

Análisis de riesgo de inundación mediante una metodología estocástica-determinística combinada aplicado en el río Chulla del municipio de Vinto - Cochabamba

Flood risk analysis using a combined stochastic-deterministic methodology applied to the Chulla river of municipality of Vinto - Cochabamba

Ronald Galarza Gonzales^{1,*}, Mauricio F. Villazón Gómez²

*Correo de correspondencia: ronaldgalarza.g@gmail.com

Resumen

La cuenca del río Rocha se caracteriza por tener un régimen hidrológico con crecidas intempestivas de corta duración, sumado al crecimiento urbano no planificado, en los últimos años ha generado inundaciones en diferentes zonas, incluyendo el municipio de Vinto. El presente estudio tiene como objetivo estimar el riesgo de pérdidas económicas y social asociado a inundaciones en la zona de Chulla del municipio de Vinto, y cuantificar la rentabilidad de medidas de mitigación en el río, combinando la metodología estocástica y determinística. La zona de estudio comprende el tramo del río Chulla desde la av. Alvina Patiño hasta la desembocadura en el río Rocha, donde el lecho del río se encuentra al nivel o por encima de las llanuras de inundación. Con el software IT-NHRain se generaron 50 escenarios estocásticos de tormentas para la cuenca del río Rocha con datos de precipitación de 16 estaciones meteorológicas con duraciones de 6 horas. Mediante modelación hidrológica en HEC-HMS, las tormentas se convirtieron en hidrogramas. El análisis hidrodinámico se realizó en HEC-RAS para el escenario de la media de los 50 escenarios estocásticos más una desviación estándar, considerado como el escenario extremo con mayor probabilidad de ocurrencia. El análisis de riesgo se realizó en la plataforma determinística de Mi-Resiliencia, los resultados indican que las obras hidráulicas planteadas generan una reducción del riesgo total del 87% respecto a la situación inicial y tienen una rentabilidad de 0.6, que económicamente no es positivo, pero el análisis del alto valor agregado hace que no sean descartadas.

Palabras clave: amenaza de inundación, análisis estocástico, cuantificación de riesgo, Mi-Resiliencia.

Abstract

The Rocha River Basin is characterized by a hydrological regime with short-lived, sudden floods, coupled with unplanned urban growth, in recent years it has generated floods in different areas, including the municipality of Vinto. The objective of this study is to estimate the risk of economic and social losses associated with flooding in the Chulla area of the municipality of Vinto, and to quantify the profitability of mitigation measures in the river, combining the stochastic and deterministic methodology. The study area includes the section of the Chulla river from the av. Alvina Patiño to the mouth of the river Rocha, where the river bed is on the level or above the flood plains. With the IT-NHRain software, 50 stochastic scenarios of storms were generated for the Rocha River basin with precipitation data of 16 meteorological stations with duration of 6 hours. By hydrological modeling in HEC-HMS, storms became hydrographs. The hydrodynamic analysis was carried out in HEC-RAS for the scenario of the average of the 50 stochastic scenarios plus a standard deviation, considered as the extreme scenario with the greatest probability of occurrence. The risk analysis was carried out on the deterministic platform of Mi-Resiliencia. The results indicate that the hydraulic works raised generate a reduction of the total risk of 87% compared to the initial situation and have a profitability of 0.6, which is economically not positive, but the analysis of the high added value makes them not discarded.

Keywords: flood risk, Mi-Resiliencia, risk quantify, stochastic analysis.

¹ Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0001-5090-9525>.

² Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0003-1175-5022>

1. Introducción

El río Rocha fluye por el Valle Central de Cochabamba atravesando los centros urbanos desde el municipio de Sacaba hasta Vinto, se caracteriza por tener un régimen hidrológico con crecidas intempestivas que tienen una corta duración durante la época lluviosa (PROMIC, 2011). El crecimiento de la mancha urbana en el área metropolitana de Cochabamba, en los últimos años, se ha incrementado de manera desordenada y sin planificación (TYPESA, 2013) además, se han evidenciado la ocurrencia de eventos extremos de precipitación que han generado inundaciones. Mediante modelaciones hidrológicas e hidráulicas se ha identificado como una zona susceptible a inundaciones las riberas del río Rocha en el municipio de Vinto (SEI, 2019). Un reporte del diario (OPINIÓN, 2018) del 4 de febrero de 2018 señaló que las inundaciones que afectaban al municipio de Vinto eran a causa de las lluvias intensas. (Palagi y otros, 2014) señalan que las inundaciones urbanas se han incrementado causando también un incremento en las pérdidas sociales y económicas en varias ciudades afectadas y se requiere un análisis más amplio. Para hacer frente a estas situaciones es necesario desarrollar y mejorar métodos de análisis de riesgo de inundación para estimar las zonas potenciales de inundación y además cuantificar las pérdidas económicas y sociales (Rincón y otros, 2022). En el presente estudio, el análisis del riesgo de inundación se realizó mediante una combinación de la metodología estocástica, para generar una amplia serie de escenarios de tormentas posibles de ocurrencia aleatoriamente, y la determinística para reducir y enfocar el análisis al escenario más probable de ocurrencia, reduciendo el esfuerzo y los recursos necesarios. Además, por las características topográficas del río Chulla donde el lecho del río está al mismo nivel o por encima de las zonas expuestas a inundación.

En ese sentido se tiene como objetivo estimar el riesgo de pérdidas económicas y social asociadas a la amenaza de inundación en la zona de Chulla del municipio de Vinto y cuantificar la rentabilidad de medidas de mitigación en el río, combinando la metodología estocástica de IT-NHRain para generar escenarios estocásticos de precipitación, transformarlas en tormentas con HEC-HMS, realizar la modelación hidráulica bidimensional con HEC-RAS 2D para generar mapas de inundación, y mediante la metodología determinística de la plataforma Mi-Resiliencia, realizar el análisis de riesgo de inundación para evaluar la rentabilidad de las obras hidráulicas.

IT-NHRain es parte de los programas de CAPRA, varios estudios en diferentes contextos han utilizado CAPRA para el análisis. Por ejemplo, (Zapata y otros, 2024) aplicaron CAPRA en la cuenca del río Chico, en Chuquisaca, Bolivia para evaluar el riesgo de inundaciones bajo escenarios de cambio climático. En El Salvador, el Ministerio de Medio Ambiente y el BID (BID & MARN, 2013) utilizaron CAPRA para evaluar el riesgo de inundaciones a nivel país. En Venezuela, (BID & ITEC, 2014) desarrollaron perfiles de riesgo de inundación para el todo el país. En Perú (Ccopi-Trucios, 2023) han aplicado la metodología estocástica en comunidades andinas para evaluar el riesgo de inundaciones. Estas aplicaciones indican que la metodología estocástica es ampliamente utilizada para análisis de riesgo de inundaciones en diferentes escalas.

2 Materiales y métodos

Área de estudio

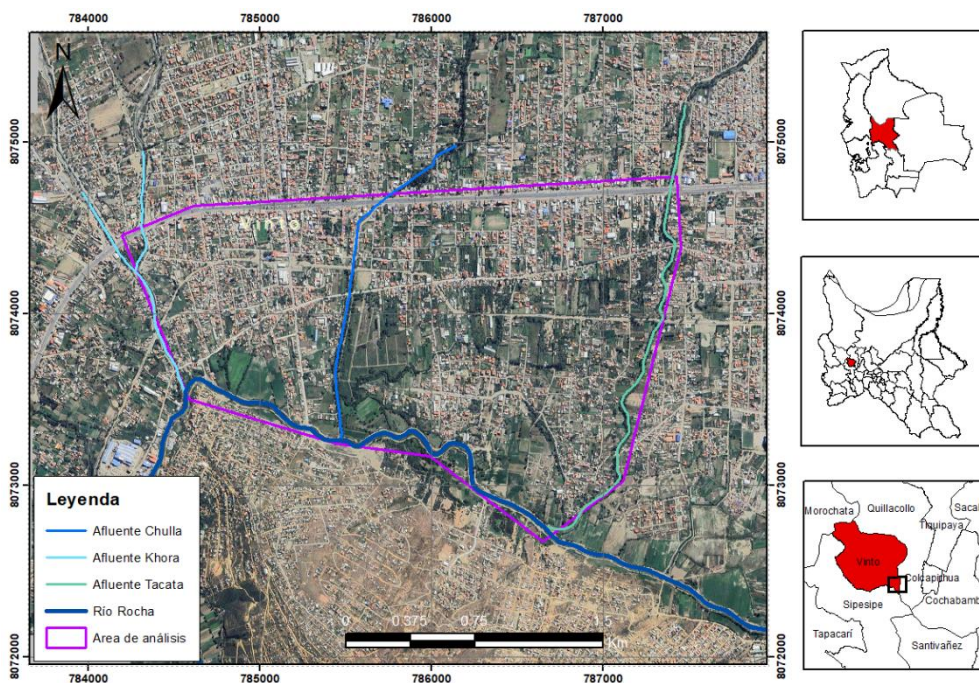
El estudio se realizó en la cuenca del río Chulla ubicado en el municipio de Vinto del departamento de Cochabamba. La región seleccionada para el caso de estudio se localiza en el tramo del río Chulla comprendido entre la av. Alvina Patiño hasta la desembocadura en el río Rocha con una longitud aproximada de 1.5 km. Este tramo es altamente susceptible a sufrir inundaciones y en general lo son el resto de los afluentes del río Rocha desde la ciudad de Cochabamba. La razón de la alta susceptibilidad para sufrir inundaciones incluye el incremento de las urbanizaciones asentadas en los márgenes

del río en los últimos años, las cuales han ido estrechando y modificando la sección natural del río, además de la reducción natural de la pendiente del cauce por la cercanía con el río Rocha, en el cual desemboca.

El río Chulla nace en la cordillera del Tunari. La parte alta de la cuenca es zona montañosa, al ingreso a la zona metropolitana de Vinto existen urbanizaciones dispersas, las mismas se intensifican conforme avanzan aguas abajo. La cuenca del río Chulla tiene un área de drenaje de 72.2 km². Un tramo de aproximadamente 415 m, desde la av. Alvina Patiño, se encuentra canalizado con muros de concreto con una sección de 8 m de ancho y 2 m de profundidad, el tramo aguas abajo es de sección natural. En la Figura 1 se ilustra la zona de estudio.

Figura 1

Área de estudio



Descripción de la metodología de análisis

El análisis de riesgo y costo-beneficio se realizó en la herramienta Mi-Resiliencia, una herramienta WEB-SIG para el análisis de riesgo de desastres y costo-beneficio de una medida de mitigación para periodos de retorno de 20, 50 y 100 años (GEOTEST AG, 2018). La evaluación se realiza en base a: mapas de intensidades de amenaza; mapas de exposición; y funciones de vulnerabilidad (integradas en la herramienta). El mapa de exposición fue elaborado en base a las clases de objetos definidos en la herramienta. Para generar los mapas de amenaza se realizaron modelaciones hidráulicas en HEC-RAS 2D con caudales producto de un análisis hidrológico en HEC-HMS con tormentas estocásticas generadas con el módulo IT-NHRain de la plataforma CAPRA.

Datos de análisis

Para la topografía de la cuenca se utilizó un Modelo de Elevación Digital Global de ASTER (Global Digital Elevation Model - GDEM) con una resolución espacial de 30 m (NASA/METI/AIST, 2019). La identificación de

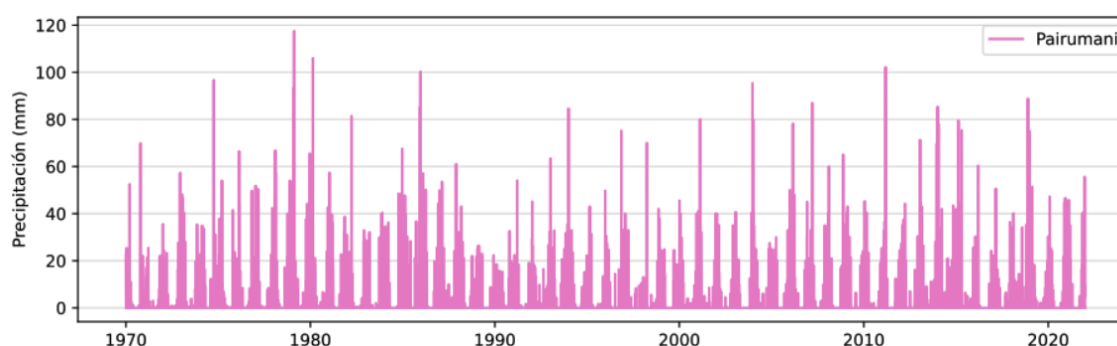
los afluentes (principalmente en la zona urbanizada) fue ajustada mediante visitas a campo para caracterizar el curso de los ríos y recolectar información adicional para afinar la delimitación de las subcuencas.

La información meteorológica fue extraída del informe Perfil de Riesgo de Desastres para Bolivia (BID, 2016) realizado por ITEC (INGENIERÍA TÉCNICA Y CIENTÍFICA S.A.S). Se utilizaron 16 estaciones que presentan datos diarios para el periodo 1971-2016. Adicionalmente, se utilizó información procesada y rellenada por centro de investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental de la UPB (2021) y se incorporó datos obtenidos del LH-IMSS y el SENAMHI para completar datos faltantes. En la Tabla 1 se presenta información general de las 16 estaciones utilizadas, la base de datos contiene registros desde 1/1/1980 al 31/12/2021. En la Figura 2 se muestra la serie histórica de precipitaciones de la estación Pairumani, que es la más cercana a la zona de estudio.

Tabla 1
Información general de las estaciones utilizadas

Estación	Longitud	Latitud	Elevación	Tipo de datos
Arani	-65.754	-17.574	2836	Precipitación
Capinota	-66.261	-17.717	2395	Precipitación
CBBA Aeropuerto	-66.179	-17.414	2563	Precipitación
Colomi	-65.871	-17.336	3284	Precipitación
La Tamborada	-66.136	-17.449	2583	Precipitación
La Violeta	-66.232	-17.347	2607	Precipitación
Pairumani	-66.319	-17.366	2615	Precipitación
Parotani	-66.344	-17.566	2475	Precipitación
San Benito	-65.904	-17.526	2708	Precipitación
Santivañez	-66.249	-17.565	2537	Precipitación
Sarco	-66.176	-17.384	2569	Precipitación
Tarata	-66.023	-17.609	2750	Precipitación
Tiraque	-65.724	-17.425	3295	Precipitación
4 Esquinas	-66.241	-17.198	3994	Precipitación
Morochata	-66.967	-17.217	3817	Precipitación
Misicuni	-66.327	-17.090	3793	Precipitación

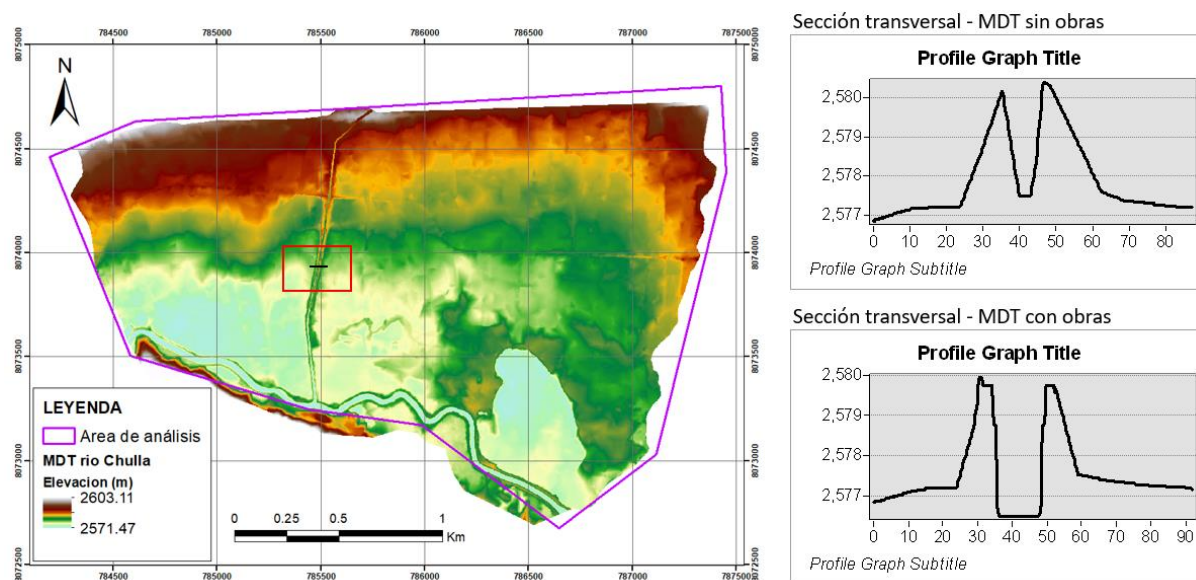
Figura 2
Serie histórica precipitación en la estación Pairumani



La topografía del río Chulla fue generada por la Empresa Consultora CIVILDEA el año 2024, que consiste un Modelo Digital de Terreno (MDT) con resolución espacial de 0.25 m producto de un levantamiento topográfico, utilizado en la implementación del modelo hidráulico 2D para tener una representación física precisa del río. El MDT fue modificado por la consultora para implementar obras hidráulicas en el tramo final del río que tiene sección natural. En la Figura 3 se muestra el MDT de la zona de estudio y una comparación del cauce del río sin obras y con obras.

Figura 3

Modelo Digital de Elevación de la zona de estudio del río Chulla



El inventario de los elementos expuestos a la amenaza de inundación fue generado por la Empresa Consultora CIVILDEA el año 2024. El inventario comprende construcciones o viviendas, infraestructura pública, áreas agrícolas y personas, principalmente. La información de las construcciones o viviendas generalmente incluye el tipo y/o material de la construcción, la ubicación, el valor de cotización y el número de pisos de la construcción (Rincón y otros, 2022). Esta información fue procesada de acuerdo a lo requerido por Mi-Resiliencia en ArcMap como elementos punto, línea y o polígonos dependiendo el tipo de objeto. En la Figura 4 se muestra el mapa de exposición clasificado en diferentes categorías.

La estimación económica de cada elemento expuesto es una tarea difícil (Pellicani y otros, 2018), ya que esta información no se conoce con exactitud y no es pública en ningún caso, además que es muy variable, aún en la misma zona. Para la determinación de los costos de inversión privada como ser viviendas de abobe, ladrillo y hormigón se tomaron los valores presentados en (BOENCO, 2021) obtenidos a partir de avalúos realizados en el departamento de Cochabamba. En el caso de infraestructura pública y demás elementos, la información se tomó de los anexos de Mi-Resiliencia (GEOTEST AG, 2018). En la Tabla 2 se muestra los valores económicos usados para la infraestructura privada.

Figura 4

Mapa de exposición clasificado para la zona de estudio

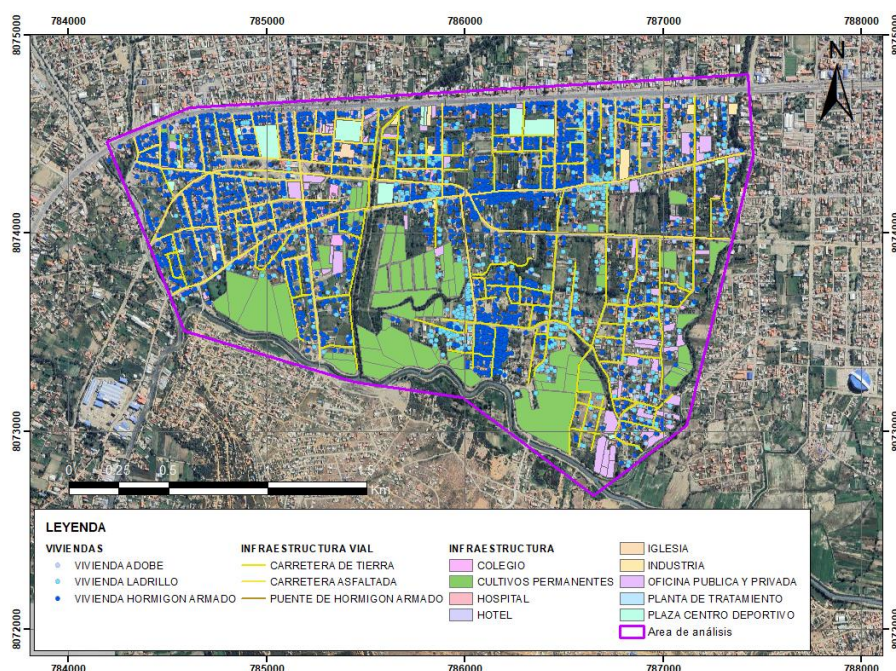


Tabla 2

Costos de infraestructura privada y/o viviendas

Tipo de Infraestructura	Costo avalúo (Bs/m ²)
Vivienda de madera y/o adobe	750
Vivienda de ladrillo	1500
Vivienda de hormigón	1800

Amenaza de lluvia – Estudio Estocástico

El análisis de lluvia y la distribución de su intensidad en la región de análisis se realizó en las herramientas IT-NHRain, IT-Flood, HEC-HMS y HEC-RAS.

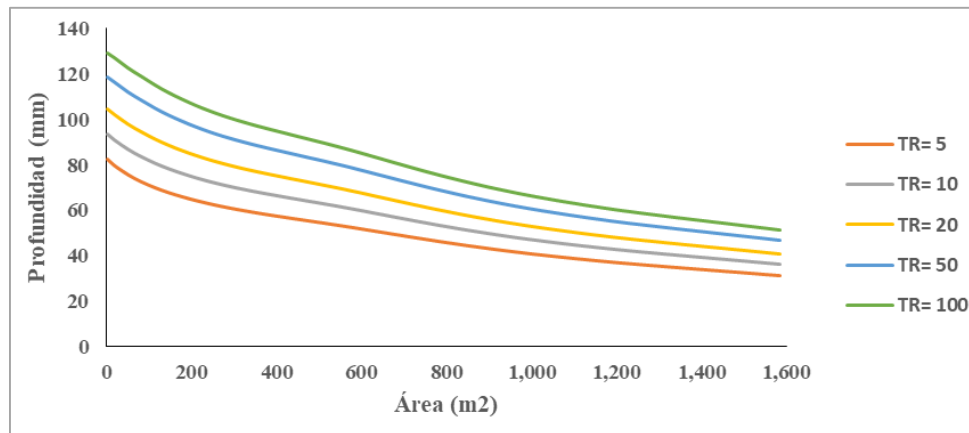
Con los datos meteorológicos de las 16 estaciones seleccionadas se generaron 50 escenarios de tormentas estocásticas con ubicación aleatoria, forma e intensidad para una duración y frecuencia seleccionada siguiendo el procedimiento indicado a continuación: 1) Caracterización geográfica de la cuenca, para determinar propiedades físicas del área de aporte; 2) Caracterización hidrológica de la cuenca, para determinar las máximas lluvias y generar las curvas Precipitación-Área-Duración-Frecuencia (PADF); y 3) Generación de tormentas estocásticas.

(ERN-AL, 2011) plantea la incorporación de un sistema de generación de lluvias convectivas estocásticas que permitan definir escenarios de amenaza específicos para la posterior evaluación del peligro de inundación asociado. El modelo seleccionado permite caracterizar las condiciones de precipitación de una cuenca en términos de curvas PADF (Cardozo & Le Noir, 2024). Estas curvas relacionan la profundidad de precipitación esperada, el área de

influencia, la duración de la tormenta y su periodo de retorno. El análisis se realizó para cinco periodos de retorno (5, 10, 20, 50 y 100 años) con una duración de las tormentas de un día teniendo en cuenta 4 estaciones con precipitación mayor a cero. La Figura 5 muestra las curvas PADF generadas para la cuenca del río Rocha.

Figura 5

Curva PADF cuenca río Rocha



Modelación hidrológica

Utilizando los escenarios estocásticos de lluvia se realizó el análisis hidrológico dentro la cuenca del río Rocha en el módulo IT-Flood de la plataforma CAPRA. Este módulo requiere un modelo hidrológico en HEC-HMS versión 4.0 para determinar los hidrogramas en la salida de cada subcuenca de interés producto de la amenaza de lluvia generada en IT-NHRain (León y otros, 2018). En el procedimiento se define que la duración de la tormenta en la cuenca del río Rocha es de 6 horas, la distribución temporal es de 25% las primeras dos horas, 60% las siguientes dos horas y por último un 15 % las últimas horas, en base a observaciones de hietogramas de tormentas históricas medidas por estaciones meteorológicas dentro la cuenca.

Para delimitar las subcuencas, determinar el curso de los ríos y las uniones, se utilizó un DEM con resolución espacial de 30 m de ASTER (NASA/METI/AIST, 2019). Se identificaron 15 puntos de interés, la delimitación automática de las subcuencas urbanas fue ajustada mediante visitas a campo. En la Tabla 3 se presenta datos de los puntos de interés para el modelo hidrológico y en la Figura 6 el resultado de las subcuencas ajustadas para cada punto. Los factores de corrección se aplicaron a los hidrogramas de salida de los puntos de interés.

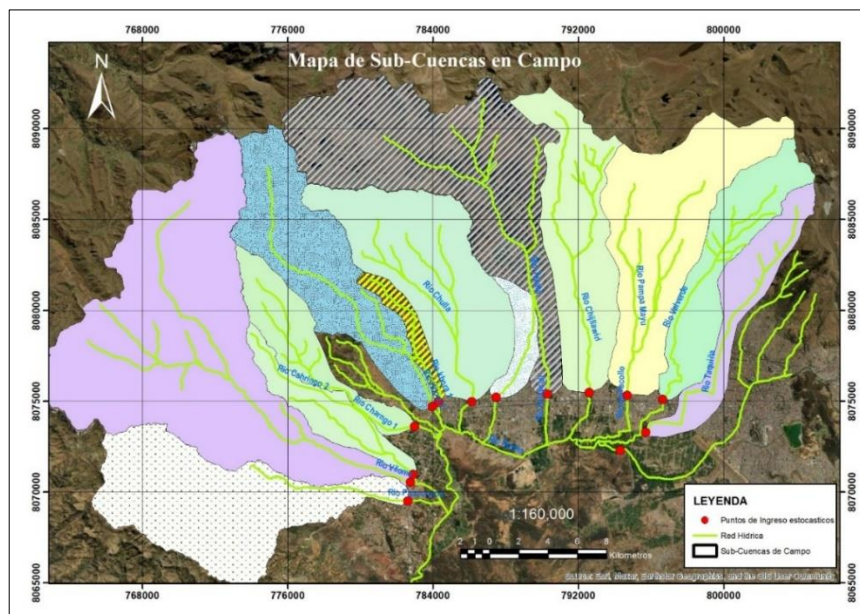
Tabla 3

Puntos de interés en modelo hidrológico

Nombre de afluentes	ID punto de interés	Áreas de campo (km ²)	Áreas en HEC-HMS (km ²)	Elemento (HEC-HMS)	Factor de corrección
Rio Pancuruma	EST-1	71.0	67.5	J4220	
Rio Viloma	EST-2	151.4	148.8	J3606	
Rio Charingo 2	EST-3	19.0	19.8	J3668	
Rio Charingo 1	EST-4	24.0	29.0	J3685	
Rio Khora 2	EST-5	45.2	58.6	J3665	1.29
Rio Khora 1	EST-6	18.6	17.9	J3647	
Rio Chulla	EST-7	66.0	41.3	J3630	1.61
Rio Huayculli	EST-8	77.0	99.1	J3662	0.77
Rio Tacata	EST-9	32.0	3.1	J3937	10.00
Rio Chijllawiri	EST-10	53.0	16.4	J3690	3.22
Rio Pampamayu	EST-11	70.9	75.8	J3650	
Rio Valverde	EST-12	37.0	89.0	J3641	0.40
Rio Taquiña	EST-13	26.9	89.0	J3641	0.33
Entrada Rocha				J3677	
Salida Rocha				J4000	

Figura 6

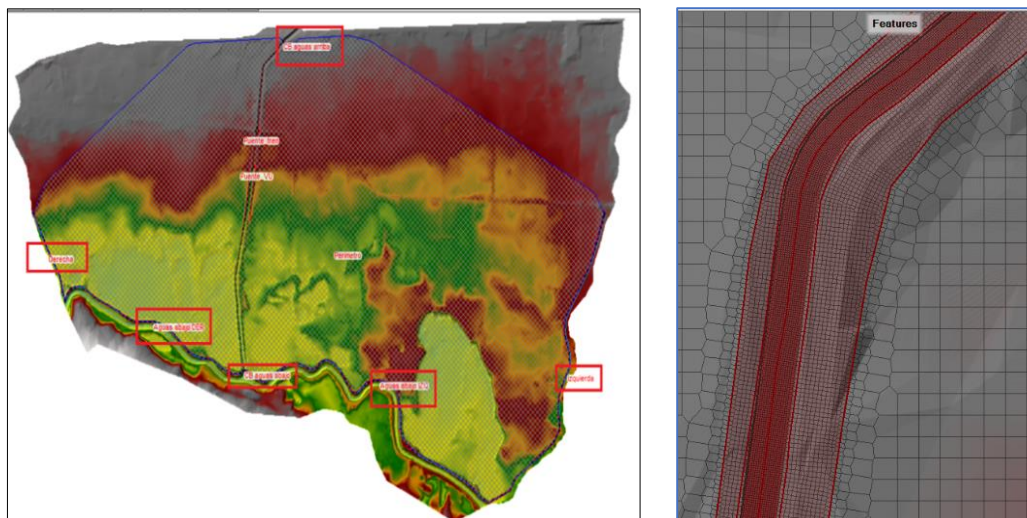
Subcuencas delimitadas y ajustadas para el modelo hidrológico



Para el cálculo de las pérdidas iniciales se utilizó el método del Número de Curva (CN) desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) y para la transformación lluvia-escorrentía se seleccionó el método del Hidrograma Unitario de Clark. Para el tránsito del hidrograma en los elementos río se utilizó el método de Miskingum-Cunge, el tiempo de concentración se calculó con la ecuación de Kirpich. En la Figura 7 se presenta el esquema del modelo hidrológico implementado en HEC-HMS, el cual utiliza como entrada precipitación grillada.

Figura 8

Malla 2D y condiciones de borde en el modelo (izq), zonas refinamiento de la malla 2D (der)



En el tramo de estudio del río Chulla se tiene 4 puentes vehiculares, cada uno fue implementado en el modelo. La rugosidad de Manning fue estimada con el procedimiento propuesto por Cowan descrito en (Chow, 1959) y se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4

Valores del coeficiente de Manning para el área de estudio

Uso de Suelo		Tipo de Suelo	n
Agricultura		Cultivos de campo maduros	0.045
Arboles		Terreno despejado con troncos de árboles, con brotes.	0.05
Canal Revestido		Concreto	0.015
Caminos		Asfalto	0.016
Cauce de Ríos	Limpio, rectó sin fisuras, fondo profundo, con algunas piedras y pastos		0.035
Suelo Desnudo		Suelo sin Cobertura Vegetal	0.025
Urbano		Pavimento con infraestructura	0.04

Los hidrogramas calculados en HEC-HMS fueron introducidos como condiciones de borde aguas arriba. La estimación de la pendiente normal fue considerada como condiciones de borde aguas abajo. Las simulaciones realizadas para el análisis de riesgo corresponden a la media de los 50 escenarios estocásticos más una desviación estándar, considerado como el escenario extremo con mayor probabilidad de ocurrencia y el que captura la esencia del análisis hidrológico estocástico.

Para los cálculos del modelo se utilizó las ecuaciones de onda difusa (Diffusion Wave Equations) bajo un enfoque general de solución (Brunner G. W., 2024). El intervalo de cálculo fue establecido en base pruebas de sensibilidad teniendo en cuenta un valor que mantenga la precisión de los resultados y estabilidad numérica establecido en el

criterio de Courant (Brunner G. W., 2023). El tiempo determinado fue de 3 s para un tiempo de simulación de 48 horas.

Las medidas de mitigación contemplan el dragado y conformación de muros de gaviones en el cauce principal del río chulla, con el fin de evitar afectar los bancos naturales del cauce y mantener en lo posible la pendiente natural del lecho. Se considera dos sectores de intervención, el primero inicia en la finalización de la canalización del cauce y el segundo en el tramo final previo a la confluencia con el río Rocha, ya que estos sectores se identificaron como potenciales para que se produzcan desbordes. Las medidas de mitigación fueron introducidas mediante modificaciones en el MDT del cauce (ver Figura 3), con ajustes en la malla 2D para considerar los cambios en la topografía, manteniendo igual el resto de los parámetros.

Análisis de riesgo de inundación

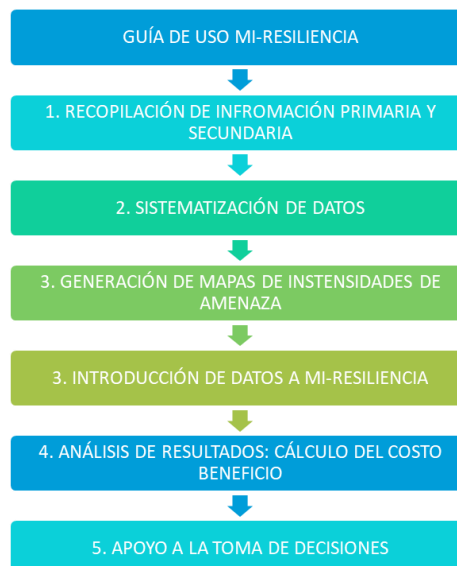
El riesgo se refiere a las pérdidas que puedan ser generadas por una amenaza, como inundación, en un elemento específico bajo la amenaza en un periodo o escenario particular (Peduzzi y otros, 2009). El riesgo es resultado de la intersección de la amenaza, el inventario de elementos expuestos y vulnerabilidad asociada a determinadas funciones que resultan en una cuantificación del daño económico y social (Rincón y otros, 2022).

El análisis se llevó a cabo en la plataforma Mi-Resiliencia, una herramienta WEB-SIG que permite realizar el análisis de riesgo de desastres y costo-beneficio de una medida de mitigación. El análisis de la amenaza de inundación puede ser evaluado para periodos de retorno de 20, 50 y 100 años. (GEOTEST AG, 2018).

A través de la modelación hidrológica e hidrodinámica se generó el nivel de amenaza existente y mediante levantamiento de información socioeconómica se determinó el nivel de exposición, teniéndose así, los insumos necesarios para el análisis. En la Figura 9 se muestra el flujograma de procesos para el desarrollo del análisis en la plataforma.

Figura 9

Flujograma de procesos para mi-resiliencia



La vulnerabilidad física de los objetos expuestos en Mi-Resiliencia están caracterizados mediante valores empíricos dependiendo del tipo de construcción y el nivel de intensidad de la amenaza, los valores están en el rango de 0 (sin daño) a 1 (daño total) (GEOTEST AG, 2018) y no pueden ser modificados por el usuario.

La amenaza de inundación se analizó para 100 años de periodo de retorno para el escenario de la media más una desviación estándar que trae el efecto estocástico y el posterior análisis probabilístico. La amenaza representada por mapas de inundación, fueron clasificados en tres intensidades: baja, media y alta, en base a los umbrales señalados en (GEOTEST AG, 2018) para las variables de profundidad de inundación h (m) y velocidad de flujo v (m/s) de la Tabla 5.

Tabla 5

Clasificación de intensidades de amenaza de inundación

Amenaza	Variable	Intensidad		
		Baja	Media	Alta
Inundación	h (m)	< 0.5	$0.5 - 2$	> 2
	$v \cdot h$ (m ² /s)	< 0.5	$0.5 - 2$	> 2

Para cada escenario de análisis, el riesgo total se calcula con la ecuación 1

$$R_j = \sum RBD_j + RPD_j + RI_j \quad (E1)$$

Donde: R_j = Riesgo total (Bs/año); RBD_j = Riesgo para bienes, daños directos (Bs/año); RPD_j = Riesgo para personas, daños directos (Bs/año)

El riesgo para bienes por daños directos en edificios, caminos y agricultura se calcula con la ecuación 2.

$$RBD_j = (p(OE) * VU * VE_j) + (p(OE) * VU * VC * g_j) + (p(OE) * VU * VA * A_j) \quad (E2)$$

El cálculo del riesgo para personas por daños directos dentro de edificios y caminos son calculados con la ecuación 3 y 4 respectivamente.

$$\text{Dentro de edificios: } RPD_j = p(OE) * MO * NP * WP * p(pr)_j \quad (E3)$$

$$\text{En caminos: } RPD_j = p(OE) * MO * OV * FR * WP * \frac{FR * g}{v * 24000}_j \quad (E4)$$

Los riesgos de daños indirectos cuantifican posibles costos de pérdidas de ingresos mediante la ecuación 5.

$$RI_j = DP + p(OE) + EM + PE(1 - FRs) \quad (E5)$$

Donde: RBD_j = Riesgo de bienes para escenario j por daños directos (Bs/año); RPD_j = Riesgo de personas para escenario j por daño directo (Bs/año); RI_j = Riesgo por daños indirectos para escenario j (Bs/año); $p(OE)$ = Probabilidad de ocurrencia espacial (-); VU = Vulnerabilidad física (-); VE = Valor edificio (Bs/und); VC = Valor camino (Bs/m); g = Longitud de camino expuesto (m); A = Área expuesta (ha); j = Escenario, periodo de retorno considerado, en este caso 100 (-); MO = Mortalidad (-); NP = Número de personas dentro el mismo objeto (-); $p(pr)$ = Probabilidad de presencia (-); OV = Ocupación promedio por vehículo (-), FR = Cantidad promedio diario de

vehículos en el camino (-); v = Velocidad media de vehículos en el camino (km/h); WP = Voluntad de pago (Willingness to pay) (Bs); DP = Días con pérdida de ingresos (días); EM = Cantidad de empleados afectados (-); PE = Pérdida económica diaria (Bs/día); FRs = Factor resiliencia (-).

El valor del “Costo anual de la medida” dentro del análisis del Beneficio/Costo está dado ecuación:

$$\text{Costo anual medida} = \frac{CC}{VUI} + CM + CO + \frac{CC}{2} * \frac{TIB}{100} \quad (E6)$$

Donde: CC = Costo de construcción (Bs); CM = Costo anual de mantenimiento (Bs/año); CO = Costo anual de operación (Bs/año); Tasa de interés bancaria (%); VUI = Vida útil de la medida (años).

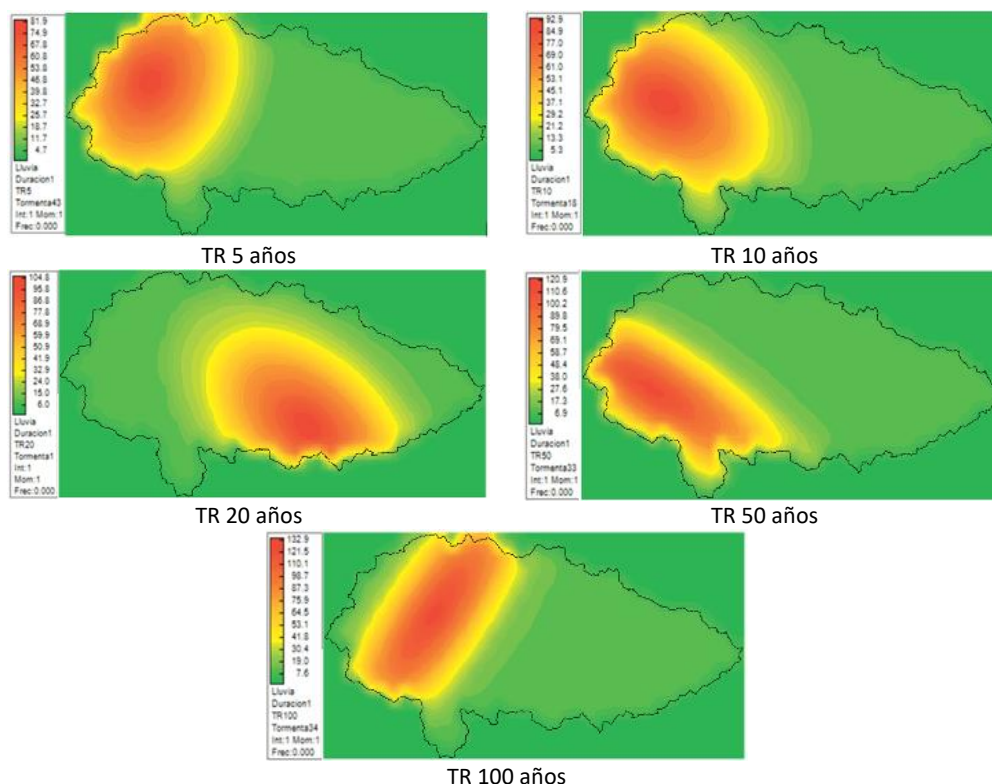
3. Resultados y discusión

Amenaza de lluvia y modelación hidrológica

Con las curvas PDAF determinadas para la cuenca del río Rocha a partir de precipitaciones diarias de 16 estaciones y la grilla de la cuenca se generó escenarios sintéticos de lluvia con patrones espaciales elípticos en IT-NHRain. Se generaron 50 escenarios por periodo de retorno (5, 10, 20, 50 y 100 años) dando como consecuencia un total de 250 escenarios, siendo cada uno resultado de 100 simulaciones para una resolución espacial de 2000 m. Los resultados generados por IT-NHRain fueron almacenados en un archivo con formato *.AME. Para su visualización se utilizó el software CAPRA-GIS, en la Figura 10 se muestra los escenarios considerados críticos para cada periodo de retorno de análisis, cada uno con un centro de tormenta diferente.

Figura 10

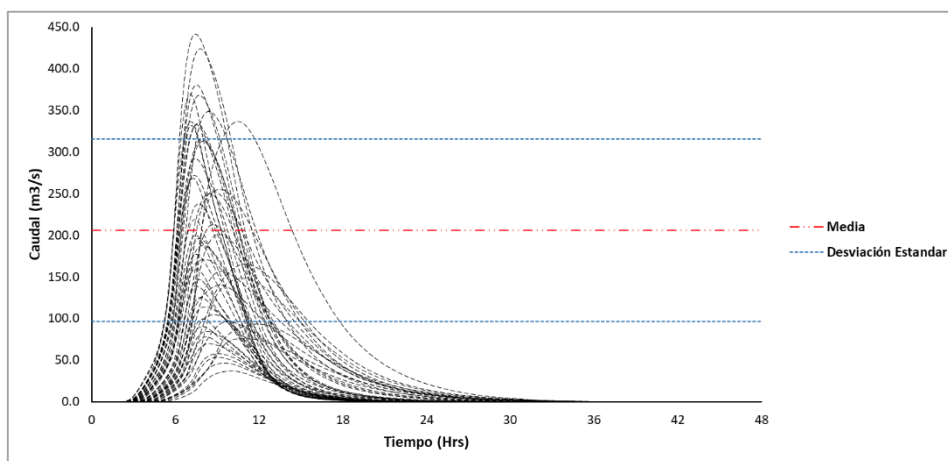
Escenarios de precipitación estocástica



Las tormentas estocásticas introducidas en el modelo hidrológico HEC-HMS generaron los hidrogramas de crecida en los puntos de interés de la cuenca para cada escenario y periodo de retorno. En la Figura 11 se muestra los hidrogramas obtenidos en la salida de la cuenca del río Rocha para los 50 escenarios estocásticos para un periodo de retorno de 5 años.

Figura 11

Hidrogramas de salida del modelo hidrológico para los 50 escenarios estocásticos para un periodo de retorno de 5 años en la salida de la cuenca del río Rocha



La verificación de los resultados se realizó mediante comparaciones con caudales de las estaciones hidrométricas del Puente El Abra, Puente Cajón (Aeropuerto) y Puente Pico de Loro ubicados en el río Rocha y los resultados del modelo hidrológico. Se tomaron caudales para un periodo de retorno de 5 años calculados con la metodología de análisis de extremos empíricos y el caudal medio de las 50 simulaciones realizadas. Dado que la comparación se realizó entre valores puntuales, se emplearon métricas de error simples en lugar de indicadores globales, como son el error absoluto (EA) (ecuación 7) y la diferencia porcentual simétrica (DP) (ecuación 8) para cuantificar la diferencia relativa. En la Tabla 6 se presenta los resultados de la comparación.

$$EA = |Q_{\text{Calculado}} - Q_{\text{Estación}}| [m^3/s] \quad (E7)$$

$$DP = \frac{|Q_{\text{Calculado}} - Q_{\text{Estación}}|}{(Q_{\text{Calculado}} + Q_{\text{Estación}})/2} * 100 [\%] \quad (E8)$$

Tabla 6

Caudal medio de 50 simulaciones en HEC-HMS vs caudal extremo empírico calculado en estaciones hidrométricas del río Rocha para un periodo de retorno de 5 años

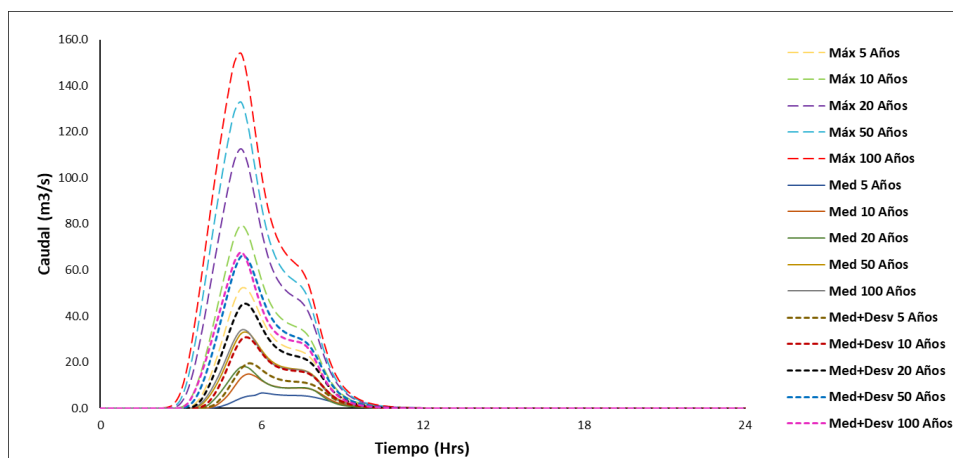
Estación hidrométrica	Caudal medio modelo HEC-HMS (m³/s)	Caudal extremo empírico (m³/s)	EA (m³/s)	DP (%)
Puente Abra	31.55	19.34	12.21	47.98
Puente Cajón Aeropuerto	45.07	52.97	7.9	16.12
Puente Pico de Loro	71.13	64.35	6.78	10.01

Se observa que la media de los hidrogramas calculados se encuentra próximo a los valores de extremos empíricos para un periodo de retorno de 5 años en base a la información hidrométrica de las estaciones automáticas con una diferencia porcentual del 10% en la estación Pico de Loro y 16% en Puente Cajón, indicando un buen desempeño de los resultados calculados en estas estaciones. En la salida de la cuenca del río Rocha no se cuenta con datos medidos.

En la Figura 12 se presentan los hidrogramas máximo, medio y medio más una desviación estándar para el río Chulla para los periodos de retorno de 5, 10, 20, 50 y 100 años.

Figura 12

Hidrogramas de salida máximo, medio y medio más una desviación estándar en la cuenca del río Chulla para los diferentes periodos de retorno



El desarrollo del análisis hidrológico para toda la cuenca del río Rocha y los diferentes periodos de retorno permitió tener una visión más amplia de los procesos hidrológicos, la variabilidad e influencia que tienen entre sí y para evaluar la consistencia de resultados obtenidos.

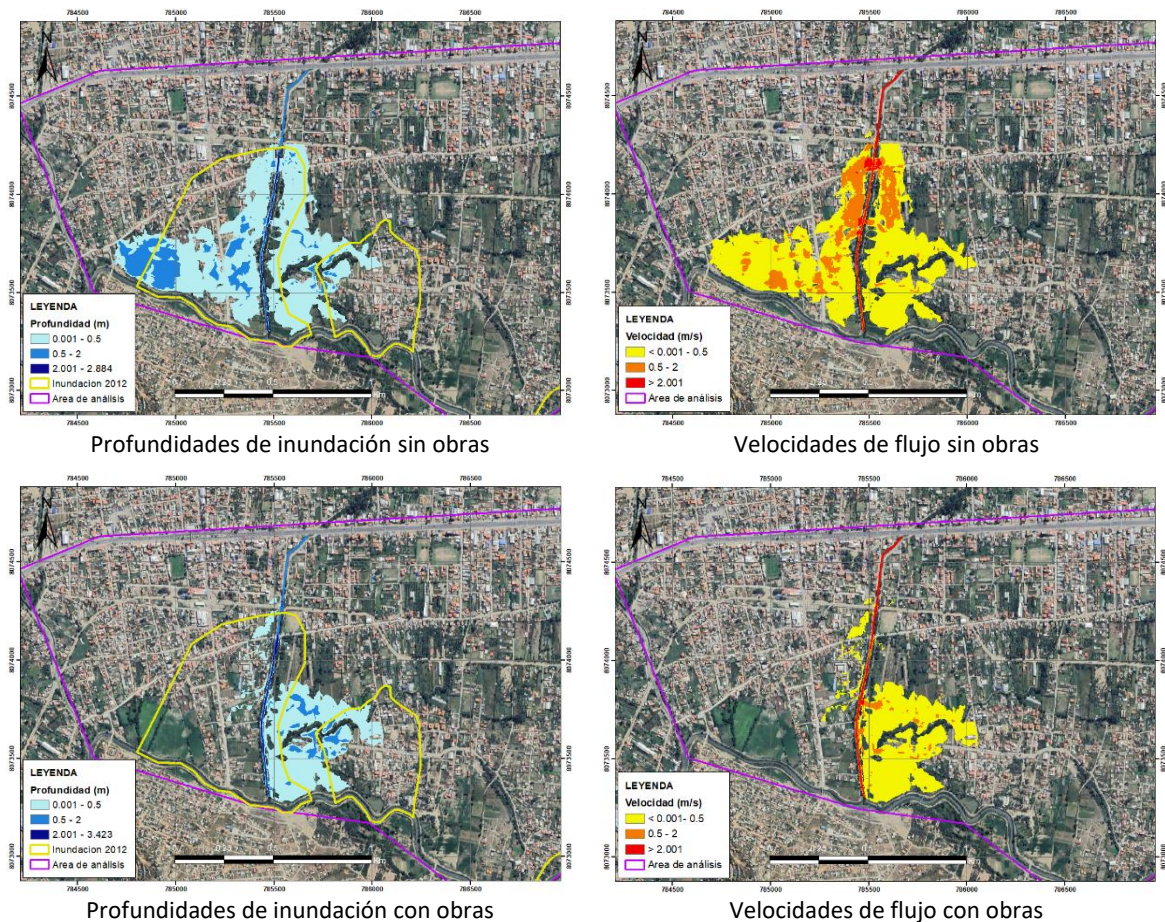
Modelación hidráulica

Las simulaciones en el modelo hidráulico HEC-RAS 2D se realizaron para la media de los 50 escenarios estocásticos más una desviación estándar de cada periodo de retorno, que como se indicó previamente captura el análisis estocástico y la probabilidad de ocurrencia.

El análisis contempló la situación sin obras y con obras (o medidas de mitigación), en la Figura 13 se muestran los resultados de las áreas de inundación generados para un periodo de retorno de 100 años. Los mapas son comparados con las áreas de inundación reportadas por el Gobierno Autónomo Departamental de Cochabamba del año 2012, en base a una evaluación visual se observa la existencia de un importante grado de correlación con los resultados para la situación sin obras.

Figura 13

Área de inundación simulada para los escenarios de 100 años para situación sin obras y con obras



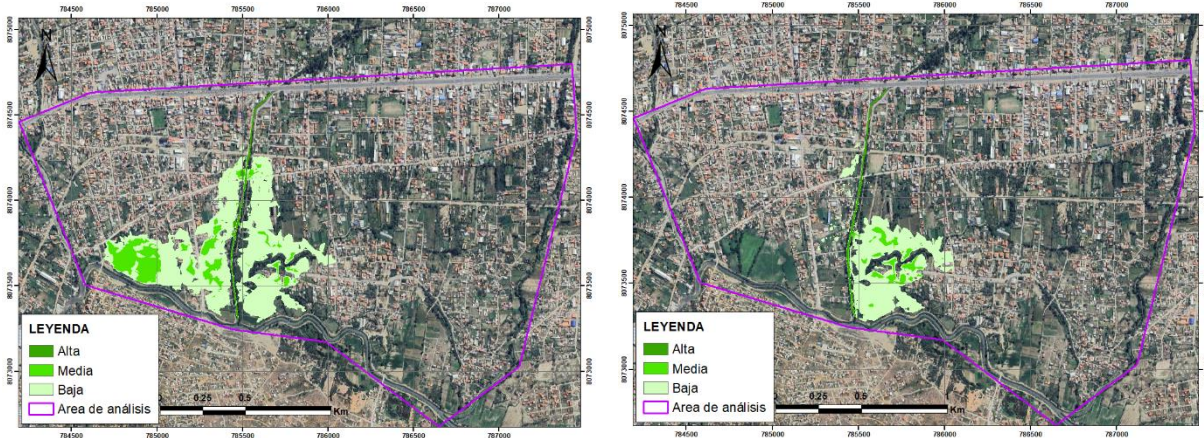
El modelo 2D permitió tener una alta consistencia de los resultados para las inundaciones estimadas, sin embargo, aquello fue posible alcanzar debido al uso de topografía con resolución mucho mayor frente al de fuentes gratuitas (como ASTER), haciendo que la representación del río y las llanuras de inundación sea mucho más precisa considerando sus características físicas.

Análisis de riesgo de inundación

En base a los umbrales de la Tabla 5 se generaron los mapas de intensidades de amenaza, los resultados se muestran en la Figura 14 para la situación sin medidas y con medidas.

Figura 14

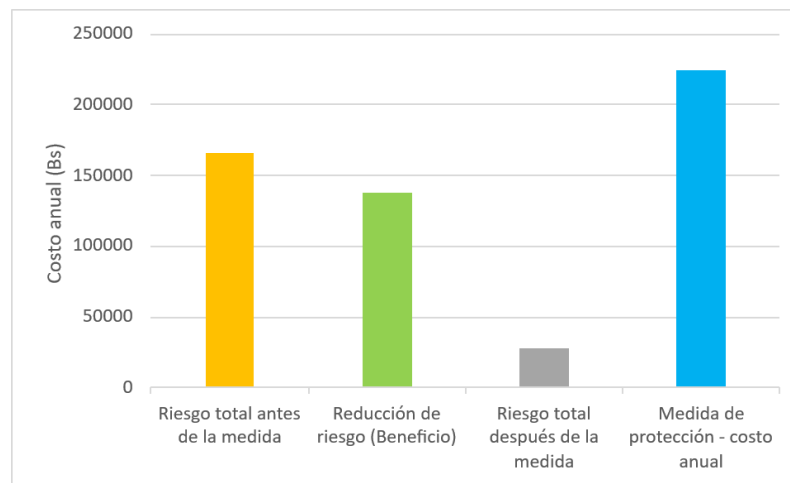
Mapa de intensidades histórico TR100 años media + desviación sin medidas de mitigación (izq.) y con medidas de mitigación (der.)



Posteriormente a la introducción de datos en Mi-Resiliencia, se ejecutó la corrida, dando como resultado la Figura 15 que resume el trabajo realizado para el escenario de la media más una desviación estándar y un periodo de retorno de 100 años.

Figura 15

Gráfico de resultados Beneficio/Costo de Mi-Resiliencia



La gráfica anterior contrasta el riesgo (Bs/año) que la zona de estudio tenía antes de implementar medidas de mitigación con respecto al riesgo (Bs/año) después de implementarlas, dando como resultado una reducción de los riesgos (Bs/año), que llega a ser el beneficio que tendrá el proyecto para la amenaza de inundación por desborde del río Chulla.

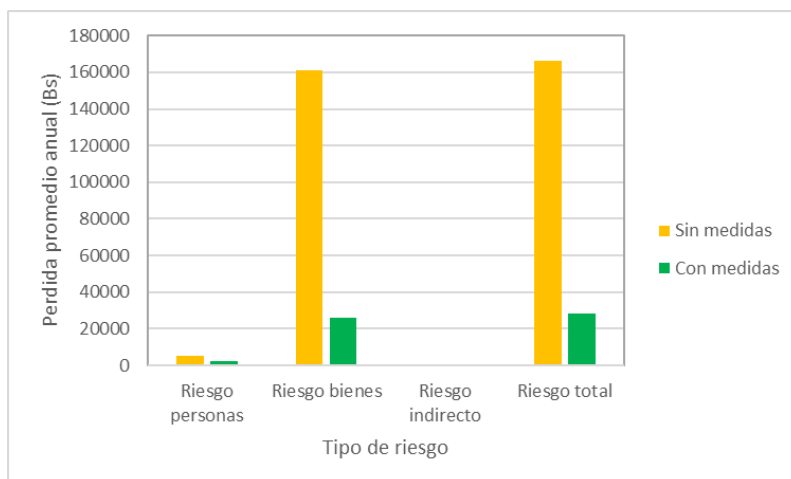
El beneficio generado por la implementación de las medidas de mitigación consideradas representa 83 % (138 mil Bs) del riesgo total sin las medidas (166 mil Bs) en promedio durante cada año. El costo anual de las obras es

calculado para el periodo de vida útil estimado de 50 años y una tasa de interés bancaria del 21.83%. La rentabilidad de las medidas contempladas para reducir y/o evitar el riesgo de inundación dio como resultado un valor de 0.6. Una medida rentable es aquella que refleja los beneficios de una inversión, como la capacidad de generar utilidades o ganancia. En el caso de estudio de Chulla, la rentabilidad obtenida no alcanza para clasificar las medidas como positivas o de ganancia actualmente, debido al uso agrícola de gran parte de las zonas inundables que representan un riesgo económico menor frente a zonas urbanas, sin embargo los beneficios son la protección y contención de vidas humanas, infraestructura pública y privada y área cultivada con un valor social asociado, además de asegurar un crecimiento urbano con mayor seguridad frente a inundaciones justifican las obras planteadas.

Adicionalmente, se presenta el cálculo del riesgo por personas, bienes, riesgo indirecto y riesgo total en la Figura 16. La reducción del riesgo como reducción anual de costos por pérdidas (beneficio) es determinado como la diferencia entre los riesgos totales para la situación actual y la situación esperada después de la implementación de las medidas.

Figura 16

Resumen de los riesgos por personas, bienes, riesgo indirecto y riesgo total

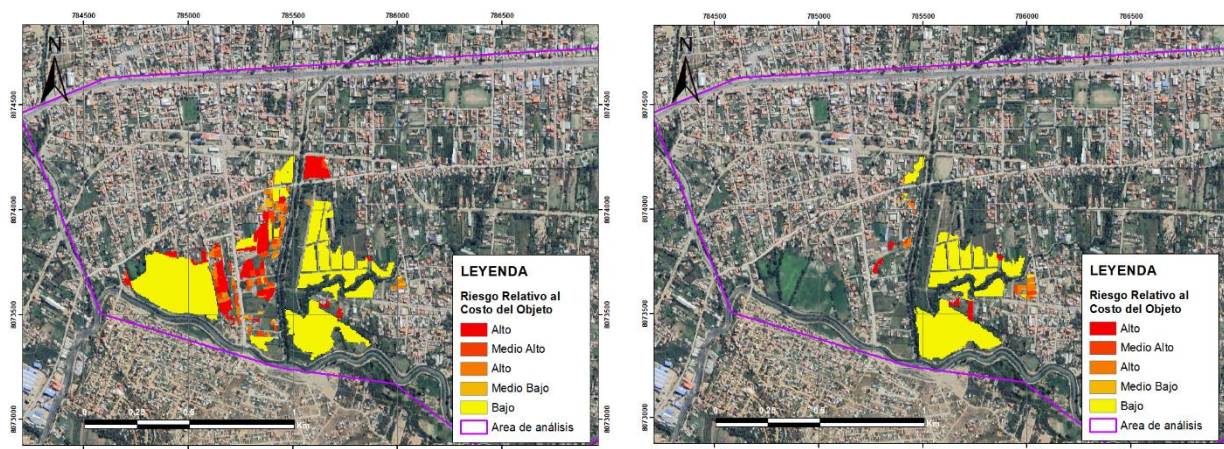


La distribución espacial de las pérdidas anuales calculadas no es posible visualizar en Mi-Resiliencia, para poder identificar las zonas con mayor riesgo de pérdidas se generó un mapa de riesgo relativo al costo del objeto en base al tipo de elemento u objeto expuesto y el mapa de amenaza de inundación, los resultados se muestran en la Figura 17. Las zonas con riesgo de pérdidas anual más alto para la situación sin obras está ubicado en la parte media del margen derecho del río Chulla y la zona próxima a la av. Blanco Galindo en el margen izquierdo, estas zonas corresponden a zonas urbanizadas con viviendas de más de 2 pisos y una elevada presencia de personas, además de algunas infraestructuras públicas. Las zonas de menor riesgo de pérdidas corresponden a zonas de cultivos en su mayoría donde la presencia de personas es mínima o nula.

A pesar de los resultados que el enfoque combinado dio, la metodología introduce incertidumbre debido a la reducción a uno solo el escenario de análisis, así como la información y métodos utilizados. Aunque en el proceso se realizaron evaluaciones específicas, la incertidumbre no se elimina completamente de las simplificaciones y lo que otros eventos podrían generar.

Figura 17

Riesgo relativo al costo del objeto expuesto en la zona de estudio sin medidas de mitigación (izq.) y con medidas de mitigación (der.)



En base a los resultados obtenidos, el análisis y cuantificación del riesgo es un proceso complejo que depende de varios factores, como social, económico, cultural y otros, pudiendo cualquier de ellos tener un valor más alto que el climático. El enfoque del análisis estocástico de las precipitaciones, a diferencia de uno determinístico, permitió obtener un amplio rango de posibles escenarios de tormentas considerando variabilidad espacial, la posibilidad de analizar la probabilidad de ocurrencia y los impactos que puedan tener. Esto da un mejor entendimiento del impacto de clima en la amenaza de inundación y las consecuencias sociales y económicas. La asunción del escenario de la media más una desviación estándar como el escenario más desfavorable y representativo, permitió el planteamiento de las obras y la cuantificación del riesgo. La adaptación y reducción del riesgo es más efectiva cuando se tiene conocimiento de la magnitud de la amenaza existente y la vulnerabilidad de los objetos expuestos.

4. Conclusiones

La estimación de las crecidas para la evaluación de puntos críticos y diseño de obras hidráulicas en los afluentes del río Rocha se ha realizado utilizando diferentes metodologías y enfoques en estudios previos. La presente investigación contempla una metodología combinada entre un análisis estocástico y determinístico. La combinación de ambas metodologías fue satisfactoria obteniéndose resultados que permiten un análisis más amplio en el diseño de obras hidráulicas.

El análisis del riesgo de inundación en el río Chulla comprendió el tramo entre la av. Blanco Galindo y la confluencia con el río Rocha. Con la metodología estocástica de IT-NHRain se generó 50 escenarios estocásticos de lluvia con patrones de forma elíptica con ubicaciones e intensidades aleatorias en base a datos de precipitación de 16 estaciones meteorológicas para cinco periodos de retorno para la cuenca del río Rocha. Mediante modelación hidrológica se generó hidrogramas de salida en diferentes puntos. Los caudales calculados se verificaron con registros hidrométricos de 3 puntos monitoreados en el Río Rocha: Puente del Abra, Puente Cajón Aeropuerto y Puente Pico de Loro, donde las diferencias porcentuales alcanzan 48%, 16% y 10% respectivamente.

La modelación hidráulica en HEC-RAS 2D se ejecutó para la media de 50 escenarios estocásticos más una desviación estándar, considerado el escenario más desfavorable con mayor probabilidad de ocurrencia y con el cual

se pretende capturar la esencia estocástica de la hidrología. Los resultados permitieron determinar las magnitudes de la amenaza y generar mapas de inundación. El modelo, combinado con topografía de alta resolución fue clave para superar las características físicas del río Chulla que tiene el lecho al mismo nivel o por encima de las llanuras de inundación. Las manchas de inundación obtenidas presentaron buena correlación con datos reportados por el GAD Cochabamba del año 2012.

El análisis determinístico de Mi-Resiliencia permitió calcular el riesgo económico de pérdidas anuales y el impacto de las medidas de mitigación en términos económicos (reducción de riesgo), reflejando la relación de los beneficios que generan las obras planteadas, incluyendo beneficios de reducción de riesgos a infraestructuras, viviendas, áreas cultivables, y riesgo de vida humana con respecto al costo total que tendrían las medidas de mitigación. Las obras hidráulicas consideradas generan una importante reducción en el riesgo anual que alcanza el 87% del riesgo total, con una rentabilidad económica de 0.6, el cual desde el punto de vista financiero no es positivo, pero el valor agregado de evitar inundaciones en una zona de crecimiento urbano acelerado tiene valor adicional para la implementación de las obras.

Los resultados demuestran que en la evaluación de riesgo de inundación y la rentabilidad de cualquier obra hidráulica se debe considerar, además de la reducción de la mancha de inundación, otros factores importantes como la exposición social y económica con una valoración a futuro.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno.

Uso de inteligencia artificial: El presente trabajo ha sido elaborado sin el uso de inteligencia artificial en ninguna de sus etapas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Empresa CIVILIDEA por la información topográfica y el inventario de elementos expuestos provistos, que fueron la base para el desarrollo del modelo hidráulico y análisis de riesgo de inundación, además de otra información adicional, y a Vanesa Ponce por la colaboración en la modelación hidrológica.

5. Referencias bibliográficas

- BID & ITEC. (2014). Perfil de riesgo de desastres por inundaciones en Venezuela mediante la plataforma CAPRA.
- BID & MARN. (2013). Perfil de riesgo de desastres por inundaciones en el Salvador utilizando la metodología CAPRA.
- BID, B. I. (2016). *Perfil de Riesgo de Desastres para Bolivia*.
- BOENCO. (2021). *Estudio de Riesgos de Inundaciones y Deslizamientos Bajo Escenarios de Vulnerabilidad y Cambio Climático en la Subcuenca Maylanco*. Cochabamba.
- Brunner, G. W. (2023). *HEC-RAS, River Analysis System - Hydraulic Reference Manual*. Davis, CA, USA: U.S. Army Corps of Engineers'.
- Brunner, G. W. (2024). *HEC-RAS: River Analysis System - HEC-RAS 2D User's Manual*. Davis, CA, USA: U.S. Army Corps of Engineers'.
- Bruno, L. S., Mattos, T. S., Oliveira, P. T., Almagro, A., & Rodriguez, D. B. (2022). Hydrological and Hydraulic Modeling Applied to Flash Flood Events in a Small Urban Stream. *Hydrology*, 9, 223. <https://doi.org/10.3390/hydrology9120223>
- Cardozo, A., & Le Noir, C. (2024). Determinación y Análisis de los Caudales de Evento Extremo Mediante Tormentas Estocásticas en la Cuenca del Río Misicuni. *Investigación & Desarrollo*, 24(2), 29-41.

- Ccopi-Trucios, J. (2023). Evaluación del riesgo de desastres por inundaciones en comunidades andinas del Perú bajo enfoques probabilísticos. *Sustainability*, 15(18), 13768.
- Chow, V. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. Nueva York: McGraw-Hill.
- ERN-AL. (2011). *Consorcio Evaluación de Riesgos Naturales - América Latina. Tomo 1: Metodología de Modelación Probabilista de Riesgos Naturales. Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-3: Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales y Selección*.
- GEOTEST AG. (2018). *MiResiliencia Bolivia - Herramienta para el Análisis del Riesgo de Desastres y Costo Beneficio de Medidas de Mitigación*. Zollikofen, Suiza.
- León, N., López, L., & Velandia, J. (2018). *User Manual Software IT-NHRain V.3.0*. Bogotá: ITEC - Ingeniería Técnica y Científica S.A.S.
- León, N., Velandia, J., López, L., & Yamin, L. (2018). *User Manual Software IT-Flood V.2.2*. Bogotá: ITEC - Ingeniería Técnica y Científica S.A.S.
- Lourenço, M. T., Villazón, M. F., Montenegro, L. E., & Heredia, M. W. (2019). Comparison of 1d and 2d hydrodynamic models for the assessment of dredging in the studies of alternatives for the implementation of the of the. *XVII Congreso Boliviano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*.
- NASA/METI/AIST. (2019). *Modelo Digital de Elevación ASTER V003*. Sioux Falls, Dakota del Sur, USA: Centro de Archivo Activo Distribuido de Procesos Terrestres de la NASA.
- OPINIÓN. (4 de Febrero de 2018). *OPINIÓN, Diario de Circulación Nacional*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2025, de Tres ríos amenazan Vinto y cifra de familias afectadas en el país sube a 6.322. <http://www.opinion.com.bo/opinion/articulos/noticias.php?a=2018&md=0214&id=245137>
- Palagi, S., Patzlaff, J., Sutumpf, M., & Kern, A. (2014). Análisis del Impacto de las Inundaciones en el Valor de las Propiedades Inmobiliarias en la Ciudad de Lajeado, Brasil - Estudio de caso de Viviendas Unifamiliares. *Revista Ingeniería de Construcción*, 29(1).
- Peduzzi, P., Dao, H., Herold, C., & Mouton, F. (2009). Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: The Disaster Risk Index. *Nat. Hazards Earth Syst.*, 9, 1149-1159.
- Pellicani, R., Parisi, A., Lemmolo, G., & Apollonio, C. (2018). Economic Risk Evaluation in Urban Flooding and Instability-Prone Areas: The Case Study of San Giovanni Rotondo (Southern Italy). *Geosciences*, 8, 112.
- PROMIC. (2011). *Manejo Integral de la Cuenca del Río Rocha*. Cochabamba.
- Rincón, D., Velandia, J. F., Tsanis, I., & Khan, U. (2022). Stochastic Flood Risk Assessment under Climate Change Scenarios for Toronto, Canada Using CAPRA. *Water*, 14(2), 227. <https://doi.org/10.3390/w14020227>
- SEI. (2019). *Formulación y Actualización del Plan Director de la Cuenca del Río Rocha, Bajo un Enfoque de Adaptación al Cambio Climático – Entregable C*. Cochabamba.
- TYPSA. (2013). *Plan Maestro Metropolitano de Agua Potable y Saneamiento de Cochabamba - Resumen ejecutivo*. Cochabamba.
- Zapata, R., Hernández, C., Fernández, S., Flores, M., López, S., & Choque, D. (2024). Evaluación probabilística de riesgo de inundaciones bajo escenarios de cambio climático en una cuenca de los Cintis (Chuquisaca, Bolivia). *Revista Técnica Ingenium*, 1(5), 81-94.