes Sentinel 1B

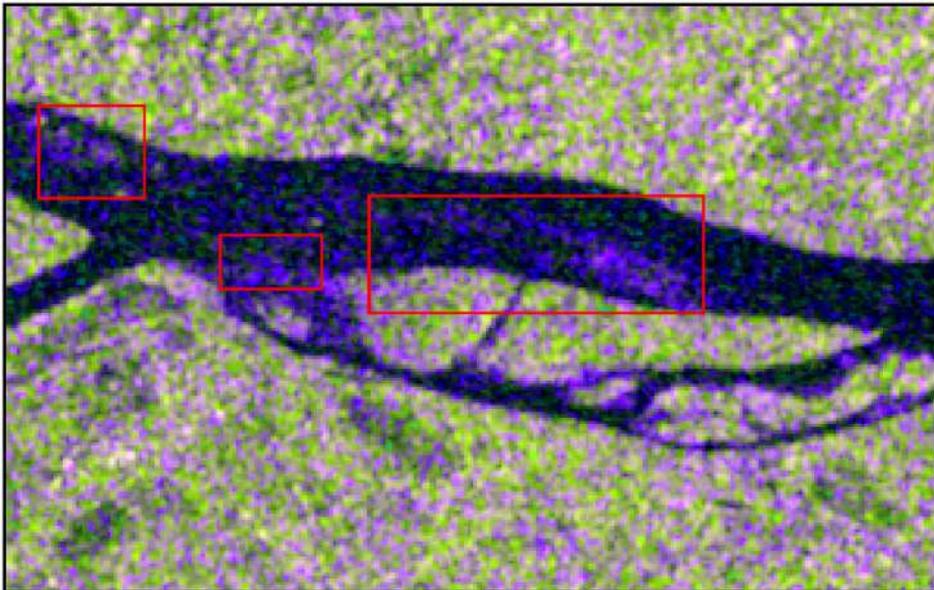


Fuente: Elaboración propia.

Debe primero indicarse que la señal de radar se comporta de manera especular ante los cuerpos de agua (Sarmap 2007), esto significa que la señal que es emitida oblicuamente por el sensor sobre el río, al entrar en contacto con la superficie de agua se refleja en dirección opuesta al punto de emisión, con esto la información que se recibe de vuelta es muy poca y visualmente estas zonas tienden a ser muy oscuras Alsdorf *et al.*, 2000).

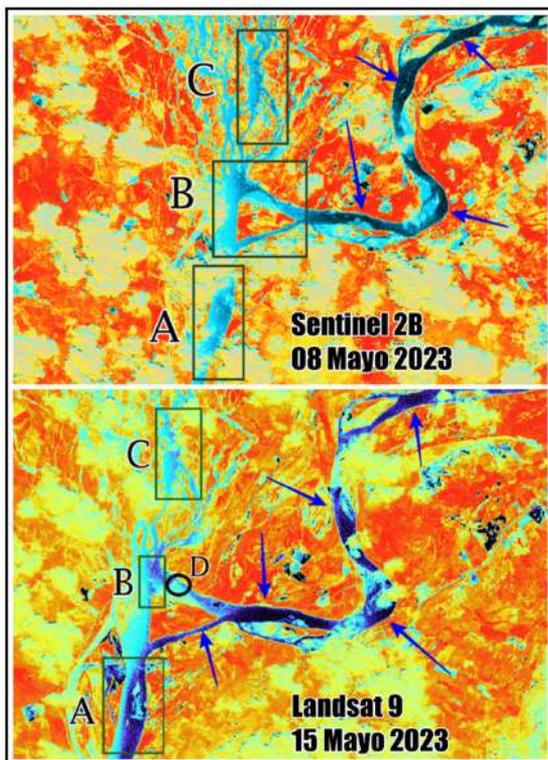
Estos tonos oscuros en los cuerpos de agua tienen a variar bajo dos condiciones: La rugosidad, producto del oleaje del agua (Goldstein y Zebker, 1988) y la cantidad de sedimentos en el agua, la cual altera la retrodispersión de la señal (Brown y Lucieer, 2015; Shao *et al.*, 2021). Con esta información y realizando una ecualización local del histograma, se identificaron los principales puntos donde se aglutinaban los sedimentos (figura 7), lo que fue posteriormente corroborado mediante un índice de turbidez (figura 8) (La-caux *et al.*, 2007), y observaciones en campo.

Figura 7. Caracterización de flujo de sedimentos sobre imágenes Sentinel 1



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Índice de turbidez realizado sobre imágenes Sentinel 2



Fuente: Elaboración propia.

Como se indicó anteriormente, para verificar elementos puntuales y constatar datos adicionales, se utilizaron imágenes Cosmo SkyMed de 1 metro de resolución espacial con polarización HH. Del mismo modo, en la fase inicial del proyecto se contó con un modelo digital de elevación del terreno con una resolución de 10 metros por pixel y que fue procesado a partir de interferometría del satélite de radar argentino SAOCOM de banda L.

La imagen satelital óptica Planet Scope fue necesaria por un evento puntual, ya que se evidenció la presencia de un alto flujo de sedimentos atípicos en el área de trabajo, caracterizado gracias a las imágenes Sentinel 2 (figura 8) sin que se pudiera, desde laboratorio, encontrar una causa natural que permitiese correlacionar su ocurrencia, tras la verificación en campo,

se encontraron más de 30 dragas artesanales, algunas de las cuales fueron identificadas en esa imagen de alta resolución.

Complementario a lo anterior se planeó la toma de imágenes digitales aerotransportadas, las cuales fueron tomadas junto a los datos LIDAR, la adquisición de esta información se programó para la última fase del proyecto, para evidenciar la situación de las obras al cierre de del proyecto y determinar el estado del avance después de 3 meses de trabajo con un alto grado de detalle. Estas imágenes poseían una resolución espacial de 10 centímetros y contaban con cuatro bandas espectrales: visible + infrarrojo.

Este flujo de información suministrado de manera continua a lo largo del proyecto permitió determinar qué puntos intervenir mediante el dragado acorde a la dinámica del río. La única excepción a esto ocurría cuando la comunidad en momentos puntuales solicitó la ayuda para dragar orillas o caños de interés debido a la afectación que la sedimentación del río podría producirles.

Una vez procesada la batimetría y con toda la información base ya colectada, se efectuó al planteamiento de diferentes alternativas hidráulicas que facilitarían el cierre del punto de ruptura, considerando que la mejor de ellas era la ampliación del denominado canal de La Esperanza, localizado al sur del sector de avulsión sobre paleo meandros dejados por el mismo Cauca, con lo que se garantizaba continuar con la dinámica propia del río, que en algún momento se encontraba sobre este punto.

El monitoreo y reporte continuo permitió además responder requerimientos específicos de los entes de control, los cuales requerían verificar el avance de las obras y la adecuada destinación de los recursos públicos, lo cual es de vital importancia para las entidades estatales y la veeduría ciudadana.

Conclusiones

Las experiencias presentadas en este trabajo ejemplarizan dos tipos de emergencias diferentes, y que fueron enfrentadas en dos momentos dispares, en el caso de Mocoa fue posterior a la emergencia y en el caso de Caregato, fue durante la ocurrencia del evento. Ambas fueron soportadas gracias a los avances en geotecnologías actuales como herramienta para el análisis geo-

gráfico, resaltando en los dos casos la importancia de estas técnicas para la construcción social del territorio, así como para una adecuada planificación del uso y apropiación del mismo.

Metodológicamente, en cada caso se combinaron los procesos técnicos y normativos sobre el pilar del conocimiento de los habitantes de los sectores afectados y la armonización pedagógica para el cambio, en el modelo de ocupación que tradicionalmente se ve enfrentado entre la oferta ambiental de estos territorios y las necesidades básicas de la población que allí reside.

Ambos análisis denotan que en Colombia la preparación ante las emergencias es reducida, si bien existen instrumentos normativos, esto son poco conocidos o tienen un rango de acción limitada, por lo cual no siempre son tomados en cuenta en los procesos de planificación del territorio.

También y sobre el mismo punto puede señalarse que los recursos para la preparación y mitigación ante el riesgo de desastre son limitados, por lo cual muchas entidades territoriales los destinan al fortalecimiento de cuerpos de bomberos, construcción de obras como taludes u obras que la comunidad requiere de manera inmediata, y no a la preparación ante eventos catastróficos de los cuales se desconoce su recurrencia o impacto.

El proceso de atención de emergencias recae sobre el gobierno central, por lo cual las entidades locales prefieren esperar a que el gobierno nacional sea quien destine recursos para estas afectaciones. Localmente puede verse en el caso de Caregato, en el cual el municipio no cuenta con recursos y es la nación quien entra a apoyar el proceso de cierre del punto de ruptura. En este caso se evidenció en campo que es la comunidad afectada, quien entra a apoyar de manera artesanal las actividades para la atención de la emergencia y quien se apersona del proceso de veeduría para garantizar la ejecución de la obra.

En Mocoa, la participación de la comunidad fue más reactiva y surgió como respuesta a la emergencia a la que se vieron avocados, posterior a ella en el proceso de evaluación del evento y construcción para la resiliencia de la población, las diferentes comunidades si tuvieron un papel más activo y se involucraron en todas las actividades desarrolladas.

Buena parte de las acciones adelantadas por la comunidad, dependieron de la información suministrada de manera activa por parte de las personas encargadas de evaluar la emergencia. Sobre este punto también cabe resaltar

las fortalezas de los datos de libre acceso en plataformas de la NASA, la ESA o la JAXA que, aunque de media resolución permiten hacer el monitoreo del territorio en periodos cortos y usualmente deben ser complementados con trabajos de campo.

De otro lado, se encuentran los datos de alta resolución espacial, estos usualmente deben ser adquiridos a compañías privadas, pero ofrecen una mirada muy detallada al territorio lo que facilita los procesos de modelamiento y prospección del territorio como es el caso de Caregato. Debido precisamente a su costo, se debe definir desde el principio en qué momento se van a tomar y cuál va a ser su papel en el proyecto, así como la manera en que deben ser trabajados con los datos de libre acceso empleados para el monitoreo.

En el caso de Mocoa, pese a que se demostró que gran parte de la comunidad tenía memoria de estos eventos de desastre en el área de estudio, no se encontraron implementadas medidas que permitieran hacer frente a estas amenazas o por lo menos a procesos de mitigación, incluso se encontró que los habitantes en áreas con una elevada vulnerabilidad ante avenidas torrenciales no tenían conocimiento de la condición de la zona en la que habitaban.

Precisamente por la temporalidad en la ocurrencia de estos eventos, el impacto de estos no fue dimensionado en los planes de ordenamiento territorial del municipio o en planes de contingencia que permitieran a los habitantes responder a este tipo de eventualidades y las herramientas metodológicas existentes, en especial los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Ambientales (POMCA), no habían sido implementadas en las cuencas de interés.

Para ambos casos es pertinente señalar, que si bien las nuevas tecnologías son cruciales para responder adecuadamente a las diferentes emergencias, la participación de la comunidad es el elemento vital para garantizar el éxito del proceso de gestión de riesgo de desastre en todas sus etapas, son ellos quienes ante una emergencia conocen su territorio y tienen la capacidad de responder más adecuadamente, son ellos quienes tienen la memoria histórica de su territorio y pueden dar validez a las soluciones planteadas.

Por señalar solo un ejemplo, la implementación de sistemas de alerta temprana en el territorio solo tiene garantizado su éxito, si la comunidad

comprende su impacto, tiene claro cómo funciona y reconoce los diferentes tipos de alertas emitidos por el sistema. Los actores sociales son el núcleo de la gestión del riesgo de desastre y su participación activa, así como el involucramiento de las autoridades locales es la única manera de garantizar comunidades fuertes y resilientes ante un evento de desastre.

Reflexiones

En la modernización del Estado colombiano se han construido una serie de herramientas metodológicas para el desarrollo del territorio, que han ido evolucionando en la medida que se detectan las falencias de los instrumentos previos o las necesidades de los habitantes, pese a lo anterior muchas de esas herramientas no son consideradas en las tareas de planificación territorial o puede ocurrir que se lleve a cabo un análisis general del paisaje pero los resultados no sean implementados y apropiados por las comunidades locales.

Las autoridades nacionales y municipales en los dos casos recurrieron a conformar un equipo técnico que vinculo el concepto de “cuádruple hélice” (Eisenhardt, 2007), a saber: Estado, academia, sector privado y sociedad en general, para realizar los estudios prospectivos necesarios de conocimiento de riesgo y establecer los lineamientos para la respectiva reducción de riesgo a este tipo de desastres y limitar al mínimo la expectativa de futuras ocurrencias, esto resulta de la mayor importancia, ya que permite abordar de una manera dinámica las problemáticas locales, mejorando considerablemente los tiempos de respuesta y aprovechando las fortalezas de cada uno de estos actores.

La “cuádruple hélice” (Eisenhardt, 2007) que el gobierno colombiano viene sugiriendo para sus procesos investigativos, busca garantizar la participación de la academia para propiciar la innovación, la sociedad civil es el garante de la ejecución de las acciones en territorio, además de ser quien usualmente se ve afectada por la ejecución de estas actividades, la empresa privada garantiza la adaptabilidad a las diferentes necesidades del territorio así como la versatilidad para la ejecución de obras y actividades y el gobierno otorga el marco regulatorio y apoya con los recursos que hagan falta.

El uso de cualquiera de las diferentes herramientas metodológicas existentes a la fecha, probablemente hubiera disminuido en algún grado el impacto del evento de desastre, pero es solo hasta la formulación de la resolución 957 de 2018 que se involucra de manera activa tantos elementos funcionales de la cuenca, lo que aunado al componente social, económico y político y por ende es solo hasta este momento que se le dan insumos a la comunidad para construir resiliencia y adaptación ante este tipo de incidentes.

También, es importante resaltar como el conocimiento científico impulsa la mejora en la regulación, control y ordenamiento del territorio, algo que se ve reflejado en la normatividad emitida para la planificación. Estos avances han permitido que en periodos muy cortos se hayan mejorado y transformado las leyes, lo cual no debe impedir que en un par de años se deban repetir y mejorar los estudios gracias a los nuevos avances tecnológicos que ayuden a mejorar el conocimiento detallado de las comunidades y sus necesidades.

Los resultados obtenidos permiten evidenciar que el trabajo combinado en la obtención de datos de tecnologías geoespaciales y su procesamiento técnico, junto con el conocimiento empírico de las comunidades mediante procesos pedagógicos, es base fundamental para la generación de información útil para la toma de decisiones inteligentes en la planeación territorial de cara a un nuevo modelo de ocupación, que tenga en cuenta las amenazas naturales presentes y armonice las necesidades de la comunidad, para el desarrollo sostenible de los espacios naturales que necesariamente deben tener un manejo que privilegie la conservación.

También es importante observar como las nuevas herramientas geoespaciales ayudan a disminuir tiempos para la obtención de variables fundamentales como geología, geomorfología o cobertura vegetal además de optimizar los recorridos en campo, o mejoran la calidad del modelamiento gracias a su precisión y al nivel de detalle que proveen nuevos instrumentos.

De este modo debe reconocerse la importancia de los nuevos avances tecnológicos para la obtención de diferentes variables que permiten un mejor conocimiento del territorio, acorde a los nuevos requerimientos y disposiciones que se hacen desde las autoridades técnicas como el IGAC, lo que a su vez responde a las nuevas dinámicas en la captura de información en la que el sector geoespacial ha estado trabajando, es decir, mayor oferta de

datos privados y libres, mayor detalle y un mayor tiempo de respuesta a la hora de acceder a información cuando ocurre una emergencia.

De igual forma, es crucial vincular siempre a los grupos sociales que habitan el territorio, esto permitirá que cualquier plan o acción de mejora tenga un proceso de apropiación que facilitará que cualquier iniciativa a llevar a cabo tenga éxito.

Cuando todas estas condiciones estén dadas, se podrá garantizar una adecuada gestión del riesgo de desastre sobre el territorio y, por ende, acciones coherentes para el manejo de situaciones amenazantes que afecten la integridad de las personas o de la infraestructura que sustenta su vida.

Finalmente, es importante notar el papel crucial de una normatividad actualizada y con suficientes herramientas metodológicas, que permitan abordar las realidades del territorio de una manera idónea. Para que las mencionadas herramientas tengan éxitos deben ser flexibles y responder a las necesidades de la comunidad, así como generar espacios de participación locales y una adecuada interlocución con el sector técnico científico de la nación.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la firma de consultoría Cuatro Conceptos S.A.S.³ por suministrar toda la información y facilitar el acceso a los datos y registros para la construcción de este documento.

Bibliografía

- Alsdorf, D., Melack, J., Dunne, T., Mertes, L., Hess, L., y Smith, L. (2000). Interferometric radar measurements of water level changes on the Amazon flood plain. *Nature*, 404(6774), 174-177. <https://doi.org/10.1038/35004560>
- Bamler, R., y Hartl, P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse problems*, 14(4), R1-R54. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/14/4/001>
- Brown, C. J., y Lucieer, V. (2015). *Backscatter measurements by seafloor-mapping sonars-*

³ <https://cuatroconceptos.com/>

- Guidelines and Recommendations*. <https://www.researchgate.net/publication/275890570>
- Calvello, M., D'Orsi, R. N., Piciullo, L., Paes, N., Magalhaes, M., y Lacerda, W. A. (2014). The Rio de Janeiro early warning system for rainfall-induced landslides: Analysis of performance for the years 2010-2013. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 12, 3-15. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2014.10.005>
- CONPES 3904, 1 (2017).
- Departamento nacional de planeación (DNP). (2007). *Cartilla ambiental. Colombia visión 2019*.
- Domínguez-Calle, E., Lozano-Báez, S., Efraín, D.-C., Sergio, L.-B., Domínguez-Calle, E., Lozano-Báez, S., Efraín, D.-C., y Sergio, L.-B. (2014). Estado del arte de los sistemas de alerta temprana en Colombia / State of the art of the early warning system in Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, VO - 38, 148, 321. <http://ezproxy.unal.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edssci&AN=edssci.S0370.3908201400030007&lang=es&site=eds-live>
- Eisenhardt, K. M., y Graebner, M. E. (2007). Theory building from cases: Opportunities and challenges. *Academy of Management Journal*, 50(1), 25-32. <https://doi.org/10.5465/AMJ.2007.24160888>
- Ferretti, A., Monti-guarnieri, A., Prati, C., y Rocca, F. (2007, febrero). InSAR principles: Guidelines for SAR interferometry processing and interpretation (TM-19; parte B). *Esa*.
- Flórez, A. (2009). Lecturas de geografía. En J. W. M. G (Ed.), *Lecturas en teoría de la geografía* (p. 371). Centro Editorial, Facultad Ciencias Humanas.
- Frigerio, S., Schenato, L., Bossi, G., Cavalli, M., Mantovani, M., Marcato, G., y Pasuto, A. (2014). A web-based platform for automatic and continuous landslide monitoring: The Rotolon (Eastern Italian Alps) case study. *Computers and Geosciences*, 63, 96-105. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.10.015>
- Geudtner, D., Winter, R., y Vachon, P. W. (1996). Flood monitoring using ERS-1 SAR interferometry coherence maps. *IGARSS '96. 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2, 966-968. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1996.516536>
- Goldstein, R. M., y Zebker, H. A. (1988). Interferometric radar measurement of ocean surface currents. *Nature*.
- Hall, A., Thomas, R. F., y Wassens, S. (2019, agosto). Mapping the maximum inundation extent of lowland intermittent riverine wetland depressions using LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111376. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111376>
- Highland, L. M., y Bobrowsky, P. (2008). The landslide Handbook: A guide to understanding landslides. *US Geological Survey Circular*, 1325, 1-147. <https://doi.org/10.3133/cir1325>
- Huang, C., Peng, Y., Lang, M., Yeo, I. Y., y McCarty, G. (2014). Wetland inundation mapping and change monitoring using Landsat and airborne LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 141, 231-242. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.10.020>
- Jo, M.-J., Jung, H.-S., Won, J.-S., y Lundgren, P. (2015). Measurement of three-dimensio-

- nal surface deformation by Cosmo-SkyMed X-band radar interferometry: Application to the March 2011 Kamoamoao fissure eruption, Kilauea Volcano, Hawai'i. *Remote Sensing of Environment*, 169, 176-191. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.003>
- Lacaux, J. P., Tourre, Y. M., Vignolles, C., Ndione, J. A., y Lafaye, M. (2007). Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*, 106(1), 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.012>
- LaRocque, A., Phiri, C., Leblon, B., Pirotti, F., Connor, K., y Hanson, A. (2020). Wetland mapping with landsat 8 OLI, Sentinel-1, ALOS-1 PALSAR, and LiDAR data in Southern New Brunswick, Canada. *Remote Sensing*, 12(13), 1-30. <https://doi.org/10.3390/rs12132095>
- Matgen, P., Hostache, R., Schumann, G., Pfister, L., Hoffmann, L., y Savenije, H. H. G. (2011). Towards an automated SAR-based flood monitoring system: Lessons learned from two case studies. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36(7-8), 241-252. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.12.009>
- Mleczko, M., y Mróz, M. (2018). Wetland mapping using SAR data from the Sentinel-1A and TanDEM-X missions: A comparative study in the Biebrza floodplain (Poland). *Remote Sensing*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/rs10010078>
- Nathanson, F. E., Reilly, J. P., y Cohen, M. N. (1991). *Radar Design Principles Signal Processing and the Environment* (2a ed.). SciTech Publishing, Inc.
- NATO/OTAN. (2004). Radar Polarimetry and Interferometry. *Radar Polarimetry and Interferometry*, 326.
- PNUD y Cepal. (1999). *El terremoto de enero de 1999 en Colombia: impacto socioeconómico del desastre en la zona del eje cafetero*. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/25388>
- Ponziani, F., Ciuffi, P., Bayer, B., Berni, N., Franceschini, S., y Simoni, A. (2023). Regional-scale InSAR investigation and landslide early warning thresholds in Umbria, Italy. *Engineering Geology*, 327, 107352. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107352>
- Ramesh, M. V. (2014). Design, development, and deployment of a wireless sensor network for detection of landslides. *Ad Hoc Networks*, 13(part A), 2-18. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.09.002>
- Ramírez Velázquez, B. R., y López Levi, B. (2015). *Espacio, paisaje, región, territorio y lugar: la diversidad en el pensamiento contemporáneo* (Geografía para el Siglo XXI, 17). UNAM, Instituto de Geografía.
- Refice, A., Capolongo, D., Lepera, A., Pasquariello, G., Pietranera, L., Volpec, F., D'Addabbo, A., y Bovenga, F. (2013). SAR and InSAR for flood monitoring: Examples with COSMO/SkyMed data. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 7(7), 703-706. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2013.6721254>
- Reid, M. E., LaHusen, R. G., Baum, R. L., Kean, J. W., Schulz, W. H., y Highland, L. M. (2012, febrero). Real-time monitoring of landslides. *U.S. Geological Survey*, 4. <http://landslides.usgs.gov/%0Ahttps://pubs.usgs.gov/fs/2012/3008/contents/FS12-3008.pdf>
- Rodríguez Castiblanco, E. A., Sandoval Ramírez, J. H., Chaparro Cordón, J. L., Trejos González, G. A., Medina Bello, E., Ramírez Hernández, K. C., Castro Marín, E., Castro

- Guerra, J. A. y Ruiz Peña, G. L. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000*. Servicio Geológico Colombiano.
- Roy, P., Martha, T. R., Khanna, K., Jain, N., y Kumar, K. V. (2022). Time and path prediction of landslides using InSAR and flow model. *Remote Sensing of Environment*, 271, 112899. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112899>
- Sarmap. (2007). *The SAR guidebook: Examples based on SARscape®*. SAR.
- SGC. (2017). *Las amenazas por movimientos en masa de Colombia: Una visión a escala 1:100,000*. Servicio Geológico Colombiano. https://srvags.sgc.gov.co/Archivos_Geoportal/Manuales/Libro_MNMM.pdf
- Shao, W., Zhao, C., Jiang, X., Sun, Z., Wang, X., Wang, J., y Cai, L. (2021). Characteristics of suspended sediment in Sentinel-1 synthetic aperture radar observations. *Remote Sensing Letters*, 12(11), 1167-1179. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2021.1974119>
- Vargas Cuervo, G. (1999). *Guía técnica para la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza por movimientos en masa*.
- Ventura, G., Vilaro, G., y Terranova, C. (2013). Landslide science and practice. En *Landslide science and practice* (vol. 2, pp. 147-151). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31445-2>