

Análisis De Vulnerabilidad Hidrológica Por Inundaciones En Ciudades De Hasta 6 000 Habitantes

Analysis Of Hydrological Vulnerability Due To Floods In Cities With Up To 6,000 Inhabitants

Autores

María Elena Sánchez Armijos¹, Amanda Estefanía Morocho Ortega², Jesús Enrique Espinoza Correa³, Luis Ángel Vargas Collaguazo⁴

¹Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador e-mail: msanchez3@utmachala.edu.ec, <https://orcid.org/0009-0003-8840-4850>; ²Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador e-mail: amorcho6@utmachala.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0001-6431-7013>; ³Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador e-mail: jespinoza@utmachala.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0003-3859-0918>; ⁴Ingeniero Ambiental, Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador e-mail: lvargas@utmachala.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0001-7619-1323>

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es determinar el nivel de vulnerabilidad por inundaciones con relación a los tirantes obtenidos a través de los mapas de inundación en varios tramos de las cuencas en el Cantón Marcabelí de Ecuador. La metodología aplica dos enfoques; bibliográfico y experimental. El enfoque bibliográfico se basa en la recopilación de información y revisión de documentos referenciales en diferentes bases de datos. El enfoque experimental abarca diferentes análisis (topográfico, hidrográfico, uso de suelo, hidrológico e hidráulico) empleando los programas ArcGis, Hec-GeoRas y Hec-Ras. Los resultados obtenidos a través de las simulaciones demuestran que el tramo C-D, en un periodo de retorno de 100 años generará un tirante de 14,54 m (riesgo alto). Los mapas de inundación aportan información acerca de las áreas susceptibles y posibles zonas afectadas por inundaciones. Para finalizar, se presenta la propuesta metodológica donde se esquematiza el proceso experimental para la creación de mapas de inundación y riesgo para diferentes caudales y periodos de retorno.

Palabras claves: *ArcGis, Hec-GeoRas, Hec-Ras, mapas de inundación, vulnerabilidad*

ABSTRACT

The main objective of this work is to determine the level of vulnerability to flooding in relation to the depths obtained through flood maps in various sections of the basins in the Marcabelí Canton of Ecuador. The methodology applies two approaches; bibliographic and experimental. The bibliographic approach is based on the collection of information and review of reference documents in different databases. The experimental approach covers different analyzes (topographic, hydrographic, land use, hydrological and hydraulic) using the ArcGis, Hec-GeoRas and Hec-Ras programs. The results obtained through the simulations show that section C-D, in a return period of 100 years, will generate a depth of 14.54 m (high risk). Flood maps provide information about susceptible areas and possible areas affected by floods. Finally, the methodological proposal is presented where the experimental process for the creation of flood and risk maps for different flows and return periods is outlined.

Keywords: *ArcGis, Hec-GeoRas, Hec-Ras, flood maps, vulnerability*

Nota Editorial: Recibido: Febrero 2024 Aceptado: Marzo 2024

1. INTRODUCCIÓN

Los fenómenos hidrológicos a nivel mundial han causado diferentes repercusiones en varios países, los que más resaltan son las inundaciones [1] [2] [3] y sequías a causa de su continuidad e inevitabilidad. La vulnerabilidad se define como las circunstancias que provocan susceptibilidad frente a las amenazas al estar relacionado con la limitación de recursos [4]. También puede ser definida como la incapacidad de enfrentar a los efectos provocados por una crisis climática [5]. El fenómeno del Niño es el evento climático con mayor impacto debido a las fuertes precipitaciones que trae consigo provocando así graves inundaciones [6], por lo tanto, algunos países del mundo han tomado medidas para la prevención y mitigación de estos fenómenos. Una de las herramientas más utilizadas para la prevención y evaluación del riesgo son el modelado de mapas de inundaciones los cuales permiten determinar las áreas más vulnerables [7].

El análisis de inundaciones señala que los factores naturales como lluvias, pendiente, uso e infiltración del suelo, escorrentía superficial son variables dominantes para el estudio de vulnerabilidad y monitoreo de los recursos hídricos para predecir inundaciones [8] [9]. El uso de los modelos de mapas de inundaciones contribuye a la toma de decisiones en las zonas propensas a inundaciones [10]. Por otra parte, el peligro de inundaciones se presenta en zonas con características de baja altitud, poca pendiente y aproximaciones a afluentes, al igual que áreas urbanísticas, zonas elevadas (topografía) y húmedas [11]. En Rumania, en el área de Valea Rea emplearon una metodología a partir de base de datos espaciales (ráster) con el fin de determinar la vulnerabilidad del área, relacionando los datos obtenidos en el laboratorio con los resultados de zonas damnificadas reales, obteniendo que el 43% del lugar se presenta como muy vulnerable [12].

La costa del Pacífico de América del Sur se destaca por su aridez y variabilidad de las precipitaciones anuales [13], el estudio realizado por C. Fernández de Córdova, P. Arias, Y. Rodríguez, y A. León en la ciudad de Cuenca, Ecuador consideró la relación entre lluvia-escorrentía para el desarrollo del modelo hidrológico con el fin de exponer el comportamiento de los escurrimientos de la cuenca del río Yanuncay [14]. En la ciudad de Santa Elena se efectuó un estudio por J. Montalván, M. Catuto y R. Gómez con la finalidad de identificar las zonas susceptibles a inundaciones provocadas por lluvias, los modelos se desarrollaron con los programas HEC-HMS y HEC-RAS [15]. Ambos artículos coinciden que empleando los mapas de inundaciones se pueden determinar las zonas de riesgo influenciadas por las cuencas hidrográficas facilitando a las autoridades competentes la mejor toma de decisiones [16]. Por ello es importante el estudio de las cuencas hidrográficas debido a la interacción entre las personas y los recursos terrestres para gestiones sostenibles [17]. En el Ecuador, los impactos negativos se evidencian en la salud, educación, agricultura, ganadería, infraestructura, etc. [18].

El objetivo principal de este trabajo es determinar el nivel de vulnerabilidad por inundaciones con relación a los tirantes obtenidos a través de los mapas de inundación en varios tramos de las cuencas en el Cantón Marcabellí de Ecuador. Con esto se crearán mapas de inundación y de riesgo para diferentes períodos de retorno que pueda emplearse como material de apoyo para la toma de decisiones de las autoridades competentes frente a la mitigación de riesgos y amenazas y un buen desarrollo urbanístico.

2. METODOLOGÍA

El trabajo se centra en dos tipos de investigación: bibliográfico y experimental. El enfoque bibliográfico, comprende la búsqueda, recopilación, análisis y revisión de documentos bibliográficos con información relevante para esta investigación. El enfoque experimental, se basa en el procesamiento de la información de modo que se definen las variables que se deberán observar y como se relacionan entre ellas, además, la medición de variables y análisis de los resultados obtenidos [19].

En la figura 1 se muestran tres etapas principales para el desarrollo de este trabajo y el tipo de investigación relacionado con cada una de ellas.

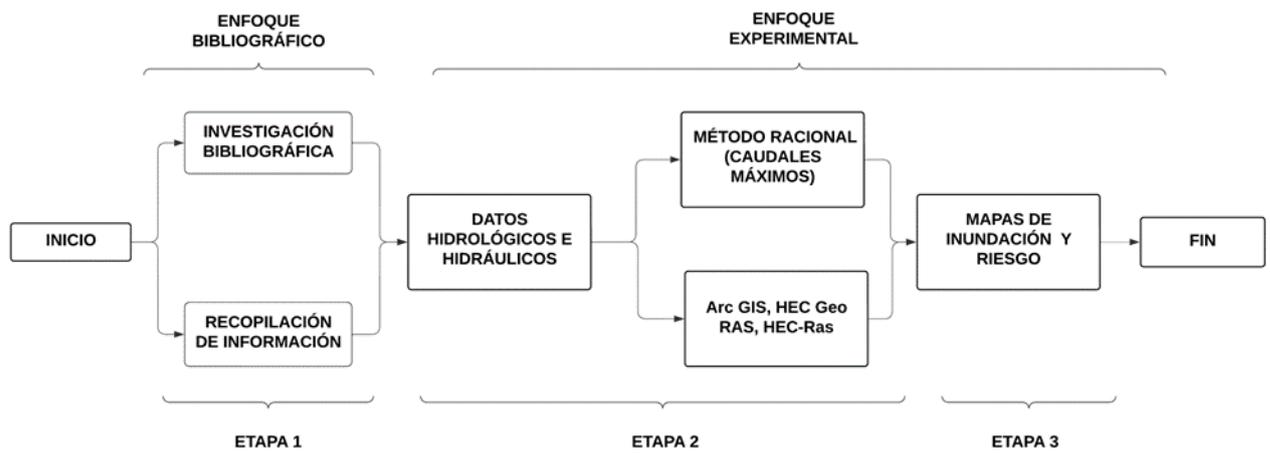


Figura 1: Etapas de investigación

En la tabla 1 se sintetiza algunas metodologías empleadas en diferentes partes del mundo, donde aplican diversas herramientas de acuerdo a los distintos recursos y escenarios para el control de inundaciones.

Tabla 1: Resumen de metodologías aplicadas en diferentes países para distintos escenarios

Autores	Resumen	Metodología	Herramientas	Conclusiones	Referencias
Tamiru y Wagari	Reconocen las zonas más propensas a inundaciones a través de mapeo.	Modelo integrado compuesto por modelo hidrológico predictivo y modelo hidráulico	Uso de redes neuronales artificiales y Hec-Ras	Recomiendan que los mapas de inundación pueden ser alternativas para estrategias de riesgos	[20]
Sholichin y Qadri	Instigaron el efecto de la urbanización sobre la escorrentía superficial y la descarga máxima.	Aplicación de modelación hidrológica predictiva y modelación hidráulica	Programas como SWAT y Hec-Ras	Demonstraron que la variación del uso del suelo afecta en el aumento o disminución en el volumen de descarga del río	[21]
Sadhvani y Eldho	Evalúa el impacto del cambio climático en los componentes del balance hídrico (precipitaciones, escorrentía superficial, agua subterránea, etc.)	Aplicación de modelación hidrológica para la obtención de componentes del balance hídrico	Aplicación de SWAT para conocer el comportamiento del caudal	Comprende los impactos del cambio climático en el equilibrio hídrico e importancia de la gestión sostenible de los recursos hídricos para un futuro hídrico resiliente en climas cambiantes	[22]
Jagadeesh y Veni	Modelación de llanuras aluviales para la adopción de medidas para la mitigación de inundaciones y mejorar la toma de decisiones y preparación ante emergencias	Aplicación de modelos integrados conformado por modelos hidrológicos e hidráulicos para diferentes períodos de retorno (2, 10, 25, 50 y 100 años)	Empleo de softwares como Arc-Gis, HEC-Ras, HEC-GeoRas	Los resultados indicaron que los SIG forman parte fundamental para el mapeo y análisis de llanuras aluviales	[23]
J. Montalván, M. Catuto, G. Gómez	Modelación hidrológica para identificar las zonas propensas a inundaciones por precipitaciones en la cuenca	Metodología de conservación del suelo para prevención de sucesos naturales	Empleo de softwares como Arc-Gis, HEC-Ras, HEC-GeoRas	Representación de mapas de inundación zonificados por los tipos de amenazas: alta, media y baja donde muestran márgenes de desbordamientos	[15]

3. RESULTADOS

La población total del Cantón Marcabelí es aproximadamente 5450 habitantes según el censo INEC 2010, sin embargo, se ha tomado en cuenta una población de alrededor de 3682 personas debido que se encuentran en la zona de interés a estudiar.

3.1. Análisis Topográfico

Para realizar el análisis topográfico de la zona de estudio se utilizó la técnica de teledetección que consiste en la obtención de datos de la superficie de la tierra a través de las plataformas espaciales. Los archivos DEM se descargaron del satélite Alos Palsar a través del Servicio Geológico de Estados Unidos, este satélite brinda archivos con corrección de geoide aplicada con alta resolución de celda de 12,5 m x 12,5 m. Con sistema de coordenadas UTM y datum de WGS84 en la zona 17 Sur

En la figura 2 se muestra el modelo de elevación digital (DEM) del área de estudio, Cantón Marcabelí.

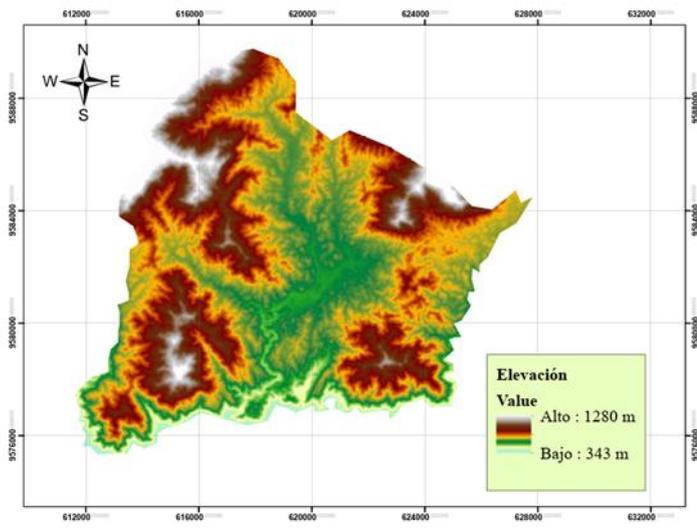


Figura 2: Modelo de Elevación Digital (DEM) del Cantón Marcabelí

3.2. Análisis De La Cuenca

A partir del DEM obtenido previamente se calcularon algunas variables de la cuenca, para ello fue empleado el software **ArcGIS 10.8.2**. La herramienta "Watershed" se utilizó para determinar el área de contribución donde se identificaron dos subcuencas provenientes desde la parroquia El Ingenio y El Caucho. A partir de ello se calculó cada área de contribución para cada tramo. En la figura 3 y se resumen en la tabla 2.

La figura 3 se indica las diferentes áreas de contribución obtenidas para las subcuencas.

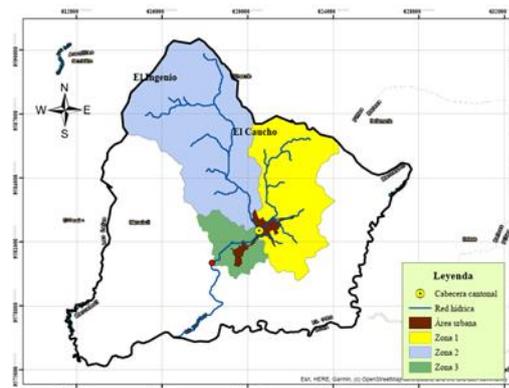


Figura 3: Áreas de contribución para las subcuencas

En la tabla 2 se resumen algunas variables obtenidas de las cuencas como longitud de cauce, área de contribución, área poblada y bosques.

Tabla 2: Resumen de variables de la cuenca

Zona	Longitud de cauce (km)	Área Total (km ²)	Área poblada (km ²)	Bosques (km ²)
1	7,13	20,83	0,64	20,19
2	11,61	33,66	0,05	33,61
3	2,75	5,84	0,37	5,47
Total		60,33	1,0678	59,2622

3.3. Análisis Del Suelo

Para evaluar el coeficiente de escorrentía se utilizaron las tablas propuestas por Chow [24], por lo tanto, para cada área de aportación se consideró dos tipos de superficies de suelos, zona de bosques y cultivos y zona urbana y vivienda. En la tabla 3 se resumen los coeficientes de escorrentía para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años para las tres zonas de estudio.

Tabla 3: Coeficientes de **escorrentía** (C) para las diferentes zonas de estudio

Coeficientes de escorrentía					
Periodos de retorno	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
Zona 1	0,35	0,37	0,41	0,45	0,49
Zona 2	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47
Zona 3	0,37	0,39	0,43	0,46	0,50

3.4. Análisis Hidrológico

Los registros se obtuvieron mediante la aplicación Giovanni desarrollado por la NASA, que provee información de diferentes satélites para todo el mundo. Los datos descargados comprenden 21 años de registros desde el año 1998 hasta el año 2019 los cuales registran precipitaciones máximas anuales. Para determinar la intensidad máxima se empleó la ecuación 1.

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n} \quad (1)$$

Donde:

I= Intensidad (mm/h)

T= período de retorno (años)

t= tiempo de duración (minutos)

K, m, n= Constates de ajuste

A partir de ello, se graficaron las curvas IDF para los diferentes periodos con intervalos de 5 minutos como se muestra en la Figura 4.

Curvas IDF

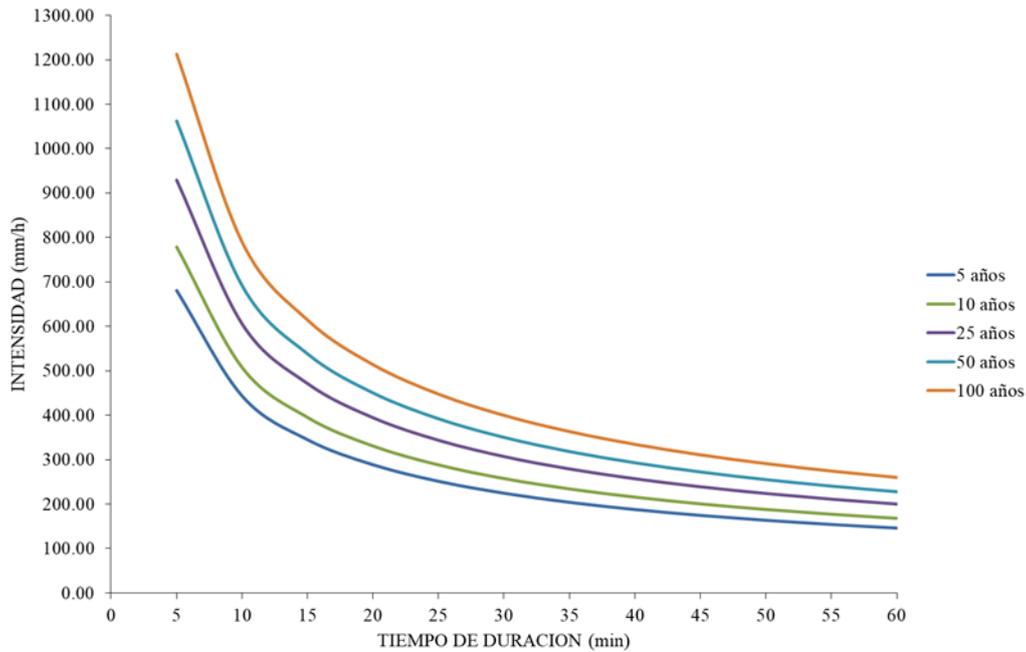


Figura 4: Curva de Intensidad-Duración-Frecuencia IDF

Se empleó la ecuación de Kirpich [25] para calcular el parámetro del tiempo de concentración para cada zona establecida previamente con la ecuación 2

$$T_c = 0.066 \cdot \left(\frac{L}{j^{0.55}} \right)^{0.77} \tag{2}$$

Donde:

- T_c = tiempo de concentración (hr)
- L = longitud de cauce (km)
- j = pendiente (adimensional)

Se obtuvieron tres diferentes resultados de tiempos de concentración para cada zona como se sintetiza en la tabla 4

Tabla 4: Tiempo de concentración (T_c)

Tiempo de concentración					
Zona	Longitud de cauce L (km)	Pendiente media j (m/m)	Tiempo de concentración T_c (hr)	Tiempo de concentración T_c (min)	T_c Establecido (min)
Zona 1	7,13	0,317	0,466	27,96	30
Zona 2	11,61	0,317	0,67	40,7	40
Zona 3	2,75	0,317	0,223	13,38	15

Con los tiempos de concentración establecidos se determina los valores de intensidades de precipitaciones según duración y frecuencia para los períodos de retornos antes mencionados. A continuación, en la tabla 5 se presenta los datos de los valores de intensidad (I).

Tabla 5: Tabla de intensidades para períodos de 5, 10, 25, 50 y 100 años

Valores de Intensidad de precipitación según Duración de la misma y Frecuencia de repetición					
Duración (minutos)	Periodo de retorno (años)				
	5,00	10,00	25,00	50,00	100,00
15,00	345,24	394,53	470,63	537,81	614,58
30,00	224,82	256,91	306,47	350,22	400,21
40,00	188,16	215,01	256,49	293,10	334,94

Finalmente, se estimaron los caudales máximos de crecida a través del método racional con la fórmula siguiente:

$$Q = 0,278 \cdot C \cdot I \cdot A \quad (3)$$

Donde:

- Q = caudal máximo de crecida (m^3/s)
- C = coeficiente de escorrentía
- I = intensidad de lluvias (mm/h)
- A = área de contribución (km^2)

El método racional por su simplicidad y más comúnmente usado para las microcuencas, por lo tanto, los diferentes parámetros a emplear serán más concentrados debido a la superficie reducida [26] [27]. Los caudales máximos se resumen en la tabla 6.

Tabla 6: Caudales máximos de crecida

Periodo de retorno (T)	Caudales máximos (m^3/s)		
	Zona 1	Zona 2	Zona 3
5 años	455,66	599,91	1262,62
10 años	556,40	725,81	1532,01
25 años	735,79	961,86	2026,20
50 años	902,47	1181,28	2486,52
100 años	1124,84	1475,27	3100,00

3.5. Modelación Hec-Georas, Hec Ras Y Arcgis

Dentro de las zonas de interés se consideraron cuatro puntos de control A, B, C y D generando tres tramos relevantes para el análisis A-C, B-C, y C-D como lo ilustra la figura 5.

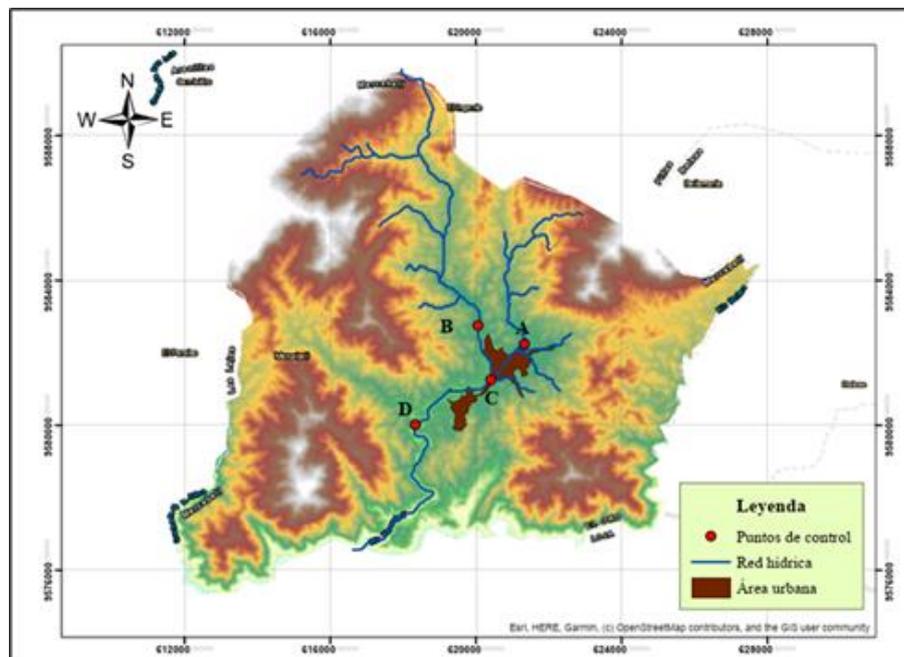
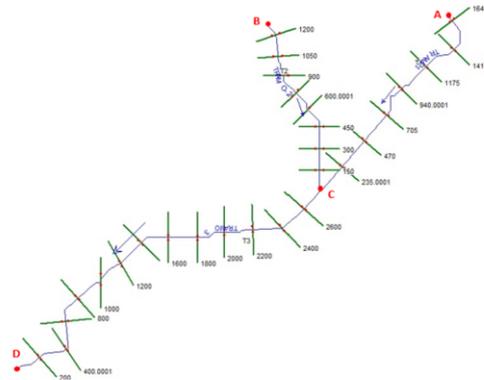


Figura 5: Puntos de control de las microcuencas de la zona de estudio

A través de la extensión **HEC-GeoRas 10.8** obtuvieron algunos datos geométricos del canal que posteriormente serán utilizados en los siguientes softwares, los datos se resumen en la tabla 7 y condiciones de frontera.

Tabla 7: Parámetros de contorno del canal

Parámetros de contorno



Tramo	A-B	B-C	C-D
Geometría			
Longitud de tramo	7,13 km	11,61 km	2,75 km
No. de secciones Transversales	7	8	13
Longitud de secciones Transversales	300 m	280 m	350 m
Distancias entre secciones transversales	235 m	150 m	200 m
Condiciones De Frontera			
Pendiente	0,317	0,317	0,317
Coefficiente De Manning	0,018 – 0,1 – 0,018	0,018 – 0,1 – 0,018	0,018 – 0,1 – 0,018

Con el programa HEC-Ras se identificaron las zonas de desborde a lo largo de las secciones transversales de los tramos A-C, B-C y C-D presentadas en la figura 6.

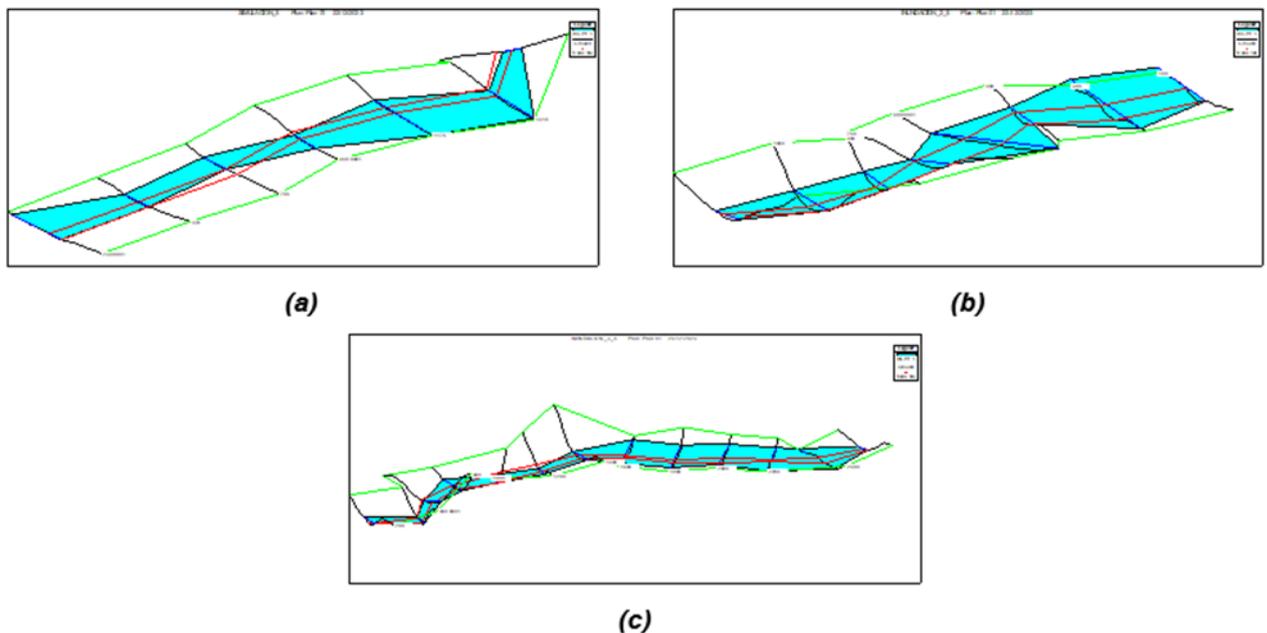


Figura 6: Zonas de desbordamientos de los tramos (a) A-C, (b) B-C y (c) C-D

Se desarrollaron los mapas de inundación y de riesgo del Cantón Marcabelí para los períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años donde se muestran las áreas más susceptibles en inundación en función de su tirante como se muestran en la tabla 8. Por consiguiente, se consideran los tramos B-C proveniente desde el sector El Ingenio y el tramo C-D que desemboca en el Río Puyango se identificaron como las zonas con mayor riesgo a inundación correspondientes a los periodos de 50 y 100 años contemplados para futuras obras civiles bajo los criterios establecidos para la generación de mapas de inundación utilizadas por Alcocer-Yamanaka [28] presentados en la tabla 9.

Tabla 8: Nivel de inundación en función de su tirante

Nivel de inundación máxima			
Período de retorno	Tramo A-C	Tramo B-C	Tramo C-D
5 años	5,46 m	7,47 m	11,43 m
10 años	5,65 m	7,77 m	11,99 m
25 años	6,06 m	8,41 m	12,89 m
50 años	6,47 m	8,72 m	13,64 m
100 años	6,92 m	9,09 m	14,54 m

Tabla 9: Criterios establecidos para la creación de mapas de riesgo

Nivel de peligro	Altura (m)
Nulo	$h < 0,3$
Bajo	$0,3 > h < 0,5$
Medio	$0,5 > h < 1,5$
Alto	$h > 1,5$

Las figuras 7-8 muestran los diferentes escenarios de las áreas susceptibles a inundaciones y riesgos para los distintos periodos de retorno de 50 y 100 años de los tramos B-C y C-D.

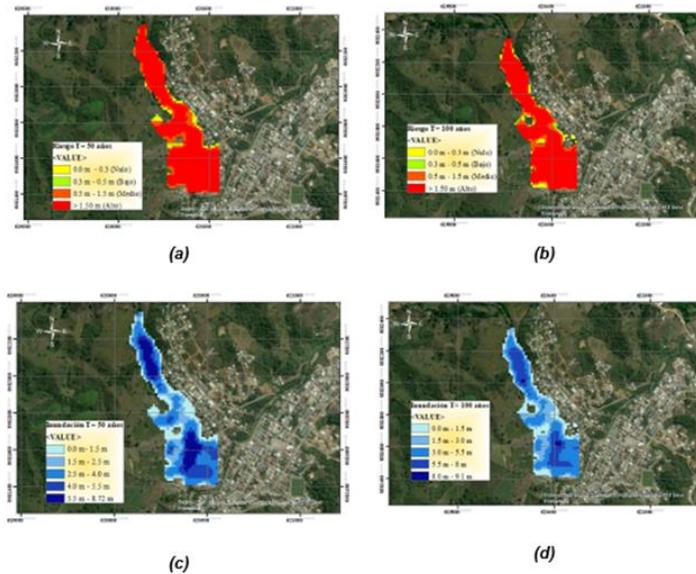


Figura 7: (a) Mapa de riesgo $T=50$ años, (b) Mapa de riesgo $T=100$ años (c) Mapa de inundación $T=50$ años (d) Mapa de inundación $T=100$ años del tramo B-C

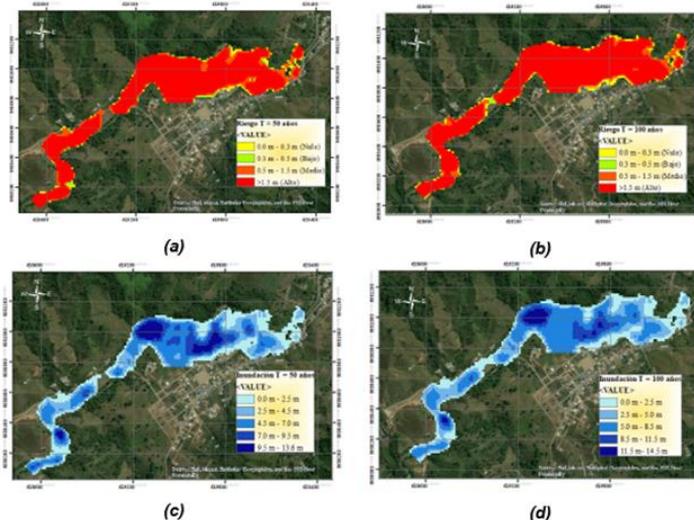


Figura 8: (a) Mapa de riesgo $T=50$ años, (b) Mapa de riesgo $T=100$ años (c) Mapa de inundación $T=50$ años (d) Mapa de inundación $T=100$ años del tramo C-D

3.6. Propuesta De Metodología

La figura 9 presenta la propuesta metodológica donde se esquematiza el proceso experimental de este trabajo. La propuesta se estructura en tres etapas; obtención de datos espaciales y georreferenciados, creación de geometría del canal y modelación de mapas. Además, el esquema muestra los datos de entrada, softwares, herramientas y funciones utilizados con resultados obtenidos.

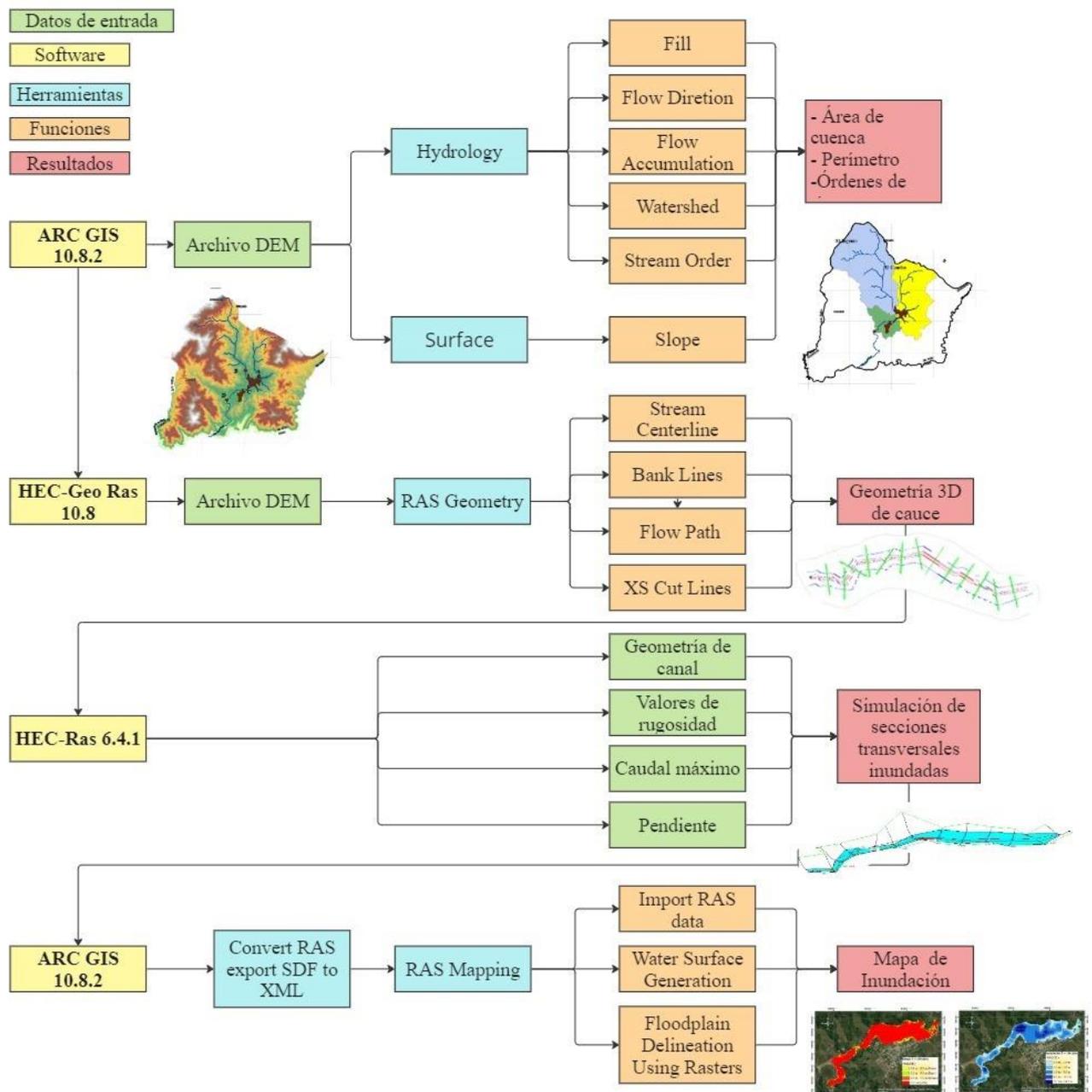


Figura 9: Propuesta metodológica para mapas de inundación y riesgo

4. CONCLUSIONES

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) dentro de este trabajo cumplen un papel fundamental para el análisis y manejo de datos hidrológicos con el fin de determinar el comportamiento en las dimensiones espaciales y temporales.

Debido a la falta de datos hidrológicos del área de estudio, se obtuvieron datos espaciales del satélite Alos Palsar mediante del Servicio Geológico de Estados Unidos; brinda archivos con corrección de geoide aplicada con alta resolución de celda de 12,5 m x 12,5 m. Esto permitió evaluar los impactos hidrológicos e hidráulicos en diferentes periodos de retorno.

El empleo de los softwares ArcGIS, Hec-GeoRas y Hec-Ras permitieron la automatización de los procesos de la extracción de datos, cálculos hidráulicos y creación de mapas de inundación, identificando las posibles zonas inundables en función a su tirante y extensión.

De acuerdo a los mapas desarrollados para los periodos de retorno de 50 y 100 años (años contemplados para obras civiles), para el tramo B-C se obtuvieron tirantes de 8,72 m y 9,09 m mientras que en el tramo C-D, 13,64 m y 14,54 m. Se concluye que existe mayor riesgo a inundaciones en esas zonas del Cantón, lo que permite a la gestión de riesgo identificar e implementar medidas para su mitigación.

La propuesta metodológica presentada resuelve el proceso y manejo de los programas ArcGIS, Hec-GeoRas y Hec-Ras para contribuir en futuras investigaciones enfocadas en estudios ambientales e ingenierías; que puedan ser considerados con fines de construcción (hidráulicas, sanitarias, infraestructura urbana y ordenamiento territorial).

1. A. M. Tawfik, "River flood routing using artificial neural networks," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, no. 3, 2023, doi: 10.1016/j.asej.2022.101904.
2. A. Minano, J. Thistlethwaite, D. Henstra, and D. Scott, "Governance of flood risk data: A comparative analysis of government and insurance geospatial data for identifying properties at risk of flood," *Comput Environ Urban Syst*, vol. 88, 2021, doi: 10.1016/j.compenurbysys.2021.101636.
3. C. Amoako and D. K. B. Inkoom, "The production of flood vulnerability in Accra, Ghana: Re-thinking flooding and informal urbanisation," *Urban Studies*, vol. 55, no. 13, 2018, doi: 10.1177/0042098016686526.
4. M. B. Malgwi, S. Fuchs, and M. Keiler, "A generic physical vulnerability model for floods: Review and concept for data-scarce regions," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 20, no. 7, 2020, doi: 10.5194/nhess-20-2067-2020.
5. K. I. Abdrabo *et al.*, "An integrated indicator-based approach for constructing an urban flood vulnerability index as an urban decision-making tool using the PCA and AHP techniques: A case study of Alexandria, Egypt," *Urban Clim*, vol. 48, 2023, doi: 10.1016/j.uclim.2023.101426.
6. E. Tauzer, M. J. Borbor-Cordova, J. Mendoza, T. De La Cuadra, J. Cunalata, and A. M. Stewart-Ibarra, "A participatory community case study of periurban coastal flood vulnerability in southern Ecuador," *PLoS One*, vol. 14, no. 10, 2019, doi: 10.1371/journal.pone.0224171.
7. J. Pinos, L. Timbe, and E. Timbe, "Evaluation of 1D hydraulic models for the simulation of mountain fluvial floods: A case study of the santa bárbara river in Ecuador," *Water Pract Technol*, vol. 14, no. 2, 2019, doi: 10.2166/wpt.2019.018.
8. H. Helmi, H. Basri, S. Sufardi, and H. Helmi, "Flood vulnerability level analysis as a hydrological disaster mitigation effort in Krueng Jreue Sub-Watershed, Aceh Besar, Indonesia," *Jamba: Journal of Disaster Risk Studies*, vol. 11, no. 1, 2019, doi: 10.4102/jamba.v11i1.737.
9. M. Jehanzaib, M. Ajmal, M. Achite, and T. W. Kim, "Comprehensive Review: Advancements in Rainfall-Runoff Modelling for Flood Mitigation," *Climate*, vol. 10, no. 10, 2022, doi: 10.3390/cli10100147.
10. R. Afsari, S. N. Shorabeh, M. Kouhnavard, M. Homaei, and J. J. Arsanjani, "A Spatial Decision Support Approach for Flood Vulnerability Analysis in Urban Areas: A Case Study of Tehran," *ISPRS Int J Geoinf*, vol. 11, no. 7, 2022, doi: 10.3390/ijgi11070380.
11. H. A. Megahed, A. M. Abdo, M. A. E. AbdelRahman, A. Scopa, and M. N. Hegazy, "Frequency Ratio Model as Tools for Flood Susceptibility Mapping in Urbanized Areas: A Case Study from Egypt," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 16, p. 9445, Aug. 2023, doi: 10.3390/app13169445.
12. I. Kocsis, Ștefan Bilașco, I. A. Irimuş, V. Dohotar, R. Rusu, and S. Roșca, "Flash Flood Vulnerability Mapping Based on FFPI Using GIS Spatial Analysis Case Study: Valea Rea Catchment Area, Romania," *Sensors*, vol. 22, no. 9, 2022, doi: 10.3390/s22093573.
13. R. Rollenbeck *et al.*, "The Coastal El Niño Event of 2017 in Ecuador and Peru: A Weather Radar Analysis," *Remote Sens (Basel)*, vol. 14, no. 4, 2022, doi: 10.3390/rs14040824.
14. C. Fernández de Córdova, P. Arias Lastre, Y. Rodríguez López, and A. León Méndez, "Modelo lluvia-escurrimiento para la cuenca del río Yanuncay en Cuenca, Ecuador Rain-runoff model for the Yanuncay river basin in Cuenca, Ecuador," *INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL*, vol. XLII, no. 3, 2021.
15. F. Javier Montalván Toala, M. Michelle Catuto Quinde, and G. R. Gómez, "Hydrological modeling of the manglaralto river for the generation of flood maps (Santa Elena-Ecuador)," in *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, 2020. doi: 10.18687/LACCEI2020.1.1.213.
16. S. Moghim, M. A. Gharethoragh, and A. Safaie, "Performance of the flood models in different topographies," *J Hydrol (Amst)*, vol. 620, 2023, doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.129446.
17. G. C. Abdeta, A. B. Tesemma, A. L. Tura, and G. H. Atlabachew, "Morphometric analysis for prioritizing sub-watersheds and management planning and practices in Gidabo Basin, Southern Rift Valley of Ethiopia," *Appl Water Sci*, vol. 10, no. 7, 2020, doi: 10.1007/s13201-020-01239-7.
18. J. Pinos and L. Timbe, "Mountain Riverine Floods in Ecuador: Issues, Challenges, and Opportunities," *Frontiers in Water*, vol. 2, 2020, doi: 10.3389/frwa.2020.545880.
19. M. angel Gomez Mendoza, J. Deslauriers, and M. V. Alzate Piedrahita, *Cómo hacer tesis de maestría y doctorado*, vol. 13, no. 1, 1959.
20. H. Tamiru and M. Wagari, "Machine-learning and HEC-RAS integrated models for flood inundation mapping in Baro River Basin, Ethiopia," *Model Earth Syst Environ*, vol. 8, no. 2, 2022, doi: 10.1007/s40808-021-01175-8.
21. M. Sholichin and W. Qadri, "Predicting flood hazards area using swat and hec-ras simulation in Bila river, South Sulawesi," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020. doi: 10.1088/1755-1315/437/1/012055.

22. K. Sadhwani and T. I. Eldho, "Assessing the Vulnerability of Water Balance to Climate Change at River Basin Scale in Humid Tropics: Implications for a Sustainable Water Future," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 11, 2023, doi: 10.3390/su15119135.
23. B. Jagadeesh and K. K. Veni, "Flood Plain Modelling of Krishna Lower Basin Using Arcgis, Hec-Georas And Hec-Ras," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1112, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1112/1/012024.
24. V. Te Chow, D. R. Maidment, and L. W. Mays, *Hidrología Aplicada*, vol. I, no. 9780070108103. 1988.
25. C. L. Castillo García, D. E. Abreu Franco, and M. Alvarez González, "Evaluación de distintas fórmulas empíricas para el cálculo del tiempo de concentración en la cuenca urbana del río Bélico y Cubanicay, ciudad de Santa Clara," *Enfoque UTE*, vol. 12, no. 3, 2021, doi: 10.29019/enfoqueute.729.
26. D. Martinhago *et al.*, "Balanço hídrico de uma bacia hidrográfica localizada no oeste do estado do Paraná," *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, vol. 26, no. 5, 2021, doi: 10.1590/s1413-41522020374.
27. Z. Şen, "Hydrological Methodology Evolution for Runoff Estimations at Ungauged Sites," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 4, 2023, doi: 10.3390/w15040702.
28. V. H. Alcocer-Yamanaka, J. M. Rodríguez-Varela, V. J. Bourguett-Ortiz, O. J. Llaguno-Guilberto, and P. M. Albornoz-Góngora, "Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas," *Scielo*, vol. VII, no. 5, pp. 33–55, Sep. 2016, Accessed: Jan. 10, 2024. [Online]. Available: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222016000500033&script=sci_abstract