

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Modelamiento hidrológico para el estudio de inundación en la isla de
Santa Cruz, Galápagos

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniería en Geología

Presentado por:

Milena Beirut Baque Charcopa

Guayaquil - Ecuador

PAO II 2023

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado a mi niña de bachillerato, a la joven BI, que, al dar sus primeros pasos en el ámbito universitario, experimentó incertidumbre, miedos y emoción. En la actualidad, como mujer joven que soy, al concluir una carrera que me apasiona, la abrazo y le digo: ¡Lo lograste! ¡Lo logramos! A pesar de las pequeñas o grandes adversidades, pudimos superarlo con el esfuerzo y las ganas de comenzar que nunca flaquearon en el camino.

Agradecimientos

A Dios quien es mi apoyo y soporte de cada día. A las mujeres de mi casa, mi abuelita Beirut, mi mamá Rocio y mi tía Alexandra quienes son mis ejemplos y mis guías de vida. A mi niño Mishael quien me da los abrazos para recargar energías en momentos de tristeza o frustración. A toda mi familia que estuvo apoyándome durante mi carrera y desarrollo de este proyecto. A mi mejor amigo, Josué Lombeyda, quien tiene las palabras precisas de aliento en esos momentos que quiero tirar la toalla. A Michelle Villalta quien me ayudo a desenredar muchas de mis ideas durante este proyecto. A mis tutores, al MSc. Daniel Gárces y al PhD. Maurizio Mulas quienes me regañaron y me alentaron en los momentos adecuados. A mis profesores de la FICT que contribuyeron a mi formación y los conocimientos aplicados en este proyecto. A ESPOL por abrirme las puertas a la ciencia y la investigación.

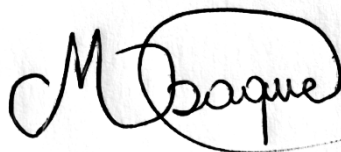
Declaración Expresa

Yo, Milena Beirut Baque Charcopa acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra autorizada a sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, y para crear y usar obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mi persona durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos en que la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se harán publicaciones ni revelaciones, sin autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 21 de febrero del 2024.



Milena Beirut Baque Charcopa

Evaluadores



Firmado electrónicamente por:
DAVID RICARDO
ALTAMIRANO MORAN

MSc. David Altamirano

Profesor de Materia



Firmado electrónicamente por:
DANIEL OMAR GARCÉS
LEÓN

MSc. Daniel Garcés

Tutor de proyecto



Firmado electrónicamente por:
MAURIZIO MULAS .

PhD. Maurizio Mulas

Co-tutor de proyecto

Resumen

A mediados del 2023, la OMM estimó la probabilidad del 90% de ocurrencia del ENOS a partir de altas temperaturas de agua superficial que generan direccionamiento de los vientos alisios y fuertes precipitaciones. Las islas Galápagos, especialmente Santa Cruz, se vieron afectadas por la influencia del ENOS.

Las consecuencias del ENOS y lluvias intensas pueden desencadenar múltiples amenazas, siendo las inundaciones una de las principales preocupaciones, provocando daños en infraestructuras y caminos en Santa Cruz. Por ende, este estudio busca analizar la amenaza de inundación en una de las cuencas hidrográficas de Santa Cruz mediante el modelamiento de información hidrológica, permitiendo contribuir con insumos para los planes de gestión del GAD cantonal.

El proceso metodológico comprende de 3 fases: (i) análisis estadístico e hidrológico de datos meteorológicos; (ii) modelamiento hidrológico de la cuenca de estudio y (iii) análisis de zonas de amenazas en las parroquias afectadas.

De un resultado de 40 cuencas hidrológicas, una de ellas incluye las parroquias de Bellavista y Puerto Ayora. A través del análisis y modelización hidrológica, se determinó que el flujo de agua se concentra en el área urbana de Puerto Ayora, evidenciando la necesidad de medidas preventivas y de gestión ante posibles eventos climáticos.

Palabras Clave: ENOS, precipitaciones, método racional, Iber, encañadas, riesgo

Abstract

In mid-2023, the WMO estimated a 90% probability of ENSO occurrence based on high surface water temperatures that generate trade wind steering and heavy rainfall. The Galapagos Islands, especially Santa Cruz, were affected by the influence of ENSO.

The consequences of ENSO and heavy rains can trigger multiple hazards, with flooding being one of the main concerns, causing damage to infrastructure and roads on Santa Cruz. Therefore, this study seeks to analyze the flood hazard in one of the Santa Cruz watersheds by modeling hydrological information, allowing to contribute with inputs for the management plans of the cantonal GAD.

The methodological process comprises 3 phases: (i) statistical and hydrological analysis of meteorological data; (ii) hydrological modeling of the study watershed; and (iii) analysis of hazard zones in the affected parishes.

Out of a total of 40 hydrological basins, one of them includes the parishes of Bellavista and Puerto Ayora. Through hydrological analysis and modeling, it was determined that water flow is concentrated in the urban area of Puerto Ayora, demonstrating the need for preventive and management measures in the face of possible climatic events.

Keywords: ENSO, rainfall, rational method, Iber, canyons, risk.

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Índice general	III
Índice de figuras.....	V
Índice de tablas	VII
Abreviaturas	VIII
Simbología	IX
Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción	2
1.2 Descripción del problema.....	3
1.3 Justificación del Problema.....	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos específicos.....	5
Capítulo 2.....	6
2.1 Marco conceptual.....	7
2.2 Marco regional	8
2.2.1 Marco geográfico	8
2.2.2 Marco geológico-tectónico	8
2.3 Marco local	10
2.3.1 Marco geográfico	10
2.3.2 Marco volcanológico	11
2.3.3 Condiciones climáticas	12
Capítulo 3.....	14
3.1 Metodología.....	15

Fase 1: Análisis estadístico e hidrológico de los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas.....	15
Fase 2: Modelamiento hidrodinámico de la cuenca de estudio	28
Fase 3: Análisis de zonas de amenaza en las parroquias afectadas	31
Capítulo 4.....	32
4.1 Resultados y análisis	33
Fase 1: Análisis estadístico e hidrológico de los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas.....	33
Fase 2: Modelamiento hidrodinámico de la cuenca de estudio	42
Fase 3: Análisis de zonas de amenaza en las parroquias afectadas.	46
Capítulo 5.....	48
5.1.1 Conclusiones	49
5.1.2 Recomendaciones.....	50
Referencias.....	51

Índice de figuras

Figura 1	Mapa de la dinámica de las placas tectónicas de las islas Galápagos	10
Figura 2	Mapa de ubicación de la isla Santa Cruz – Galápagos.....	11
Figura 3	Esquema metodológico del proyecto	15
Figura 4	Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas	16
Figura 5	Diagrama de flujo del proceso de delimitación de cuenca usando herramientas del software GIS.	27
Figura 6	Precipitaciones en Bellavista en los diferentes episodios	33
Figura 7	Precipitaciones en Puerto Ayora en los diferentes episodios	34
Figura 8	Relación entre las precipitaciones anuales y la precipitación neta en Bellavista.....	35
Figura 9	Relación entre las precipitaciones anuales y la precipitación neta en Puerto Ayora	36
Figura 10.	Caudales en Bellavista a 10 años	38
Figura 11.	Caudales en Puerto Ayora a 10 años	38
Figura 12	Secuencia de los resultados de las herramientas hidrológicas para la producción de cuencas.....	39
Figura 13	Mapa de cuencas de Santa Cruz.....	40
Figura 14	Mapas comparativos de cuencas hidrográficas de la isla Santa Cruz	40
Figura 15.	Mapa de comparación entre las encañadas del IGM.....	41
Figura 16	Dato de entrada en la sección de condiciones de contorno. Hidrograma generado a partir del análisis estadístico	42
Figura 17.	Mapa de flujos de agua.....	43
Figura 18.	Mapa de flujos de agua en relación con la topografía.....	44
Figura 19.	Mapa de flujos en relación con la microcuenca PelicanBay	45
Figura 20	Mapa del sector rural afectado en Bellavista.....	46

Figura 21 Mapa del sector urbano afectado en Bellavista.....47

Índice de tablas

Tabla 1	Valores de media y desviación típica con relación al número de datos.....	18
Tabla 2	Valor inicial del umbral de escorrentía P_0 inicial [mm].....	23
Tabla 3	Coefficiente corrector del umbral de escorrentía: valores correspondientes a calibraciones regionales	24
Tabla 4	Valores del coeficiente de rugosidad n	30
Tabla 5	Relación entre los periodos de retorno en Bellavista.....	34
Tabla 6	Relación entre los periodos de retorno en Puerto Ayora	35
Tabla 7.	Resultado del método racional y sus factores en Bellavista	37
Tabla 8.	Resultado del método racional y sus factores en Puerto Ayora.....	37

Abreviaturas

UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
ONU	Organización de las Naciones Unidas
ENOS	El Niño - Oscilación del Sur
WMO	World Meteorological Organization
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
SGR	Secretaría de Gestión de Riesgo
CGREG	Consejo de Gobierno de Régimen Especial de Galápagos
PNG	Parque Nacional Galápagos
GAD	Gobierno Autónomo Descentralizado
COOTAD	Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización
SENPLADES	Secretaría Nacional de Planificación
IGM	Instituto Geológico Militar
GSC	Centro de Expansión de Galápagos
RTIN	Rectangular triangular irregular network
MDT	Modelo de terreno digital
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
shp	shapefile

Simbología

°	grados
~	aproximadamente
%	porcentaje
>	mayor que
<	menor que
km	kilómetros
m	metros
mm	milímetros
E	Este
O	Oeste
ka	kilo años
Ma	Millones de años
m.s.n.m	metros sobre el nivel del mar
Csv	Valores separados por coma

Capítulo 1

1.1 Introducción

Galápagos es un archipiélago de origen volcánico ubicado en el océano Pacífico aproximadamente a 1000 km de distancia de la costa de América del Sur (López Andrade, 2021). Por su ubicación, las islas Galápagos son el punto de convergencia de varias corrientes marinas que influyen en la variedad de fauna y flora otorgándole el título de Reserva Marina (UNESCO, 2022).

La isla Santa Cruz, se ve afectada por las corrientes de Humboldt (época cálida y húmeda) presente desde los meses de enero a junio de manera cíclica cada año. Haga clic o pulse aquí para escribir texto. Cada 3 a 7 años, el fenómeno de El Niño se presenta de julio a diciembre, caracterizado por aumento de las temperaturas superficiales del mar, fuertes lluvias y debilitamiento de los vientos alisios que afectan directamente a su ecosistema frágil (Balladares Imbaquingo y otros., 2019; Dueñas et al., 2021).

Según Balladares Imbaquingo y otros (2019), el fenómeno de El Niño - Oscilación del Sur (ENOS) ha sido una de las corrientes con mayor impacto en la isla. A raíz de sus fuertes precipitaciones se han generado inundaciones que han deteriorado caminos e infraestructuras, afectando a los sectores productivos como la pesca y agricultura.

Santa Cruz es uno de los cantones con mayor densidad poblacional de las Galápagos (INEC, 2010) y con mayor ingreso de turistas (Caisaguano y otros., 2023), razón por la que este tipo de fenómenos afecta directamente a la población flotante y residente. Según la Agenda de Reducción de Riesgos del Cantón de Santa Cruz (2021), el promedio anual de las precipitaciones en la isla es de 0-300 mm en la costa y de 300-1700 mm en la parte alta de la isla. En temporada de lluvias e influencia de El Niño, las precipitaciones han llegado a valores de 3000 mm por año. Los eventos históricos más fuertes en la isla se han registrado en los periodos de 1982-1983 y 1997-1998 (Paltán y otros., 2021).

De acuerdo con la World Meteorological Organization (WMO) (2020), se estima que la corriente de ENOS ocurrirá con un 90% de probabilidad durante la segunda mitad del año 2023 y provocará récords de altas temperaturas, motivo por el que las autoridades han mostrado interés en mitigar el impacto del fenómeno en la isla y prevenir consigo sus efectos (Ecuavisa, 2023).

Por lo tanto, este proyecto busca realizar un modelamiento hidrológico en una zona piloto de la isla Santa Cruz mediante el uso de datos de precipitaciones, de topografía y de uso de suelo, para ser procesados como escenarios hidrológicos utilizando los programas Iber y ArcMap. La propuesta intenta identificar aquellas áreas susceptibles al fenómeno de inundación según la cantidad variable de precipitaciones para apoyar a las entidades gubernamentales de la isla a gestionar los planes de prevención y mitigación.

1.2 Descripción del problema

Las islas Galápagos se encuentran influenciada por las corrientes marinas que pasan estacionalmente a su alrededor (Dávalos Suárez, 2021). En la época de lluvias, se observan cambios climáticos como la disminución de la intensidad de los vientos y el aumento de las temperaturas en la superficie del mar, lo que provoca un incremento de las precipitaciones y amenazas diversas, como las inundaciones (Balladares Imbaquingo y otros, 2019; López Andrade, 2021).

Las lluvias intensas afectan al sector agrícola, pesquero, turístico y de transporte debido al taponamiento en las calles, generación de charcos de agua en algunos lugares céntricos de la ciudad y destrucción de carreteras. Estas afectaciones han sido indicativos de malestar en los habitantes y turistas afectando al desarrollo económico de la isla (Expreso, 5 de enero del 2016; El Universo, 22 de abril del 2023).

La carencia de un sistema hídrico, como ríos o canales, es la causa de los problemas en los sectores productores. El agua por naturaleza sigue el curso de las características geomorfológicas, y con la llegada de ENOS y sus fuertes precipitaciones, se crean flujos de escorrentías que generan la formación de encañadas desde la zona alta de la isla, que terminan afectando a las zonas de actividad antrópica y formando lagunas temporales en la parte baja de la cuenca (Caisaguano y otros, 2021).

1.3 Justificación del Problema

Las inundaciones son una de las amenazas más recurrentes en el Ecuador (Mena Benavidas y otros, 2021). El último evento ocurrido en la isla Santa Cruz fue en el 2016 el cual provocó daños en las carreteras y viviendas, a partir de esto las autoridades buscaron la forma de mitigar dicha amenaza (SGR, 2016; CGREG, 2023).

Una forma de mostrar un pronóstico de afectaciones es el modelamiento hidrológico que permite reconocer el área de susceptibilidad a inundación según la variabilidad de la cantidad de precipitaciones debido a la influencia del ENOS. Es importante identificar las áreas susceptibles para poder realizar una mejor planificación en el sector, por medio del modelamiento de inundaciones que permite conocer de forma dinámica el comportamiento de las lluvias y sus posibles variables de cambio (caudal y suelo).

El trabajo se alinea a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): 1 - Fin de la pobreza, promoviendo mecanismos para aumentar la capacidad de planificación y gestión efectivas en relación con el cambio climático y reducir su exposición y vulnerabilidad a los fenómenos extremos relacionados con el clima y a otros desastres económicos, sociales y ambientales; 11 - Ciudades y comunidades sostenibles, reduciendo las muertes y afectaciones provocadas por desastres, principalmente los asociados con el agua; y 13 - Acción por el clima, promoviendo mecanismos para aumentar la capacidad de planificación y gestión efectivas en relación con el cambio climático (ONU, 2015).

De igual forma, el proyecto se alinea a las directrices del Art 389 de la Constitución del Ecuador, el Art 140 del Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD) y la política 7.8 del Objetivo 7 del Plan Nacional de Desarrollo cuales expresan acerca de la gestión de riesgo por parte del Estado y los Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) con el fin de fortalecer las acciones de prevención, mitigación, reconstrucción y mejoramiento ante las consecuencias negativas de los desastres de agua de origen natural o antrópico.

En base a esto, la implementación de este proyecto permitirá apoyar en la elaboración de los mapas y planes de riesgo y en la toma de decisiones preventivas.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar la amenaza a inundación en una cuenca de Santa Cruz, mediante el modelamiento de información hidrológica para su uso en los planes de gestión del GAD cantonal.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Identificar las cuencas hidrológicas de estudio a partir del uso de las herramientas hidrológicas de un software SIG.
2. Relacionar las condiciones de suelo y precipitación en la cuenca de la isla a partir de la clasificación hidrometeorológica.
3. Interpretar las posibles áreas afectadas considerando el escenario extremo en un periodo de retorno mediante software especializado.

Capítulo 2

2.1 Marco conceptual

Modelización hidrodinámica

Los modelos hidrodinámicos permiten representar las características y el comportamiento de un cuerpo hídrico a partir de las capacidades analíticas predictivas, facilitando la evaluación de posibles causas y efectos tanto positivos como negativos que podrían surgir, y desarrollar una resolución en la gestión de problemas (Torres-Bejarano y otros., 2016).

Hidrodinámica en inundaciones

Para analizar los efectos de las lluvias intensas que pueden dar lugar a inundaciones, se emplean modelos tanto unidimensionales como bidimensionales.

Un **modelo unidimensional** para un cauce se representa como una línea con secciones transversales, donde la geometría constituye los puntos de cálculo en el modelo. En contraste, los **modelos bidimensionales** discretizan todo el sistema mediante una malla compuesta por celdas poligonales que representando la topografía y las llanuras de inundación. Esta aproximación permitiendo obtener con mayor exactitud los parámetros tanto del cauce como de las áreas propensas a inundaciones (Bladé Castellet y otros., 2014).

Modelo hidrodinámico bidimensional “Iber”

Iber es un modelo matemático que se utiliza para simular el flujo en ríos y estuarios, empleando una representación bidimensional. Puede ser utilizado en diversos campos como simulación del flujo en lámina libre en cauces naturales, evaluación de zonas inundables, cálculo hidráulico de encauzamientos y más mediante la resolución de

ecuaciones en forma integral por el método de volúmenes finitos en una malla no-estructurada (Bladé y otros., 2014).

2.2 Marco regional

2.2.1 Marco geográfico

Las islas Galápagos se encuentran situadas sobre la línea ecuatorial a 90° de longitud este y ocupa un área marítima de unos 45000 km². Comprende una superficie de unos 8000 km² distribuida entre 15 islas grandes, 215 islotes y numerosas rocas pequeñas. El 93% de la superficie total del archipiélago se concentra en las islas Isabela, Santa Cruz, Fernandina, Santiago y San Cristóbal, siendo Isabela la isla de mayor tamaño con el 58% de la superficie total (CGREG, 2016).

Debido a su origen volcánico y su posición geográfica, las islas presentan altitudes que varían desde los 0 a los 1707 m.s.n.m., siendo esta última registrado como el volcán Wolf en Isabela. El archipiélago está constituido por un entorno frágil en contraste a las dinámicas naturales y humanas continentales siendo así el 97% del archipiélago declarado Parque Nacional y el 3% queda libre para los asentamientos humanos (SENPLADES, 2017).

2.2.2 Marco geológico-tectónico

El origen de formación de las islas se debe a la actividad de una pluma del manto ubicada cerca del margen occidental del archipiélago debajo de la placa tectónica de Nazca (Candra y otros., 2021), donde el material volcánico emerge sobre una plataforma submarina basáltica localizada entre 360 y 900 metros bajo la superficie del Océano Pacífico Oriental marcando el extremo occidental de la asísmica Cordillera de Carnegie (Geist y otros., 1998).

El punto caliente está ubicado cerca del Centro de Expansión de Galápagos (GSC), siendo este el límite de las placas oceánicas de Cocos y Nazca donde se separan a medida

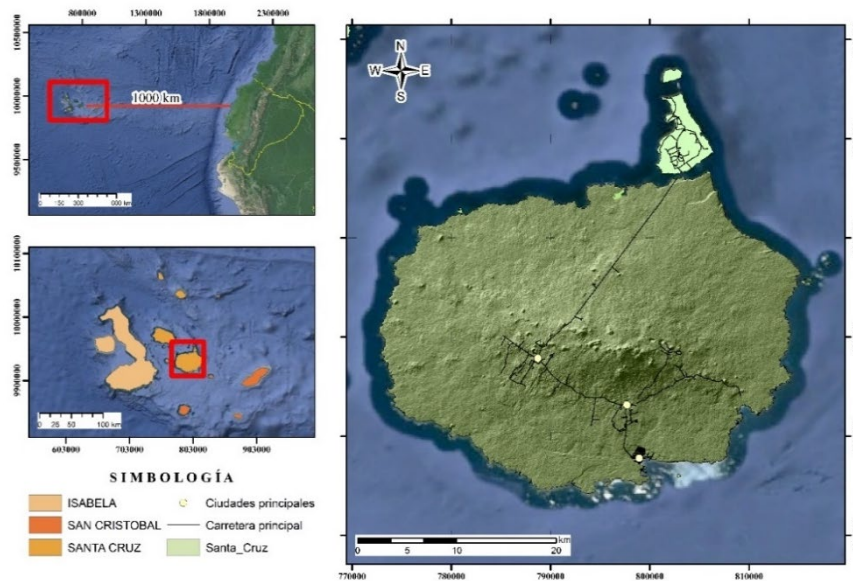
que se forma nuevo material volcánico (Werner y otros., 2003). La Placa de Cocos se mueve hacia el noreste aproximadamente 12 mm/año y la Placa de Nazca se mueve hacia el sureste a aproximadamente 59 mm/año subduciendo cuando los bordes de ambas placas se encuentran con placas continentales, formando fosas en una región de gran actividad sísmica (Durham, 2021).

La fuente del GSC data hace aproximadamente 23 Ma, cuando el crecimiento de una zona de fractura preexistente sobre el punto caliente de Galápagos provocó la ruptura de la Placa Farallón en las placas Cocos y Nazca (Handschumacher, 1976). El punto caliente se encontraba directamente debajo del GSC y contribuyó con magmas simultáneamente a la producción de las crestas Cocos y Carnegie (Werner y otros., 2003). Sin embargo, desde la ruptura de placas, el GSC está en constante movimiento manteniendo una relación con respecto al hotspot.

Aproximadamente entre dos y tres millones de años, el centro de expansión se desplazó hasta 100 km de distancia, pero se mantenía lo suficientemente cerca del punto caliente para recibir la mayor parte de la columna del flujo de magma (Durham, 2021). Debido al vulcanismo del punto caliente combinado con el movimiento hacia el este de la Placa de Nazca, las islas más occidentales, situadas más cerca del punto caliente, son más jóvenes y se caracterizan por tener volcanes más activos en comparación con las islas orientales más antiguas (Candra y otros., 2021).

Figura 2

Mapa de ubicación de la isla Santa Cruz – Galápagos



2.3.2 Marco volcanológico

La isla Santa Cruz es un volcán en escudo elíptico de 992 km² que presenta una amplia plataforma costera de baja elevación que se inclina gradualmente hasta llegar al área de la cumbre donde predomina una alineación de conos volcánicos a lo largo de fallas normales de E-O alcanzando una altitud de 950 m.s.n.m (Auken y otros., 2009; Stoops y otros., 2022).

Santa Cruz emergió aproximadamente hace 2 Ma y está formada por un núcleo de sedimentos marinos, que incluyen hialoclastitas y calizas fosilíferas de la Serie Plataforma, cubiertos por corrientes de lava basáltica de la Serie Escudo definiendo la estratigrafía volcánica de la isla (Stoops, 2014; Schwartz y otros., 2022).

La Serie de Plataformas data una edad aproximadamente de 1,3 Ma. (Geist y otros., 2011) y consta de lavas expuestas principalmente a lo largo de la costa noreste de Santa Cruz, así como de las Islas Baltra y Seymour, que son restos fallados de Santa Cruz (Bow, 1979).

Las lavas de la Serie Escudo datan una edad aproximadamente de 590 ± 270 ka y 24 ± 11 ka (Geist y otros., 2011), son flujos pahoehoe tanto subaéreos como submarinos, espesos (~ 10 m), y muchos están intercalados con playas y depósitos de aguas poco profundas (Bow, 1979 en Wilson y otros., 2022).

Una serie de escarpes de falla orientados aproximadamente de este a oeste (los llamados “barrancos”) se encuentran al norte de Puerto Ayora. En estos barrancos, y en varios cráteres de colapso, como Los Gemelos, no se observó formación de suelo ni meteorización entre sucesivas coladas de lava, lo que indica que el intervalo entre las erupciones fue demasiado corto o que las condiciones climáticas no eran las adecuadas para tales procesos (Stoops, 2014).

Al contar de una forma de placa invertida, la isla cuenta con pendientes suaves ($5-10^\circ$) en las zonas superiores, pendientes pronunciadas a muy pronunciadas ($15-25^\circ$) en las zonas medias y pendientes suaves (2°) en las zonas basales (Alomía Herrera y otros., 2022).

2.3.3 Condiciones climáticas

El clima de las islas está muy influenciado por las corrientes marinas y vientos alisios del sureste, dando lugar a dos estaciones principales: una temporada húmeda/cálida de enero a mayo y una seca/fría de junio a diciembre (Candra y otros., 2023). Sin embargo, las condiciones climáticas locales están fuertemente influenciadas por la topografía (Stoops y otros., 2022).

Con respecto al régimen de las precipitaciones, las secciones altas, ubicadas por encima de los 200 m.s.n.m., reciben >400 mm de precipitación anual, mientras que las tierras bajas, una precipitación de 200 mm en la estación cálida; durante la estación fría, las precipitaciones son menores a estas cantidades (Lasso y Espinosa, 2018).

Según Stoops (2022), en Santa Cruz, las tierras altas y las laderas superiores del sur están continuamente húmedas debido a las lluvias durante la estación cálida y a una llovizna continúa causada por la formación de nubes en el aire húmedo ascendente durante la estación fría.

La zona costera y la vertiente norte reciben precipitaciones únicamente durante la temporada de lluvias dado que es una zona seca (precipitación media anual de 464 mm/año), con períodos de 103 días consecutivos sin precipitaciones, no obstante, se puede llegar a dar lluvias torrenciales con hasta 194,6 mm en un día (Stoops, 2014; Lasso y Espinosa, 2018).

Según las isoyetas desarrolladas por Trueman y d'Ozouville (2010) para la isla Santa Cruz, la precipitación media anual en las tierras bajas secas se puede estimar entre 100 a 500 mm y las tierras altas húmedas hasta 1600 mm.

2.3.3.1 Fenómeno de “El Niño”

La oscilación de la Corriente de Humboldt tiene dos extremos, conocidos como El Niño y La Niña, que afectan periódicamente el clima de las islas. El Niño puede aparecer a partir de diciembre al aumentar la temperatura y las precipitaciones, mientras que La Niña reduce significativamente los mismos parámetros climáticos (Trueman y d'Ozouville, 2010).

La relevancia de la corriente de Humboldt se manifiesta en precipitaciones intensas y concentradas entre enero y marzo, aunque pueden extenderse de diciembre a julio. En condiciones normales, los promedios anuales de lluvia oscilan entre 250 y 500 mm. Sin embargo, durante situaciones anormales como el fenómeno de El Niño (por ejemplo, 1997-1998), las lluvias pueden superar los 1200 mm. A su vez, se generan lloviznas muy finas llamadas garua, permanente y constante entre junio y noviembre cubriendo solo a las zonas altas con mayores precipitaciones (Freire, 2017).

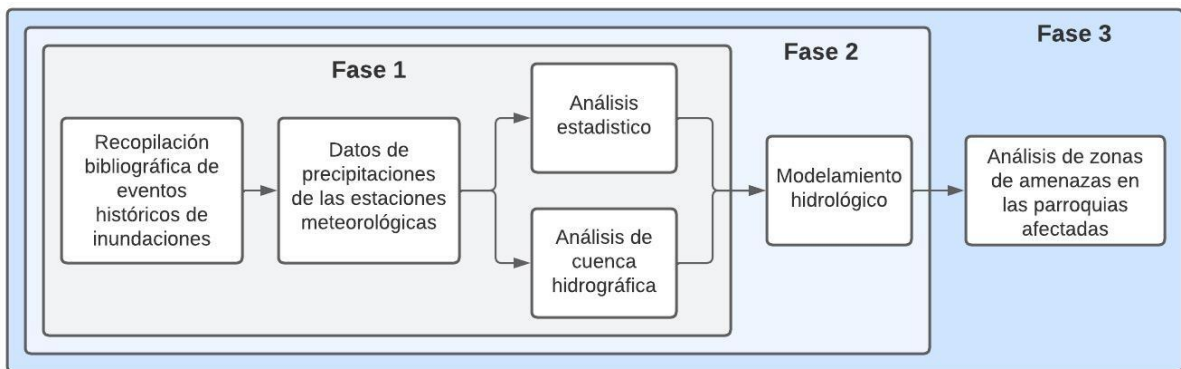
Capítulo 3

3.1 Metodología

La metodología desarrollada tiene un enfoque cuantitativo y se cumple en 3 fases: (i) Análisis estadístico e hidrológico de los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas; (ii) Modelamiento hidrológico de la cuenca de estudio; y (iii) Análisis de zonas de amenazas en las parroquias afectadas. En la Figura 3 se pueden apreciar cada uno de los componentes de cada fase.

Figura 3

Esquema metodológico del proyecto



Fase 1: Análisis estadístico e hidrológico de los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas

Comprende desde la búsqueda de eventos de inundaciones, la correlación con los datos de precipitaciones registrados en las estaciones meteorológicas respectivas y el análisis de estos a través de procesos estadísticos. En la identificación de los sectores y área de amenaza, se hizo un análisis hidrológico de las cuencas de la isla para comprender el desplazamiento del flujo del agua y la dirección de su cauce.

Recopilación bibliográfica de eventos históricos de inundaciones

Se llevó a cabo la selección de material bibliográfico sobre inundaciones ocasionadas por el fenómeno de El niño en la isla Santa Cruz mediante la exploración de fuentes primarias y secundarias como Google Scholar, Scopus y revistas de divulgación científica. Se consideró

la búsqueda de términos claves como: “hidrología”, “inundaciones”, “Eventos históricos”, “Santa Cruz”, “Fenómeno de El Niño”.

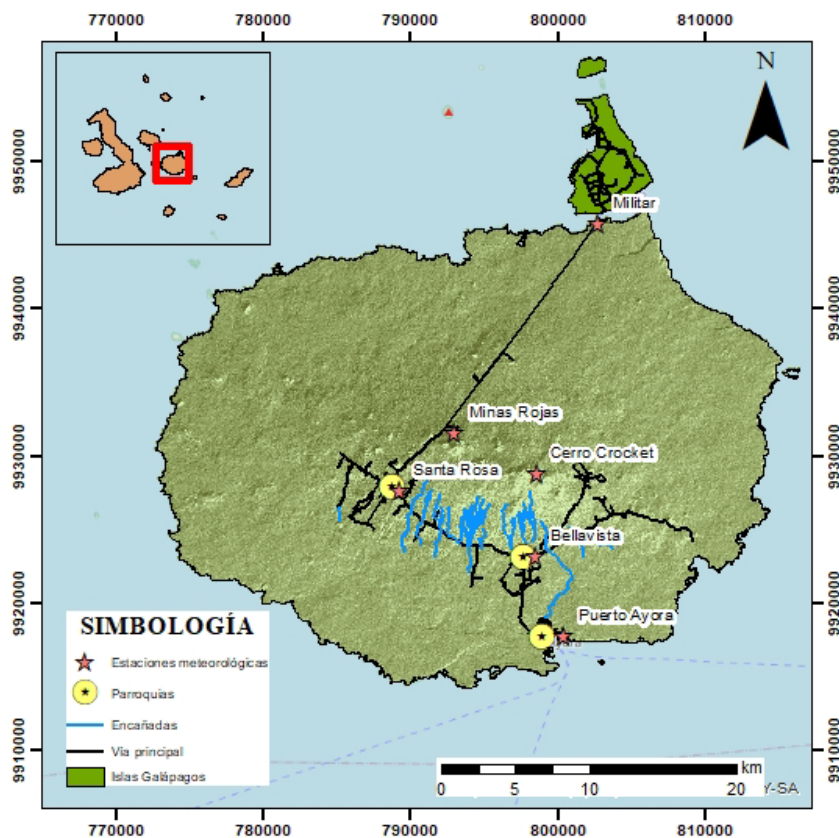
Datos de precipitaciones de las estaciones meteorológicas

Se realizó la búsqueda de datos meteorológicos en las estaciones mediante la página de acceso libre de la fundación Charles Darwin donde se obtuvo información de las estaciones Militar, Mina Roja, Santa Rosa, Cerro Crocket, Bellavista y Puerto Ayora. En la Figura 4 se puede apreciar la ubicación de cada una de las estaciones hábiles en la isla.

Para el desarrollo del proyecto se utilizaron los datos de las estaciones de Puerto Ayora y Bellavista, pues existe información desde 1964 y 1987 hasta 2019, en contraste con las otras estaciones que disponen del último año 2022-2023.

Figura 4

Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas



Análisis estadístico

Uno de los parámetros necesarios para el desarrollo del modelamiento es el valor de caudal. No obstante, en la isla y en las estaciones meteorológicas, se cuenta con registros históricos de precipitaciones. Por lo tanto, mediante procesos estadísticos se decidió determinar tiempo de retorno, cálculo de precipitación neta y el caudal promedio mediante el método racional para generar el hidrograma.

Periodo de retorno

El tiempo es uno de los factores independientes del proyecto, sin embargo, es posible conocer un tiempo de recurrencia de un evento en condiciones extremas. Al basarse en los eventos de inundación, el periodo de retorno se expresa como el inverso de la probabilidad. Uno de los métodos a analizar es la distribución de Gumbel.

Distribución de Gumbel

La distribución de Gumbel se utiliza para el estudio de los valores extremos donde mediante la fórmula 3.1 se puede calcular la frecuencia que presentara cierto caudal o precipitación.

$$F(x) = e^{-e^{-b}} \quad (3.1)$$

Donde b es representado por la fórmula 3.2 que contienen los factores α y u representadas en las ecuaciones 3.3 y 3.4 respectivamente:

$$b = \alpha(x - u) \quad (3.2) \quad \alpha = \frac{S_x}{\sigma_y} \quad (3.3) \quad u = \bar{x} - \frac{\mu_y}{\alpha} \quad (3.4)$$

$F(x)$ = Probabilidad de que se presente un valor igual o menor que x

e = base de los logaritmos neperianos

\bar{x} = media aritmética de la muestra

S_x = desviación estándar de la muestra

σ_y, μ_y = media y desviación típica respectivamente que dependen del número de datos.

Para el último parámetro, se cuenta con la Tabla 1.

Tabla 1

Valores de media y desviación típica con relación al número de datos

# de datos	μ_y	σ_y	# de datos	μ_y	σ_y
10	0,4952	0,9496	55	0,5504	1,1682
15	0,5128	1,0206	60	0,5521	1,1747
20	0,5236	1,0628	65	0,5535	1,1803
25	0,5309	1,0914	70	0,5548	1,1854
30	0,5362	1,1124	75	0,5559	1,1898
35	0,5403	1,1285	80	0,5569	1,1938
40	0,5436	1,1413	85	0,5578	1,1974
45	0,5463	1,1518	90	0,5586	1,2007
50	0,5485	1,1607	95	0,5593	1,2037
			100	0,5600	1,2065

Nota: Tabla tomada del libro Hidrología Hidrogeología de Francisco Sánchez (2013).

En caso de conocer que caudal o precipitación se producirá cada x años, se debe despejar la variable x mediante las ecuaciones 3.5 y 3.6.

$$b = -\ln(-\ln(F(x))) \quad (3.5) \qquad x = \left(\frac{b}{\alpha}\right) + u \quad (3.6)$$

Precipitación neta

En un pluviómetro se lleva el registro de la cantidad de precipitaciones ocurridas por día o por determinada unidad de tiempo. Para conocer la cantidad de lluvia que resultará en escorrentía, se realizó el cálculo de la precipitación neta. Este cálculo permite identificar cuánta agua de lluvia generará escorrentía superficial, tomando en consideración las características del suelo. La cantidad de lluvia que no genera escorrentía queda como retención superficial o infiltración.

Para la implementación de este método, se cuenta con una base de datos de 12000 registros de precipitaciones en Bellavista y con 22000 registros de precipitaciones en Pto. Ayora.

Los pasos por seguir para el cálculo de un hietograma completo son:

1. **Cálculo del umbral de escorrentía (P_0):** Es un dato que genera en relación con el uso de la superficie (bosque, cultivo, etc.), de la pendiente y del tipo de suelo (de más arenoso y permeable a de más arcilloso e impermeable). Ver la Tabla 2.
2. A partir de los datos de precipitación, se **calculó de la P acumulada ($\sum P$)** donde se suma el valor de la precipitación más el anterior.
3. **Cálculo de P neta acumulada:** Si es menor que la absorción ($\sum P < P_0$), la precipitación neta es 0. Si la supera la abstracción inicial ($\sum P > P_0$), se aplica la fórmula 3.7:

$$\sum P_n = \frac{(\sum P - P_0)^2}{\sum P + 4P_0} \quad (3.7)$$

4. **Cálculo de P neta:** Una vez calculada la P neta acumulada, se procede a desacumular los datos restando cada valor de la columna con el anterior.

Método racional

El método racional es un método matemático-estadístico originario de España que representa la aproximación más sencilla para estimar el caudal resultante de una precipitación en una cuenca (Sánchez, 2013). El objetivo es calcular el caudal para el diseño de proyectos, como en el caso del modelado de inundaciones.

Se empleó el método racional desarrollado por Mulvaney (1850) cuya propuesta se basa que a partir del área de una cuenca $[A]$ con un tiempo de concentración $[tc]$, y esta se ve

influenciada por la presencia de lluvia [P], el caudal generado en el punto de salida será el máximo que estará aportando toda la cuenca.

Corrección de la precipitación diaria

La corrección de la precipitación diaria requiere la disponibilidad de la precipitación máxima para el periodo de retorno seleccionado. Este cálculo se realiza utilizando una extensa serie de precipitaciones máximas, que corresponde al día de mayor caudal en cada año.

Es necesario considerar que la corrección de la precipitación diaria se aplica a cuencas que superan 1 km². Se emplea el factor reductor definido por la ecuación 3.8 para compensar la variabilidad de la precipitación en grandes cuencas, reconociendo que no puede ser uniforme en toda su extensión.

$$K_A = \frac{\log A}{15} \quad (3.8)$$

Donde:

A = superficie [km²]

Por ello, la precipitación diaria disponible se la calcula mediante la fórmula 3.9:

$$P_{ac} = P_a \cdot K_A \quad (3.9)$$

Donde:

P_{ac} = Precipitación anual corregida

P_a = Precipitación anual máxima calculada para el periodo de retorno

K_A = Factor reductor (3.8)

Intensidad media anual

Parámetro para conocer la cantidad de agua presente en relación a un año mediante la ecuación 3.10:

$$I_a = \frac{P_{ac}}{365} \quad (3.10)$$

Donde:

I_a = Intensidad anual [mm/año]

P_{ac} = Precipitación anual corregida [mm] (3.9)

Tiempo de concentración

Uno de los parámetros a calcular en el tiempo es la pendiente, el mismo que se evalúa mediante la siguiente fórmula:

$$m = \frac{(m_{m\acute{a}x} - m_{m\acute{i}n})}{L} \quad (3.11)$$

Donde:

m = pendiente media [m/m]

$m_{m\acute{a}x}$ = cota máxima

$m_{m\acute{i}n}$ = cota mínima

L = longitud de cauce [m]

La longitud del cauce se refiere a la distancia más larga desde el punto más alejado del desagüe hasta dicho punto de desembocadura.

El tiempo se evalúa mediante:

$$t_c = 0.3 * \frac{L^{0.76}}{m^{0.19}} \quad (3.12)$$

t_c = tiempo de concentración [años]

m = pendiente media [m/m] (3.11)

L = longitud de cauce [km]

Cálculo de la intensidad para un tiempo igual al tiempo de concentración

Permite conocer la cantidad de agua en relación a la intensidad anual considerando la pendiente y longitud del cauce en el periodo de retorno a través de la ecuación 3.13:

$$I_t = I_a * \left(\frac{I_l}{I_a} \right)^{3.5287 - 2.5287 * t^{0.1}} \quad (3.13)$$

Donde:

I_t = Intensidad media en el periodo t

I_l = Intensidad en el año más lluvioso dentro del periodo t

I_a = Intensidad media anual (3.10)

t = periodo de retorno [años].

Evaluación del umbral de escorrentía

Se calcula mediante la ecuación 3.14 tomando en consideración características del suelo:

$$P_o = P_o \text{ inicial} * \beta \quad (3.14)$$

El valor $P_o \text{ inicial}$ se obtiene a partir de tablas según el uso del suelo (tipo de cultivo, bosque, etc.), pendiente y tipo de suelo.

Tabla 2*Valor inicial del umbral de escorrentía Po inicial [mm]*

Código	Uso del suelo	Practica de cultivo	Pendiente	Grupo de suelo			
				A	B	C	D
12100	Granjas agrícolas			24	14	8	6
24222	Mosaico de cultivos permanentes en regadío		≥ 3	80	34	19	14
24222	Mosaico de cultivos permanentes en regadío		< 3	95	42	22	15
24223	Mosaico de cultivos anuales con cultivos permanentes en regadío		≥ 3	75	33	18	14
24223	Mosaico de cultivos anuales con cultivos permanentes en regadío		< 3	106	48	22	15
24320	Mosaico de cultivos agrícolas en regadío con espacios significativos de vegetación natural y seminatural	R	≥ 3	37	20	12	9
24320	Mosaico de cultivos agrícolas en regadío con espacios significativos de vegetación natural y seminatural	N	≥ 3	42	23	14	11
24320	Mosaico de cultivos agrícolas en regadío con espacios significativos de vegetación natural y seminatural	R/N	< 3	47	25	16	13
24400	Sistemas agroforestales		≥ 3	53	23	14	9
24400	Sistemas agroforestales		< 3	80	35	17	10
32100	Formaciones herbáceas de llanuras aluviales inundadas y llanuras costeras, tierras bajas		≥ 3	70	33	18	13
32100	Formaciones herbáceas de llanuras aluviales inundadas y llanuras costeras, tierras bajas		< 3	120	55	22	14

Nota: Tabla tomada del Boletín oficial del Estado (2016).

En la Tabla 2, los tipos A, B, C y D corresponden a la infiltración rápida, media, lenta y muy lenta respectivamente, siendo de suelos arenosos a arcillosos. Las siglas R o N indican, en el caso de cultivos con pendiente >3%, la orientación de los surcos: perpendiculares o paralelos a las curvas de nivel. El umbral de escorrentía es mayor cuando los surcos son perpendiculares a la máxima pendiente.

El coeficiente corrector (β) se calcula de acuerdo a la región y el periodo de retorno mediante la ecuación 3.15:

$$\beta = \beta_m * F_T \quad (3.15)$$

Se calcula con la Tabla 3 donde se ha seleccionado la región 61 que las condiciones de origen y suelo son similares a las de Santa Cruz, por ello se optó usar esos valores.

Tabla 3

Coeficiente corrector del umbral de escorrentía: valores correspondientes a calibraciones regionales

Región	Valores medio, β_m	Desviación respecto al valor medio para el intervalo de confianza			Periodo de retorno T [años], F_T				
		50%	67%	90%	2	5	25	100	500
		$\Delta 50$	$\Delta 67$	$\Delta 90$					
61	2,00	0,25	0,35	0,60	0,77	0,91	1,10	1,18	1,17

Nota: Tabla tomada del Boletín oficial del Estado (2016).

Si se trata de un drenaje transversal de una carretera, hay que considerar el valor $\Delta 50$ correspondiente.

Cálculo del coeficiente de escorrentía

Si $P_{ac} > P_0$ se calcula mediante la fórmula 3.16:

$$C = \frac{\left(\frac{P_{ac}}{P_0} - 1\right) * \left(\frac{P_{ac}}{P_0} + 23\right)}{\left(\frac{P_{ac}}{P_0} + 11\right)^2} \quad (3.16)$$

Siendo:

C = Coeficiente de escorrentía

P_{ac} = Precipitación anual corregida [mm] (3.9)

P_0 = Umbral de escorrentía [mm] (3.14)

Si $P_{ac} < P_0$, el coeficiente $C = 0$, debido que, la precipitación se infiltro o se retuvo por vegetación o el tipo de suelo.

Cálculo del coeficiente de uniformidad

En cuencas grandes, resulta más desafiante mantener la homogeneidad de la intensidad de la precipitación a lo largo del tiempo de concentración. Para ello se aplicó el siguiente coeficiente en la ecuación 3.17:

$$K_t = 1 + \frac{t_c^{1.25}}{t_c^{1.25} + 14} \quad (3.17)$$

Donde:

K_t = Coeficiente de uniformidad de acuerdo al tiempo de concentración

t_c = tiempo de concentración de la cuenca [años] (3.12)

Cálculo del caudal

Se aplicó el método racional, incluyendo el factor K_t calculado con la ecuación 3.18:

$$Q = \frac{C * I_t * A * K_t}{3.6} \quad (3.18)$$

Donde:

Q = caudal [$m^3/año$]

C = coeficiente de escorrentía (3.16)

I_t = intensidad de la precipitación [$mm/año$] (3.13)

A = superficie de la cuenca [km^2]

K_t = Coeficiente de uniformidad temporal (3.17)

Hidrograma triangular SCS

Esquemmatizando un hidrograma como un triángulo, se utilizó las expresiones 3.19, 3.20 y 3.21 para desarrollar:

Tiempo de la punta

$$t_p = 0.5 * D + 0.6 * t_c \quad (3.19)$$

t_p : tiempo de la punta [años]

D : Duración de la precipitación neta [años]

t_c : tiempo de concentración [años]

Tiempo base

$$t_b = 2.67 * t_p \quad (3.20)$$

t_b : tiempo base [años]

t_p : tiempo de la punta [años]

Caudal de la punta

$$Q_p = \frac{P * A}{1.8 * t_b} \quad (3.21)$$

Q_p : Caudal de la punta [$m^3/años$]

P : Precipitación neta [mm]

A: Superficie de la cuenca [km^2]

t_b : tiempo base [años]

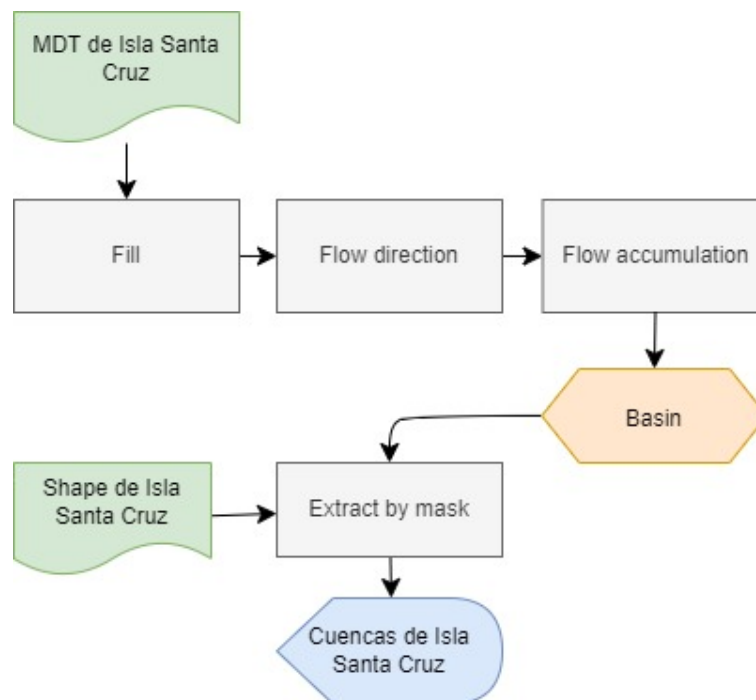
Análisis hidrológico

El sistema de drenaje es el principal componente en el área hidrológica y uno de los factores de estudios ante la amenaza de inundación. A partir de este se puede conocer las cuencas hidrológicas existentes en la zona de estudio y su vez, escoger aquella cuenca que abarca las poblaciones más afectadas.

Para el análisis hidrológico, se implementó las herramientas hidrológicas de un software GIS que se aprecia en el diagrama de flujo de la Figura 5. Además, se parte de los insumos obtenidos del geoportal del IGM – Cartografía de Libre acceso a escala 1:50000 y un MDT extraído del Landviewer en una resolución de 4,7 x 4,7 m.

Figura 5

Diagrama de flujo del proceso de delimitación de cuenca usando herramientas del software GIS.



Fase 2: Modelamiento hidrodinámico de la cuenca de estudio

Comprende el uso de los resultados del análisis estadístico e hidrológico para procesarlos mediante el software Iber.

Iber es un software hidrológico que se caracteriza por constar de dos secciones: el pre-proceso, que comprende el ingreso de datos al software, y el post-proceso, que implica el modelamiento a partir de dichos datos.

Pre-proceso

RTIN – Generación de la malla

IBER utiliza una malla de cálculo, compuesta por formas de triángulos y/o cuadriláteros, cual puede ser generada en los siguientes tipos:

- Estructuradas y no estructuradas
- Triangulares de forma irregular creadas por error cordal
- En forma de triángulos rectángulos o RTIN (Rectangular Triangular Irregular Network)
- Regulares con la totalidad de puntos de un modelo de terreno digital (MDT).
- Importadas en formato .2dm

Para el proyecto, se utilizó una malla RTIN debido que se adapta a la compleja morfología de los cauces y para ello se necesita que el MDT se encuentre en formato ASCII. El modelo de elevación posee un tamaño de píxel de 4,7 m x 4,7 m, una de las consideraciones a considerar para la generación de malla en los parámetros de tolerancia, máximo y mínimo.

Condiciones de contorno

Condiciones de contorno de entrada

Para asignar un determinado caudal al flujo de entrada de las encañadas se consideró la posibilidad de asignar un caudal total, un caudal específico (caudal por unidad de ancho), o una cota de agua, de tal manera que en cualquiera de los casos seleccionados era necesario introducir los parámetros requeridos, los cuales dependerán de si el régimen del fluido de entrada es crítico/subcrítico, o supercrítico.

Condiciones de contorno de salida

Las condiciones de salida que se utilizaron corresponden a un comportamiento subcrítico al flujo en la malla de la isla, cual los parámetros responden al comportamiento del flujo aguas abajo en el tramo final.

Rugosidad – Coeficiente de manning

Para IBER, el coeficiente de Manning desempeña un papel crucial al determinar la resistencia al flujo. El programa requiere un archivo en formato ASCII que contenga información sobre el uso del suelo, junto con los valores correspondientes del coeficiente de rugosidad según la Tabla 4. Además, es necesario de un archivo CSV con el mismo nombre, que proporcione detalles sobre los tipos de suelos utilizados y mantenga una estructura similar a la base de datos utilizada por IBER.

Tabla 4*Valores del coeficiente de rugosidad n*

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
D-2. Planicies de inundación			
a. Pastizales, sin matorrales			
1. Pasto corto	0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto	0.030	0.035	0.050
b. Áreas cultivadas			
1. Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
2. Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
c. Matorrales			
1. Dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
3. Pocos matorrales y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
4. Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
5. Matorrales medios a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
d. Árboles			
1. Sauces densos, rectos y en verano	0.110	0.150	0.200
2. Terreno limpio, con troncos sin retoños	0.030	0.040	0.050
3. Igual que el anterior pero gran cantidad de retoños	0.050	0.060	0.080
4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo de las ramas.	0.080	0.100	0.120
5. Igual que el anterior, pero con nivel creciente por encima de las ramas.	0.100	0.120	0.160

Nota: Tabla tomada del Libro de Ven Te Chow (1994).

Condiciones iniciales

Representa las condiciones que tiene el dominio al momento de iniciar la modelación, en este caso, la asignación de cota de agua o calado a la superficie de control. Para evaluar las zonas inundables del área de estudio se supuso que la superficie de la isla es cero, para evitar errores porque no existen datos de calado y velocidades en las encañadas de la isla.

Post-proceso

El postproceso cumple la función de visualizar los resultados de la simulación bidimensional de manera gráfica, representando la información con escalas de colores. Estos resultados pueden ser analizados en términos de características hidráulicas, como el caudal, la velocidad y las cotas del agua en cada instante del tiempo. Además, se pueden presentar de manera suavizada o como vectores para una comprensión más detallada.

Fase 3: Análisis de zonas de amenaza en las parroquias afectadas

Comprende de la identificación de las áreas afectadas por la amenaza de inundación a raíz del resultado de modelamiento y del análisis hidrológico manteniendo como relación primordial las poblaciones afectadas como Bellavista y Puerto Ayora.

Capítulo 4

4.1 Resultados y análisis

Fase 1: Análisis estadístico e hidrológico de los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas

Recopilación bibliográfica y datos de precipitaciones

Según la búsqueda bibliográfica, se identificaron dos eventos históricos de gran impacto ambiental-social: 1982-1983 y 1997-1998, donde las zonas más afectadas fueron las parroquias de Santa Rosa, Bellavista y Puerto Ayora.

En relación con los datos obtenidos en las estaciones meteorológicas y clasificándolas a los episodios de la Niña y el Niño, se evidencia en las figuras 6 y 7 como se relacionan con los eventos históricos al presentar altas tasas de precipitaciones para los años de 1982 y 1998 para Puerto Ayora y Bellavista.

Figura 6

Precipitaciones en Bellavista en los diferentes episodios

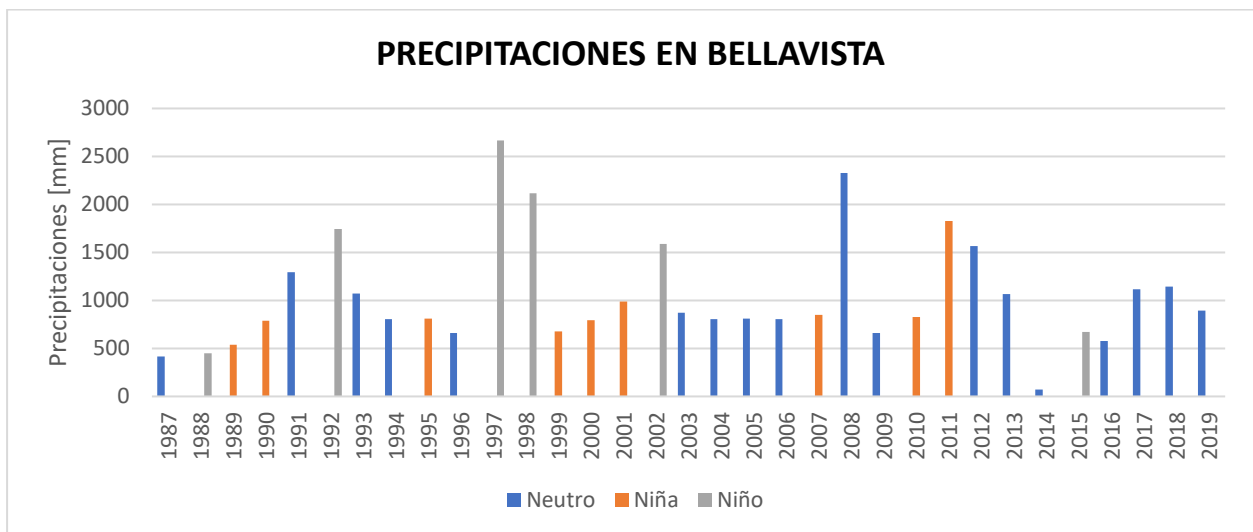
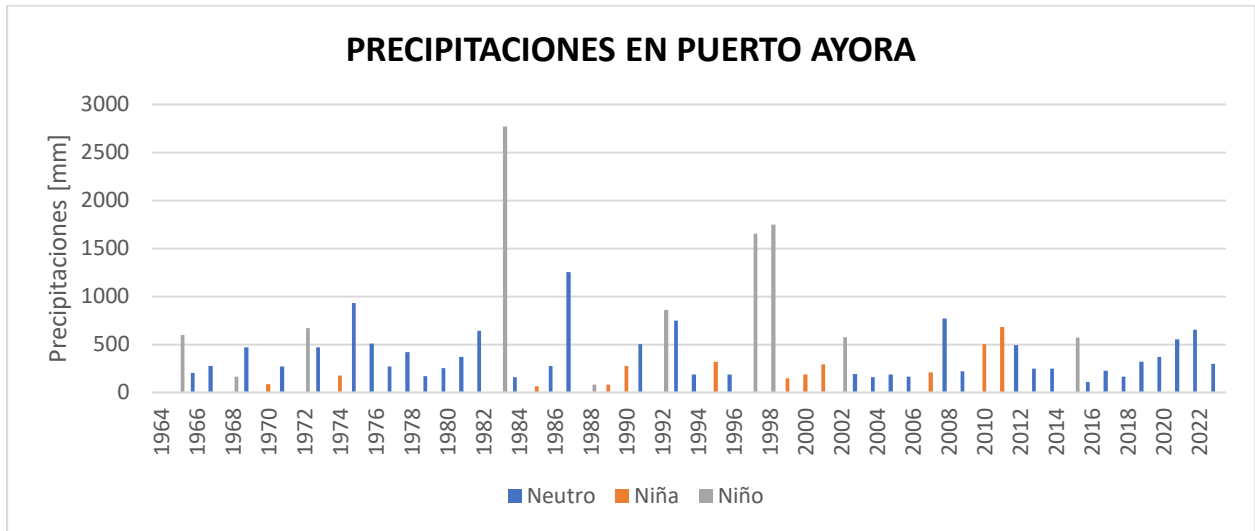


Figura 7

Precipitaciones en Puerto Ayora en los diferentes episodios



Análisis estadístico

Periodo de retorno

Se calculó el periodo de retorno en los años 5, 10, 25, 50 y 75 con el fin de conocer la probabilidad máxima de recurrencia y a que valor de precipitación traspasa a valores extremos. En las tablas 5 y 6 se muestran los resultados obtenidos.

Aunque el ENOS no mantiene un rango de recurrencia estable, se sabe que en las islas se ha presentado entre los 3 y 7 años. Por ello, se consideró un periodo de retorno de 10 años, en donde se obtuvo que la probabilidad para que las precipitaciones sean mayores a 11 mm y 17 mm en Puerto ayora y Bellavista respectivamente, es del 90% de ocurrencia.

Tabla 5

Relación entre los periodos de retorno en Bellavista

Probabilidad de que sea mayor que x					
Periodo [años]	1-F(x)	F(x)	%	b	x [mm]
5	0.2	0.8	80	1.500	11.013
10	0.1	0.9	90	2.250	17.361
25	0.04	0.96	96	3.199	25.380
50	0.02	0.98	98	3.902	31.330

75	0.013	0.987	98.667	4.311	34.788
----	-------	-------	--------	-------	--------

Tabla 6

Relación entre los periodos de retorno en Puerto Ayora

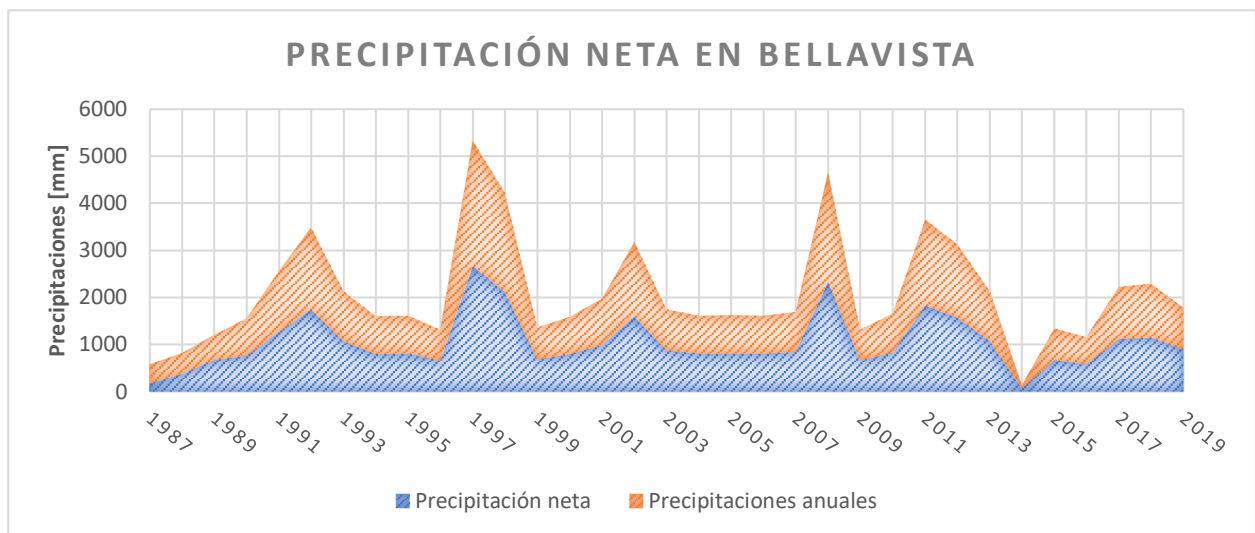
Probabilidad de que sea mayor que x					
Periodo [años]	1-F(x)	F(x)	%	b	x [mm]
5	0.2	0.8	80	1.500	6.807
10	0.1	0.9	90	2.250	11.205
25	0.04	0.96	96	3.199	16.763
50	0.02	0.98	98	3.902	20.886
75	0.0133	0.987	98.667	4.311	23.283

Precipitación neta

En Bellavista, se analizaron 33 años de datos registrados en la estación hidrológica del mismo nombre. Utilizando los datos de precipitaciones anuales (naranja), se calculó la cantidad de precipitaciones en escorrentía (azul). La diferencia entre estas áreas reveló la cantidad de agua absorbida o retenida. La Figura 8 ilustra las diversas zonas de lluvia.

Figura 8

Relación entre las precipitaciones anuales y la precipitación neta en Bellavista

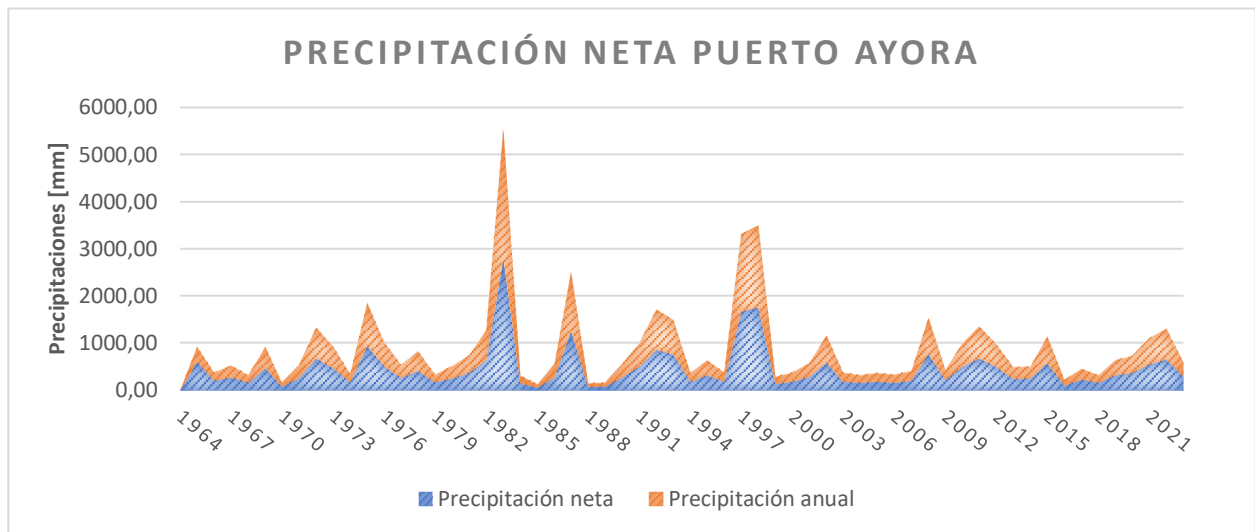


Referente a Puerto Ayora, se procesó datos de 60 años de registros en la estación del mismo nombre. Asimismo, se identificó la diferencia entre el total de las precipitaciones anuales y las precipitaciones en escorrentía obteniendo valores de la cantidad de agua absorbida o en retención visualizado en la Figura 9.

En contraste con la estación de Bellavista, se aprecia que la diferencia entre las precipitaciones anuales con las de escorrentía es menor, lo que nos da indicativo acerca de la retención de agua en factores como el suelo, vegetación o infiltraciones.

Figura 9

Relación entre las precipitaciones anuales y la precipitación neta en Puerto Ayora



Método racional

Se calculó el caudal promedio considerando de todas las precipitaciones anuales registradas en la estación Bellavista, obteniendo un valor de $405.70 \text{ m}^3/\text{año}$. En la Tabla 7 se detallan los parámetros esenciales para la obtención del caudal, resaltando la cantidad de precipitación de entrada de 425.36 mm .

Tabla 7.*Resultado del método racional y sus factores en Bellavista*

Abreviatura	Descripción	Unidades	Valores
Pac	Precipitación anual corregida	mm	425.36
Ia	Intensidad media anual	mm/año	17.72
tc	tiempo de concentración	años	1.04
It	Intensidad media en el periodo t	mm/año	28.48
Po	Umbral de escorrentía	mm	70.58
C	Coefficiente de escorrentía		0.50
Kt	Coefficiente de uniformidad temporal		1.07
Q ₀	Caudal medio	m ³ /año	405.70

Para la estación de Puerto Ayora, se determinó un caudal promedio de 207.48 m³/año. De igual forma, en la Tabla 8 se aprecian los parámetros relevantes, destacando los 270.84 mm de precipitaciones de entrada. En contraste con los valores de Bellavista, se observa que Puerto Ayora presenta la mitad del caudal observado en la zona alta, lo cual puede atribuirse a la cantidad máxima de precipitación anual que recibe cada ciudad.

Tabla 8.*Resultado del método racional y sus factores en Puerto Ayora*

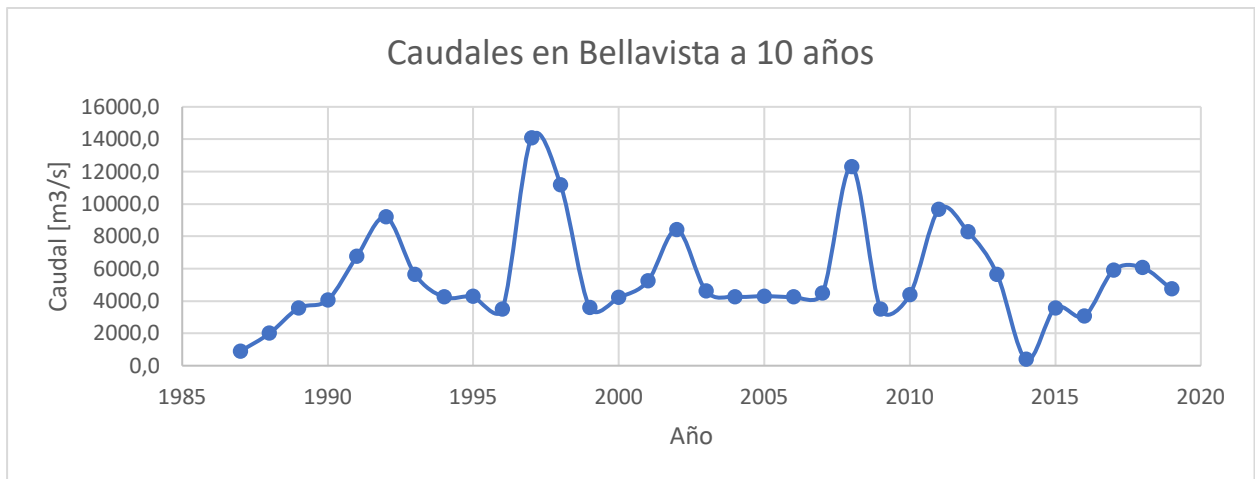
Abreviatura	Descripción	Unidades	Valores
Pac	Precipitación anual corregida	mm	270.84
Ia	Intensidad media anual	mm/año	11.29
tc	tiempo de concentración	años	1.04
It	Intensidad media en el periodo t	mm/año	21.19
Po	Umbral de escorrentía	mm	70.58
C	Coefficiente de escorrentía		0.35
Kt	Coefficiente de uniformidad temporal		1.07
Q ₀	Caudal medio	m ³ /año	207.48

Hidrograma triangular

A partir de los datos de precipitación neta y mediante el cálculo del tiempo base en relación con el periodo de retorno, se pudo obtener el hidrograma de caudales de Bellavista que se refleja en la Figura 10 donde asemeja a la tendencia de las precipitaciones.

Figura 10.

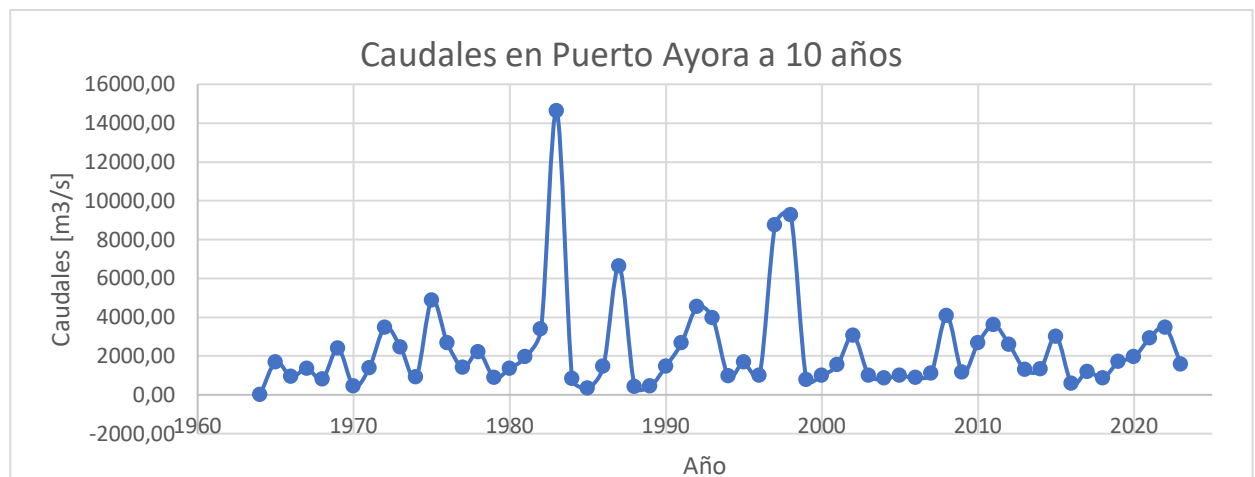
Caudales en Bellavista a 10 años



Asimismo, utilizando la información de precipitación neta y tomando el periodo de retorno, se generó el hidrograma de caudales para Puerto Ayora, visible en la Figura 11. Este hidrograma exhibe una tendencia similar a las precipitaciones anuales, coincidiendo con el patrón observado en Bellavista.

Figura 11.

Caudales en Puerto Ayora a 10 años



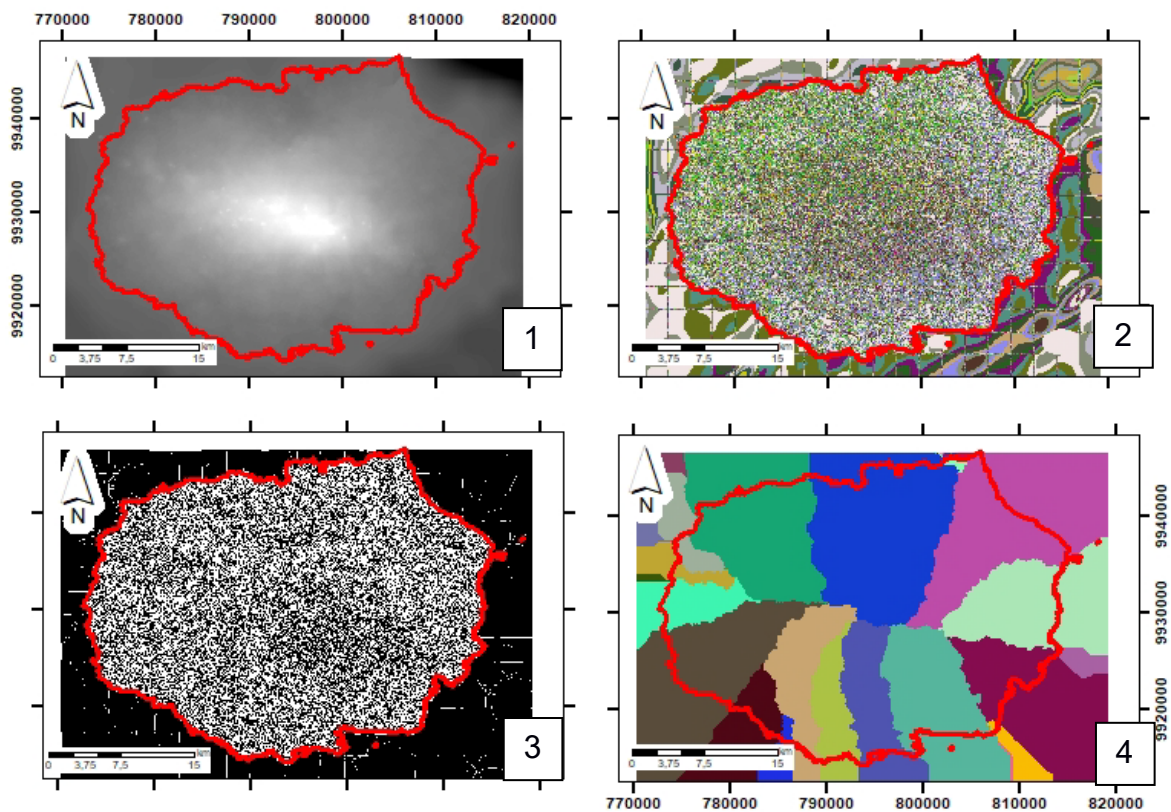
Análisis hidrológico

Con base en un MDT a una resolución de 4,7 m x 4,7 m y al procesamiento con herramientas hidrológicas del software ArcMap (Figura 12), se obtuvo el mapa de cuencas de la Isla Santa Cruz que muestra 18 cuencas hidrográficas (Figura 13). En contraste, d'Ozouville y otros (2008) presentó la existencia de 38 cuencas hidrográficas en la isla basándose en un MDT generado por radargrametría/STRM con una resolución de 20 m x 20 m (Figura 14).

A partir de este producto, se seleccionó la cuenca de estudio que es aquella que contiene a las ciudades de Bellavista y Puerto Ayora, las mismas que son de interés de estudio a la amenaza de inundaciones, y que además cuentan con estaciones meteorológicas.

Figura 12

Secuencia de los resultados de las herramientas hidrológicas para la producción de cuencas



Nota: El mapa 1 corresponde al procesamiento Fill, el mapa 2 corresponde al procesamiento Flow direction, el mapa 3 corresponde al procesamiento Flow accumulation y el mapa 4 corresponde al procesamiento Basin.

Figura 13

Mapa de cuencas de Santa Cruz

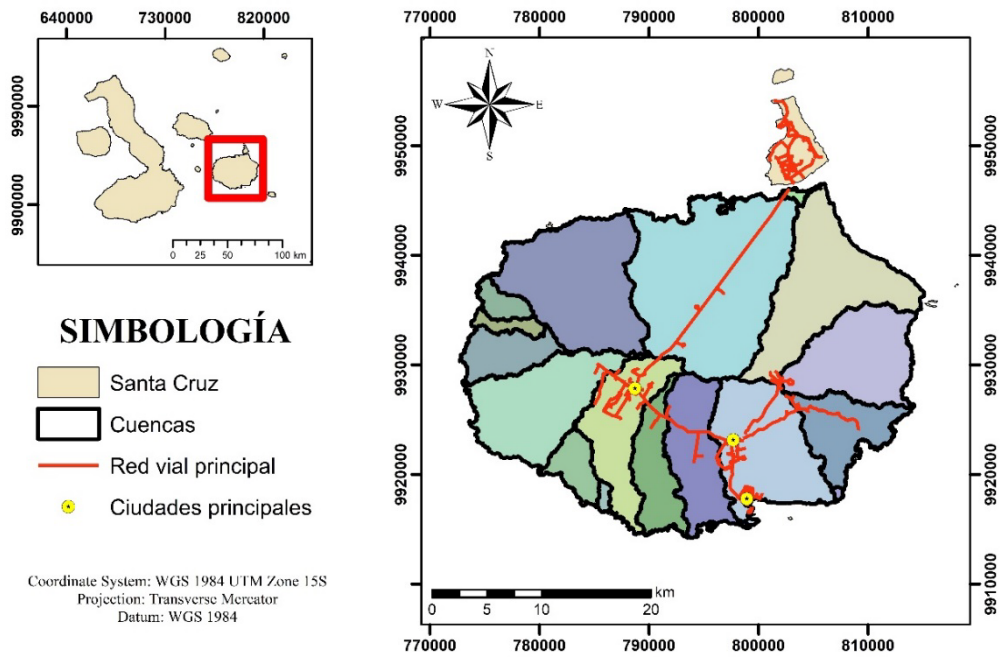
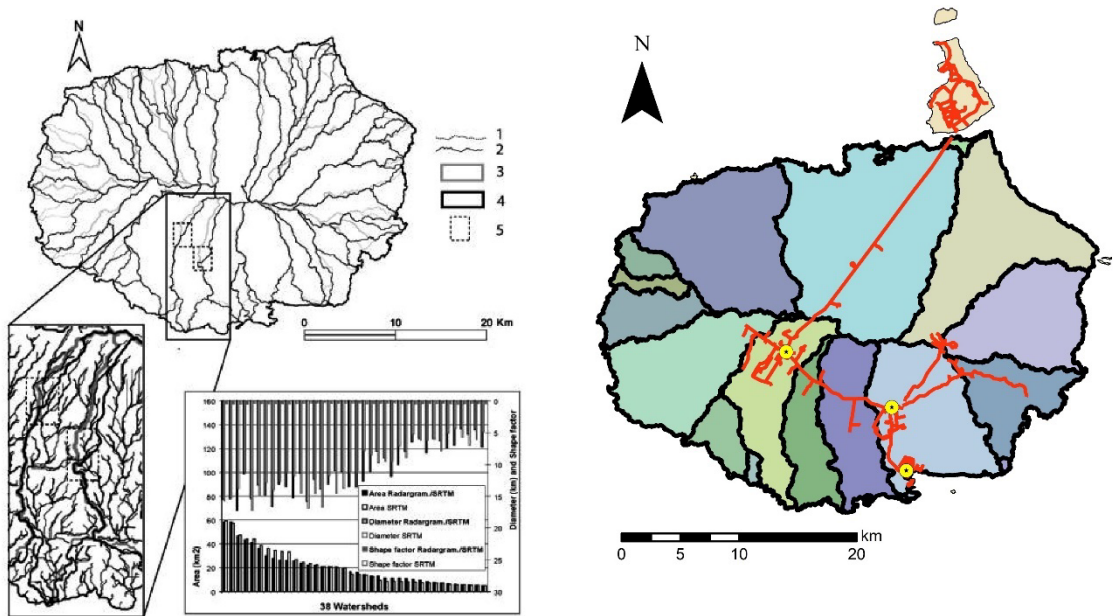


Figura 14

Mapas comparativos de cuencas hidrográficas de la isla Santa Cruz



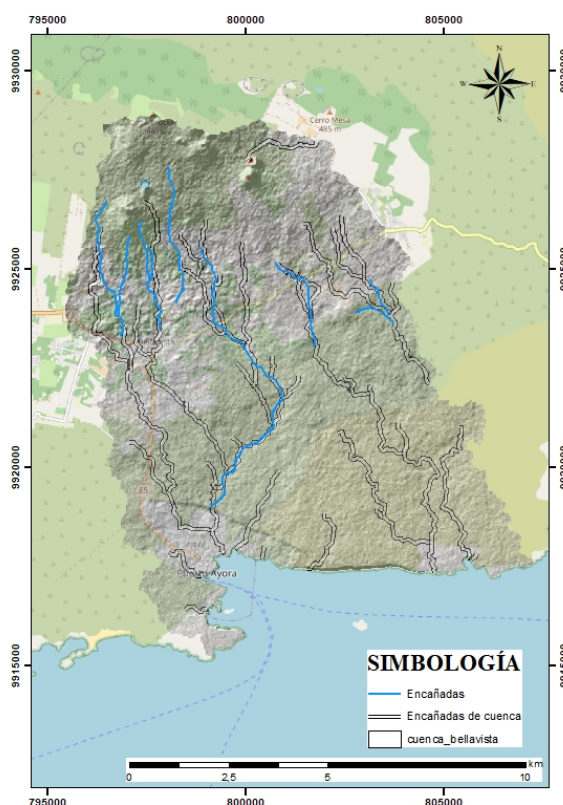
Nota: El mapa de la izquierda corresponde al artículo de d'Ozouville et al. (2008) y el mapa de la derecha corresponde a la producción del análisis hidrológico desarrollado en este proyecto

Seleccionada la cuenca de estudio, se realizó nuevamente un análisis del sistema hídrico de la cuenca para determinar las líneas de flujo (ver encañadas de cuenca en la Figura 15). Como información adicional, se cuenta con las líneas de flujo publicadas por el IGM (ver líneas celestes identificadas como Encañadas en la Figura 15), las mismas que son comúnmente identificadas como encañadas o zonas de flujo alto de agua en temporadas de lluvia.

Las encañadas del IGM muestran una salida de agua en medio de la cuenca sin un punto específico de desembocadura. En contraste, al examinar las encañadas generadas en este estudio mediante las herramientas hidrológicas, se observó como la mayoría de ellas desembocaban con el mar, y se originaban en la zona alta de la isla. Además, es necesario mencionar que existe un alto grado de similitud entre las líneas de flujo del IGM y las de este estudio, teniendo en consideración que son muy pocas las líneas dibujadas por el IGM a diferencia del alto número de líneas de flujo identificadas en este estudio.

Figura 15.

Mapa de comparación entre las encañadas del IGM

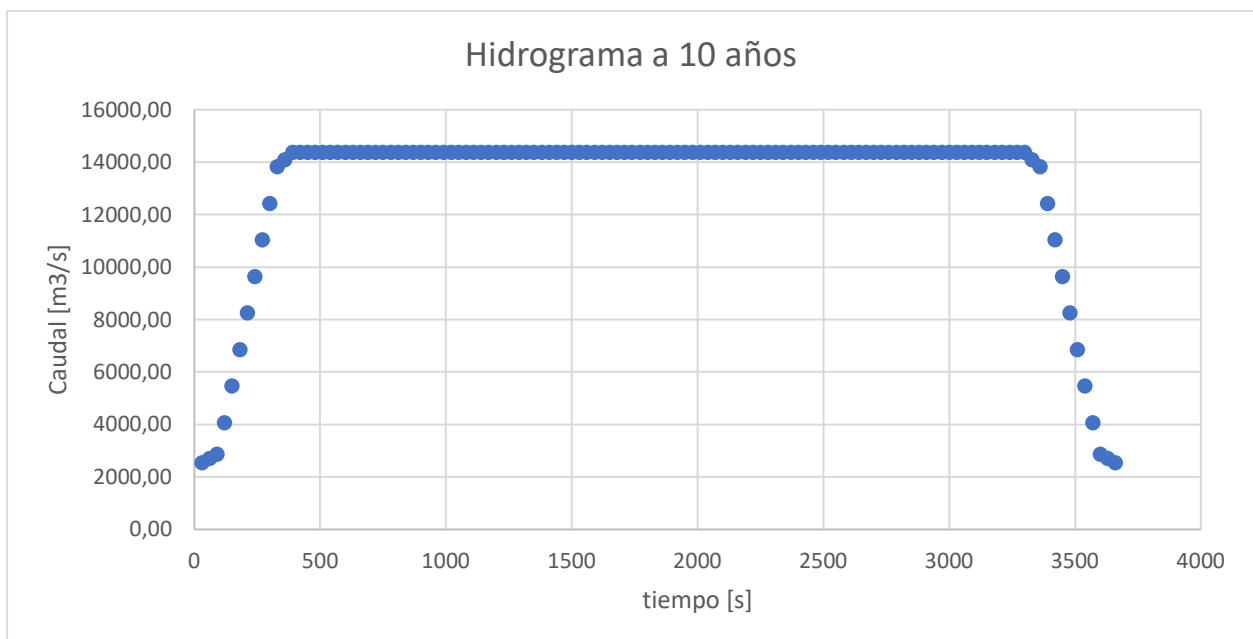


Fase 2: Modelamiento hidrodinámico de la cuenca de estudio

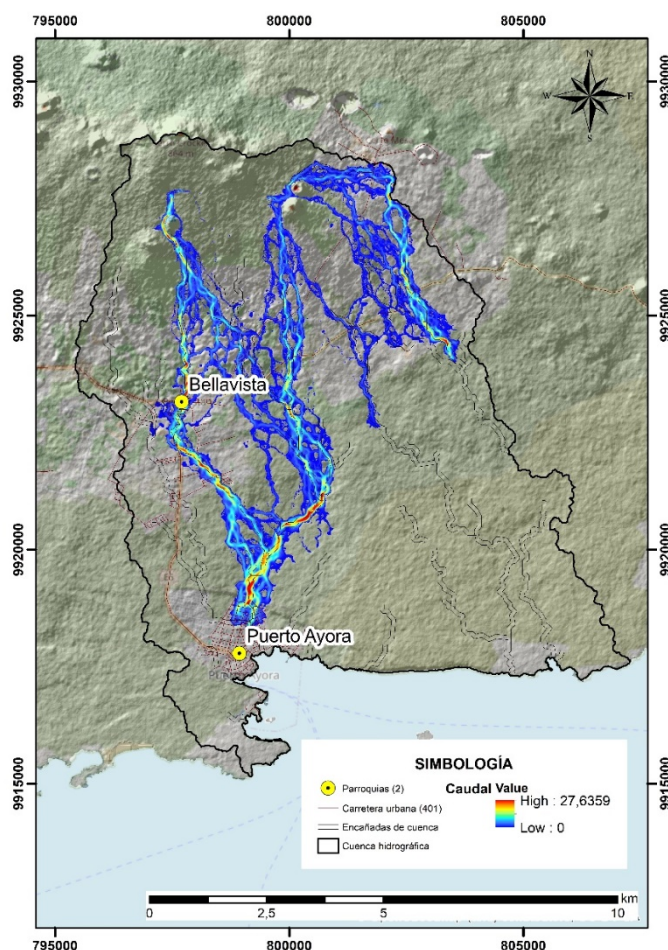
En la parte de preproceso en la interfaz del software Iber, se ingresaron los datos correspondientes a las diversas secciones: condiciones de contorno, se agregó un hidrograma generado a partir de los picos de caudales comprendida entre 0 m³/s hasta 14365 m³/s (Figura 16); uso de suelo, se asignó la capa de vegetación arbustiva con un coeficiente de Manning de 0.08 a todo el terreno de la cuenca debido que la mayoría del área es atribuida a los bosques o área vegetativa; condiciones iniciales, se asignó el valor de cero debido que la profundidad de las encañadas en relación a la superficie es casi nula; y datos del problema hace referencia al tiempo de modelado cual se determinó en un periodo de 3600 s equivalente a 1 hora en un escenario a lo largo de 10 años.

Figura 16

Dato de entrada en la sección de condiciones de contorno. Hidrograma generado a partir del análisis estadístico



Al ingresar los datos y ajustar las condiciones del modelamiento, en la fase de postproceso se obtuvo el resultado de la Figura 17, donde se aprecian como los flujos de agua parten desde dos puntos de la zona alta hasta que el agua termina desembocando en la zona urbana de Puerto Ayora.

Figura 17.*Mapa de flujos de agua*

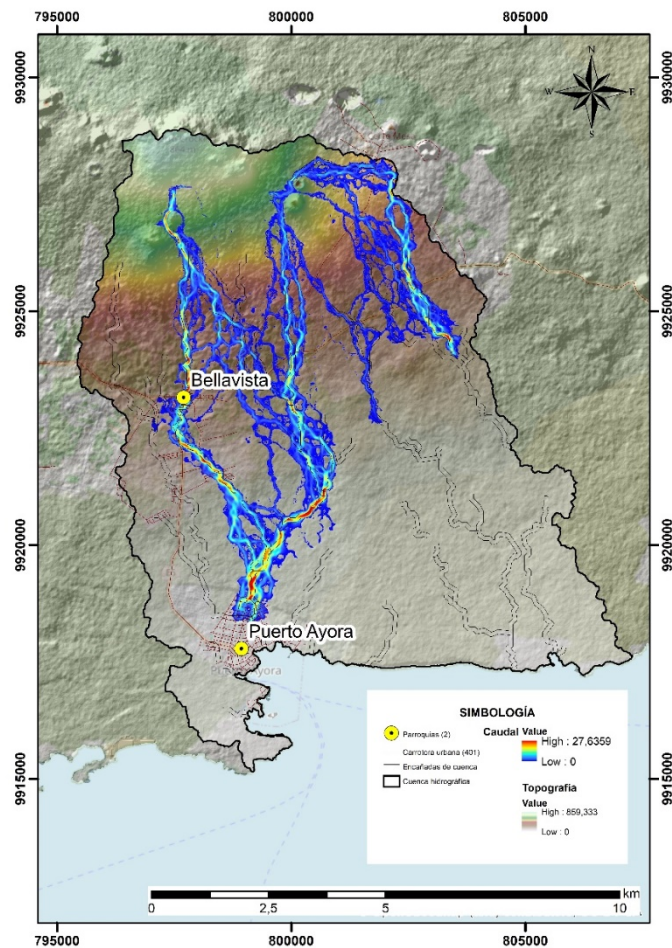
En el mapa de la Figura 18 se muestra el flujo de agua que rodea a los conos volcánicos ubicados en la zona alta de la isla y mantiene el sentido de dirección de las encañadas realizadas con anterioridad. Desde los dos puntos de inicio en la zona alta de la isla, se aprecia como conforme el terreno disminuye la elevación, se distribuyen más ramificaciones de los puntos que se iniciaron y dos de estas ramificaciones se llegan a unir para concentrar una gran cantidad de agua destinada a desembocar a la cabecera cantonal. Es importante resaltar el alto grado de similitud entre las líneas de flujo generadas mediante el software GIS y los resultados generados con el software Iber; sin embargo, las líneas de flujo solo nos dan la información de la dirección linear que tomaría el flujo del agua de conformidad con la geomorfología, mientras que el modelo de Iber nos da

información de las áreas que cubriría o inundaría, el calado, y las velocidades de flujo que alcanzaría el flujo del agua durante un evento de lluvia intensa.

Retomando parte del análisis estadístico, se estableció como el caudal de Puerto Ayora es menor que el de Bellavista, sin embargo, para dicho análisis no se toma en consideración más entrada de agua a parte de las precipitaciones, por ello, al conocer la distribución de agua a partir de las ramificaciones de flujo de agua permite entender la peligrosidad de la amenaza de inundación.

Figura 18.

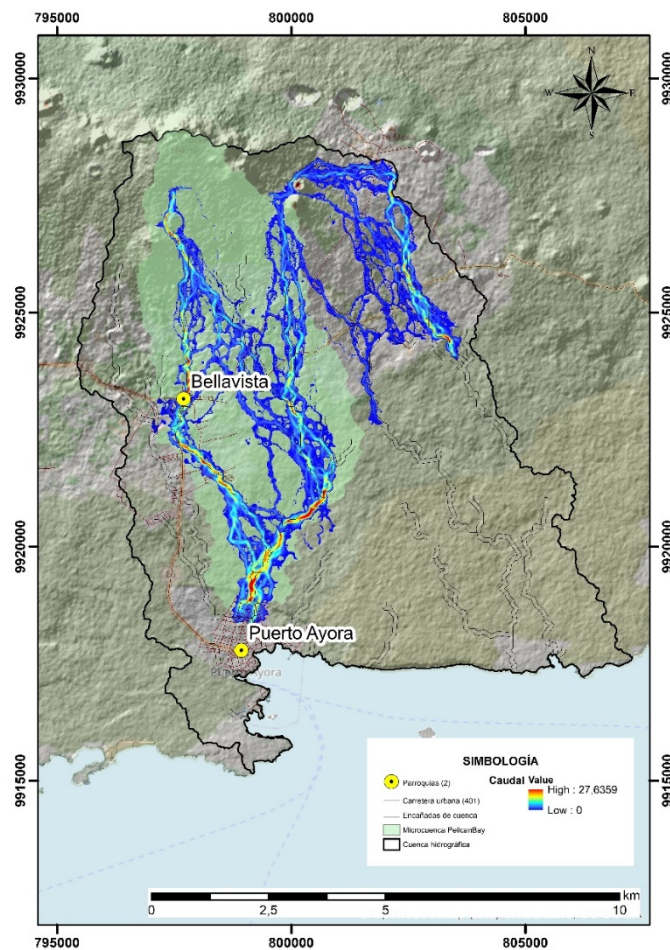
Mapa de flujos de agua en relación con la topografía



Tras reconocer el punto donde se registraba mucha salida de agua, se realizó un análisis hidrológico adicional que dio como resultado una microcuenca conocida como Pelican Bay. Dicha microcuenca es la principal fuente de desarrollo humano en la isla debido a sus dos zonas ecológicas pertenecientes al PNG, así como su extensa área de agricultura con necesidades de agua para riego y ganadería. Esta microcuenca abarcaba dos de las ciudades afectadas y los principales puntos de extracción de agua (Figura 19). Por lo tanto, observar y analizar cómo el flujo de agua se relaciona con la microcuenca permitió comprender el direccionamiento del flujo en las encañadas.

Figura 19.

Mapa de flujos en relación con la microcuenca Pelican Bay



Fase 3: Análisis de zonas de amenaza en las parroquias afectadas.

Una vez que se determinaron las direcciones del flujo de agua de las precipitaciones y se identificaron las ciudades que formaban parte de la cuenca, se procedió a cuantificar las áreas de amenaza, donde los flujos de agua cubren $\sim 9 \text{ km}^2$ en el área rural y $\sim 700 \text{ m}^2$ en el área urbana. En el caso del área rural, caracterizada por la prevalencia de actividades agrícolas y ganaderas, y perteneciente a la ciudad de Bellavista, ocupaba la totalidad del área afectada. En cuanto al área urbana se encontró distribuida en $\sim 350 \text{ m}^2$ para Bellavista y $\sim 350 \text{ m}^2$ para Puerto Ayora, evidenciando como esta amenaza afecta tanto a los sectores productivos como a la ciudad, transformándola en canales de agua.

En las figuras 20 y 21 se evidencia las áreas de afectación de acuerdo al sector rural y urbano en la parroquia de Bellavista.

Figura 20

Mapa del sector rural afectado en Bellavista

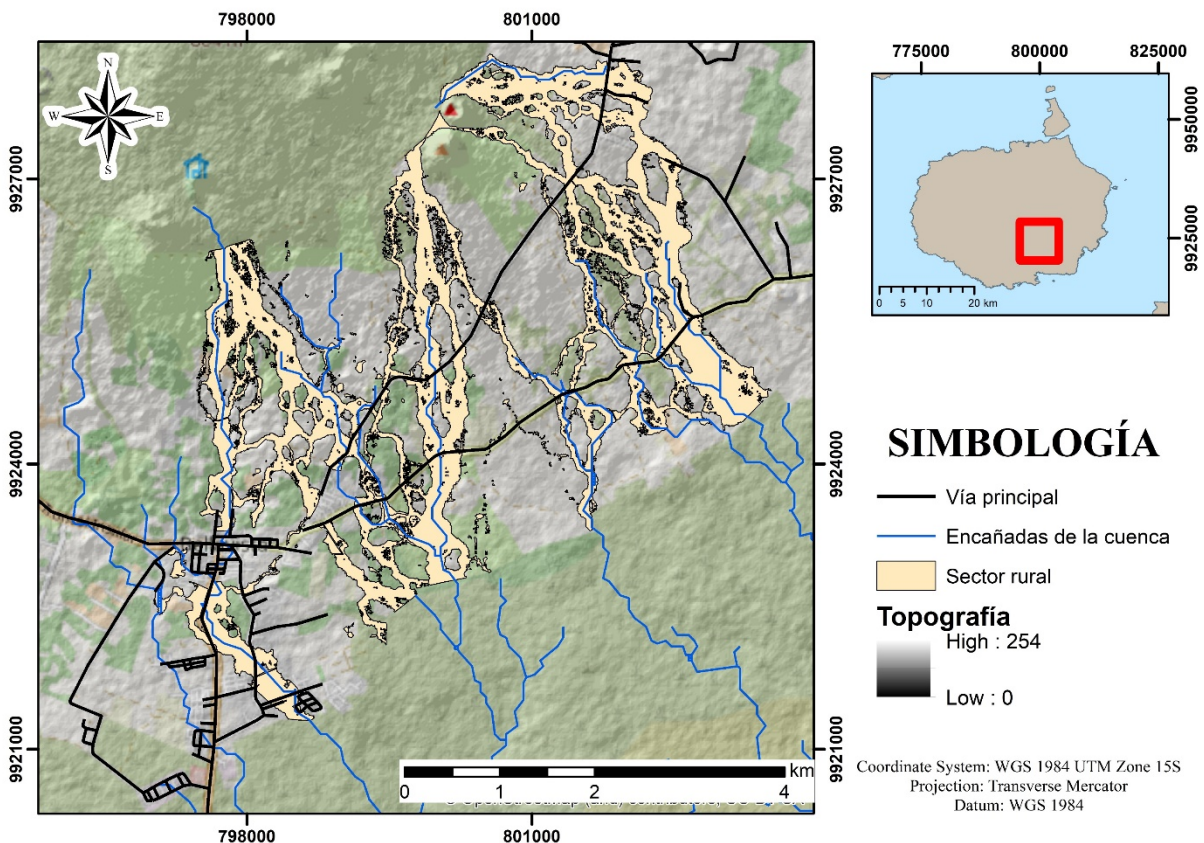
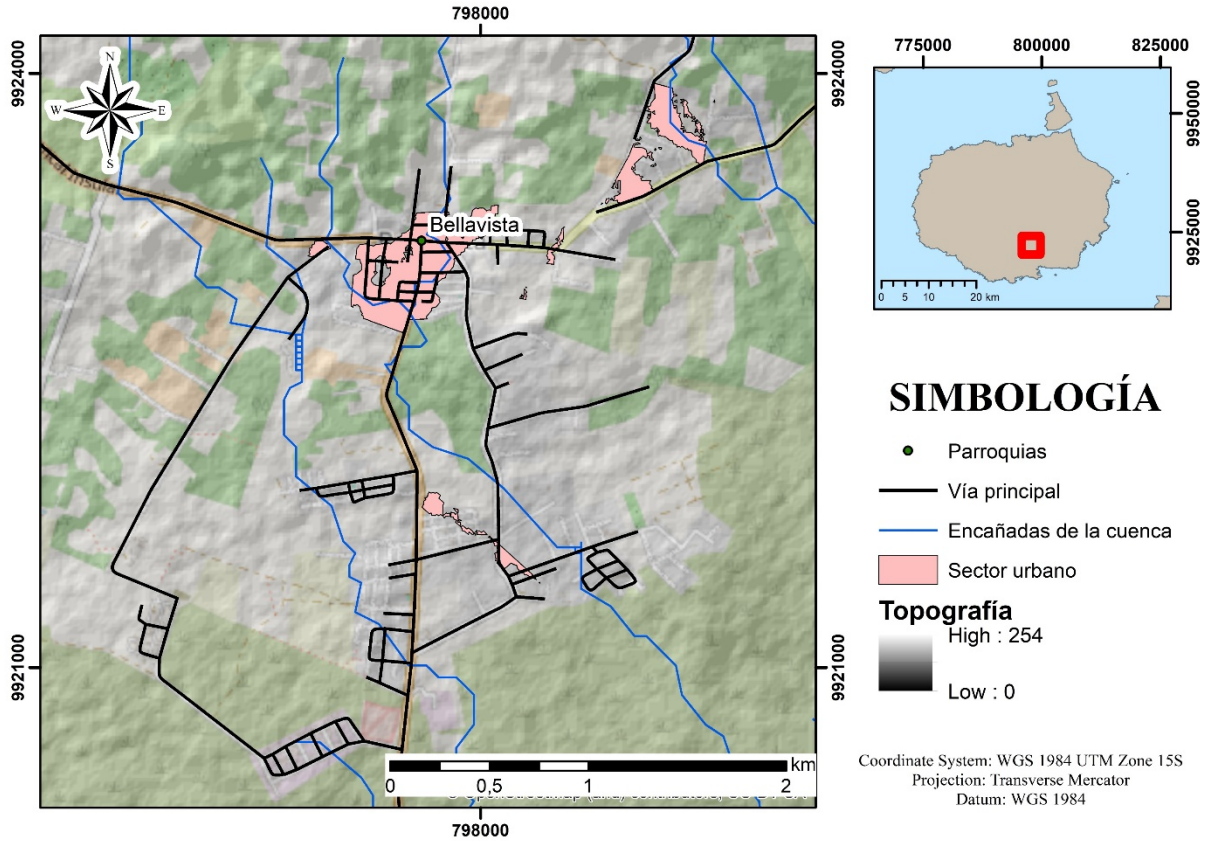


Figura 21

Mapa del sector urbano afectado en Bellavista



Capítulo 5

5.1 Conclusiones

1. A partir del análisis hidrológico se determinaron un total de 18 cuencas hidrológicas, todas ellas caracterizadas por tener vertientes con salida al mar. Se identificó que dos de estas cuencas cubren las parroquias principales de la isla, Santa Rosa, Bellavista y Puerto Ayora, y se seleccionó aquella que cubre la mayor área de población para su estudio.
2. Según los análisis estadísticos, la parroquia más propensa a fuertes precipitaciones es Bellavista con valores que alcanzan los 430 mm, mientras que la ciudad de Puerto Ayora experimenta menos precipitaciones que llegan a los 270 mm. Las precipitaciones que recibe Puerto Ayora son menores que las de Bellavista; sin embargo, el aporte grande que recibe es mediante la escorrentía identificada en el análisis hidrológico de este estudio.
3. Al desarrollar los flujos de agua a través del software IBER y vincularlos con las parroquias de la isla, se identificaron $\sim 9 \text{ km}^2$ en el área rural y $\sim 350 \text{ m}^2$ en el área urbana en el sector de Bellavista que enfrentan amenazas de inundación. En lo que respecta a Puerto Ayora se identificaron alrededor de 350 m^2 de áreas afectadas por esta amenaza.
4. Se evidencia una mayor extensión de área posiblemente afectada en la parroquia de Bellavista debido a la dispersión de los flujos de agua lo que genera una cobertura de mayor área. Sin embargo, en la zona de Puerto Ayora se evidencia un área menor de afectación, pero con una mayor intensidad debido a la cantidad de flujo acumulado y concentrado que ingresa a la zona urbana, generando daños a las estructuras urbanas.
5. Se evidencia la fuerte coincidencia entre la zona conocida e identificada como “zona de encañadas” por parte la población de la isla, con la zona de fuerte acumulación y escorrentía que se forma al noreste Puerto Ayora, lo que sirve como un indicador de validación del modelo hidrológico.

5.2 Recomendaciones

1. Disponer de un adecuado Modelo Digital del Terreno (MDT) para el programa, ya que suele no interpretar correctamente la conversión en formato ASCII.
2. Es fundamental contar con información detallada sobre el uso de suelo, hidrogramas y precipitaciones para realizar el modelo de manera óptima. Esto implica incluir geometrías del uso de suelo, ajustar el hidrograma a las condiciones específicas a abordar, identificar las condiciones de contorno adecuadas para el modelo y realizar un análisis minucioso de la rugosidad del suelo.
3. Aunque este estudio careció de un componente de trabajo de campo, se aconseja realizar el reconocimiento de la zona de estudio para validar los resultados en la realidad y evaluar la incertidumbre de los parámetros del modelo con el entorno de la cuenca. Además, facilitaría la posibilidad de ajustar nuevos parámetros, mejorando la precisión de resultados obtenidos.

Referencias

- Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado (Ed.). (2016). Cálculo de caudales. In *Boletín oficial del Estado* (1st ed., Vol. 1, pp. 18882–19023).
- Alomía Herrera, I., Paque, R., Maertens, M., & Vanacker, V. (2022). History of Land Cover Change on Santa Cruz Island, Galapagos. *Land*, *11*(7), 1017. <https://doi.org/10.3390/land11071017>
- Auken, E., Violette, S., d'Ozouville, N., Deffontaines, B., Sørensen, K. I., Viezzoli, A., & de Marsily, G. (2009). An integrated study of the hydrogeology of volcanic islands using helicopter borne transient electromagnetic: Application in the Galápagos Archipelago. *Comptes Rendus Geoscience*, *341*(10–11), 899–907. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.07.006>
- Balladares Imbaquingo, G., Serrano, M. F., & Vásquez, R. (2019). Analisis de las amenazas naturales y el grado de preparación de población en la isla Santa Cruz, Galápagos. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa*, *IV*, 75–106. https://www.researchgate.net/publication/332819994_Analisis_de_las_Amenazas_Naturales_y_el_Grado_de_preparacion_de_la_poblacion_en_la_isla_Santa_CruzGalapagos
- Bladé, E., Cea, L., & Corestein, G. (2014). Numerical modelling of river inundations. *Ingeniería Del Agua*, *18*(1), 68. <https://doi.org/https://doi.org/10.4995/ia.2014.3144>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, *30*(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>

- Bow, C. S. (1979). *The Geology and Petrogenesis of the Lavas of Floreana and Santa Cruz Islands: Galápagos Archipelago*. University of Oregon.
- Caisaguano A., F., Flores T., J., Gamboa J., S., Loyola H., G., Plaza G., D., Santamaría D., V., Segura J., F., Guerrero Verónica, & Villaroel S., A. (2023). *Informa anual ingreso de visitantes a las áreas protegidas de Galápagos del año 2022*.
- Caisaguano, J., Carrión, C., & Ramos, W. (2021). *Agenda de Reducción de Riesgos del Cantón Santa Cruz*.
- Candra, I. N., Gerzabek, M. H., Ottner, F., Wriessnig, K., Tintner, J., Schmidt, G., Rechberger, M. V., Rampazzo, N., & Zehetner, F. (2021). Soil development and mineral transformations along a one-million-year chronosequence on the Galápagos Islands. *Soil Science Society of America Journal*, 85(6), 2077–2099. <https://doi.org/10.1002/saj2.20317>
- CGREG. (2016). *Plan de Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial del Régimen Especial de Galápagos*.
- CGREG. (2023). *Plan de Acción del Gobierno Nacional busca minimizar el impacto del Fenómeno El Niño en Galápagos*. <https://www.gobiernogalapagos.gob.ec/plan-de-accion-del-gobierno-nacional-busca-minimizar-el-impacto-del-fenomeno-el-nino-en-galapagos/>
- Chow, V. Te. (1994). *Hidraulica de canales abiertos* (McGraw-Hill).
- Dávalos Suárez, J. (2021). Convemar y la Reserva marina de Galápagos. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa*, 4, 85–95. <https://doi.org/https://doi.org/10.24133/rcsd.V4N2.2019.09>
- d'Ozouville, N., Deffontaines, B., Benveniste, J., Wegmüller, U., Violette, S., & de Marsily, G. (2008). DEM generation using ASAR (ENVISAT) for addressing the lack of freshwater ecosystems management, Santa Cruz Island, Galapagos. *Remote*

Sensing of Environment, 112(11), 4131–4147.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.02.017>

Dueñas, A., Jiménez-Uzcátegui, G., & Bosker, T. (2021). The effects of climate change on wildlife biodiversity of the galapagos islands. *Climate Change Ecology*, 2, 100026. <https://doi.org/10.1016/j.ecochg.2021.100026>

Durham, W. H. (2021). *Exuberant Life*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780197531518.001.0001>

Ecuavisa. (2023). *Fenómeno de El Niño: en las Islas Galápagos se planifican medidas preventivas*. <https://www.ecuavisa.com/noticias/ecuador/fenomeno-de-el-nino-en-las-islas-galapagos-se-planifican-medidas-preventivas-CN5924150>

El Universo. (2023, April 22). *Isabela, Santa Cruz, San Cristóbal y Floreana en Galápagos tienen planes de contingencia por el invierno*. <https://www.eluniverso.com/noticias/ecuador/planes-de-contingencia-en-galapagos-por-las-lluvias-nota/>

Expreso. (2016, January 5). *Un torrencial aguacero freno la actividad turística en Santa Cruz*. <https://www.expreso.ec/actualidad/torrencial-aguacero-freno-actividad-turistica-santa-cruz-55056.html>

Geist, D., Harpp, K., & d'Ozouville, N. (2011). *Field trip guide. AGU Chapman Conference on The Galápagos as a Laboratory for the Earth Sciences*.

Geist, D., Naumann, T., & Larson, P. (1998). Evolution of Galapagos Magmas: Mantle and Crustal Fractionation without Assimilation. *Journal of Petrology*, 39(5), 953–971. <https://doi.org/10.1093/petroj/39.5.953>

Handschumacher, D. W. (1976). *Post-Eocene Plate Tectonics of the Eastern Pacific* (pp. 177–202). <https://doi.org/10.1029/GM019p0177>

- INEC. (2010). *Fascículo provincial de Galápagos*.
<https://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Manualateral/Resultados-provinciales/galapagos.pdf>
- Lasso, L., & Espinosa, J. (2018). Soils from the Galapagos Islands. In J. Espinosa, J. Moreno, & G. Bernal (Eds.), *The soils of Ecuador: Vol. VII* (1st ed., pp. 139–150). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25319-0_5
- López Andrade, J. (2021). *La forma urbana en áreas naturales protegidas : El caso del archipiélago de Galápagos* [Universitat Politècnica de Catalunya].
<https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-367763>
- Mena Benavidas, M., Scheffczyk, K., Urrutia, M., Huerta, B., & Walz, Y. (2021). *Evaluación del riesgo de inundación en Ecuador*.
- Paltán, H. A., Benitez, F. L., Rosero, P., Escobar-Camacho, D., Cuesta, F., & Mena, C. F. (2021). Climate and sea surface trends in the Galapagos Islands. *Scientific Reports*, *11*(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93870-w>
- Sánchez, F. (2013). Cálculos Estadísticos en Hidrología. In *Apuntes de Hidrología e Hidrogeología* (1st ed., Vol. 1, pp. 1–11). Universidad de Salamanca.
- Schwartz, D. M., Harpp, K., Kurz, M. D., Wilson, E., & Van Kirk, R. (2022). Low-volume magmatism linked to flank deformation on Isla Santa Cruz, Galápagos Archipelago, using cosmogenic ^3He exposure and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of fault scarps and lavas. *Bulletin of Volcanology*, *84*(9), 82. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01575-3>
- Secretaria de Gestión de Riesgo. (2016). *Acciones de respuesta por inundación en Galápagos*. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/acciones-de-respuesta-por-inundacion-en-galapagos/>
- SENPLADES. (2017). *Plan Nacional de Desarrollo 2017 - 2021*.

- Stoops, G. (2014). A micromorphological evaluation of pedogenesis on Isla Santa Cruz (Galápagos) . *Spanish Journal of Soil Science*, 3. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2013.V3.N2.02>
- Stoops, G., Mees, F., Dumon, M., Adhikari, R., & Van Ranst, E. (2022). Soils of the coastal and lower belt of Galápagos Islands – The case of Isla Santa Fé and Isla Santa Cruz. *Geoderma Regional*, 29, e00520. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00520>
- Torres-Bejarano, F., Padilla Coba, J., Rodríguez Cuevas, C., Ramírez León, H., & Cantero Rodelo, R. (2016). La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 32(3), 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.04.001>
- Trueman, M., & d'Ozouville, N. (2010). Characterizing the Galapagos terrestrial climate in the face of global climate change. *AquaDocs*, 67, 26–37.
- UNESCO. (2022, January). *Galápagos Biosphere Reserve, Ecuador*. Biosphere Reserves in Latin America and the Caribbean. <https://en.unesco.org/biosphere/lac/galapagos>
- Werner, R., Hoernle, K., Barckhausen, U., & Hauff, F. (2003). Geodynamic evolution of the Galápagos hot spot system (Central East Pacific) over the past 20 m.y.: Constraints from morphology, geochemistry, and magnetic anomalies. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(12). <https://doi.org/10.1029/2003GC000576>
- Wilson, E. L., Harpp, K. S., Schwartz, D. M., & Van Kirk, R. (2022). The Geochemical Evolution of Santa Cruz Island, Galápagos Archipelago. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.845544>

WMO. (2020). *Latest WMO El Niño/La Niña update.*

<https://community.wmo.int/en/activity-areas/climate/wmo-el-ninola-nina-updates>

ANEXOS

Anexo 1

Tabla del hidrograma generado de caudales para ingresar al software Iber

t [s]	Q [m³/año]	t [s]	Q [m³/año]
30	2523,60	1860	14368,14
60	2693,77	1890	14368,14
90	2863,94	1920	14368,14
120	4057,01	1950	14368,14
150	5450,08	1980	14368,14
180	6843,15	2010	14368,14
210	8236,23	2040	14368,14
240	9629,30	2070	14368,14
270	11022,37	2100	14368,14
300	12415,44	2130	14368,14
330	13808,52	2160	14368,14
360	14088,33	2190	14368,14
390	14368,14	2220	14368,14
420	14368,14	2250	14368,14
450	14368,14	2280	14368,14
480	14368,14	2310	14368,14
510	14368,14	2340	14368,14
540	14368,14	2370	14368,14
570	14368,14	2400	14368,14
600	14368,14	2430	14368,14
630	14368,14	2460	14368,14
660	14368,14	2490	14368,14
690	14368,14	2520	14368,14
720	14368,14	2550	14368,14
750	14368,14	2580	14368,14
780	14368,14	2610	14368,14
810	14368,14	2640	14368,14
840	14368,14	2670	14368,14
870	14368,14	2700	14368,14
900	14368,14	2730	14368,14
930	14368,14	2760	14368,14
960	14368,14	2790	14368,14
990	14368,14	2820	14368,14
1020	14368,14	2850	14368,14
1050	14368,14	2880	14368,14
1080	14368,14	2910	14368,14
1110	14368,14	2940	14368,14
1140	14368,14	2970	14368,14
1170	14368,14	3000	14368,14

1200	14368,14	3030	14368,14
1230	14368,14	3060	14368,14
1260	14368,14	3090	14368,14
1290	14368,14	3120	14368,14
1320	14368,14	3150	14368,14
1350	14368,14	3180	14368,14
1380	14368,14	3210	14368,14
1410	14368,14	3240	14368,14
1440	14368,14	3270	14368,14
1470	14368,14	3300	14368,14
1500	14368,14	3330	14088,33
1530	14368,14	3360	13809,33
1560	14368,14	3390	12416,26
1590	14368,14	3420	11023,18
1620	14368,14	3450	9630,11
1650	14368,14	3480	8237,04
1680	14368,14	3510	6843,97
1710	14368,14	3540	5450,89
1740	14368,14	3570	4057,82
1770	14368,14	3600	2863,93
1800	14368,14	3630	2693,75
1830	14368,14	3660	2523,58

Modelamiento hidrológico para el estudio de inundación en la isla de Santa Cruz, Galápagos

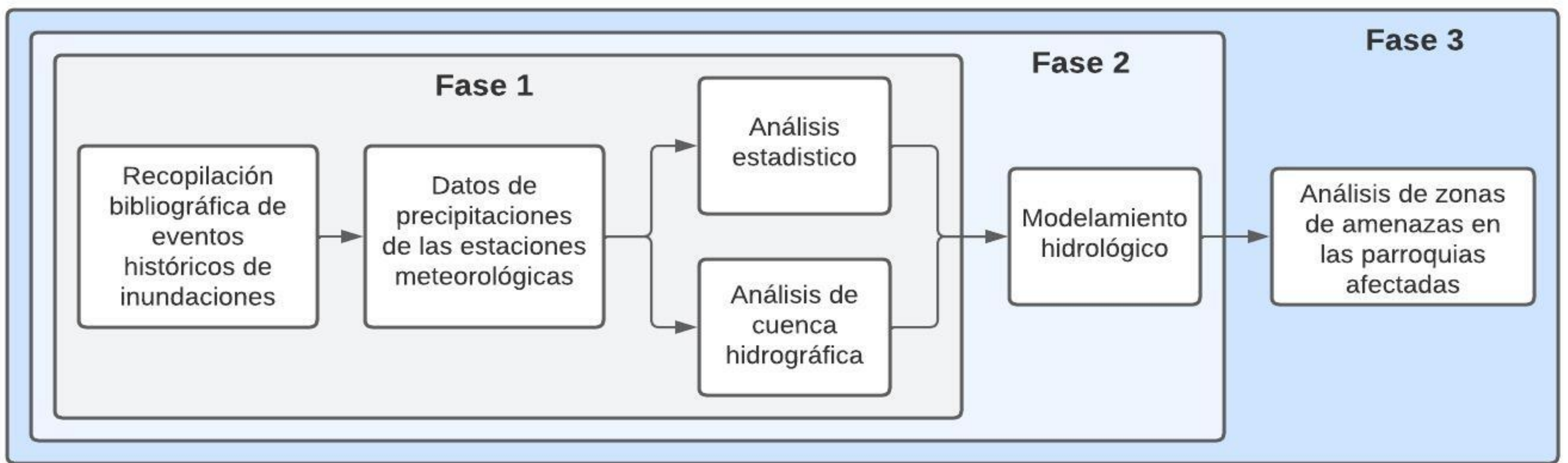
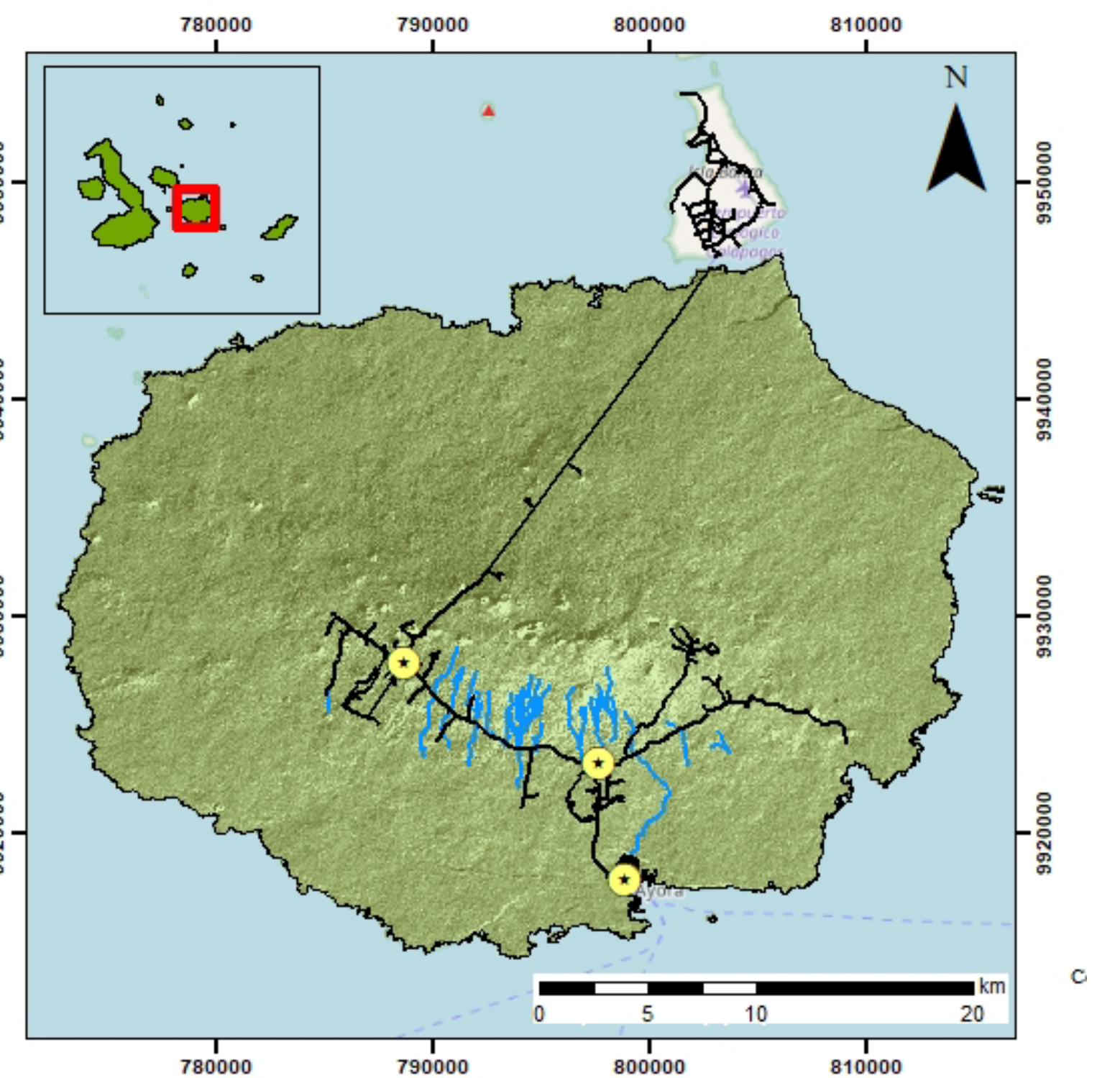
PROBLEMA

Las inundaciones es una de las amenazas que afecta a las actividades de turismo, transporte, agricultura y pesca a partir del incremento de precipitaciones durante la temporada de lluvias bajo influencia del ENOS. En la isla, se cuentan con planes de respuesta y mapas de vulnerabilidad ante dicha amenaza, no obstante, continua siendo de difícil entendimiento para los colonos y extranjeros.

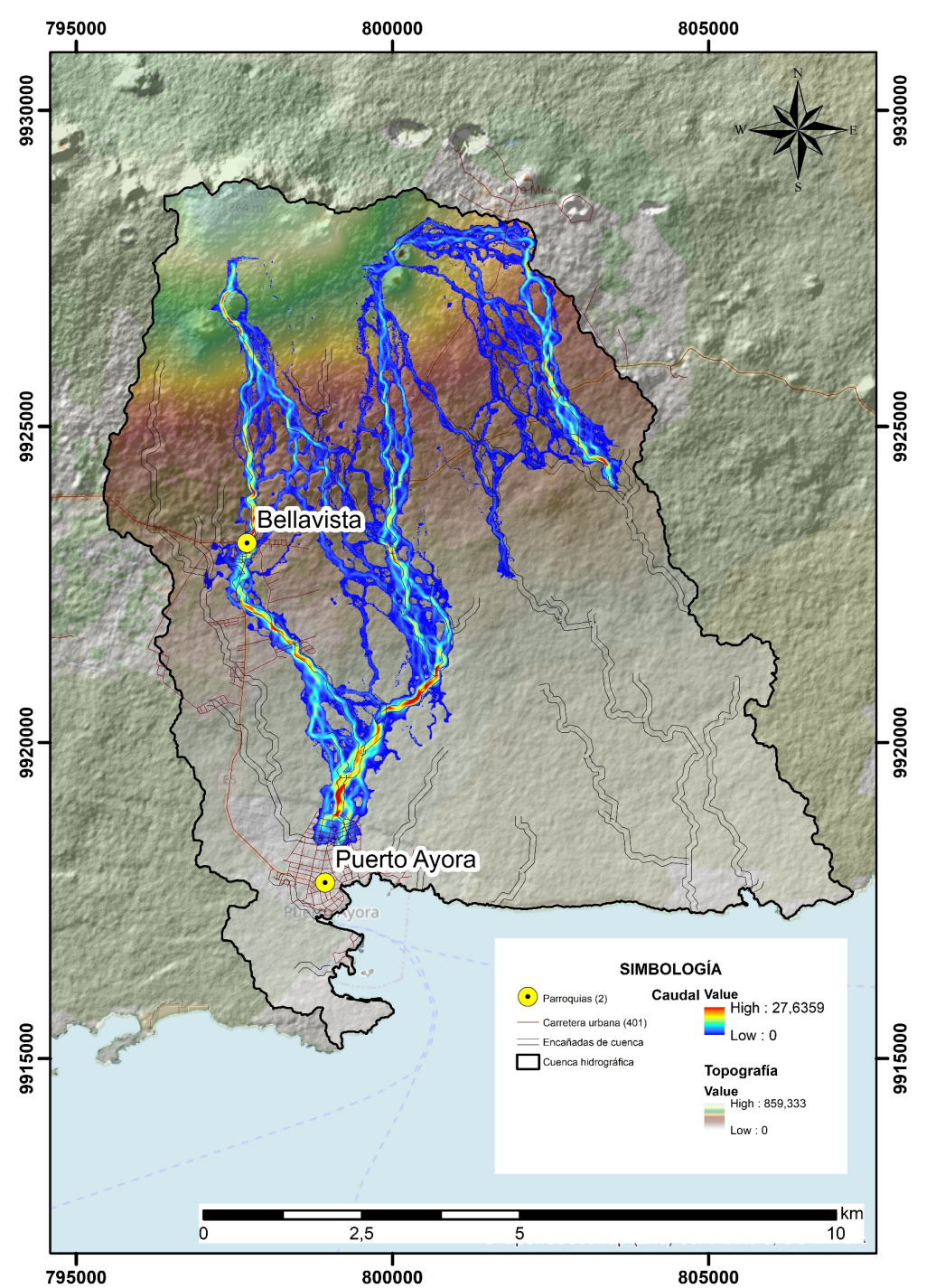
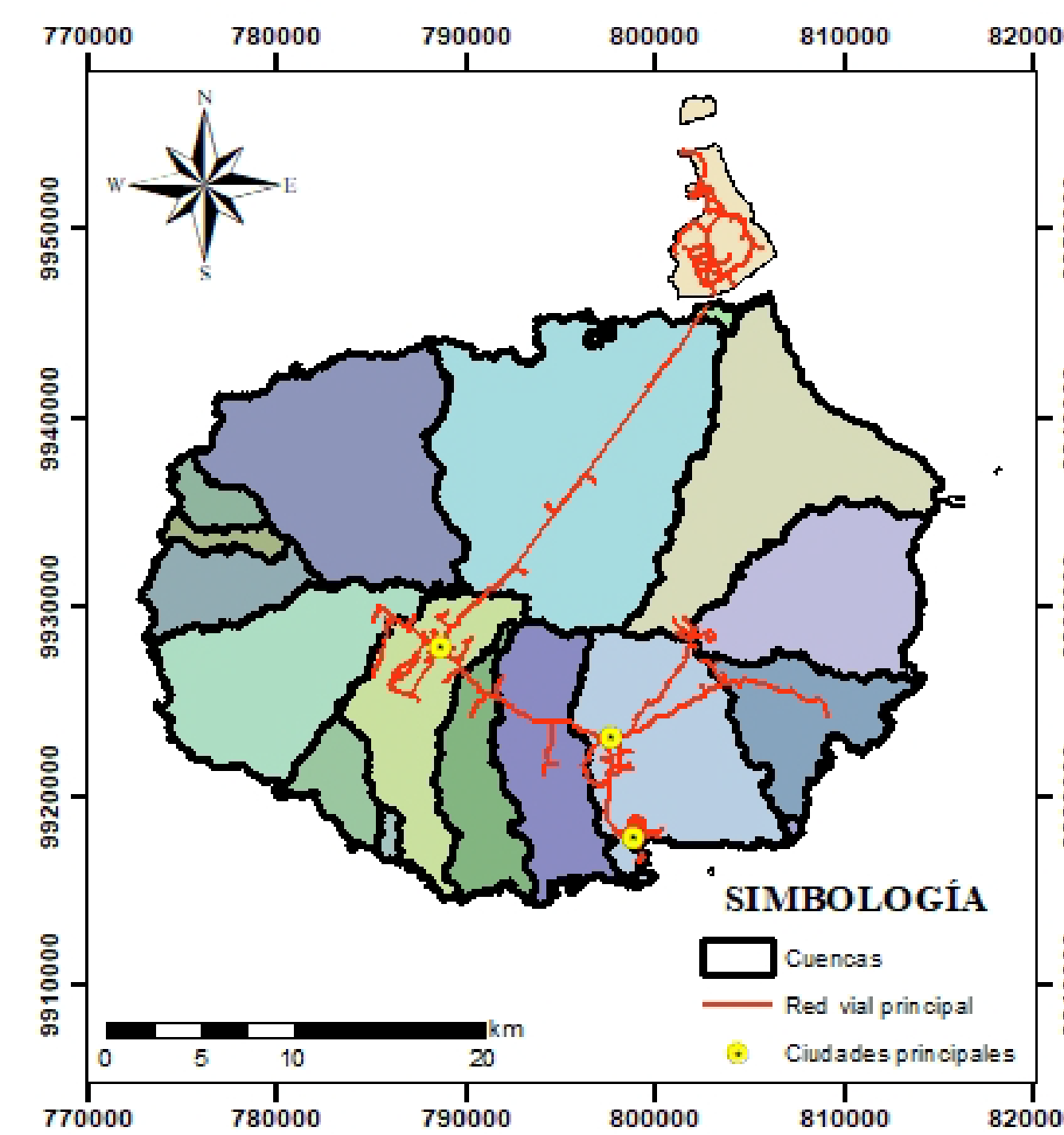
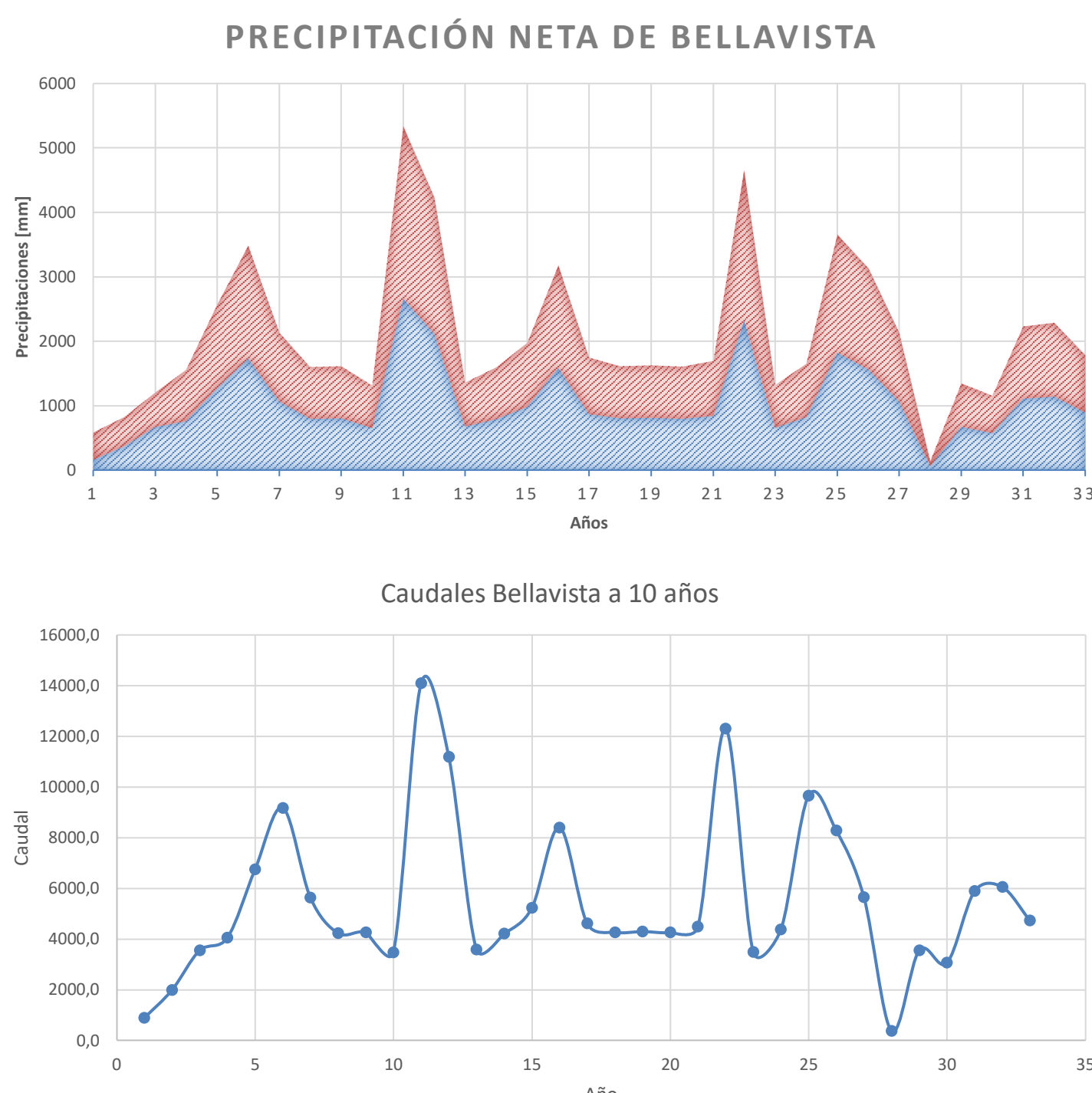
OBJETIVO GENERAL

Analizar la amenaza a inundación en una cuenca de Santa Cruz, mediante el modelamiento de información hidrológica para su uso en planes de gestión del GAD cantonal.

PROPUESTA



RESULTADOS



- La isla Santa Cruz cuenta con 6 estaciones meteorológicas siendo las estaciones Bellavista y Puerto Ayora aquellas que cuentan con 60 años de datos hidrometeorológicos y están relacionados a los eventos históricos suscitados en 1982-83 y 1997-98.
- Tras un análisis estadístico, se estableció un umbral de 10 años utilizando la distribución de Gumbell. Esto resultó una precipitación neta en una variación de 100 a 200 mm, generando un caudal de 14000 m³/s mediante un hidrograma triangular.
- De acuerdo al análisis hidrológico, se obtuvo 18 cuencas hidrográficas. Se seleccionó la cuenca donde Bellavista y Puerto Ayora comparten un sistema hídrico, comparándolo con el sistema hídrico obtenido por el IGM.
- En la fase de modelamiento, se obtuvo el seguimiento del flujo de agua desde la zona alta de la cuenca en donde se identifico 9 km² en el área rural y 700 km² en el área urbana como posibles áreas de inundación.

CONCLUSIONES

- Se determinaron un total de 18 cuencas hidrográficas, todas ellas caracterizadas por tener vertientes con salida al mar. Se identifico que dos de estas cubren las parroquias de la isla, Santa Rosa, Bellavista y Puerto Ayora; y se seleccionó aquella que cubre la mayor área de población para su estudio.
- Según los análisis estadísticos, la parroquia más propensa a fuertes precipitaciones es Bellavista con valores que alcanzan los 430 mm, mientras que la ciudad de Puerto Ayora experimenta menos precipitaciones que llegan a los 270 mm, sin embargo, el aporte grande que recibe es mediante la escorrentía identificada en el análisis hidrológico.
- Al desarrollar los flujos de agua a través del software IBER y vincularlos con las parroquias de la isla, se identificaron alrededor de 9km² en el área rural y 350 km² en el área urbana en el sector de Bellavista que enfrentan amenazas de inundación. En lo que respecta a Puerto Ayora se identificaron alrededor de 350 km² de áreas afectadas en el sector urbano.