

Evaluación probabilística del riesgo de inundaciones bajo escenarios de cambio climático en una cuenca de los Cintis - Chuquisaca

Zapata, R.^a, Hernández, C.^b, Fernández, S.^c, Flores, M.^d, López, N.^e, Choque, D.^f

^a Investigador en el área de recursos hídricos del Instituto de Aguas de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: zapata.ronald@usfx.bo

^b Docente en el área de recursos hídricos de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: hernandez.corina@usfx.bo

^c Estudiante de posgrado en el área de recursos hídricos de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: sergio.fernandezm9@gmail.com.

^d Estudiante de posgrado en el área de recursos hídricos de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: mauricioflores971@gmail.com.

^e Estudiante de posgrado en el área de recursos hídricos de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: nikyloppad29@gmail.com

^f Estudiante de posgrado en el área de recursos hídricos de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: daynoryeisonchoqueorias@gmail.com.

Recibido: 06/10/2024

Aceptado: 10/10/2024

Publicado: 10/11/2024

RESUMEN

La evaluación del riesgo de inundación en la cuenca de estudio, basada en un enfoque probabilístico y en escenarios de cambio climático, revela un incremento notable en la frecuencia y magnitud de los eventos extremos. Mediante la generación de tormentas estocásticas y el uso de modelos hidráulicos como HEC-HMS y HEC-RAS, se estimaron los impactos de las inundaciones en periodos de retorno de 50 y 100 años, los resultados muestran que las áreas más expuestas son las zonas bajas, con infraestructuras críticas y cultivos susceptibles a daños significativos; el análisis de vulnerabilidad, realizado con el software CAPRA-GIS, proyecta pérdidas económicas considerables, subrayando la necesidad de reforzar infraestructuras defensivas y mejorar los sistemas de alerta temprana para mitigar los efectos del cambio climático en esta región clave de Bolivia.

Palabras clave: Riesgo de inundación, cuenca del Río Chico, cambio climático, vulnerabilidad, análisis probabilista.

ABSTRACT

The flood risk assessment in the studied basin, based on a probabilistic approach and climate change scenarios, reveals a significant increase in the frequency and magnitude of extreme events. Through the generation of stochastic storms and the use of hydraulic models such as HEC-HMS and HEC-RAS, the impacts of floods were estimated for 50- and 100-year return periods. The results show that the most exposed areas are the lowlands, where critical infrastructure and crops are highly vulnerable to significant damage. The vulnerability analysis, carried out using CAPRA-GIS software, projects considerable economic losses, highlighting the need to reinforce defensive infrastructure and improve early warning systems to mitigate the effects of climate change in this key region of Bolivia.

Key words: channel type spillways, two-dimensional physical / numerical hydraulic modeling

INTRODUCCIÓN

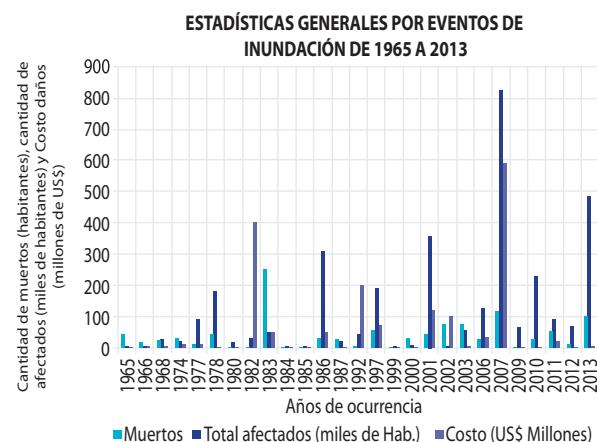
Las inundaciones son uno de los fenómenos naturales más frecuentes y costosos, afectando regiones a nivel mundial, especialmente en áreas vulnerables al cambio climático. En los últimos años, ha habido un incremento en la frecuencia e intensidad de estos eventos debido a factores como la expansión de asentamientos humanos y el uso intensivo de zonas propensas a inundaciones, así como cambios en los patrones de precipitación asociados al calentamiento global (Keating et al., 2014; Arnell & Gosling, 2016). En este contexto, se espera que el cambio climático incremente tanto la magnitud como la frecuencia de las inundaciones en varias regiones, incluyendo Bolivia, lo que plantea retos significativos para la gestión del riesgo y la protección de las comunidades vulnerables.

En Bolivia, las inundaciones han sido particularmente devastadoras, con eventos recientes que han afectado tanto las áreas urbanas como rurales, dañando infraestructuras, viviendas y áreas agrícolas. Entre 1965 y 2013, se reportaron 37 eventos de inundaciones significativos con pérdidas económicas cercanas a los 2 mil millones de dólares, afectando a más de 3 millones de personas y cobrando la vida de aproximadamente 1,000 individuos (BID, 2016). Este panorama sugiere la urgente necesidad de integrar modelos robustos para la evaluación del riesgo y la implementación de medidas de mitigación a nivel local y regional.

En los últimos años, Bolivia ha sido catalogada como una de las naciones más vulnerables a los desastres naturales, incluidos los eventos de inundación, exacerbados por la deforestación y el uso inadecuado de la tierra; entre 2000 y 2020, Bolivia registró 632 eventos de inundaciones que afectaron a más de 2 millones de personas y causaron la muerte de 289 personas, según el SNATD (2020, estos eventos ocurrieron principalmente entre diciembre y marzo, afectando principalmente al altiplano y la Amazonía. La inundación más grave fue en 2007, con 540,000 personas afectadas y 67 muertes, la evolución temporal de las inundaciones en Bolivia desde 1965 hasta 2013 y destacan los diez eventos más severos entre 2000 y 2020.

Estudios indican que, con el cambio climático, el país podría experimentar precipitaciones más extremas, incrementando los riesgos para las infraestructuras y la economía (Freeman & Warner, 2001; Kemfert, 2005). La necesidad de desarrollar estrategias para la gestión sostenible de los recursos hídricos, junto con sistemas de alerta temprana, es crucial para reducir los impactos de las inundaciones en las comunidades más vulnerables.

Figura 1. Eventos de inundaciones desde 1965 hasta 2013



Fuente: Adaptado de SNATD (2020)

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca de estudio tiene una extensión de 20915.21 Km². Hidrográficamente se encuentra en el área de la macrocuenca del Río de la Plata y de la Cuenca del Río Pilcomayo, del que es afluente principal el Río Tumusla, clasificada como cuenca menor; entre las principales fuentes de agua, están los ríos de caudal permanente y temporal, las quebradas, las vertientes y aguas subterráneas; estas últimas son aprovechadas principalmente para consumo humano y animal.

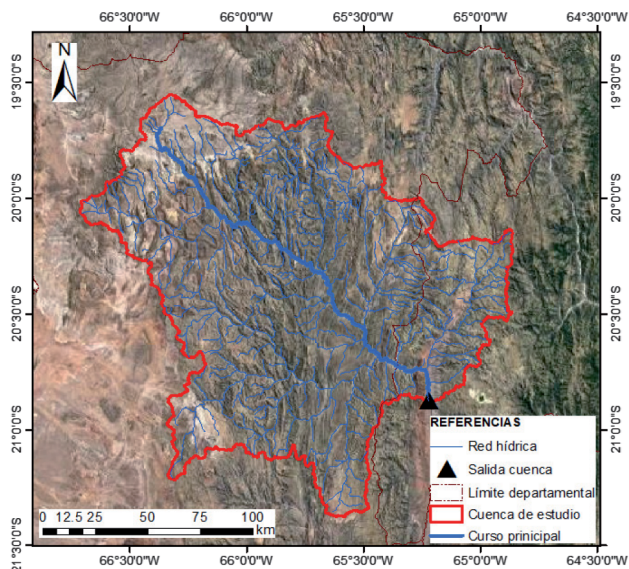


Figura 2. Cuenca de estudio e infraestructura de protección

Inventario de eventos de inundación en el municipio de Camargo

De acuerdo a la información recopilada de la base de datos del desinventar para el municipio de Camargo, además de la plataforma del VIDECL para riesgos de desastres en Bolivia y medios de prensa nacional del país, se han identificado un total de 5 tipos de amenazas en la región, siendo las de mayor recurrencia los eventos de inundación y granizada; y las de menor recurrencia las amenazas de Lluvias intensas, Heladas y Sequías.

Las comunidades con mayores eventos de inundación registrados son las de Camargo, Papagayo y La Torre, presentándose más de 3 eventos de inundación en cada una de ellas. El evento registrado con mayor daño causado fue el del año 2004, que afectó a varias comunidades de la región. En el mapa de la figura 6 se muestra la recurrencia de eventos de inundación por comunidades afectadas a lo largo del río Chico y río Grande del municipio de Camargo.

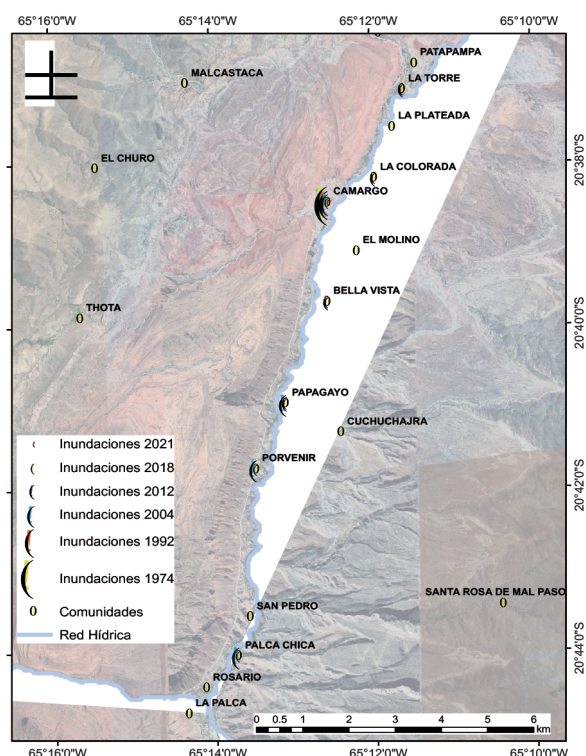


Figura 3. Mapa de espacialidad de la recurrencia de inundación por comunidad

La recurrencia de los eventos de inundación en la zona se ha dado cada cuatro años, siendo los últimos eventos más severos que los anteriores por el número de damnificados y pérdidas de cultivos registradas en la zona.

MATERIALES Y MÉTODOS

Metodología para la evaluación probabilista del riesgo por inundación

En este estudio se eligió la metodología CAPRA para la evaluación del riesgo de inundaciones debido a

sus ventajas sobre otros métodos, ya que permite la evaluación del riesgo tanto determinista como estocástico mediante la generación de escenarios estocásticos de lluvia (Rincón, D. et al, 2022, Torres M.A. et al, 2013; ERN-AL, 2009. A continuación, se describen los pasos considerados.

Amenaza de lluvia

Disponibilidad de la información pluviométrica

Se recopiló información pluviométrica de la plataforma INADHI del SENAMHI, que proporcionó datos históricos mensuales y diarios de precipitación. Se utilizó ArcGis 10.4 para mapear la ubicación de las estaciones, empleando archivos vectoriales (.shp) que incluyeron cuencas, redes hídricas y estaciones. La base de datos abarcó estaciones históricas, automáticas con tecnología GPRS y con datos satelitales. Posteriormente, se aplicaron criterios de selección, considerando estaciones dentro de la cuenca con más de 15 años de registros completos, estaciones convencionales o automáticas (excluyendo datos satelitales), y estaciones fuera de la cuenca con suficiente cantidad de datos, cercanía al perímetro de la cuenca y una variación altitudinal de ± 500 metros respecto a la altitud media de la cuenca.

Análisis de la calidad de los datos

Evaluación visual de series cronológicas: Este proceso incluyó la revisión de oscilaciones en los registros a lo largo del tiempo y la detección de periodos con datos idénticos, que podrían ser indicativos de errores sistemáticos o aleatorios en la recolección de datos.

Evaluación de outliers o datos atípicos: La evaluación de datos atípicos se realizó siguiendo la Guía de Balance Hídrico de Bolivia (1980-2020) y el enfoque del rango intercuartílico (RI), comúnmente utilizado en datos climáticos. Para este estudio, los umbrales de valores atípicos fueron definidos con la fórmula $U_{max} = q_{75} + f \cdot (q_{75} - q_{25})$, donde f es un factor multiplicador ajustable.

Donde q_{25} es el primer cuartil, q_{75} es el tercer cuartil, y f es un factor multiplicador definido por el usuario. El U_{min} es el umbral mínimo del cual los datos menores a dicho valor son considerados como sospechosos. El U_{max} es el umbral máximo del cual los datos mayores a dicho valor son considerados como sospechosos.

Análisis de regionalización y homogeneización

Se aplicó el método del vector regional para evaluar la homogeneidad de las series de precipitación. El análisis se realizó mediante la creación de un vector de referencia (índice anual) que representa la tendencia de cada región, considerando las estaciones ficticias para verificar la homogeneidad temporal y espacial.

Relleno y reconstrucción de series temporales de precipitación

Se aplicó el Standard Normal Homogeneity Test (SNHT), utilizando el paquete Climatology V3.1.1 en R, para completar las series de precipitación con datos faltantes, el método se basó en el enfoque de Paulhus y Kohler (1952), que utiliza promedios ponderados de estaciones cercanas, normalizados mediante la división por sus precipitaciones medias.

Generación de curvas PADF y tormentas estocásticas

Por las características de la cuenca se seleccionó una duración de 5 días para la Cuenca del río Grande y río Chico.

Construcción del modelo hidrológico

Para la simulación de los hidrogramas de crecidas en la cuenca de estudio, se utilizó el software HEC-HMS v 4.0 con el modelo de lluvia-escurrimiento del hidrograma unitario del S.C.S. Este modelo se basa en el número de curva de escurrimiento (CN) y pérdidas por infiltración, considerando umbrales de escurrimiento como lo describen Chu y Steinman (2009). Este enfoque es ampliamente utilizado en hidrología debido a su simplicidad, robustez y precisión, especialmente en cuencas de Latinoamérica (Vega-Manganiello et al., 2015; Francisco-Nicolás et al., 2010).

Los datos de entrada para el modelo incluyeron: Área de la cuenca, tiempo de retardo (asumido como 0.6 del tiempo de concentración, SCS, 1972), número de curva de escurrimiento (CN). Se utilizaron tormentas de diseño para periodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años, ingresando la duración de la lluvia y el intervalo de tiempo según los criterios de distribución pluviométrica. La cuenca fue modelada con salidas comunes para simplificar la simulación, pero los caudales fueron calculados de manera individual para cada subcuenca.

Amenaza de lluvia

El estudio se realizó utilizando el software IT-LluviaNH, desarrollado para el análisis probabilístico de la amenaza de lluvias no huracanadas. Este software permitió generar múltiples escenarios estocásticos de lluvia a partir de registros históricos de estaciones meteorológicas o imágenes satelitales, representando adecuadamente la amenaza en la zona de estudio (ITEC, 2018).

Amenaza de inundación

Asimismo, se empleó el software IT-Inundación para el análisis de inundaciones, tanto fluviales como por desbordamiento. En el enfoque probabilístico, el software generó diferentes escenarios de caudal para un mismo periodo de retorno, considerando la variabilidad de la precipitación. En el enfoque determinista, se realizaron estimaciones de flujo basadas en curvas de periodo de retorno. Estos resultados se utilizaron como

datos de entrada en el software HEC-RAS, con el que se obtuvo información sobre la profundidad, velocidad y duración de cada escenario de inundación (ITEC, 2018).

Metodología para la evaluación del riesgo

Modelación hidráulica en HEC RAS

La modelación hidráulica en **HEC RAS** se empleó para evaluar el riesgo de inundación de manera precisa y detallada. La metodología aplicada incluyó los siguientes pasos:

Recopilación de datos: Se reunieron datos topográficos (elevaciones, pendientes) y datos hidrológicos (caudales, curvas de descarga) de la zona de estudio.

Topografía del cauce y planicie de inundación: Se utilizó información topográfica de alta resolución ($\leq 1\text{m} \times 1\text{m}$), obtenida mediante levantamiento con estaciones totales, drones con cámaras fotogramétricas, LIDAR o imágenes satelitales. Esta precisión es fundamental debido a la evaluación de estructuras de defensa ribereña y otras infraestructuras expuestas a inundaciones.

Rugosidad del cauce y planicie de inundación: La rugosidad, expresada por el coeficiente de Manning o Darcy-Weisbach, se evaluó considerando las características del lecho del río y las planicies de inundación. Este valor, obtenido a partir de estudios y fotografías de canales típicos, se ajustó a las condiciones locales de los casos de estudio para asegurar la precisión en la modelación.

Este enfoque permitió una representación fiel del comportamiento hidráulico en la zona de análisis.

Configuración de modelo hidráulico

La configuración del modelo hidráulico en HEC RAS debe configurarse con el método de flujo no estacionario (unsteady flow) el cual implica los siguientes pasos:

Secciones transversales

Asignación de diques (Levees)

Generación de un plan de trabajo definiendo los siguientes parámetros de cálculo: Geometría con la que interactuará el fluido. simulación de caudal no estacionario, post procesamiento, definición de fecha/ tiempo de inicio – final, intervalo computacional de cálculo, intervalo del hidrograma de salida, intervalo de salida detallado, opciones de control de convergencia

Parámetros del método de flujo no estacionario: En este apartado debe configurarse las condiciones de contorno del modelo hidráulico: seleccionar ubicación de condiciones de contorno, asignar una condición de contorno a las secciones correspondientes, asignar el hidrograma a la condición de contorno de entrada

Calibración del modelo hidráulico

Para la calibración del modelo hidráulico en HEC RAS, se recopilaban datos de campo y mediciones relevantes, incluyendo información topográfica, geometría de las estructuras, condiciones de flujo y rugosidad. Estos datos permitieron que el modelo base reflejara de manera precisa las características del área de estudio.

Se simuló el modelo hidráulico inicial y se compararon los resultados con los datos observados en campo.

Este paso identificó discrepancias entre los valores simulados y los medidos, especialmente en términos de tirante y velocidad del flujo.

Luego, se ajustaron los parámetros del modelo, tales como la rugosidad del cauce y la elevación del fondo, para reducir las diferencias encontradas. Una vez realizado el ajuste, se volvió a simular el modelo con los parámetros modificados y se evaluó la precisión de los resultados en comparación con los datos reales.

Finalmente, se validó el modelo ajustado mediante pruebas con diferentes condiciones de flujo, asegurando que el modelo calibrado pudiera replicar con precisión las características hidráulicas de la zona en diversas situaciones.

Componente de exposición

Información requerida

El componente de exposición consistió en levantar una base de datos sobre los elementos expuestos en el tramo de análisis seleccionado. Esta información fue recopilada mediante imágenes satelitales y trabajo de campo, complementada por datos de catastros y límites territoriales, materiales de viviendas (mampostería, madera, adobe), áreas agrícolas y verdes, ubicación de vías y puentes, principales unidades sociales, y obras de protección como defensas ribereñas.

La recopilación de esta información fue clave para analizar la exposición de los elementos ante la amenaza de inundaciones, lo que permitió evaluar el grado de contacto de los componentes con el peligro y su vulnerabilidad frente a posibles daños.

Exposición de los componentes

En el caso específico de las cuencas del Río Chico y Río Grande, se evaluaron los factores de exposición y vulnerabilidad.

Estos análisis permitieron definir medidas de prevención y mitigación, como la construcción de sistemas de drenaje, la elevación de edificaciones, y la creación de sistemas de alerta temprana y planes de evacuación.

El análisis de exposición se actualizó de manera continua para asegurar la relevancia de las estrategias

de prevención frente a cambios en las condiciones ambientales y socioeconómicas (Figura 3).

Evaluación de vulnerabilidad

Información requerida

Se recopiló información sobre elementos físicos como infraestructuras, muros, cultivos y ganadería en las zonas críticas. Estos elementos fueron identificados como los más vulnerables ante la amenaza de inundación.

Tipificación de los elementos

Tipificación de infraestructura:

Se evaluaron parámetros de las edificaciones tales como uso, estado, materiales de construcción (muros, cubiertas, pisos), número de pisos, altura entre pisos, y cantidad de habitantes. Utilizando el software ERN-vulnerabilidad V2.0, se aplicaron funciones específicas de vulnerabilidad basadas en el tipo de edificación y su exposición a las inundaciones, ajustando los resultados con parámetros como fracción de altura y porcentaje de daño estimado.

Tipificación de cultivos:

Se definieron funciones de vulnerabilidad para diferentes tipos de cultivos, considerando sus características y sistemas de riego. Los parámetros evaluados incluyeron la altura de los cultivos, fracción de altura, porcentaje de daño estimado y curvatura de vulnerabilidad, aplicando el programa ERN-vulnerabilidad V2.0.

Funciones de curva de vulnerabilidades según la tipificación de los componentes

Infraestructura: Se establecieron curvas de vulnerabilidad para diferentes tipos de edificaciones, dependiendo del material de construcción y el número de pisos.

Muros: Se identificaron las vulnerabilidades de los muros de protección, categorizándolos en muros de mampostería de piedra, hormigón ciclópeo y gaviones.

Cultivos: Se desarrollaron curvas específicas para diferentes tipos de cultivos, como uva, durazno, maíz, cereales y hortalizas.

Ganadería: La ganadería también fue evaluada en términos de vulnerabilidad, con curvas específicas para bovinos, caprinos, ovinos, porcinos y avicultura.

Metodología de evaluación probabilista de riesgo

La metodología de evaluación probabilista de riesgo, según la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), define el riesgo de desastres como la posibilidad de muertes, lesiones o daños en activos dentro de un sistema o comunidad, determinado por la amenaza, la exposición, la vulnerabilidad y la capacidad de respuesta (UNDRR, 2017).

El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) indica que el módulo de riesgo integra los componentes de amenaza, exposición y vulnerabilidad, y destaca la importancia de evaluar la incertidumbre, que se clasifica en:

Incetidumbre natural o aleatoria: Inherente a la variabilidad de los procesos naturales.

Incetidumbre epistémica: Derivada de la falta de conocimiento sobre el sistema evaluado.

La elección del método de análisis de riesgo depende de las necesidades específicas del proyecto, considerando factores como la disponibilidad de datos y modelos, limitaciones de tiempo y recursos, y el nivel de detalle requerido (BID, 2019).

La evaluación probabilista aborda incertidumbres inherentes al riesgo de desastres, como la limitada disponibilidad de datos históricos y la infrecuencia de eventos catastróficos (ERN-AL, s.f. a). Esta metodología modela probabilísticamente los componentes del riesgo y utiliza eventos estocásticos para calcular daños esperados y sus probabilidades, propagando las incertidumbres.

El resultado es una distribución de probabilidades de pérdidas, de la cual se derivan métricas de riesgo como la curva de excedencia de pérdidas (CEP), la pérdida anual esperada (PAE) y las pérdidas máximas probables (PMP). Para más información, se puede consultar la Plataforma CAPRA (Evaluación Probabilística del Riesgo).

Cálculo numérico básico

El riesgo por amenazas naturales es comúnmente descrito mediante la curva de excedencia de pérdidas ("loss curve") que especifica las frecuencias, usualmente anuales, con que ocurrirán eventos en que se excedan un valor especificado de pérdidas. Esta frecuencia anual de excedencia o tasa de excedencia puede calcularse mediante la siguiente ecuación, que es una de las múltiples formas que adopta el teorema de la probabilidad total:

Donde:

$v(p)$ = tasa de excedencia de la pérdida p

$F_A(\text{Evento } i)$ = frecuencia anual de ocurrencia del evento i

$Pr(P > p | \text{Evento } i)$ = probabilidad de que la pérdida sea superior a p , dado que ocurrió el i -ésimo evento.

La suma en la ecuación anterior se hace para todos los eventos potencialmente dañinos. El inverso de $v(p)$ es el periodo de retorno de la pérdida p , identificado como T_r .

La pérdida p a que se refiere la ecuación anterior es la suma de las pérdidas que acontecen en todos los elementos expuestos.

Incetidumbres

Generalmente es impráctico determinar de manera directa la distribución de probabilidad de la pérdida en un bien expuesto condicionada a la ocurrencia de un escenario. Por razones metodológicas, la probabilidad de excedencia de la pérdida p , dado que ocurrió un evento, suele expresarse de la siguiente manera:

Donde:

$Pr(P > p | I)$ = probabilidad de que la pérdida exceda el valor p dado que la intensidad local fue I

$f(I | \text{Evento})$ = densidad de probabilidades de la intensidad condicionada a la ocurrencia del evento

Estimadores puntuales del riesgo

La curva calculada aplicando la ecuación para la curva de excedencia de pérdidas ("loss curve") tiene toda la información necesaria para caracterizar el proceso de ocurrencia de eventos que produzcan pérdidas. Sin embargo, en ocasiones es impráctico utilizar una curva completa, por lo que conviene utilizar estimadores puntuales del riesgo que permitan expresarlo con un solo número.

Se presentan a continuación los dos estimadores puntuales comúnmente utilizados.

Pérdida anual esperada (PAE): se trata del valor esperado de la pérdida anual. Es una cantidad importante puesto que indica, por ejemplo, que si el proceso de ocurrencia de eventos dañinos fuera estacionario de aquí a la eternidad, su costo equivaldría a haber pagado la PAE cantidad anualmente. Por tanto, en un sistema simple de seguro, la pérdida anual esperada sería la prima pura anual justa. La PAE puede obtenerse por integración de $v(p)$ o mediante la siguiente expresión:

Pérdida máxima probable (PML por las iniciales en inglés de Probable Maximum Loss): se trata de una pérdida que ocurre con muy poca frecuencia. No existen estándares universalmente aceptados para definir qué quiere decir "muy poca frecuencia". De hecho, la elección de un periodo de retorno u otro para tomar cierta decisión depende de la aversión al riesgo de quien la está tomando. Para el caso de análisis de inundaciones no es usual en general realizar análisis para periodos de retorno de más de 200 o 250 años ya que en general los fenómenos hidrometeorológicos son más recurrentes, es decir, se repiten entre cada veinte o cincuenta años.

Escenarios de Cambio Climático en la Estimación del Riesgo Probabilista de Inundación

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático define el cambio climático como aquel cambio atribuido a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera, sumándose a la variabilidad natural del clima. El Panel Intergubernamental de

Expertos en Cambio Climático (IPCC) señala que el cambio climático se manifiesta a través de cambios en la media y/o la variabilidad de las propiedades climáticas, persistiendo por periodos prolongados, típicamente décadas o más.

Modelos de Circulación Global (GCMs)

Los GCMs son herramientas que simulan los procesos físicos de la atmósfera, océano, criosfera y superficie terrestre de manera acoplada, aunque no pueden abordar fenómenos de menor escala como la orografía y la convección. Estos modelos son la principal fuente de información para predecir el clima a largo plazo, generando series a partir de algoritmos matemáticos que representan las dinámicas del sistema climático.

A pesar de su utilidad, los GCMs presentan limitaciones en la representación de atributos climáticos locales, dado que su resolución espacial horizontal varía entre 1 y 3 grados (aproximadamente 40 a 120 km en el ecuador). Por ello, es fundamental desarrollar proyecciones climáticas a escala reducida para evaluar los impactos locales en los recursos hídricos.

CMIP6

El Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP) ha mejorado la comprensión del clima pasado, presente y futuro. Las fases más recientes, CMIP5 y CMIP6, han mejorado las simulaciones del clima global, aunque aún presentan sesgos sistemáticos, especialmente en las precipitaciones. Para el análisis, se emplearon datos de 10 GCMs del CMIP6, complementados con otros 7 modelos para una mejor evaluación del desempeño en diferentes zonas con variados patrones pluviométricos.

Escenarios de Cambio Climático

El sexto informe del IPCC evalúa cinco escenarios que ilustran posibles evoluciones de las fuerzas impulsoras del cambio climático. Estos escenarios incluyen emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) altas, intermedias y bajas, con predicciones de incremento de precipitaciones en latitudes altas y reducción en subtropicales. La evaluación sugiere que el escenario más crítico para eventos extremos en Bolivia es el SSP5 (8.5).

Análisis del Desempeño de los GCMs

Para identificar el GCM que mejor representa las características pluviométricas locales, se evaluaron cinco indicadores estadísticos. La delimitación temporal se centró en el escenario SSP5-8.5, considerado crítico por el aumento de emisiones de GEI. Las series históricas de 1980 a 2015 se usaron como referencia para los periodos 2021-2060 y 2061-2100.

Reducción de Escala (Downscaling)

Las técnicas de reducción de escala buscan asociar las salidas de los GCM con condiciones meteorológicas locales.

Entre las técnicas, el Quantile Mapping ha demostrado ser efectivo, transformando las funciones de distribución de variables modeladas en observadas. Este método no paramétrico utiliza la relación cuantil-cuantil para alinear las distribuciones acumulativas de series temporales observadas y simuladas.

Probabilidad de excedencia de valores de pérdida

La curva de pérdidas, $v(p)$, indica con qué frecuencia ocurrirán eventos que producirán pérdidas iguales o superiores a una dada, p . Si suponemos que el proceso de ocurrencia de eventos en el tiempo obedece a un proceso de Poisson, entonces es posible calcular la probabilidad de que la pérdida p sea excedida en un lapso T , es decir, en los próximos T años, con la siguiente expresión:

Donde:

$P_e(p,T)$ = probabilidad error de que la pérdida p sea excedida en los próximos T años.

Análisis del riesgo por inundación

El análisis del riesgo por inundación es un proceso que se utiliza para evaluar el nivel de peligro que representan las inundaciones en un área determinada.

El objetivo principal es identificar las posibles amenazas de inundación y evaluar la vulnerabilidad de los bienes y personas que se encuentran en esa zona.

Este análisis implica la identificación de las áreas de riesgo, la evaluación de la vulnerabilidad, la evaluación de la amenaza y el análisis del riesgo en sí. Al analizar el riesgo, se deben considerar factores como la probabilidad de que ocurra una inundación, el grado de impacto que tendría en la zona afectada y la eficacia de las medidas de mitigación y preparación que se podrían implementar.

Evaluación del riesgo

Existe un amplio consenso de que una de las estrategias más efectivas para la reducción del riesgo es la planificación, en la medida en que intenta ubicar a la población, la infraestructura física y las actividades económicas en zonas aptas para cada tipo de actividad, de acuerdo con las capacidades y características del territorio. Es por ello que su adecuada interpretación y representación es de vital importancia.

La evaluación del riesgo se lleva a cabo mediante la asociación de las amenazas consideradas sobre el inventario de activos expuestos con las funciones de vulnerabilidad relacionadas.

Para el efecto se emplea la herramienta de evaluación de riesgo CAPRA-GIS. Se evalúa, entonces, el porcentaje de daños esperado en cada una de las edificaciones y zonas de cultivo expuestas para cada uno de los escenarios planteados y para el análisis probabilista integral. La valoración del riesgo se presenta en términos de:

Porcentaje de afectación física de las construcciones.

Pérdidas anuales esperadas aproximadas por predio.

Pérdidas económicas máximas probables para el portafolio de construcciones.

Pérdidas y porcentaje de daño esperado para escenarios específicos.

Pérdidas económicas esperadas y máximas probables en zonas de cultivos.

RESULTADOS

Análisis de información hidroclimática

Se seleccionaron 29 estaciones dentro y fuera de la cuenca del río Chico y río Grande (Camargo), de acuerdo con los criterios descritos en la tabla 4. Todas las estaciones seleccionadas provienen de las estaciones terrestres del INADHI-SENAMHI.

De las 29 estaciones, el 52% (15 estaciones) cuenta con más de 30 años de registros completos, el 28% (8 estaciones) tiene entre 20 y 30 años de información, y el 20% (6 estaciones) posee entre 15 y 20 años de registros completos. Entre las estaciones con mayor antigüedad se encuentran Yocalla (C29), Vitichi (C28), Uyuni (C26), Tupiza (C25), Potosí Los Pinos (C16), Oploca (C12), y El Puente (C08), que comenzaron sus registros en 1942, lo que representa aproximadamente 80 años de datos.

La altitud de estas estaciones varía entre 2,176 msnm y 3,950 msnm, mientras que la precipitación media multianual oscila entre 196.4 mm y 707.8 mm. En la tabla 14 se detallan las características de cada estación, incluyendo su ID, coordenadas, precipitación media anual, y los años de registros completos. El mapa de la figura 20 muestra la ubicación de las estaciones dentro de la cuenca del río Chico y río Grande, con un total de 14 estaciones dentro de la cuenca.

La disponibilidad de información a escala diaria se presenta gráficamente en la figura 21, donde se puede observar el comportamiento de las estaciones entre 1980 y 2020. Para identificar y corregir datos atípicos, se aplicó un proceso metodológico, que se describe en el esquema de la figura 7. Se realizaron análisis separados para cada caso de estudio y se identificaron siete grupos de estaciones con características pluviométricas y altitudinales similares.

Después de calcular los umbrales máximos, se identificaron los valores atípicos que excedían los límites

establecidos para cada estación. Estos valores fueron comparados con los datos de otras estaciones del mismo grupo para verificar similitudes en magnitud y temporalidad. En los casos en los que no se encontraron similitudes, se procedió a eliminar los datos atípicos.

Finalmente, la regionalización de las estaciones se realizó en un solo análisis que cubrió las tres áreas de estudio, identificando tres regiones homogéneas en función de la pluviometría. La primera región incluye estaciones con una precipitación anual entre 200 y 300 mm, y un coeficiente de correlación superior a 0.65. La segunda región se caracteriza por precipitaciones superiores a 500 mm, típicas de zonas de valle, con un coeficiente de correlación mayor a 0.7. La tercera región tiene precipitaciones anuales entre 300 y 500 mm, con un coeficiente de correlación superior a 0.6.

Los resultados de los índices anuales del vector regional se muestran en varias gráficas, reflejando las características de cada región homogénea.

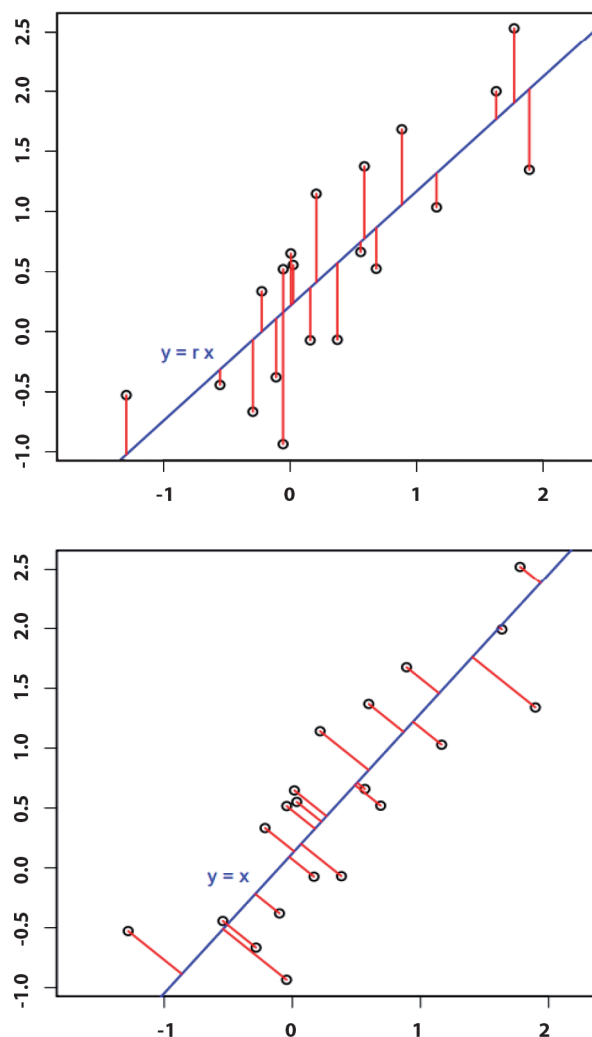


Figura 4. En rojo, desviaciones de la recta de regresión lineal (azul) minimizadas por mínimos cuadrados en los modelos I (izquierda) y II (derecha).

Generación de curvas PADF y tormentas estocásticas

La generación de curvas PADF y tormentas estocásticas de lluvia se realizó utilizando el software IT-LluviaNH, el cual permite obtener una serie de eventos estocásticos que en conjunto representan la amenaza de lluvia en cada una de las cuencas de análisis.

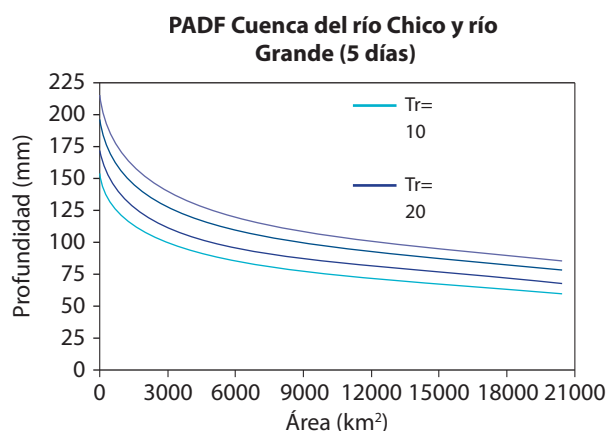


Figura 5. Curvas PADF para 5 días de duración - Cuenca de estudio

Resultados de modelo hidrológico

Los resultados del modelo hidrológico mostraron que, para la cuenca, los caudales máximos estimados variaron entre 1375.52 m³/s para un periodo de retorno de 10 años y 2446.9 m³/s para un periodo de retorno de 100 años.

El modelo proporcionó resultados satisfactorios en términos de consistencia y comparación con datos históricos de la región. Estos resultados son coherentes con la literatura que respalda la validez del método en cuencas con áreas comprendidas entre 0.5 y 250 km² (García y Conesa, 2011), confirmando su aplicabilidad en el contexto local.

Los caudales resultantes se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 1. Caudales de crecida máxima en las cuencas

Estado de carga	Periodo de retorno	Avenida Máxima
	T (años)	Q (m ³ /s)
Estado 1	10	1375.52
Estado 2	20	1879.6
Estado 3	50	2146.2
Estado 4	100	2446.9

Resultados de la modelación hidráulica

La modelación hidráulica se realizó mediante el método de flujo no estacionario, lo que permitió una simulación efectiva del comportamiento del flujo en el cauce del río. Este enfoque es crucial para entender cómo el agua se comporta bajo diferentes condiciones hidrológicas.

Uno de los aspectos más destacados de los resultados es la utilización de una topografía detallada con una resolución de 0.40 m x 0.40 m. Esta alta resolución es fundamental, ya que garantiza que la geometría del terreno y del cauce se represente con precisión, lo que a su vez impacta directamente en la calidad y fiabilidad de los resultados obtenidos. La correcta representación del terreno es esencial para predecir con exactitud los flujos y niveles de agua durante eventos de inundación.

El análisis de las características hidráulicas del modelo mostró que se establecieron distancias adecuadas entre las secciones transversales, orientándolas de manera perpendicular al flujo. Esta configuración optimiza la recolección de datos y mejora la exactitud en la simulación, permitiendo capturar variaciones en el comportamiento del flujo de manera más efectiva. Además, se consideró la amplitud de estas secciones para evaluar potenciales desbordamientos, un factor crítico en la gestión del riesgo de inundaciones.

La asignación de diques en las elevaciones topográficas se realizó con un enfoque cuidadoso, identificando las obras de defensa ribereña y los puntos de desborde. Esta estrategia no solo contribuyó a la precisión del modelo, sino que también permitió adoptar un carácter cuasi-bidimensional, integrando el efecto de desbordamiento del flujo hacia las áreas adyacentes. Este aspecto es fundamental para comprender cómo el flujo puede afectar las zonas aledañas en caso de inundaciones.

Para la entrada de caudales, se utilizaron hidrogramas que se cargaron en formato "DSS", lo que facilitó la simulación de flujos no uniformes. La capacidad de manejar hidrogramas en este formato es una ventaja significativa, ya que permite una flexibilidad en el análisis de diferentes escenarios de inundación. Finalmente, el coeficiente de rugosidad de Manning fue ajustado a 0.027 para el lecho del río y a 0.032 para los márgenes. Estos valores se determinaron con base en las características del material gravoso presente en el área de estudio. La correcta asignación de estos coeficientes es crucial, ya que influyen directamente en la velocidad y el comportamiento del flujo en el modelo.

Se calibró el coeficiente de rugosidad (n) en el modelo hidráulico, variando este parámetro para que los tirantes simulados se asemejaran a los tirantes observados.

Los gráficos comparativos entre las curvas de tirantes observados y simulados mostraron un comportamiento similar, aunque no se superpusieron completamente. Esta similitud es crucial, ya que indica que el modelo

puede replicar adecuadamente el comportamiento del flujo en eventos de inundación.

Las curvas de tirantes reflejaron una distribución temporal considerablemente cercana, lo que sugiere que el modelo simula correctamente la dinámica del flujo a lo largo del tiempo. Se obtuvieron parámetros estadísticos que indican una adecuada similitud entre los tirantes observados y simulados, validando la efectividad de la calibración del modelo.

Tabla 2. Parámetros estadísticos de la calibración

Estadístico		Valor
Coeficiente de correlación	R2	0.99
Coeficiente de varianza	CV	1.33
Coeficiente de Nash	NS	-1.05

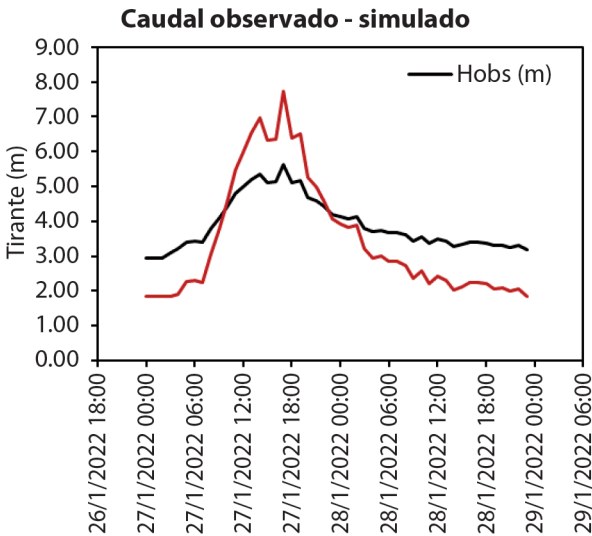
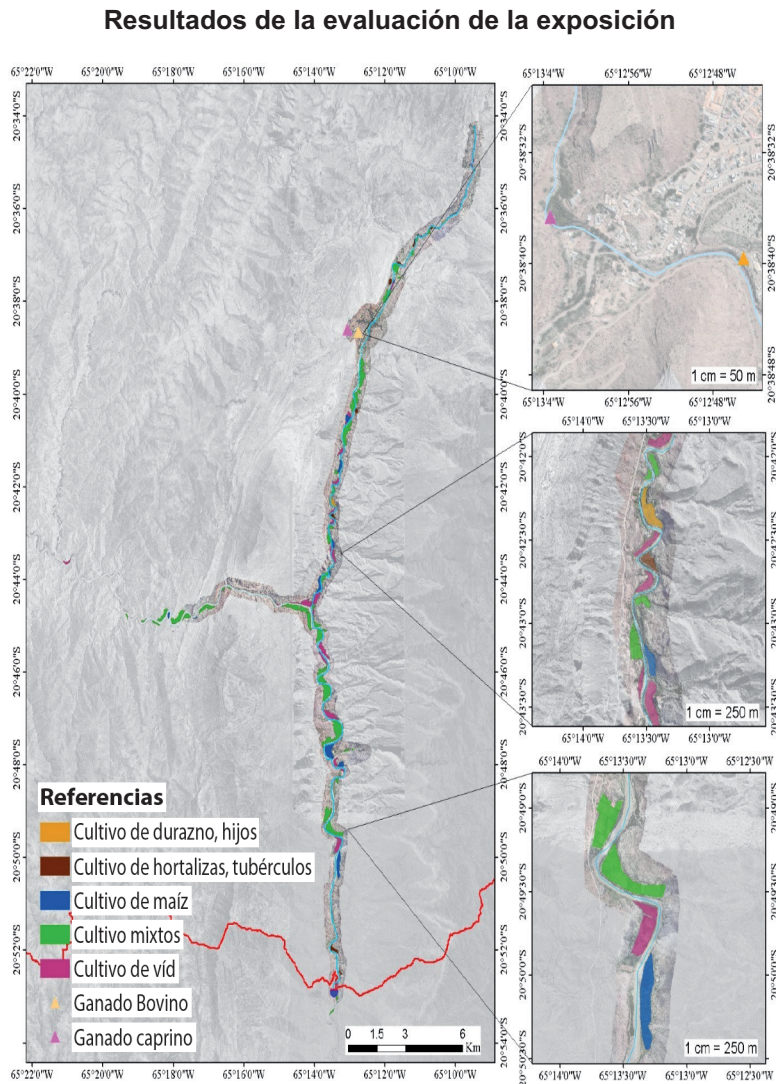


Figura 6. Caudal observado - simulado



La evaluación de la exposición en el tramo analizado se realizó mediante un levantamiento de datos complementados con imágenes satelitales y trabajo de campo. Este análisis es esencial para la gestión de riesgos ante inundaciones, ya que determina el grado de contacto de los componentes expuestos con el peligro de inundaciones y su vulnerabilidad.

Figura 7 Mapa de uso de suelo por componente de exposición

Clasificación de elementos expuestos

Infraestructura: El total expuesto corresponde a 18.41 hectáreas expuestas, la infraestructura está concentrada en el centro urbano de la cuenca, afectado por el río Chico y las quebradas circundantes. Se identificaron seis tipos de edificaciones, destacando: **Mampostería de un piso:** 6.69 ha (36.34%, 174 edificaciones), **Mampostería de dos pisos:** 5.20 ha (28.24%, 101 edificaciones), **Edificio de adobe de un piso:** 3.98 ha (21.62%, 97 edificaciones).

Cultivos: Total expuesto corresponde con 375.94 hectáreas, se registraron cinco tipos de cultivos, siendo los cultivos mixtos los más abundantes, con 209.21 ha (55.65%).

Ganadería: El total expuesto corresponde con 28 cabezas de ganado, se identificaron dos corrales: 20 cabezas de ganado bovino y 8 de ganado caprino.

Se construyó un mapa de uso de suelo que muestra la ubicación de todos los elementos expuestos a lo largo del río de la cuenca.

Este análisis proporciona una base sólida para la implementación de estrategias de gestión de riesgos ante inundaciones en la región.

Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad

En la figura 8 se presenta un mapa de vulnerabilidad actual según los eventos históricos registrados hasta la fecha.

Se tiene alrededor de 20 edificaciones con grado de vulnerabilidad muy alto debido al material que presentan y su exposición debido a las cuatro quebradas que circundan el municipio de Camargo.

Resultados de la evaluación probabilista de riesgo por inundación

La evaluación probabilista de riesgo por inundación en la cuenca fue llevada a cabo utilizando un enfoque cuantitativo que integra los componentes de vulnerabilidad, exposición y amenaza.

Este análisis se fundamentó en la situación actual del área, considerando tanto la infraestructura expuesta como las estructuras de protección existentes, como muros.

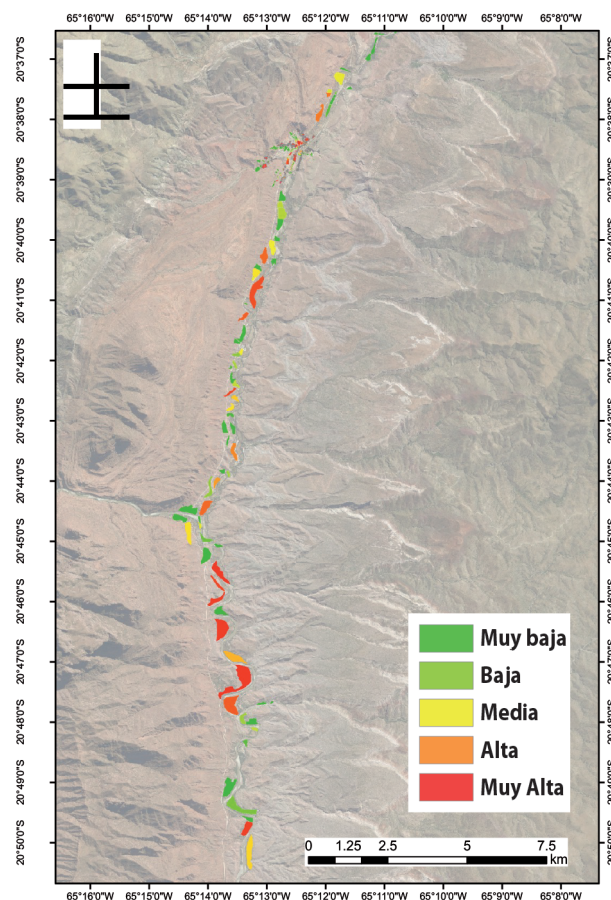


Figura 8. Mapa vulnerabilidad

Resultados de la amenaza por inundación: La amenaza de inundación se generó mediante la herramienta IT-Inundación, que produjo un archivo que representa distintos escenarios de inundación para diversas tormentas estocásticas y periodos de retorno. Los resultados clave para los diferentes periodos de retorno son:

Tabla 3. Parámetros estadísticos de la calibración

Periodo de Retorno	Caudal (m ³ /s)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)
10 años	1,375.52	6.38	14.9
20 años	1,879.6	7.6	16.4
50 años	2,146.2	8.32	14.9
100 años	2,446.9	8.6	13.8

Estos valores indican que, a medida que aumenta el periodo de retorno, también lo hacen el caudal y el tirante, lo que resalta la creciente amenaza de inundaciones en la región. Se generaron mapas de amenaza que ilustran las áreas de inundación bajo diferentes escenarios de retorno, mostrando variaciones en la velocidad del flujo, especialmente en tramos curvos del río.

Pérdida Máxima Probable (PML): La PML se evaluó para cada periodo de retorno y se resumen los resultados a continuación:

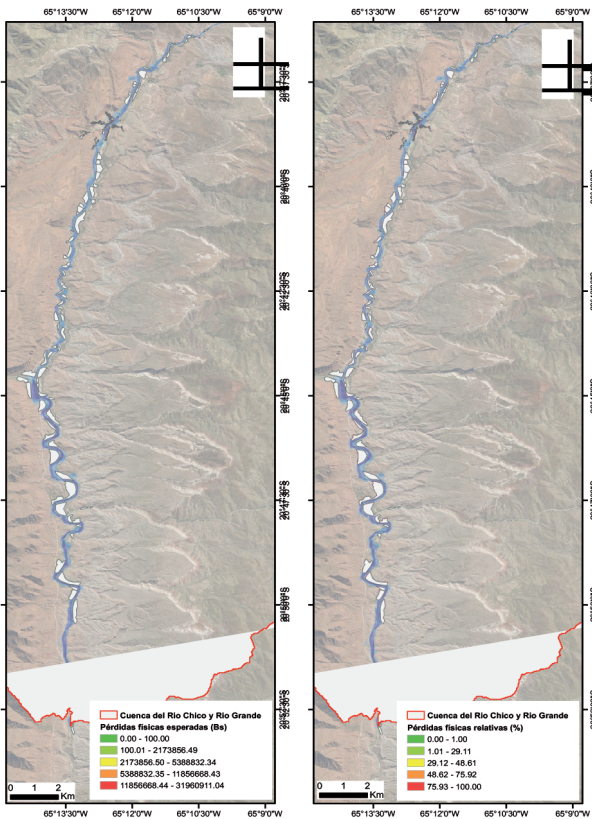


Figura 9. Mapa pérdidas

Tabla 4. Pérdidas en Bs. y % de valor expuesto

Periodo de Retorno (años)	Pérdida (Bs)	% del Valor Expuesto
10	4,789,667.05	0.58
20	6,056,066.67	0.74
50	9,637,827.16	1.17
100	62,705,417.87	7.63

Estos resultados muestran que la pérdida económica aumenta significativamente con el incremento del periodo de retorno, destacando el impacto potencial de eventos de inundación severos.

Evaluación de escenarios críticos: Se analizaron tres escenarios de inundación bajo condiciones actuales y de cambio climático, identificando las siguientes pérdidas económicas esperadas:

Escenario 1 (Actual):

Pérdida anual esperada: 1.9 millones de Bs.

Pérdida máxima probable (PML) para 100 años: 62.7 millones de Bs.

Impacto: 572 personas afectadas, 130 edificaciones dañadas, y 90.2 hectáreas de cultivos afectados.

Escenario 2 (Cambio Climático 2021-2060):

Pérdida anual esperada: 5.5 millones de Bs.

Pérdida máxima probable (PML) para 100 años: 164 millones de Bs.

Escenario 3 (Cambio Climático 2061-2100):

Pérdida anual esperada: 19.4 millones de Bs.

Pérdida máxima probable (PML) para 100 años: 144.8 millones de Bs.

Estos escenarios indican un aumento significativo en las pérdidas económicas anuales esperadas bajo condiciones de cambio climático, con un incremento de tres a diez veces el valor en comparación con la situación actual.

CONCLUSIONES

La cuenca presenta un área de 394,38 hectáreas bajo riesgo por inundación, en donde se identificaron 514 elementos expuestos con una valoración aproximada de bolivianos 822'042.747,44; entre los cuales se encuentran 421 elementos correspondientes a infraestructura con un valor económico de 800'978.152,8 bolivianos, 91 elementos correspondientes a áreas de cultivo valoradas en 20'994.694,6 bolivianos y 2 elementos correspondientes a áreas de ganadería valoradas en 69.900,0 bolivianos.

Respecto a la exposición de vidas humanas se contabilizan 2098 personas aproximadamente.

Los escenarios críticos de inundación analizados generan una pérdida económica máxima para eventos de lluvias con periodo de retorno de 100 años. El análisis de escenarios críticos indica lo siguiente:

La zona crítica desde la perspectiva de riesgo por inundaciones, tiene su repercusión en el sector urbano de la ciudad de Camargo, así como del sector agricultor en vista de que el nivel de exposición y vulnerabilidad ante la inundación resultan elevados; por lo tanto, es en donde se debe concentrar los esfuerzos para la prevención y mitigación del riesgo, así como la preparación para la atención de emergencias en una primera fase de posibles intervenciones para la reducción del riesgo en el municipio.

Los resultados de una evaluación cualitativa o cuantitativa del riesgo son una herramienta muy importante en la toma de decisiones debido a que ambas metodologías combinan diferentes áreas de evaluación y se integran para identificar áreas que pueden convertirse en zonas

de riesgo sino se realiza una planificación adecuada y normada para su uso.

La evaluación de riesgos por inundación con enfoque probabilista se constituye en un procedimiento necesario y válido para nuestro país, puesto que permite considerar las incertidumbres asociadas en su evaluación, las relaciones frecuencia-intensidad de los eventos en el análisis, la obtención de diferentes parámetros probabilistas que lo califiquen, la posibilidad de obtener medidas del riesgo únicas en caso de multiamenazas y la consideración de casos particulares de análisis, asociados al cambio climático o a escenarios futuros con algún grado de probabilidad de ocurrencia asignado.

El componente de exposición en la evaluación probabilista comprende la identificación de todas las áreas específicas que se desea evaluar si serán o no afectadas debido a la amenaza, en cambio el modelo determinista delimita el área de mayor exposición considerando la distancia a los ríos y la pendiente del terreno mediante un modelo estadístico, que da como resultado áreas de baja pendiente cercanas a los cursos de agua y de acuerdo a eso se identifica que áreas son las más expuestas.

En la evaluación de la vulnerabilidad probabilista se tiene mejor percepción del daño que puede ocurrir en una infraestructura. La metodología probabilista considera la vulnerabilidad física y humana, en cambio la metodología determinista para la evaluación de la vulnerabilidad puede realizarse considerando los aspectos sociales, económicos, ambientales y otros que se adecúan al contexto.

Respecto a la metodología probabilista de evaluación de riesgo por inundación implementada CAPRA, y sus herramientas IT-lluvia e IT-Inundación, se recomienda en el caso del primero mejorar su desarrollo, incorporando la generación de escenarios estocásticos de precipitación a una escala horaria o menos, y en el caso del segundo permitir la integración con un modelo hidráulico 2D, que es más apropiado (HEC-RAS 2D).

Los daños tangibles cuantificados sólo consideraron daños directos. Los daños directos generalmente consideran daños a estructuras y contenidos, cultivos, etc. Una mejora potencial para la cuantificación de los daños sería incluir los daños al contenido, así como los daños tangibles indirectos (por ejemplo, interrupción del negocio, desvíos y pérdida de ingresos, etc.).

La vulnerabilidad social se determinó únicamente como el número de personas afectadas en función al tirante del agua generado por la amenaza inundación.

Una oportunidad para mejorar el análisis del riesgo social sería considerar los diferentes indicadores de vulnerabilidad social, tales como características

demográficas, estatus socioeconómico, tenencia de la tierra, características del vecindario, tipo de cultivo, etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEMET, A. E. (2019). Homogeneización de series climáticas con Climatol Versión 3.1.1. Islas Baleares, España.
- Arenas, J. (2014). Impactos del cambio climático en las cuencas andinas. *Environmental Research Journal*, 45(3), 231-245.
- Arnell, N. W., & Gosling, S. N. (2016). The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change*, 134(3), 387-401. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1084-5>
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2016). Informe de eventos de inundación en Bolivia.
- Bonilla, C., & Mesa, O. (2017). Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia. *Ciencias de la tierra*, 41(158), 107-118.
- Casanueva, A. (2016). Comparación de técnicas estadísticas y dinámicas de regionalización del clima: exploración de métodos para su uso de estudios de impactos. Santander, Spain: Universidad de Cantabria.
- Evaluación de Riesgos Naturales-América Latina (ERN-AL) (2009). Central America Probabilistic Risk Assessment—CAPRA; World Bank and Inter-American Development Bank (IDB): Washington, DC, USA. Disponible en línea: <https://ecapra.org/> (acceso el 20 de agosto de 2024).
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C., Stevens, S. B., Stouffer, R., & Taylor, K. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9, 1937-1958.
- Freeman, P., & Warner, K. (2001). Vulnerability of Infrastructure to Climate Variability: How Does this Affect Infrastructure Lending Policies?. World Bank Discussion Paper.
- Freeman, P., & Warner, K. (2001). Vulnerability to climate change and disaster risk. UNISDR.
- GlZ, P. B. (2023). Evaluación de riesgo climático para identificar estrategias robustas de adaptación en el sector del agua en Bolivia. La Paz.
- Holthuijzen, M., Beckage, B., Clemens, P. J., Higdson, D., & Winter, J. M. (2022). Robust bias-correction of precipitation extremes using a novel hybrid empirical quantile-mapping method. *Theoretical and Applied Climatology*, 863-882.

- IPCC. (2021). Resumen para responsables de políticas. En: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- ITEC, I. t. (2015). Perfil de riesgo de desastres para Bolivia ante inundaciones y deslizamientos en cuencas seleccionadas. Bogotá, Colombia.
- Keating, A., Campbell, K., Mechler, R., Michel-Kerjan, E., Mochizuki, J., et al. (2014). Operationalizing resilience against natural disaster risk: Opportunities, barriers, and a way forward. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 12, 1-16.
- Kemfert, C. (2005). Global climate protection: immediate action will avert high costs. *DIW Berlin Weekly Report*, 1(8), 135-141.
- MacDonald, A. (1999). Flood risk and climate change: Impacts on global hydrological systems. *Hydrology and Earth System Sciences*.
- Rincón, D.; Velandia, J.F.; Tsanis, I.; Khan, U.T. (2022). Stochastic Flood Risk Assessment under Climate Change Scenarios for Toronto, Canada Using CAPRA. *Water* 14, 227. <https://doi.org/10.3390/w14020227>.
- SEI, S. E. (2023). Balance Hídrico de Bolivia 1980-2020.
- Seiler, C. (2009). Implementation and validation of a Regional Climate Model for Bolivia. (Fan-Bolivia).
- Torres, M.A.; Jaimes, M.A.; Reinoso, E.; Ordaz, M. (2013). Event-Based Approach for Probabilistic Flood Risk Assessment. *Int. J. River Basin Manag*, 12, 377–389.
- Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, M. (2016). Guía metodológica para la elaboración de balances hídricos superficiales. La Paz.