

Contribuciones a la gestión del riesgo de inundación en zonas localizadas. Caso de estudio: Tunja, Colombia
Flood risk management contributions in localized areas. Case study: Tunja, Colombia

Carlos Andrés Caro-Camargo¹, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5568-1219>

Laura Gil-Alvarado²

¹Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia, carlos.caroc@usantoto.edu.co

²Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia, lau.yga@gmail.com

Autor para correspondencia: Carlos Andrés Caro-Camargo, carlos.caroc@usantoto.edu.co, carlosandrescaro@gmail.com

Resumen

En un mundo cada vez más urbanizado, los gobiernos locales tienen mayor responsabilidad de implementar medidas prácticas frente al cambio climático. Medidas que ayuden a prevenir, mitigar y superar eficientemente eventos como las inundaciones, centrándose en el desarrollo urbano sostenible. El presente proyecto se enfoca en la ciudad

de Tunja, Colombia. Se evalúan sectores con alta amenaza de inundación, según los principales cuerpos de agua que atraviesan el área urbana: los ríos Jordán y La Vega. El propósito de la investigación es proporcionar estrategias que promuevan la correcta gestión del riesgo de inundación en el municipio. Se cuenta con tres temáticas prioritarias: (1) la importancia de la planificación y gestión urbana; (2) el estudio de la vulnerabilidad desde la percepción social de los habitantes expuestos y, finalmente, (3) una propuesta de alternativas estratégicas según el riesgo analizado. Está dirigido a la promoción oportuna de la prevención y la reducción de afectaciones, producto de eventos de precipitación por variabilidad climática.

Palabras clave: desarrollo urbano sostenible, gestión de riesgos, inundaciones, percepción social, vulnerabilidad.

Abstract

In an increasingly urbanized world, local governments have greater responsibility to implement practical measures against climate change. Measures that help prevent, mitigate and efficiently overcome events such as floods, focusing on sustainable urban development. The present project is developed for the city of Tunja, Colombia. In this, sectors with high flood threat are evaluated, according to the main bodies of water that cross the urban area, Jordán River and La Vega River. The research purpose is to provide strategies that promote the correct flood risk management in the municipality. There are three priority topics, (1) importance of urban planning and management, (2) study of vulnerability from the social perception of the exposed inhabitants and, finally, (3) a

proposal of strategic alternatives according to the analyzed risk. It is aimed to the timely prevention promotion and affectations reduction, product of precipitation events due to climatic variability.

Keywords: Floods, risk management, social perception, sustainable urban development, vulnerability.

Recibido: 01/07/2019

Aceptado: 15/09/2020

Introducción

En el contexto global, la gente está optando por establecerse en áreas urbanas. Actualmente, las ciudades se consideran motores del crecimiento económico. Las personas que migran de los centros rurales a los urbanos persiguen un nivel de vida más alto. Sin embargo, no se debe ignorar la necesidad de abordar el cambio climático con la ayuda y promoción de la gestión de riesgos. Las ciudades que tienden a crecer significativamente a lo largo de los años pueden traer aumentos en la economía regional, pero también pueden generar peligros si no se planifican y desarrollan de modo adecuado de acuerdo con el entorno que las rodea.

Se enfatiza la necesidad de establecer ciudades mejor planificadas y, sobre todo, dignas y seguras para sus habitantes. Si bien la

Organización Meteorológica Mundial revela que nueve de cada diez desastres en el mundo están relacionados con el clima o el agua, los desastres naturales continúan teniendo mayores repercusiones en las economías de los países en desarrollo. En Colombia, las consecuencias de los eventos de precipitación debido al fenómeno de "La Niña", que ha sido uno de los más fuertes de la historia (Hurtado & Euscátegui, 2012), muestran las fallas nacionales existentes en cuanto a la organización territorial. Por ello, es de gran importancia que se genere un monitoreo continuo de los cuerpos de agua y se eviten desastres naturales que afecten vidas, infraestructura y bienes.

En Tunja existen riesgos que pueden afectar a la población, los activos y la infraestructura existente en el territorio; entre ellos, se pueden mencionar inundaciones, deslizamientos de tierra, eventos sísmicos, aglomeraciones públicas, riesgos tecnológicos y, por supuesto, los derivados de los efectos del cambio climático, entre otros. Estos riesgos, de diverso origen y diferentes formas en su manifestación, representan desafíos de política pública, la cual debe ser coherente con las transformaciones institucionales que se han producido en el país en los últimos años. Con la expedición de la Ley 1523 de 2012 se transformó la conceptualización que hasta ese momento se había hecho sobre la prevención de desastres, concibiendo así la gestión de riesgos como un proceso social.

Es por las necesidades expuestas anteriormente que se desarrolla este estudio. Se destacan varios procesos enmarcados en la investigación, la acción y la participación. Procesos como recolección de datos a analizar; revisión de información documental brindada por entes oficiales; estudio de áreas prioritarias a evaluar; uso de técnicas como entrevistas, visitas

de campo; reconocimiento de sectores seleccionados y, finalmente, este proyecto, evalúan la gestión de riesgo de inundaciones en el área de estudio, brindando una propuesta de lineamientos estratégicos para su aplicación en el municipio de Tunja. En este estudio también se analiza la gestión local de riesgos desde la identificación y percepción de riesgos, la reducción de riesgos, la gestión de desastres y la gobernanza. Todo esto es de gran utilidad para las entidades de toma de decisiones y para la misma comunidad que puede verse afectada por situaciones de desastre.

El documento tendrá carácter analítico y descriptivo, enfocándose en la generación de aportes teóricos y prácticos en el ámbito de la gestión del riesgo de inundaciones en las zonas de Tunja con alta amenaza. Los periodos de análisis más importantes para esta investigación son principalmente los que ocurrieron en 2010-2011, cuando se presentó el fenómeno "La Niña" en Colombia y los posteriores avances legales que surgieron. Se espera que con los resultados de este proyecto se mejoren las actividades de prevención y mitigación de daños derivados de futuros fenómenos naturales que puedan generar desastres en sitios con alta amenaza de inundaciones.

Revisión de literatura

Metodologías de reducción del riesgo de inundaciones

Planes departamentales de gestión de riesgos

Dentro de la guía metodológica para la elaboración de planes departamentales de gestión de riesgos, el Estado apuesta por la correcta gestión de cada riesgo al servicio del territorio. La Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres es adoptada e impulsada en Colombia mediante la Ley 1523 de 2012. Este plan brinda lineamientos para el estudio de amenazas, vulnerabilidades y riesgo, a fin de establecer acciones a realizar en cada territorio. Esta guía destaca la necesidad de que las administraciones autonómicas inicien y mantengan la continuidad de los procesos de gestión de riesgos en cada sector, así como la integración en la planificación del desarrollo, las acciones prioritarias en este ámbito y otros instrumentos de planificación (PNUD, 2012).

Sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS)

El crecimiento verde y la adaptación al cambio climático se convierten en un objetivo fundamental dentro de la estrategia de mejora de los sistemas de captación y retención de agua de lluvia. Dado que uno de los riesgos asociados con el cambio climático es el provocado por las inundaciones, que tienen su origen en la inadecuada gestión de la escorrentía superficial, en los últimos años se ha visto obligado a suscitar una profunda discusión

donde desde políticas públicas y técnicas soluciones se tratan de aportar las herramientas necesarias para afrontar este tipo de situaciones de forma correcta.

Uno de los factores más influyentes en los que la escorrentía superficial por lluvia se convierte en un factor determinante en los procesos de inundación de las ciudades tiene que ver con el rápido crecimiento urbano, que por el elevado número de edificaciones supera la capacidad de las redes de alcantarillado. La falta de cultura ciudadana, que genera bloqueos de sumideros por la contaminación, y el aumento de la superficie impermeable en el espacio público no contribuyen a retener el agua sino que, por el contrario, la evacúan de manera directa y más rápida a las redes de alcantarillado de la ciudad. La necesidad es implementar soluciones acordes con el entorno con bajo impacto negativo.

A través de la implementación de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS) se pretende que la respuesta hidrológica de un área urbanizada sea lo más similar posible a la de su estado hidrológico original (Ramos, Pérez-Sánchez, Franco, & López-Jiménez, 2017). Con el SUDS se fortalecen dos objetivos en cuanto a la gestión del agua de lluvia. Por un lado está la redistribución de la escorrentía urbana a través de medidas como el control en la fuente, la atenuación de picos de inundación, la entrega de descargas controladas/reguladas, la recarga del acuífero y el uso del transporte de flujo. Un segundo objetivo es la reducción de la contaminación de los cuerpos de agua que reciben escorrentías urbanas.

Modelación hidrodinámica

Gracias al avance computacional, la modelación hidrológica ha presentado avances notables en la caracterización de procesos físicos, como extensión de la aplicación de conceptos que encierran el comportamiento del agua en sus diversas fases del ciclo hidrológico en el planeta. Hay trabajos enfocados al estudio de modelos que se aproximan mucho a los procesos hidrológicos generales, teniendo en cuenta zonas superficiales, o subterráneas con principios hidráulicos basados en esquemas de volúmenes finitos, aplicando las ecuaciones completas de Saint-Venant o sus simplificaciones (Caro-Camargo, & Velandia-Tarazona, 2019). Se ha observado que aplicando el módulo hidrológico de transferencia vertical en el *software Iber* se ha aproximado el comportamiento de una cuenca, dando como resultado respuestas hidrológicas precisas, mostrándose especial interés por el tipo de malla del modelo digital de elevación. Influye en los resultados el desempeño de la simulación y la elección del tipo de modelado hidrológico o hidráulico (Caro-Camargo, Pacheco-Merchán, & Sánchez-Tueros, 2019).

Los modelos que se han utilizado en naciones con un crecimiento urbano excesivo permiten enfrentar parámetros de escorrentía superficial y enrutamiento normal del flujo a través de canales de agua naturales que atraviesan ciudades. Se han propuesto modelos que evalúan los principales datos que influyen en el comportamiento de los sistemas de alerta de riesgo de inundaciones para prevenir la pérdida de vidas

humanas y el deterioro de los bienes materiales de las personas (Chen, Zhou, Zhang, Du, & Zhou, 2015).

Sistemas de alerta temprana de inundaciones (FEWS)

Los devastadores resultados que han provocado las inundaciones han logrado generar un impacto tanto en el medio ambiente como en la sociedad. En varias partes del mundo se han estudiado herramientas para la alerta temprana desde las frecuentes inundaciones. La necesidad se observa en la capacidad de respuesta oportuna que pueden tener las localidades afectadas. Existen estudios que proponen un índice de inundaciones basado en datos satelitales que identifican áreas que dan lugar a escorrentías y que contribuyen en gran medida a la producción de inundaciones de la cuenca. Las conclusiones preliminares de los estudios indican que la distribución espacial de las áreas que probablemente causan la escorrentía muestran los sitios más propensos a inundaciones (Koriche & Rientjes, 2016).

Gestión pública y gestión del riesgo de inundaciones

Para lograr un fenómeno socio-natural de reducción de la vulnerabilidad de las inundaciones es necesario que las estrategias que se proponen y utilizan tengan la máxima efectividad posible. Se necesitan instrumentos regulatorios que se enfoquen en variables de gestión de riesgos y ordenamiento territorial, maximizando el impacto de la actividad poblacional como criterios prioritarios relacionados con la gestión pública, urbana y de riesgos.

Materiales y métodos

La metodología desarrollada para esta investigación se centró en cuatro etapas diseñadas para cumplir con los objetivos específicos establecidos para el proyecto. A continuación se muestra un diagrama en la Figura 1 que resume las actividades que se describirán en el transcurso del artículo.

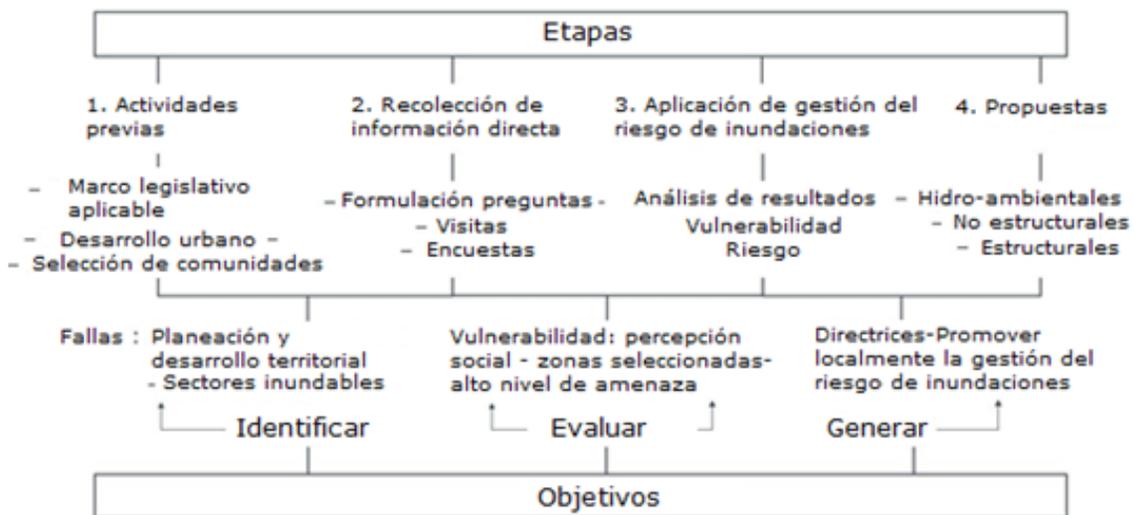


Figura 1. Metodología de investigación, Etapas y objetivos. Fuente: propia.

Se aclara que aquí se nombrarán los resultados obtenidos en cada etapa, pero quedan en el desarrollo del libro definitivo de esta investigación. En este artículo se destacarán los enfoques más relevantes obtenidos.

Ubicación

Tunja es la capital del departamento de Boyacá, ubicada a dos horas de Bogotá, Colombia. La calidad del espacio urbano producido al norte de Tunja no alcanza grandes niveles, pues a pesar de ubicarse en zonas de

estratos altos, estudios enfocados en las líneas de diseño y transformaciones urbanas llegan a mostrar que la configuración de estos sectores no garantiza la adecuada apariencia de los espacios públicos, ni su articulación con el sistema de equipamientos, ni su transición entre medios construidos y naturales, ni con adecuados accesos y vías de comunicación con el resto de sectores urbanos. Normalmente se muestra que el proceso de configuración de la ciudad está bajo regulación que se enfoca en determinar las tasas de ocupación de cada propiedad y no muestra una imagen consistente con las necesidades de desarrollo urbano que actualmente se señalan en estudios nacionales e internacionales (Chocontá-Martínez, 2017). En la Figura 2 se muestra la ubicación de la ciudad.



Figura 2. Localización del caso estudio, Tunja, Colombia. Fuente: propia, uso de *Google Maps*, plataforma *TuSIG*, *POT Tunja*.

Se muestran tres áreas principales: (I) área rural, (II) área de expansión urbana y (III) área urbana. La huella de inundación durante el fenómeno "La Niña" también se muestra a la derecha de la Figura 2, y corresponde al área urbana priorizada a estudiar para su continuo crecimiento y desarrollo actual. Teniendo en cuenta que se han localizado los principales barrios afectados por inundaciones, se seleccionaron cinco de ellos para estudiar la vulnerabilidad desde una perspectiva social (Las Quintas + José de Las Flores, 15 de Mayo, Santa Inés, Pozo Donato y Mesopotamia).

Puntos de interés por posible desbordamiento

Hay tramos específicos en las riberas de los ríos que tienen elevaciones más bajas en ciertas laderas y pueden afectar los vecindarios cuando ocurren eventos de lluvia, con periodos de retorno altos. Estos puntos específicos se han abordado mediante modelos hidrodinámicos y se seleccionaron los encontrados en este estudio de caso. En la Figura 3 se muestran algunos de los puntos más vulnerables al desbordamiento en un Periodo de Retorno $T = 50$ años, según la modelación IBER realizada en estudios previos (Caro-Camargo & Bayona-Romero, 2018).

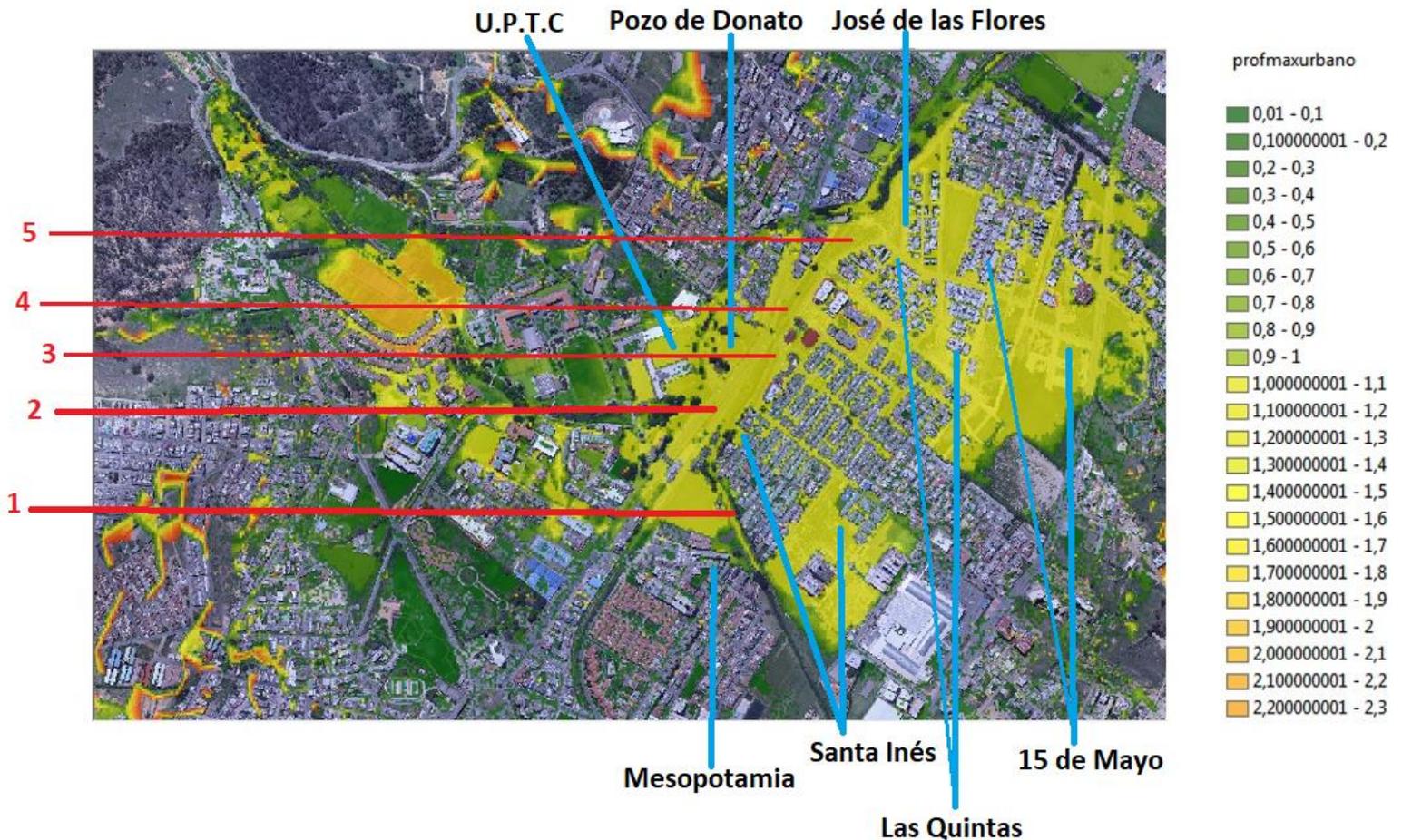


Figura 3. Puntos de interés. Posible desbordamiento. Fuente: propia, de acuerdo con modelación en IBER.

- El primer punto se ubica en el tramo del río Jordán Alto, que cruza entre el barrio de Mesopotamia y el barrio de Santa Inés. Según perfil transversal, se observa que el nivel de Mesopotamia es mucho más bajo que el colindante con la zona de Remansos de Santa Inés, lo que genera amenazas de inundación al primer barrio con corrientes de agua de hasta 1.3 m y velocidades de 0.8 m/s.

- El segundo punto de interés para este estudio se ubica entre la Avenida Norte y el barrio Santa Inés, el cual tiene una altura menor hacia la pendiente de la avenida, frente a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), lo que puede verse afectado con dimensiones de 0.5 m y velocidades de 0.5 m/s.

- El tercer punto observado en el estudio fue el que genera un giro de 90 ° en el río Jordán, a la altura del Centro Comercial Santa Inés. Esto puede afectar la zona de Santa Inés y Quince de Mayo, con niveles de inundación y velocidades similares a las mencionadas en el punto anterior.

- Para el cuarto punto revisado, hay una gran contextualización por eventos de inundaciones en el pasado, que han afectado a barrios como Los Rosales, Los Cristales, Pozo Donato y Avenida Norte. Se ubica sobre el río La Vega y genera una reducción en el tramo del río debido a la ubicación de una estructura de alcantarilla de caja. Según los resultados del modelo, se dan velocidades de 0.8 m/s y calados de hasta 1.5 m, lo que la convierte en una zona de alto riesgo.

- Finalmente, el quinto punto se refiere al sector del río Jordán Bajo (tras su unión con el río La Vega), a la altura de Las Quintas, donde puede producirse un desbordamiento hacia el este, con elevaciones de lámina de agua de hasta 1.5 m por encima del suelo. Esta inundación del área tendría la capacidad de llegar a Avenida universitaria y las áreas que actualmente se encuentran en proceso de desarrollo urbano.

Este estudio se revisó y corroboró para luego presentar sugerencias de medidas estructurales a tomar.

Muestra

A través del desarrollo de esta sección se hizo un uso constante del Modelo Genérico de Procesos de Negocio Estadístico (GSBPM v 5.1), donde se presentan sugerencias para aplicar modelos estadísticos en diversos casos de estudio. La estructura que presenta este modelo está definida por ocho etapas de desarrollo que se muestran en la Figura 4. El modelo está diseñado para ser utilizado en la descripción y evaluación de la calidad de procesos con base en encuestas, censos, registros administrativos, y otros no estadísticos o fuentes mixtas (UNECE, 2019) Debido a su extensa aplicabilidad, actualización y amplia condición de adaptación de acuerdo con cada estudio de caso, se seleccionó este modelo para usarse en esta investigación.

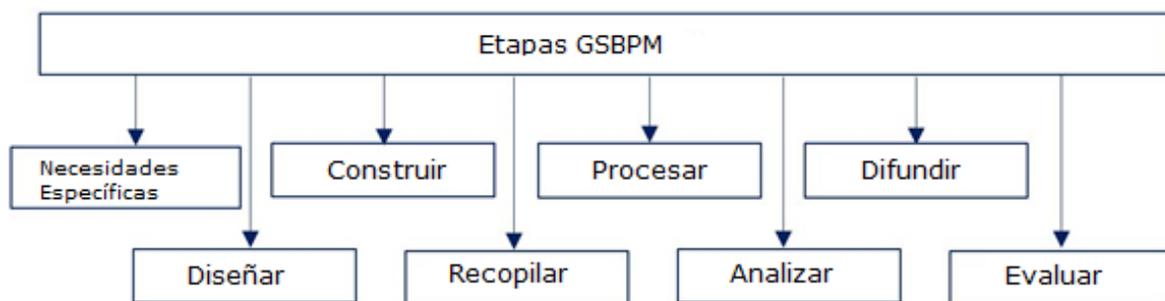


Figura 4. Nivel 1. Etapas GSBPM. Fuente: Propia, de acuerdo con el modelo.

Se seleccionaron 16 preguntas para aplicar durante las entrevistas a los habitantes. Cerca de 15 más se dirigieron a entidades agentes de gestión municipal de riesgos.

Como primer apartado del formato de la encuesta se tomó la caracterización de los hogares, seguido de la vivienda y su entorno, la percepción y memoria de la amenaza, para finalizar con un apartado de ubicación espacial de los habitantes del sector, generado mediante una actividad visual del municipio, el barrio y su vivienda. Los tres primeros apartados se ensamblaron en una plantilla creada mediante *Google Forms* y se aplicaron con el correo institucional de la universidad, para que la información se registrara y actualizara en su momento en Internet.

Luego de tener el número de propiedades construidas, se procedió a seleccionar aleatoriamente la muestra de acuerdo a la cantidad que fue dada por el cálculo del tamaño de muestra, que se muestra en la Tabla 1. Esta muestra se realizó por la suma de las propiedades construidas que se contabilizaron (sectores 1 y 2).

Tabla 1. Número de encuestas por sector.

Barrios	Número de hogares	Porcentaje	Número de encuestas	Encuestas tomadas
Sector 1	621	100 %	65	
Las Quintas + José de las Flores	571	92 %	60	65
Pozo Donato	50	8 %	5	10
Sector 2	1303	100 %	69	
Santa Inés + 15 Mayo	739	57 %	39	43
Santa Inés + Mesopotamia	564	43 %	30	32
Total			134	150

Fuente: Propia, de acuerdo con la muestra.

Resultados

Análisis de las encuestas realizadas

Se observó que las 150 encuestas realizadas representan a 519 personas que habitan en viviendas de los sectores en estudio. En promedio hay cuatro habitantes por hogar y las mujeres representan un número mayor. Los sectores tienen mayoritariamente a personas mayores de 45 años, seguidos por jóvenes de entre 18 y 25 años que en su mayoría son estudiantes universitarios. Los habitantes de los sectores estudiados, tienen empleo —ya sean independientes o asalariados— y la mayoría ha alcanzado el desarrollo de los estudios universitarios.

Para emergencias, se observa que ninguno de los sectores reconoce una ruta de evacuación clara y estructurada. Alrededor del 20 % de ellos dice conocer uno, pero no tiene un punto de encuentro claro con los habitantes de la casa o el barrio. Eran muy pocos los hogares que tenían puntos establecidos, en algunos casos no muy convenientes, para reunirse con los familiares.

Con respecto a una de las preguntas sobre la memoria de amenazas de inundaciones, se observó que el 72 % de los habitantes del Sector 1 dice no recordar haber sufrido eventos de inundación. Esto se debe a que gran parte de la población del barrio Las Quintas no vive allí desde hace

más de cinco años. Sin embargo, el 70 % de los encuestados en el barrio de Pozo Donato, junto con el 21 % del barrio de Las Quintas que respondió afirmativamente a esta pregunta recuerdan los hechos ocurridos durante la temporada de invierno-fenómeno "La Niña", ocurrido en 2010-2012.

Evaluación de amenazas

La amenaza es un factor de riesgo asociado con un evento físico de origen natural, causado o inducido por la acción humana. Esto puede ocurrir con una gravedad suficiente como para causar pérdidas de vidas, propiedad o impactos en la salud. Las amenazas pueden estar asociadas con su origen natural (inherente a la dinámica natural del planeta); antrópico (acciones directamente humanas, tanto intencionales como no intencionales); tecnológico (asociado con actividades industriales y transporte de sustancias peligrosas), o socio-natural (similar al natural, pero inducido).

De acuerdo con los valores obtenidos a través de encuestas, se realizó el análisis de frecuencia, intensidad y territorio afectado, para encontrar el valor de amenaza en los sectores estudiados, priorizando los eventos ocurridos en 2011. Durante esta etapa se utilizó la guía metodológica (PNUD, 2012), donde 1 significa evaluación baja; 2, media; y 3, alta. En la Tabla 2 se pueden ver los resultados globales de la amenaza.

Tabla 2. Evaluación de amenazas.

Frecuencia	Intensidad	Territorio afectado	Amenaza
3 - Alta	2 - Media	3 - Alta	8 - Alta
Evento que ocurre más de una vez al año o al menos una vez en un periodo de uno a tres años	Afectación moderada de territorio, recursos naturales, afectación en redes de servicios públicos, suspensión temporal de actividades económicas, afectación moderada en infraestructura, viviendas dañadas	Más del 80 % del territorio estudiado se ha visto afectado	Frecuencia + Intensidad + territorio afectado (1-3 bajo; 4-6 medio; 7-9 alto)

Fuente: propia, de acuerdo con la guía.

Se obtuvo que la amenaza en la que se encuentran es alta. Esto corrobora los estudios realizados en el municipio de Tunja, en los que los mapas muestran a estas comunidades con alta amenaza de inundaciones. Asimismo, se le pueden sumar las fallas que se generan en el sistema de alcantarillado, que provocan que los desbordes sean recurrentes en periodos de lluvia.

Evaluación de la vulnerabilidad

Luego de generar un análisis de vulnerabilidad física, ambiental, económica y social con base en la información recolectada sobre los

sectores en estudio en Tunja, la Tabla 3 muestra la vulnerabilidad total obtenida para ambos sectores.

Tabla 3. Evaluación de vulnerabilidad. Suma de vulnerabilidades.

Vulnerabilidad física	Vulnerabilidad ambiental	Vulnerabilidad económica	Vulnerabilidad social	Vulnerabilidad total
Sector 1: 9 Sector 2: 10	Ambos sectores: 10	Sector 1: 6 Sector 2: 5	Ambos sector: 9	Ambos sector: 34 - Medio
<ul style="list-style-type: none"> - Edad de la edificación - Construcción, materiales y estado de preservación - Cumplimiento de la normativa vigente - Características del tipo de suelo - Localización de las construcciones respecto a fuentes de agua y zonas de riesgo identificadas 	<ul style="list-style-type: none"> - Condiciones atmosféricas - Calidad y composición del aire - Calidad y composición del agua - Condiciones de recursos ambientales 	<ul style="list-style-type: none"> - Nivel de ingresos - Situación de pobreza y seguridad alimentaria - Acceso a servicios públicos - Acceso al mercado laboral 	<ul style="list-style-type: none"> - Nivel de organización - Participación - Relaciones entre comunidad, organizaciones e instituciones - Conocimiento comunitario del riesgo 	

Fuente: propia, de acuerdo con la guía.

Evaluación del riesgo

Para realizar el cálculo del riesgo presentado en los sectores elegidos se utiliza la matriz de doble entrada de amenaza y vulnerabilidad como se muestra en la Tabla 4. Ambos resultados obtenidos anteriormente están interrelacionados. La intersección de ambos estima el nivel de riesgo esperado. Esta información es muy importante para adoptar medidas que puedan facilitar el proceso de reducción de riesgos y gestión de desastres.

Tabla 4. Evaluación del riesgo.

Matriz de evaluación del riesgo			
Amenaza	Riesgo		
Alta	Medio	Alto	Alto
Media	Bajo	Medio	Alto
Baja	Bajo	Bajo	Medio
	Bajo	Medio	Alto
	Vulnerabilidad		

Fuente: propia, según la guía.

De acuerdo con los resultados de amenaza (alta) y vulnerabilidad (media) obtenidos para los sectores estudiados, se puede observar que la estimación de riesgo para estas áreas es alta. La población, así como las instituciones correspondientes, deben tomar conciencia y difundir el conocimiento sobre el riesgo existente. Es necesario tomar medidas para mitigar posibles futuros eventos de emergencia y aplicarlos en conjunto con los sectores comunitarios y amenazados por inundaciones. Cuando la

sociedad aumenta su resiliencia, las condiciones de vulnerabilidad y sus niveles de riesgo se reducirán.

Propuestas

Se presentan algunas propuestas de acciones que al ser promovidas pueden reducir las vulnerabilidades existentes en los sectores de amenaza de inundaciones. Teniendo en cuenta que las características del área de estudio corresponden a sectores de rápida urbanización, baja pendiente y alto riesgo de inundaciones, debido a su proximidad a cuerpos de agua y áreas de recarga de acuíferos, se propusieron una serie de estrategias para una adecuada planificación y control del riesgo de inundaciones. A continuación se muestran las medidas estructurales más relevantes a tener en cuenta en estos casos.

Las medidas estructurales que se pueden adoptar para estos sectores contemplan la construcción de obras de protección en las riberas. En el caso de estudio, fue posible resaltar los puntos de importancia por el desborde del río, presentados en la Figura 3, en el cual se propone y recomienda la construcción de muros, gaviones y/o cántaros en las márgenes del río, 0.5 a 0.8 m por encima del nivel del suelo actual.

SUDS

Los SUDS buscan trabajar en diferentes escenarios del espacio público y por su vocación pueden intervenir de manera eficiente. Si bien es cierto que en algunas ciudades colombianas se han desarrollado estrategias de implementación de SUDS, al no ser una política pública los avances en su implementación aún son poco estudiados (Martínez-Candelo, 2014). Entre los más utilizados, se pueden destacar cubiertas, fachadas y zanjas verdes, las cuales se basan en los sistemas naturales de la ciudad, no diseñadas para tal fin, pero eficientes, como parques, sardinas y separadores, entre otros. Sin embargo, en muchos casos el porcentaje de superficie impermeable sigue siendo mucho mayor, en comparación con la superficie de filtrado deseable para ciudades con estos problemas (Hoang & Fenner, 2016).

Estas alternativas poco convencionales surgen como respuesta a problemas similares a los asociados en el municipio de Tunja, donde el crecimiento de la ciudad impermeable es cada vez mayor en porcentajes de suelo y existen limitaciones en los sistemas de drenaje existentes.

En Tunja, el objetivo sería adoptar alternativas basadas en la metodología SUDS para controlar y regular la escorrentía generada por las lluvias mediante la integración efectiva de un estanque de detención, que almacena temporalmente el exceso de precipitación y entrega un caudal cómodo a la red de alcantarillado. Por todo ello, debe ser conocido por las instituciones responsables de su implementación y la comunidad local para su adecuado cuidado y mantenimiento.

Al seleccionar y diseñar las alternativas propuestas, habiendo identificado el área del proyecto, se debe identificar la información

urbana, topografía, tipo de suelos y caminos, procediendo a delimitar las áreas respectivas que drenarán su escorrentía hacia la zona de detención, determinando cada uno de sus parámetros, con los que se pueden calcular los hidrogramas y caudales que generan. De esta forma se define el volumen y tipo de regulación que mejor se adapta a las condiciones locales. Todo esto se puede simular en un *software* como *EPA SWMM* (acceso libre), que tiene una extensión SUDS para ser modelado en entornos urbanos (Jiménez, 2015).

En el Sector 1 se recomienda la implementación de parque de llanura aluvial, ya que es, con diferencia, el sistema con mayor caudal para eliminar de la red de drenaje con altas capacidades de retención de agua, aprovechando de esta forma, la gran superficie disponible que se encuentra efectivamente disponible para un área recreativa. Además, es importante mencionar que es el punto de llegada del flujo con altas velocidades provenientes del centro de la ciudad (por topografía), por lo que un reservorio de retención temporal, o en este caso un parque de inundaciones, cumple la función de reducir velocidades para los sectores hacia abajo, reduciendo así también las vulnerabilidades asociadas.

FEWS

Es de gran importancia que se promueva la implementación de sistemas de alerta temprana de inundaciones (FEWS) en beneficio de áreas pobladas con riesgo de inundación (González-Cao, García-Feal,

Fernández-Nóvoa, Domínguez-Alonso, & Gómez-Gesteira, 2019). Durante el desarrollo de esta investigación se observó que Tunja tiene un alto riesgo de inundaciones en determinadas zonas. La mayoría de sus inundaciones en el área urbana se deben a desbordes de alcantarillas, pero los eventos más impactantes para la comunidad han sido en conjunto el desborde de cuerpos de agua que la atraviesan. Esto incrementa la necesidad de contar con un sistema de información oportuno y adecuado sobre los niveles de los ríos en puntos estratégicos, donde se demuestre una posible afectación aguas abajo. Todo esto, para estar prevenido y poder tomar las mejores decisiones a tiempo.

Esta medida puede incrementar el nivel de seguridad de los habitantes del área urbana de Tunja, quienes se ubican en las riberas de los ríos y para planificar eficientemente sus pasos de acción. Para el proyecto de implementación de FEWS se puede seguir esta metodología propuesta:

- Recolectar información topográfica e hidroclimatológica del área de estudio.
- Determinar variables ambientales e hidrodinámicas para un sistema de alerta temprana en el estudio de caso.
- Modelización del área de estudio hidrodinámico y ambiental, utilizando modelos hidrodinámicos (p. ej., *IBER*), para analizar el comportamiento de las masas de agua.
- Establecer puntos significativos para implementar sistemas de alerta temprana.

Basado en una investigación exhaustiva de FEWS, se propone considerar las siguientes dos fases: prediseño y diseño, para estudios de inundaciones en áreas localizadas.

Prediseño. Se propone seleccionar el objeto de la alerta, considerando la frecuencia, el tipo y los tiempos de llegada de las inundaciones. Se deben delimitar las áreas de drenaje (cuencas y subcuencas). Se recoge información (cartográfica, meteorológica e hidroclimatológica). Luego, se realiza la caracterización hidrológica de la cuenca y el levantamiento de campo, para la elaboración de un informe completo.

Diseño. Durante la fase de diseño, se establece el tipo de FEWS y sus componentes, con la preparación de instrumentación como pluviómetros. Se realiza un análisis hidrodinámico de los sitios de interés; con topografías de modelado hidrológico e hidráulico se realiza la selección de umbrales de inundación y un protocolo de operación. Esto, para finalmente desarrollar un proceso de retroalimentación en el proceso de implementación de FEWS.

Dentro de la investigación realizada sobre las metodologías de implementación del FEWS se puede destacar este resumen, que puede ser complementario a la revisión en el momento de la implementación de un sistema para el municipio de Tunja.

La operación de FEWS se puede dividir en tres componentes: monitoreo, comunicaciones y activación de alertas, para dar paso a los preparativos de respuesta. Para el monitoreo, FEWS cuenta con equipos de transmisión y recolección de datos que incluyen los pluviómetros y los sensores de nivel, vinculados con la red hidrometeorológica de la ciudad donde están instalados. Esto permite la realización del comportamiento hidrometeorológico y favorece los modelos de pronóstico de la cuenca.

Es importante zonificar de modo adecuado las precipitaciones registradas en el municipio de Tunja. Las entidades de gestión de riesgos

hacen un seguimiento de las lluvias, sin embargo, según información procesada con la entidad municipal, ha habido meses sin datos, siendo los más lluviosos. Generar confiabilidad en las mediciones de precipitaciones beneficia el conocimiento de los eventos que ocurren en el territorio y su manejo oportuno.

La forma de seguimiento que tiene Tunja actualmente para afrontar posibles desbordes es mediante la revisión de los niveles de los ríos en determinados puntos, que son vigilados en época de lluvias por los agentes de ayudas municipales.

Discusión

Durante el desarrollo de este trabajo de investigación se mantuvo la idea de que el riesgo se construye socialmente debido a fenómenos multicausal. Esto implica que varios factores que ocurren en un mismo territorio hacen que el desastre se materialice. En este último apartado se revisará el cumplimiento de los objetivos establecidos, se revisarán las cuestiones iniciales de investigación planteadas y se señalarán algunos comentarios finales.

De acuerdo con los resultados obtenidos de este proyecto, se tomaron los principales procesos a lo largo de su desarrollo y se analizaron los objetivos específicos para revisar sus derivaciones:

- Dentro de la identificación de las deficiencias existentes en el desarrollo territorial de Tunja y su situación actual en la gestión del riesgo de inundaciones, se pudo elegir cinco barrios prioritarios para ser analizados por encontrarse bajo alta amenaza de inundaciones y por contar con información suficiente sobre el desarrollo de construcciones en esta área de estudio. Finalmente se generó un reconocimiento del sector, haciendo un resumen de su situación actual.

- En cuanto a la evaluación mediante levantamientos de la vulnerabilidad existente, desde la percepción social, en las áreas elegidas para sus eventos de alto nivel de amenaza de inundaciones en Tunja, se pudo hacer una recolección de información directa, que determinó las necesidades y vulnerabilidades a las inundaciones desde la percepción social. Con todo ello se obtuvo un número exacto de encuestas, con una muestra de 150, que representan a 519 personas, y se realizó un resumen de los resultados obtenidos, así como la evaluación del riesgo de inundaciones con base en diversas variables. La amenaza de inundaciones resultó ser alta para estos sectores, lo que en combinación con su vulnerabilidad media generó un riesgo alto.

Durante el análisis de respuestas se decidió resaltar una pregunta. Se observó que la mayoría de las comunidades no consideran que el municipio esté preparado para enfrentar situaciones de emergencia que puedan presentarse, como se muestra en la Figura 5. Esta percepción es muy importante para tomar medidas de abordaje comunitario por parte de las instituciones encargadas.

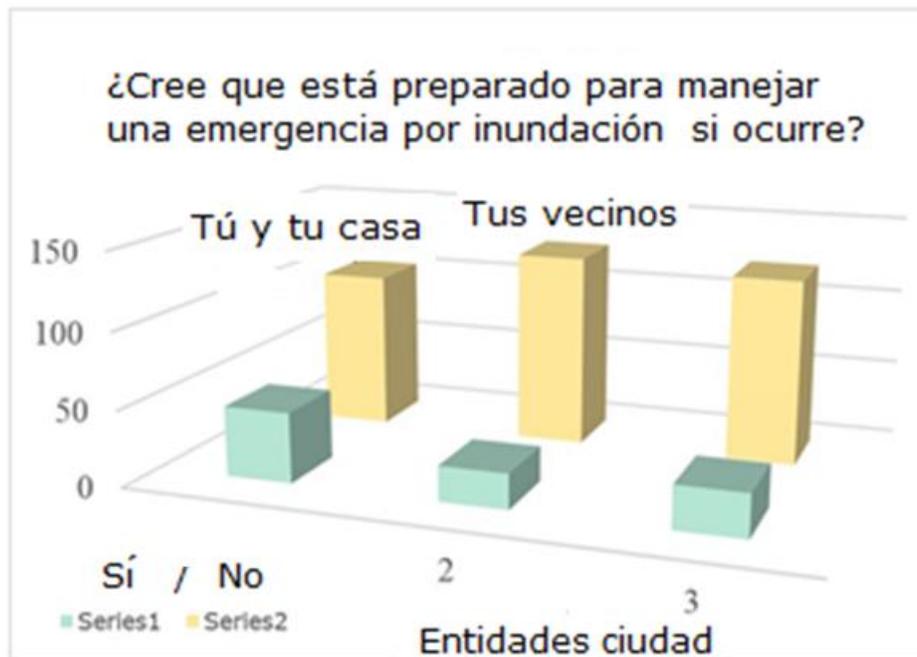


Figura 5. Percepciones sociales sobre la preparación del municipio frente al riesgo de inundaciones. Fuente: Propia, de acuerdo con la guía.

- En cuanto a la generación de conocimiento teórico y práctico que promueva la aplicación local de la gestión del riesgo de inundaciones en Tunja, de acuerdo con los análisis desarrollados se presentó un contenido relevante como alternativas para ser aplicadas en sectores de alta amenaza. Se planteó la necesidad de instalar sistemas de alerta temprana de inundaciones, impulsando una metodología desde su diseño. Se promueve la implementación de metodologías estudiadas y aplicadas con éxito en áreas localizadas de este tipo (Robleto-Molina, 2010). A la par de todo lo anterior, se compartió el conocimiento adquirido a través de la investigación en torno a diferentes metodologías y se toman acciones que también promueven la mitigación de eventos de inundaciones, por medio de la implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible, que

pueden llegar a ser profundizados y aplicados de forma local, promoviendo el adecuado manejo del agua de lluvia, su retención, limpieza y aprovechamiento. La propuesta de parque inundable significa que no hay inundaciones inmediatamente aguas abajo del Sector 1, lo cual también se ha verificado en estudios similares (Trapote-Jaume & Fernández-Rodríguez, 2016).

Si bien estos sistemas pueden no ser la solución definitiva a los problemas de inundaciones de la ciudad, generarían grandes beneficios para los sistemas de alcantarillado, que actualmente generan problemas cuando se trata de eventos de lluvias intensas.

Se recomienda complementar la información presentada, en estudios futuros, con las 50 directrices para el diseño de SUDS (Departamento Nacional de Planeación, 2018) y las guías técnicas específicas de la Universidad de los Andes, la EAAB y la Secretaría de Ambiente de Bogotá (Universidad de Los Andes, 2017), ya que son documentos técnicos idóneos para el desarrollo de estos trabajos de investigación y aplicación, pudiendo brindar grandes beneficios a los habitantes de los sectores amenazados y sus gobiernos.

Con este proyecto se busca que las entidades oficiales tomen como base la información presentada, proyectar socializaciones, talleres y otras estrategias para crear una comunidad prevenible y resiliente ante las amenazas locales existentes; e incrementar el conocimiento de los temas de gestión de riesgos en la ciudad de Tunja, de acuerdo con sus amenazas. Además, se aseguró que los habitantes que fueron entrevistados durante el desarrollo de este proyecto pudieran tomar más conciencia sobre su vulnerabilidad ante inundaciones y la necesidad de

ampliar sus conocimientos sobre el tema, teniendo en cuenta que generarán su propio beneficio.

Conclusiones

A través del presente estudio fue posible determinar un alto riesgo para las áreas estudiadas, donde se requiere la implementación de propuestas no estructuradas, como la educación y toma de medidas legales y gubernamentales contra el riesgo, así como la construcción de soluciones estructurales, tales como gaviones, SUDS y FEWS; esto, teniendo en cuenta que los habitantes expuestos aguas abajo de los cuerpos de agua se beneficiarían.

Los SUDS restauran en la ciudad el ciclo hidrológico natural con el fin de mantener la hidrología previa al proceso de urbanización, minimizando las escorrentías e impactos del urbanismo, mejorando la integración paisajística de la ciudad y sus infraestructuras, y optimando los servicios al ciudadano de forma respetuosa con el entorno.

En el caso de Tunja, la empresa proveedora de los servicios de agua y alcantarillado, junto con la Secretaría de Planeamiento Municipal, deben aunar esfuerzos para definir y establecer criterios unificados aplicables a las nuevas construcciones urbanas que permitan la adopción de este tipo de proyectos, alternativas SUDS, incluidas medidas estructurales y no

estructurales. Este trabajo requiere al mismo tiempo un diagnóstico completo del estado real del sistema de alcantarillado de la ciudad.

Se espera que las comunidades logren un gran progreso en el logro de los objetivos generales de los planes de gestión de riesgos, incluido un aumento en la percepción del riesgo de inundaciones y las estrategias de autoprotección; mejore la coordinación administrativa entre los actores involucrados, la capacidad de predicción de inundaciones, y se reduzca el peligro en la medida de lo posible para la salud de la población, el medio ambiente y las actividades económicas en las zonas inundables.

La implementación efectiva de los sistemas de reducción del riesgo de desastres y gestión del riesgo de desastres depende de la fortaleza de las capacidades institucionales y los actores clave en los diferentes niveles del gobierno, el sector privado y la sociedad civil, y la coordinación efectiva entre éstos. Se requiere la promoción de buenas prácticas sociales en el ámbito local, particularmente en la gestión ambiental, el uso adecuado del suelo y los recursos naturales, la gestión urbana y la gestión integral de riesgos, que son producto de procesos históricos de relación y adaptación con el entorno del conocimiento local, desarrollo científico específico y actividad de la administración pública municipal.

Se espera que este trabajo motive la realización de futuras investigaciones para áreas urbanas, donde se brindarán potentes herramientas de análisis; con equipos interdisciplinarios y mayores recursos se podrá realizar el monitoreo espacial de vulnerabilidades a amenazas naturales, con el fin de tener una mejor planificación en las ciudades, pero sobre todo más "dignas y seguras", con poblaciones más conscientes de su papel tanto en la generación como en la prevención y reducción de las condiciones de vulnerabilidad.

Cabe mencionar que no existen propuestas infalibles que garanticen el éxito al definir e involucrar a la sociedad en general, con su patrimonio y la necesidad de proteger a la ciudadanía. Menos en este escenario que está dominado por la incertidumbre. Sin embargo, al generar esfuerzos conjuntos para la incorporación y difusión de la idea de que el problema de las inundaciones no está en escenarios aislados sino que forma parte de nuestro sistema territorial se entendería que la escala local es la base para desarrollar estrategias integrales de reducción de desastres. Siguiendo los principios de coordinación, cooperación y flexibilidad en la adopción de estrategias será posible definir una ruta eficiente orientada hacia la consecución de un bien común, en un contexto sostenible.

Se requiere voluntad, acompañada de un cambio de paradigma que implica la gestión de la infraestructura pública en el desarrollo sostenible de las ciudades. Una promoción al conocimiento de los riesgos existentes para aquellos que pueden llegar a ser los más afectados y una ampliación de la perspectiva de desarrollo, orientada a las necesidades de la población. Dentro de este estudio se pueden señalar principales resultados para su tratamiento en conjunto con diversas entidades desde la sensibilización social y el trabajo en comunidad, como visión prospectiva del diseño urbano responsable.

Referencias

- Caro-Camargo, C. A., Pacheco-Merchán, O. F., & Sánchez-Tueros, H. P. (2019). Calibration of Manning's roughness in non-instrumented rural basins using a distributed hydrological model. *DYNA*, 86(210), 164-173. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.72506>

- Caro-Camargo, C. A., & Velandia-Tarazona, J. E. (2019). The effect of changes in vegetation cover on the hydrological response of the sub-basin Los Pozos. *DYNA*, 86(208), 182-191. Recovered from <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.74115>
- Caro-Camargo, C. A., & Bayona-Romero, J. A. (2028). Hydro-dynamic modeling for identification of flooding zones in the city of Tunja. *Revista Facultad de Ingeniería*, 88, 40-55. DOI: <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n88a05>
- Chen, Y., Zhou, H., Zhang, H., Du, G., & Zhou, J. (2015). Urban flood risk warming under rapid urbanization. *Environmental Research*, 193, 3-10. DOI: 10.1016/j.envres.2015.02.028
- Chocontá-Martínez, M. J. (2017). *Morfología urbana. Acercamiento de la teoría a la práctica. Configuración de las zonas de expansión en el norte de Tunja*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Departamento Nacional de Planeación. (2018). *50 Lineamientos para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible SUDS*. Bogotá: DNP, Departamento Nacional de Planeación.
- González-Cao, J., García-Feal, O., Fernández-Nóvoa, D., Domínguez-Alonso, J. M., & Gómez-Gesteira, M. (2019). Towards an automatic early warning system of flood hazards on precipitation forecast: The case of the Miño River (NW Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(11), 2583-2595. DOI: 10.5194/nhess-19-2583-2019
- Hoang, L., & Fenner, R. A. (2016). System interactions of stormwater management using sustainable urban drainage systems and green

- infraestructure. *Urban Water Journal*, 13(7), 739-758. Recovered from <https://doi.org/10.1080/1573062X.2015.1036083>
- Hurtado, G., & Euscátegui, C. (2012). Análisis del impacto del fenómeno "La Niña" 2010-2011 en la hidroclimatología del país. Recovered from <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418818/An%C3%A1lisis+Impacto+La+Ni%C3%B1a.pdf/640a4a18-4a2a-4a25-b7d5-b3768e0a768a>
- Jimenez, A. F. (2015). *Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) como gestión integral en la regulación y control de aguas lluvias; caso de estudio sector en la ciudad de Bogotá*. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia.
- Koriche, S. A., & Rientjes, T. H. M. (2016). Application of satellite products and hydrological modelling for flood. *Physics and Chemistry of the Earth*, 93, 12-23.
- Martínez-Candelo, G. (2014). *Sistemas urbanos de drenaje sostenible "SUDS" como alternativa de control y regulación de las aguas lluvias en la ciudad de Palmira*. Bogotá, Colombia: Universidad Militar Nueva Granada.
- PNUD, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2012). *Guía metodológica para la elaboración de planes departamentales para la Gestión del Riesgo*. Bogotá, Colombia: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, Unión Europea.
- Ramos, H. M., Pérez-Sánchez, M., Franco, A. B., & López-Jiménez, P. A. (November, 7, 2017). Urban Floods Adaptation and Sustainable Drainage Measures. *Fluids*, 2, 61. DOI: 10.3390/fluids2040061

- Robleto-Molina, J. A. (2010). *Metodología para el diseño e implementación de sistemas de alerta temprana ante inundaciones con aplicación hidrológica e hidráulica*. Guatemala, Guatemala: Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos.
- Trapote-Jaume, A., & Fernández-Rodríguez, H. (2016). *Técnicas de drenaje urbano sostenible*. Alicante, España: Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales.
- UNECE, United Nations Economic Commission for Europe. (2019). *Generic Statistical Business Process Model - GSBPM v 5.1*. Geneva, Switzerland: United Nations Economic Commission for Europe, International Statistical Community.
- Universidad de Los Andes. (2017). *Guía técnica de diseño y construcción de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)*. Bogotá, Colombia: Universidad de Los Andes.