

URBANIZACIÓN, CAMBIO CLIMÁTICO E INUNDACIONES: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA PRELIMINAR DE LA CUENCA DEL RÍO JUAN DÍAZ

Peregrina-Bonilla, Aaron

Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil
Ciudad de Panamá, Panamá
aaron.peregrina@utp.ac.pa

Osorio-Ugarte, Haydée

Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil
Ciudad de Panamá, Panamá
haydee.osorio@utp.ac.pa

Abstract

The Juan Díaz River Basin is located in an area of rapid urban growth. This accelerated increase has intensified the impermeabilization of the soil, reducing vertical infiltration and affecting aquifer recharge, which alters the surface and underground water balance. As a consequence, the subsoil's water buffering capacity progressively decreases. When this phenomenon is combined with extreme precipitation events linked to climate variability, the already insufficient storm drainage system becomes saturated, increasing the frequency and intensity of floods and favoring the mobilization of pollutants towards the underlying aquifer. This highlights the need to generate solid hydrogeological knowledge to understand the basin's dynamics under strong anthropogenic pressure and support sustainable water management strategies."

"The present study sought to comprehensively characterize the basin's hydrogeological conditions and establish a baseline of information for the development of aquifer system modeling tools. A state-of-the-art review was conducted using databases provided by the Directorate of Water Security of the Ministry of the Environment (Dirección de Seguridad Hídrica del Ministerio de Ambiente), which include the location of wells, forest cover, land use, and key hydrogeological features. The information was cleaned and standardized for integration into ArcGIS Pro, where georeferencing and spatial modeling processes were applied. From this, maps of permeability, drainage patterns, and quantitative indicators were generated. Finally, a monitoring network was designed with wells, springs, river courses, and rain gauges, complemented by participatory surveys that provided a comprehensive socio-hydrological perspective.

Keywords: Juan Diaz River, hydrogeology, urbanization , climate change, groundwarwer

Resumen

La cuenca del río Juan Díaz se ubica en una zona de rápido crecimiento urbano. Este incremento acelerado ha intensificado la impermeabilización del suelo, reduciendo la infiltración vertical y afectando la recarga de los acuíferos, lo que altera el balance hídrico superficial y subterráneo. Como consecuencia, la capacidad de amortiguación hídrica del subsuelo disminuye progresivamente. Cuando este fenómeno se combina con eventos de precipitación extrema vinculados a la variabilidad climática, el sistema de drenaje pluvial ya insuficiente se ve saturado, aumentando la frecuencia e intensidad de las inundaciones y favoreciendo la movilización de contaminantes hacia el acuífero subyacente. Esto resalta la necesidad de generar conocimiento hidrogeológico sólido que permita comprender la dinámica de la cuenca bajo fuerte presión antropogénica y respaldar estrategias de gestión hídrica sostenible.

El presente estudio buscó caracterizar integralmente las condiciones hidrogeológicas de la cuenca y establecer una base de información para el desarrollo de herramientas de modelización del sistema acuífero. Se realizó un estado del arte utilizando bases de datos suministradas por la Dirección de Seguridad Hídrica del Ministerio de Ambiente, que incluyen localización de pozos, cobertura boscosa, uso del suelo y rasgos hidrogeológicos claves. La información fue depurada y normalizada para integrarla en ArcGIS Pro, donde se aplicaron procesos de georreferenciación y modelado espacial. A partir de ello se generaron mapas de permeabilidad, patrones de drenaje e indicadores cuantitativos. Finalmente, se diseñó una red de monitoreo con pozos, manantiales, cursos fluviales y estaciones pluviométricas, complementada con encuestas participativas que aportaron una perspectiva socio-hidrológica integral.

Palabras claves: Río Juan Díaz, hidrogeología, urbanización, cambio climático y aguas subterráneas

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca hidrográfica N° 144 perteneciente al río Juan Díaz, ubicada en los distritos de Panamá y San Miguelito, constituye uno de los sistemas urbanos más dinámicos y ambientalmente vulnerables del país. Esta cuenca tiene aproximadamente 322 km² y una red de drenaje que desemboca directamente en la bahía de Panamá [1]. Esta cuenca experimenta un proceso acelerado de urbanización asociado al crecimiento demográfico y a la expansión territorial desordenada [2]. Las proyecciones oficiales estiman que la población metropolitana podría pasar de 725,065 habitantes en 2018 a cerca de 1,405,000 para 2050, lo cual representara una gran presión sobre los sistemas hídricos superficiales y subterráneos [25].

Diversos estudios han demostrado que los procesos de urbanización acelerada es el principal generador de un aumento significativo de superficies impermeables, reduciendo el proceso de infiltración vertical y alterando el balance hídrico natural de las cuencas [3], [4]. Este efecto es especialmente crítico en regiones tropicales, donde la intensificación de eventos extremos y la variabilidad climática a la que están expuesto aumentan el riesgo de escorrentías rápidas e inundaciones urbanas [5], [6]. En el caso de la cuenca del río Juan Díaz, los rellenos artificiales, la ocupación de humedales costeros y la distribución urbana han reducido altamente la capacidad de amortiguación del subsuelo, contribuyendo al aumento de la frecuencia e intensidad de las inundaciones [1].

Adicionalmente, el ascenso del nivel del mar incrementa la exposición de la cuenca a inundaciones compuestas fluviales y mareales, fenómeno ampliamente documentado en zonas urbanas costeras [7], [8]. Estas condiciones hacen indispensable comprender la dinámica hidrogeológica del sistema, considerando tanto los procesos superficiales como la estructura subsuperficial que controla la recarga, el almacenamiento y los flujos subterráneos.

En este contexto, el presente estudio desarrolla una caracterización hidrogeológica preliminar de la cuenca del río Juan Díaz mediante integración de información temática, teledetección e instrumentos SIG. Esta aproximación constituye una base esencial para el desarrollo de herramientas de modelación hidrogeológica orientadas a mejorar la gestión del riesgo de inundaciones, fortalecer la resiliencia climática y apoyar la planificación territorial sostenible en uno de los sistemas urbanos más sensibles de Panamá.

2. MÉTODO

La metodología se estructuró en cuatro componentes principales: (1) delimitación hidrológica de la cuenca, (2) integración y procesamiento de información temática, (3) análisis espacial para la generación del mapa sintético de permeabilidad, y (4) modelación tridimensional para la interpretación hidrogeológica preliminar. Estos procedimientos se desarrollaron en ArcGIS Pro utilizando criterios adoptados en estudios similares de caracterización hidrogeológica urbana [14].

2.1 Delimitación de la cuenca

La cuenca fue delimitada empleando un Modelo Digital de Elevación (DEM) de 5×5 m suministrado por el Ministerio de Ambiente. El DEM fue sometido a corrección hidrológica mediante Fill Sinks para eliminar depresiones artificiales y asegurar continuidad en el flujo superficial. Posteriormente, se generaron las capas de dirección y acumulación de flujo como lo indica el método para flujos distribuidos [9]. La validación geomorfológica se realizó comparando los cauces modelados con los ríos y quebradas identificados previamente por el estudio realizado por el Instituto de Cantabria [1].

Este proceso permitió obtener una delineación precisa de la red hidrográfica y los límites de la cuenca, insumo esencial para estudios hidrológicos y de gestión del riesgo en zonas urbanas.

2.2 Integración de información temática

Se integraron capas geoespaciales de geología, hidrogeología, pendiente y uso del suelo, proporcionadas por el Ministerio de Ambiente y validadas con datos del portal SINIA. Para evaluar los cambios en la cobertura superficial y la expansión urbana, se procesaron imágenes Landsat correspondientes a los años 1986, 2000 y 2024 utilizando análisis multiespectral infrarrojo. Este enfoque es ampliamente utilizado para identificar superficies impermeables y transformaciones urbanas en cuencas tropicales [10].

Cada capa temática fue reclasificada en una escala de permeabilidad relativa de 1 a 5, donde 1 representa baja permeabilidad (arcillas, rellenos, humedales antrópicamente alterados) y 5 representa alta permeabilidad (gravas, depósitos aluviales y suelos con alta porosidad). Esta clasificación se fundamentó en criterios hidrogeológicos y en estudios de infiltración urbana [3], [4].

2.3 Análisis espacial: Mapa sintético de permeabilidad

Las capas reclasificadas fueron integradas mediante la herramienta Weighted Overlay, asignando pesos relativos en función de la influencia de cada variable en la infiltración y el comportamiento subsuperficial: Geología: 40%, Hidrogeología: 30%, Uso del suelo: 20%, Pendiente: 10%

La ponderación se fundamentó en metodologías aplicadas en estudios similares de vulnerabilidad hidrogeológica y recarga. El resultado fue un mapa sintético de permeabilidad que permite identificar:

1. Zonas potenciales de recarga
2. Sectores críticos de baja infiltración

Transiciones geomorfológicas relevantes para la dinámica del acuífero

Este análisis constituye un insumo esencial para modelación hidrogeológica y para la gestión del riesgo por inundaciones en ambientes urbanos.

2.4 Modelación hidrogeológica tridimensional

Se elaboró una escena 3D utilizando la profundidad de los pozos de la cuenca y la altura del terreno obtenida del DEM. La integración tridimensional de variables geológicas y topográficas permite visualizar la continuidad de los estratos, la heterogeneidad del subsuelo y los gradientes potenciales de flujo subterráneo. Este enfoque es recomendado en investigaciones de evaluación preliminar de acuíferos urbanos y su interacción con

procesos hidrológicos superficiales [11].

Esta representación es clave en cuencas costeras sometidas a variaciones del nivel del mar y altas presiones antrópicas [7].

3.RESULTADOS

El análisis espacial y la integración de información temática permitieron obtener una caracterización detallada de la dinámica hidrogeológica de la cuenca del río Juan Díaz. Los resultados muestran una marcada heterogeneidad en los patrones de permeabilidad, estructura geomorfológica y distribución de usos de suelo, lo cual influye directamente en la capacidad de infiltración, la recarga del acuífero y la generación de escorrentía superficial en un entorno urbano en expansión [3], [12].

3.1. Delimitación hidrológica y estructura de la cuenca

La delimitación hidrológica a partir de un DEM de 5×5 m define un área de drenaje aproximada de 149.97 km² para la cuenca principal, cuya cabecera se localiza en el sector de Cerro Azul a una elevación máxima de 691 msnm.

3.2. Cambios en cobertura y uso del suelo

El análisis multitemporal de imágenes Landsat (1986–2024) evidenció una expansión urbana acelerada hacia el sector bajo y medio de la cuenca. La superficie impermeabilizada aumentó de manera consistente, reemplazando áreas vegetadas y humedales costeros que anteriormente funcionaban como zonas naturales de amortiguación e infiltración. Este patrón coincide con tendencias regionales documentadas en cuencas altamente urbanizadas de zonas tropicales [10], [14].

En particular, los humedales ubicados en la desembocadura muestran un retroceso considerable, asociado tanto a procesos de relleno antrópico como a ocupación informal e infraestructura vial. Dicha pérdida de servicios ecosistémicos reduce la capacidad natural de la cuenca para almacenar y retardar volúmenes de agua durante tormentas intensas.

La Figura 1 evidencia, mediante imágenes Landsat, una expansión acelerada de la urbanización en la cuenca del río Juan Díaz entre 1986 y 2024, con incremento de superficies impermeables desde la cuenca baja hacia la media y reducción progresiva de la cobertura vegetal, hoy concentrada principalmente en la parte alta, lo que favorece el escurrimiento superficial y aumenta la vulnerabilidad a inundaciones durante lluvias intensas.

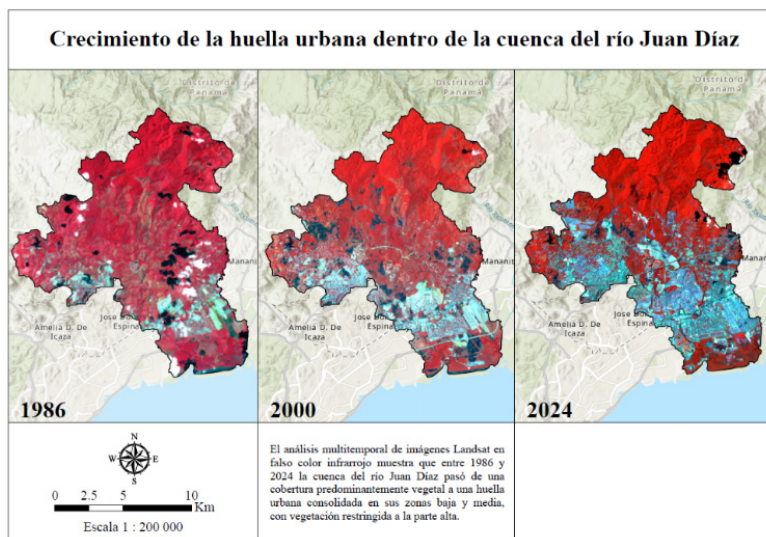


Figura 1. Crecimiento de la huella urbana dentro de la cuenca del río Juan Díaz.

3.3. Mapa sintético de permeabilidad

La integración de capas mediante Weighted Overlay permitió generar un mapa sintético de permeabilidad, el cual muestra tres tendencias principales:

a. Alta permeabilidad en zonas altas y medias

Corresponde a regiones con litologías más fracturadas, suelos aluviales y mayor cobertura vegetal. Estas áreas presentan condiciones favorables para infiltración y recarga, lo que coincide con observaciones en ambientes hidrogeológicos similares [12].

b. Permeabilidad moderada en corredores de transición

Zonas con mezcla de suelos intervenidos y remanentes naturales, que actúan como áreas intermedias entre la recarga efectiva y los sectores más impermeabilizados.

c. Baja a muy baja permeabilidad en la cuenca baja

Asociada a rellenos, marismas alteradas y superficies urbanas densas. Aquí se identifican los mayores niveles de impermeabilización y las áreas de mayor riesgo por inundación

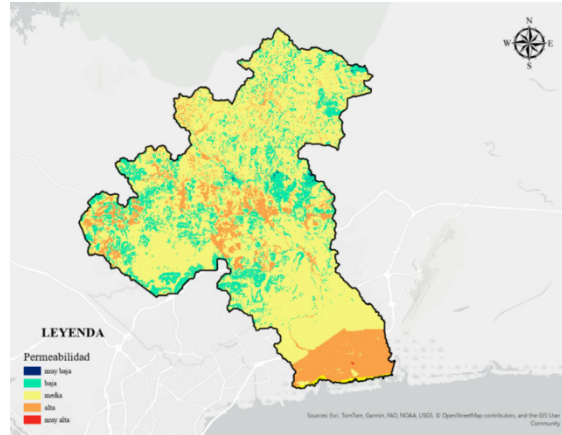


Figura 2. Mapa de permeabilidad de la cuenca del río Juan Díaz

Asociada a rellenos, marismas alteradas y superficies urbanas densas. Aquí se identifican los mayores niveles de impermeabilización y las áreas de mayor riesgo por inundación.

3.4. Representación tridimensional (3D) del subsuelo

La figura 3 ilustra una escena 3D construida a partir de datos de pozos y elevaciones del terreno revela una marcada heterogeneidad en el espesor de los materiales subsuperficiales. Entre los principales hallazgos se identifican diferencias marcadas en la profundidad del acuífero, con niveles freáticos más profundos en la parte alta de la cuenca y más someros hacia la zona costera, donde la mayor influencia del nivel freático incrementa la vulnerabilidad a inundaciones durante eventos extremos y frente al ascenso del nivel del mar [15].

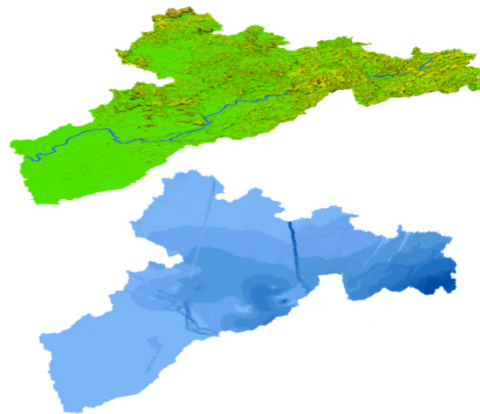


Figura 3. Topografía y nivel freático estimado en la cuenca del río Juan Díaz

Los resultados del análisis integrado evidencian una modificación progresiva del sistema hidrogeológico de la cuenca del río Juan Díaz, estrechamente asociada a la urbanización acelerada. La expansión de superficies impermeables en las zonas media y baja ha

reducido la recarga freática y la permeabilidad del suelo, favoreciendo el escurrimiento superficial y una respuesta hidrológica más rápida ante lluvias intensas, lo que incrementa la susceptibilidad a inundaciones urbanas [16]–[18]. Asimismo, el gradiente del nivel freático sigue en términos generales la topografía y el patrón de drenaje, aunque presenta variaciones locales asociadas a la heterogeneidad hidrogeológica y al grado de intervención antrópica, especialmente en la cuenca baja, donde niveles freáticos someros y topografía suave aumentan la vulnerabilidad frente a eventos extremos y al ascenso del nivel del mar [19]–[24]. En conjunto, la interacción entre urbanización, propiedades del suelo y dinámica freática condiciona la resiliencia hidrológica del territorio y resalta la importancia de enfoques integrados para la gestión y planificación hídrica en contextos urbanos sometidos al cambio climático.

4. CONCLUSIONES

Este estudio permitió caracterizar de manera preliminar la hidrogeología de la cuenca hidrológica del río Juan Díaz mediante la integración de datos geoespaciales, técnicas de teledetección y análisis estadísticos, demostrando que el enfoque metodológico adoptado es adecuado para identificar relaciones espaciales consistentes entre las características físicas de la cuenca y el comportamiento del acuífero.

Los resultados evidencian que variables como el uso y cobertura del suelo, la cobertura boscosa, la geología y la topografía influyen directamente en la dinámica del nivel freático, ya que la superficie subsuperficial estimada responde de forma coherente a las condiciones físicas de la cuenca, manteniendo gradientes y profundidades compatibles con la morfología del terreno y la red de drenaje.

La integración de cartografía temática y representaciones tridimensionales permitió visualizar de manera más clara la variabilidad espacial del sistema hidrogeológico, particularmente en la cuenca media y baja, lo que resalta el potencial de este análisis preliminar como base para el desarrollo de modelos hidrogeológicos más detallados y como insumo para la gestión y planificación hídrica en contextos urbanos sometidos a procesos acelerados de urbanización y cambio climático.

Referencias

- [1] IH Cantabria and BID, “ESTUDIO INTEGRAL DE ACTUACIONES DE MITIGACIÓN DE INUNDACIONES EN LA CUENCA DE JUAN DÍAZ,” Sep. 2016. Accessed: Dec. 04, 2025. [Online]. Available: https://resiliencia.mupa.gob.pa/wp-content/uploads/2022/08/ESTUDIO-INTEGRAL-DE-ACTUACIONES-DE-MITIGACION-DE-INUNDACIONES-EN-LA-CUENCA-DE-JUAN-DIAZ_IH-Cantabria_2016.pdf

- [2] A. Carrera and J. Castro, "The Juan Díaz river basin: the logic of disorder," pp. 217–234, Apr. 2024.
- [3] C. R. Jacobson, "Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review," *J Environ Manage*, vol. 92, no. 6, pp. 1438–1448, 2011, doi: 10.1016/j.jenvman.2011.01.018.
- [4] M. J. Paul and J. L. Meyer, "Streams in the urban landscape," *Annu Rev Ecol Syst*, vol. 32, no. Volume 32, 2001, pp. 333–365, Nov. 2001, doi: 10.1146/ANNUREV.ECOLSYS.32.081501.114040/CITE/REFWORKS.
- [5] S. Westra et al., "Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall," *Reviews of Geophysics*, vol. 52, no. 3, pp. 522–555, Sep. 2014, doi: 10.1002/2014RG000464;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER.
- [6] IPCC, "Climate Change 2013: The Physical Science Basis," New York, 2014. [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf
- [7] Y. Hirabayashi et al., "Global flood risk under climate change," *Nat Clim Chang*, vol. 3, no. 9, pp. 816–821, Sep. 2013, doi: 10.1038/NCLIMATE1911.
- [8] "Atlas de Riesgo Climático de Panamá." Accessed: Dec. 08, 2025. [Online]. Available: <https://atlasderiesgoclimatico.miambiente.gob.pa/atlas>
- [9] D. G. Tarboton, "A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models," *Water Resour Res*, vol. 33, no. 2, pp. 309–319, Feb. 1997, doi: 10.1029/96WR03137;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:19447973;ISSUE:ISSUE:DOI.
- [10] Y. Montecelos-Zamora, T. Cavazos, T. Kretzschmar, E. R. Vivoni, G. Corzo, and E. Molina-Navarro, "Hydrological modeling of climate change impacts in a Tropical River Basin: A case study of the Cauto River, Cuba," *Water (Switzerland)*, vol. 10, no. 9, Aug. 2018, doi: 10.3390/W10091135.
- [11] C. R. Fitts, "Groundwater Science," *Groundwater Science*, pp. 1–672, Jan. 2012, doi: 10.1016/C2009-0-62950-0.
- [12] S. Foster and R. Hirata, "The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection?," *Hydrogeol J*, pp. 13899–1392, Nov. 2013, Accessed: Dec. 08, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/257471572_The_aquifer_pollution_vulnerability_concept_aid_or_impediment_in_promoting_groundwater_protection
- [13] H. Wheeler and E. Evans, "Land use, water management and future flood risk," *Land use policy*, vol. 26, no. SUPPL. 1, pp. S251–S264, Dec. 2009, doi: 10.1016/J.LANDUSEPOL.2009.08.019.
- [14] B. F. Ochoa-Tocachi et al., "Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments," *Hydrol Process*, vol. 30, no. 22, pp. 4074–4089, Oct. 2016, doi: 10.1002/HYP.10980;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER.
- [15] "Climate Change 2021: The Physical Science Basis | Climate Change 2021: The Physical Science Basis." Accessed: Dec. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- [16] Y. Zhou, X. Liu, J. Wang y H. Chen, "Impact of rapid urbanization on groundwater storage variation over two decades," *Science of the Total Environment*, vol. 907, art. no. 167873, 2025, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.167873.
- [17] U. Pasquier, M. P. Clark y E. J. G. Leijnse, "Quantifying the city-scale impacts of impervious surfaces on groundwater recharge potential," *Journal of Hydrology*, vol. 612, art. no. 128202, 2022, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128202.
- [18] S. Shrestha, A. Sharma y R. J. Dawson, "Impact of urbanization on flood risk in metropolitan basins under changing climate conditions," *Hydrology*, vol. 12, no. 11, p. 283, 2025, doi: 10.3390/hydrology12110283.

- [19] R. Douglas y D. Murgulet, "Groundwater–surface water interactions in the coastal zone: Processes, controls and implications," *Journal of Hydrology*, vol. 631, art. no. 130542, 2025, doi: 10.1016/j.jhydrol.2024.130542.
- [20] D. J. Irvine, K. Singha, B. L. Kurylyk, M. A. Briggs, Y. Sebastian, D. R. Tait y A. M. Helton, "Groundwater-Surface water interactions research: Past trends and future directions," *Journal of Hydrology*, vol. 644, Art. no. 132061, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.jhydrol.2024.132061.
- [21] S. A. Siyad y Z. H. Mohamed, "A systematic literature review on groundwater recharge dynamics under climate variability, land use change and sea level rise," *Discovery Sustainability*, vol. 6, art. no. 1331, Nov. 2025, doi: 10.1007/s43621-025-02232-3.
- [22] S. Habel, "Hidden threat: The influence of sea-level rise on coastal groundwater systems," *Annual Review of Marine Science*, vol. 16, pp. 345–368, 2024, doi: 10.1146/annurev-marine-020923-120737.
- [23] M. Marshall, E. Dubois, S. C. Moulaye Ahmed Cherif, C. Dubath, O. Wague, G. Mariethoz y P. Perona, "Mapping groundwater-related flooding in urban coastal regions," *Journal of Hydrology*, vol. 657, Art. no. 132907, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.jhydrol.2025.132907.
- [24] J. D. Paul, A. Ajmi, D. Bolaji-Dada y S. Bordessoule, "Groundwater Flooding of Superficial Gravels in an Urbanized Catchment," *Journal of Flood Risk Management*, vol. 18, no. 2, Art. no. e70050, 2025, doi: 10.1111/jfr3.70050.
- [25] Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC), XII Censo Nacional de Población y VIII de Vivienda 2020. Contraloría General de la República de Panamá, 2020.

Autorización y Licencia CC

Los autores autorizan a APANAC XVIII a publicar el artículo en las actas de la conferencia en Acceso Abierto (Open Access) en diversos formatos digitales (PDF, HTML, EPUB) e integrarlos en diversas plataformas online como repositorios y bases de datos bajo la licencia CC:

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

Ni APANAC XVIII ni los editores son responsables ni del contenido ni de las implicaciones de lo expresado en el artículo.