

ACTA NOVA**Revista de Ciencias y Tecnología**

¹Universidad Mayor de San Simón,
Dirección de Postgrado Facultad de
Ciencias y Tecnología, Carrera de
Ingeniería Civil.

²Universidad Católica Boliviana San
Pablo Sede Cochabamba.

³Universidad Mayor de San Simón,
Dirección de Postgrado Facultad de
Ciencias y Tecnología

Autor para correspondencia:
Alejandro R. Paredes
fcotrina@fan-bo.org

**Análisis de las inundaciones implementando
modelos de circulación global (GCMS)*****Flood analysis using Global Circulation Models (GCMs)***

Alejandro R. Paredes O.¹, Willman García F.², Claudia Pizarro M.³

Resumen: El estudio analiza la amenaza de inundaciones y la proyección de eventos futuros utilizando registros de precipitación históricos y Modelos de Circulación Global (MIROC-ESM e IPSL-CM5A-MR) bajo el escenario RCP 8.5. Las proyecciones fueron ajustadas a escala local utilizando datos de la Plataforma de Simulación Climática del CR2, que aplica técnicas de downscaling estadístico. Las simulaciones con HEC-HMS estimaron caudales máximos de $44 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, el modelo IBER identificó 5440 hectáreas con riesgo de inundación. Se puede esperar un incremento de 7.5% en la intensidad de las lluvias en áreas urbanas y agrícolas de alta exposición al riesgo, con profundidades de inundación de hasta 2.5 metros. Aplicando medidas estructurales como diques, canales y embalses de retención, así como acciones no estructurales orientadas a la gestión del territorio, educación ambiental e implementación de sistemas de alerta temprana, se puede reducir el riesgo de las inundaciones. La combinación de modelos climáticos y herramientas de simulación contribuye a una planificación integral y sostenible en regiones vulnerables a las inundaciones.

Palabras clave: Inundaciones, cambio climático, GCMs, HEC-HMS, IBER.

1. Introducción

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2021) reporta un incremento de la temperatura media global de aproximadamente $1,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y proyecta un aumento de hasta $5,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ hacia el año 2100, lo que implica modificaciones significativas en los patrones climáticos a escala mundial. Estas variaciones se manifiestan con mayor intensidad en regiones vulnerables, como los valles

Abstract: This study analyzes flood hazards and projections of future events using historical precipitation records and Global Circulation Models (MIROC-ESM and IPSL-CM5A-MR) under the RCP 8.5 scenario. Projections were adjusted to a local scale using data from the CR2 Climate Simulation Platform, which applies statistical downscaling techniques. Simulations with HEC-HMS estimated peak flows of $44 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, and the IBER model identified 5,440 hectares at risk of flooding. A 7.5% increase in rainfall intensity in high-risk urban and agricultural areas, with flood depths of up to 2.5 meters, could be expected. Applying structural measures such as dikes, canals, and retention reservoirs, as well as non-structural actions aimed at land management, environmental education, and the implementation of early warning systems, can reduce flood risk. The combination of climate models and simulation tools contributes to comprehensive and sustainable planning in flood-prone regions.

Key words floods, climate change, GCMs, HEC-HMS, IBER.

interandinos de Bolivia, donde se observa un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos.

En este contexto, el municipio de Cliza, ubicado en el departamento de Cochabamba ($17^{\circ}35'31'' \text{ S}$, $65^{\circ}56'03'' \text{ O}$), a una altitud de 2 708 m s.n.m., presenta una temperatura media anual de $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y una precipitación promedio de 412 mm. Durante los meses de enero y febrero, se registran lluvias intensas que incrementan el riesgo de

inundaciones, afectando a la población, la infraestructura y la producción agrícola (SENAMHI, 2019).

Diversos estudios en los valles interandinos han evidenciado que la deforestación, la urbanización no planificada y las prácticas agrícolas no sostenibles intensifican la vulnerabilidad de las comunidades frente a estos eventos (Blancas, 2013). Asimismo, investigaciones relacionadas con el uso inadecuado del suelo y su influencia en la magnitud de fenómenos hidrológicos extremos destacan la necesidad de integrar modelos climáticos con herramientas de gestión territorial (López, 2015).

Ante este escenario, los Modelos de Circulación Global (GCMS) constituyen una base fundamental para el análisis del cambio climático. No obstante, su resolución espacial limita su aplicación directa a escala local, por lo que resulta indispensable emplear técnicas de reducción de escala climática (CR2, s.f.). En este sentido, el proyecto CMIP5 incorpora escenarios de concentración de gases de efecto invernadero (RCPs) y simulaciones históricas que permiten evaluar el impacto antropogénico sobre el clima, siendo una referencia clave para los informes del IPCC (Taylor et al., 2012).

De manera complementaria, los modelos hidrológicos e hidráulicos permiten analizar la respuesta de las cuencas ante eventos extremos. El modelo HEC-HMS facilita la estimación de caudales en subcuencas, mientras que IBER posibilita la simulación de la distribución del flujo superficial y la identificación de zonas vulnerables a inundaciones (Feldman, 2000; Bladé et al., 2012).

En este marco, el objetivo del presente estudio es analizar el comportamiento hidrológico de la subcuenca del municipio de Cliza frente a escenarios actuales y futuros de riesgo de inundación mediante la implementación de Modelos de Circulación Global y modelos hidrológicos e hidráulicos. Asimismo, se realizan análisis de exposición y vulnerabilidad bajo normativas vigentes, con el propósito de proponer medidas técnicamente viables para la reducción del riesgo de desastres por inundaciones.

2. Antecedentes

En los Andes bolivianos, las condiciones topográficas y climáticas incrementan la vulnerabilidad frente a eventos hidrometeorológicos extremos, especialmente en zonas interandinas como el Valle Alto de Cochabamba. El municipio de Cliza presenta alta susceptibilidad a inundaciones debido a su relieve, la degradación de suelos agrícolas y la limitada capacidad de drenaje urbano (Buytaert, 2010).

El riesgo de inundación responde tanto al cambio climático como a las transformaciones en el uso y cobertura del suelo. La expansión urbana no planificada y la

compactación de suelos reducen la infiltración, incrementan la escorrentía y elevan los caudales máximos (Wei et al., 2018; Hallegatte et al., 2013).

Los eventos registrados en marzo de 2024, que afectaron infraestructura y viviendas en Cliza, evidencian la fragilidad territorial ante lluvias intensas y la limitada gestión del riesgo existente (Opinión, 2024; UNDP, 2017).

La comprensión de estos procesos requiere el análisis de patrones de precipitación extrema y su impacto hidrológico (Smith, 2022). Estudios en cuencas de Cochabamba confirman un riesgo medio a alto de inundaciones en áreas urbanizadas (García et al., 2021).

Asimismo, el uso de Modelos de Circulación Global integrados con modelos hidrológicos locales permite evaluar escenarios climáticos futuros (Taylor et al., 2012). La aplicación de Sistemas de Información Geográfica y datos de teledetección fortalece la gestión del riesgo y de los recursos hídricos (Arévalo et al., 2012). Experiencias en otras regiones del país, como Santa Ana del Yacuma, refuerzan la necesidad de estrategias específicas de reducción de vulnerabilidad (García et al., 2017).

3. Metodología

Para la evaluación del riesgo de inundaciones en el municipio de Cliza, se realizó un análisis del comportamiento climático e hidrológico durante el periodo 1966–2024, a partir de registros históricos de precipitación y temperatura provenientes de la estación meteorológica San Benito, ubicada en proximidad al área de estudio. Estos datos fueron sometidos a procesos de control de calidad, homogenización y calibración mediante el método de bloques, con el fin de reducir sesgos y garantizar su consistencia temporal.

Con base en la información climática validada, se seleccionaron los modelos MIROC-ESM e IPSL-CM5A-MR del conjunto CMIP5 por su capacidad para representar adecuadamente los patrones climáticos en regiones andinas. Estos modelos simulan con precisión variables clave como la precipitación y la temperatura, fundamentales para el análisis hidrológico. Ambos fueron evaluados bajo el escenario RCP 8.5, que representa una trayectoria de altas emisiones y permite analizar condiciones climáticas críticas. La adopción de este escenario se justifica por su carácter conservador y su uso frecuente en estudios de riesgo climático. Asimismo, la persistencia de prácticas regionales como el chaqueo y los incendios forestales refuerza su pertinencia en el contexto local (Mejía et al., 2017).

Las proyecciones climáticas fueron sometidas a un proceso de reducción de escala mediante el método delta, utilizando información de la Plataforma de Simulación Climática del CR2. Este procedimiento permitió ajustar las

series mensuales proyectadas por los GCMs a escala local, corrigiendo sesgos sistemáticos y preservando las tendencias climáticas futuras.

Posteriormente, las series ajustadas fueron desagregadas temporalmente para su aplicación en el modelado hidrológico. A partir de los registros históricos, se desarrollaron curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF), empleando análisis probabilístico de máximos anuales y funciones de distribución adecuadas. Estas curvas permitieron definir precipitaciones de diseño para diferentes periodos de retorno.

Con base en las precipitaciones de diseño, se generaron hietogramas sintéticos mediante el método de bloques alternados, adoptando duraciones de tormenta representativas de la cuenca y distribuciones temporales compatibles con las características locales de precipitación. Este procedimiento permitió transformar la precipitación diaria y mensual proyectada en eventos extremos puntuales de escala subdiaria.

Los hietogramas obtenidos fueron utilizados como insumo en el modelo hidrológico HEC-HMS para la simulación de hidrogramas de escorrentía. El modelo fue parametrizado a partir de variables morfométricas de la subcuenca, tales

como área, pendiente media, longitud hidráulica y tiempo de concentración. Asimismo, se realizó una calibración y validación del modelo empleando eventos históricos representativos.

Para la evaluación de escenarios futuros, se aplicaron métodos probabilísticos que permitieron integrar la incertidumbre asociada a las proyecciones climáticas, generando conjuntos de hietogramas e hidrogramas bajo diferentes condiciones de recurrencia.

Posteriormente, los caudales máximos simulados fueron incorporados en el modelo hidráulico IBER, junto con información topográfica de alta resolución y datos de uso y cobertura del suelo, con el fin de simular la propagación del flujo superficial y delimitar las zonas inundables bajo escenarios de lluvia extrema.

Finalmente, los resultados hidrológicos e hidráulicos fueron integrados con análisis de exposición y vulnerabilidad para identificar las áreas con mayor nivel de riesgo. A partir de esta información, se evaluaron medidas estructurales y no estructurales orientadas a la reducción del riesgo de desastres por inundaciones y al fortalecimiento de la resiliencia territorial.

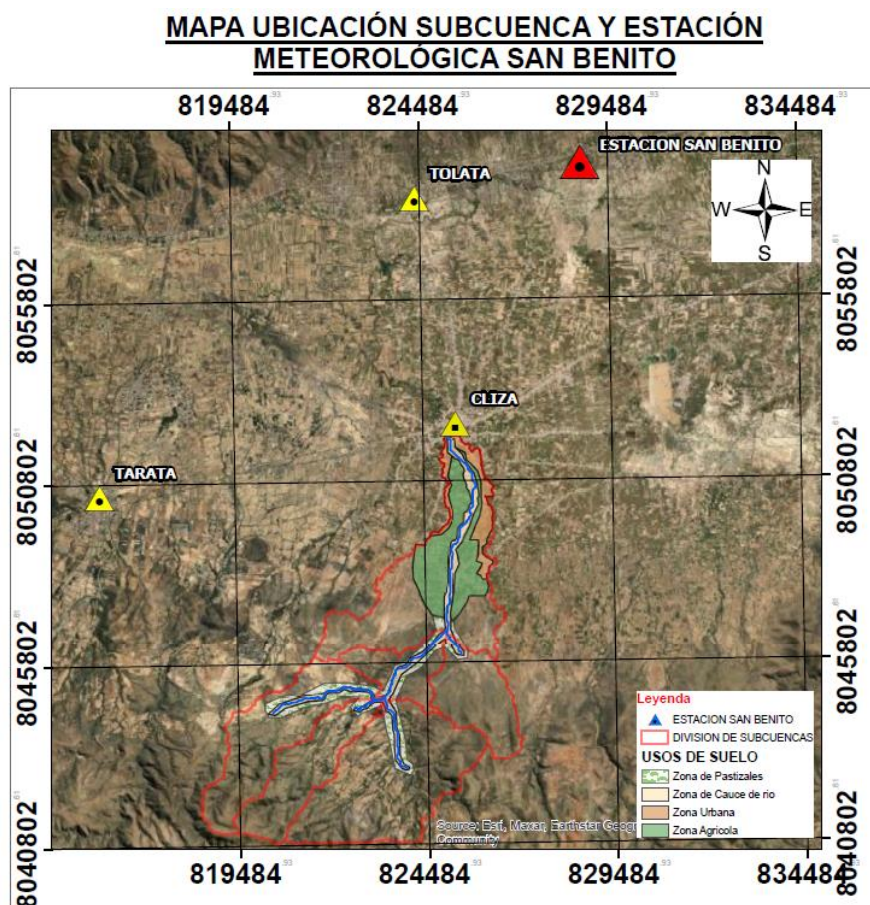


Figura 1. Ubicación subcuenca Cliza y estación de monitoreo San Benito.

4. Resultados

4.1 Descripción de la zona de estudio

El Municipio de Cliza se encuentra en el Valle Alto de Cochabamba, Bolivia, está ubicado entre las coordenadas 17°35' y 17°41' de latitud sur, y 65°56' y 66°03' de longitud oeste, a una altitud media de 2.600 m.s.n.m., presenta un clima templado semiárido con lluvias concentradas entre noviembre y marzo.

La sedimentación del cauce del río Cliza y su topografía caracterizada por zonas bajas con poca pendiente, incrementa la susceptibilidad del área a inundaciones. Especialmente en áreas agrícolas donde se cultivan maíz, hortalizas y frutales como durazno y manzano, gracias a los suelos fértiles que se concentran en las zonas más húmedas del valle (Figura 1).

4.2 Análisis de patrones climáticos

4.2.1 Distribución de las precipitaciones

Entre 1966 y 2024, los registros de la estación meteorológica San Benito mostraron variaciones significativas en las precipitaciones, con máximos en enero y febrero, influenciados por el fenómeno de La Niña. En los últimos años, se ha incrementado la intensidad de las precipitaciones, lo que ha provocado mayores inundaciones en zonas bajas del municipio. Asimismo, podemos observar una tendencia de incremento de las precipitaciones sobre todo en los meses más lluviosos (enero y febrero), anomalías con picos que salen de la línea de desviación estándar en ciertos años con periodos secos y húmedos asociados a los eventos del Niño y la Niña respectivamente (Figura 2).

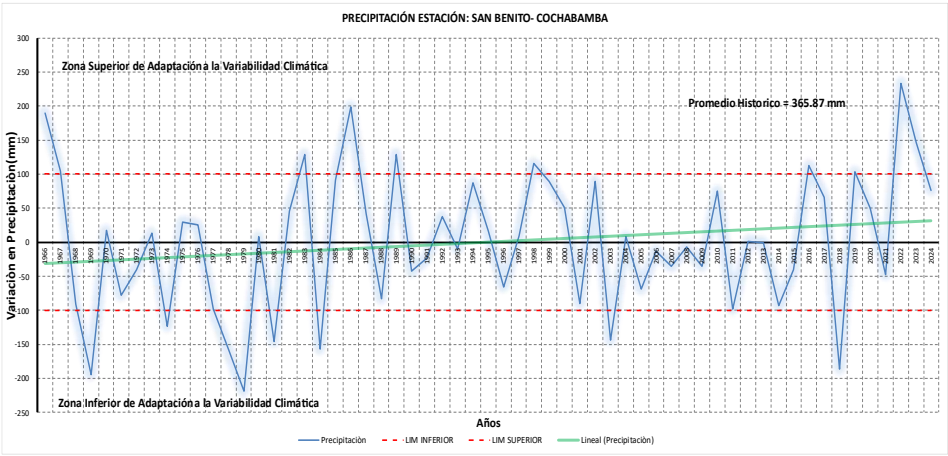


Figura 2. Diagrama de variabilidad climática de precipitaciones del Municipio de Cliza.

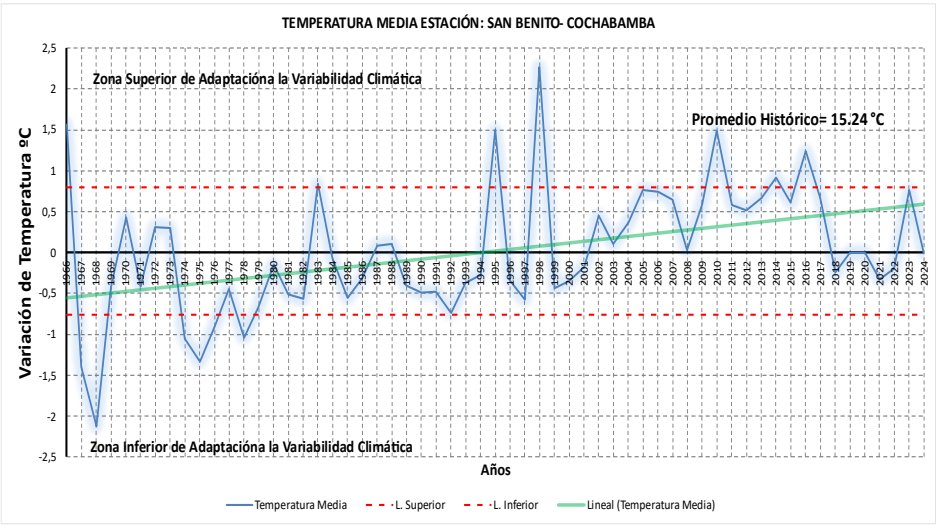


Figura 3. Diagrama de variabilidad climática de temperaturas del Municipio de Cliza.

4.2.2 Distribución de las temperaturas

Cliza presenta un clima templado con variaciones térmicas de temperaturas que se encuentran entre 12 °C y 24 °C, con una media histórica de 15.24 °C. El análisis histórico muestra una tendencia de incremento de la temperatura en 0.5 °C en la zona de estudio. (Figura 3).

4.3 Caracterización y delimitación de la subcuenca

4.3.1 Delimitación y subdivisión de la subcuenca

Con apoyo del software ArcGIS, para delimitar y obtener las características físicas por subcuencas y utilizando el Modelo de Elevación Digital (DEM) de ALOS PALSAR con resolución de 12.5 metros, aplicando procesos variables de depresiones, dirección y acumulación de flujo

escurrimiento, pendientes, altitudes, permitió definir 7 subcuencas en el Municipio de Cliza (Figura 4).

4.3.2 Parámetros morfométricos y tiempo de concentración de la subcuenca.

La subcuenca Cliza, tiene una superficie de 46.71 km², con un desnivel de 540 metros entre su punto más alto y bajo. Su cauce principal tiene una longitud de 16.58 km, y la pendiente media es de 0.037, presentando una inclinación moderada favoreciendo el escurrimiento rápido durante lluvias intensas (Tabla 1).

El tiempo de concentración de la subcuenca Cliza se estimó en 3 horas, aplicando métodos Temez, Passini, Kirpich y California (Tabla 2). Este valor indica una respuesta rápida de la subcuenca ante lluvias intensas, lo que incrementa el riesgo de inundaciones.

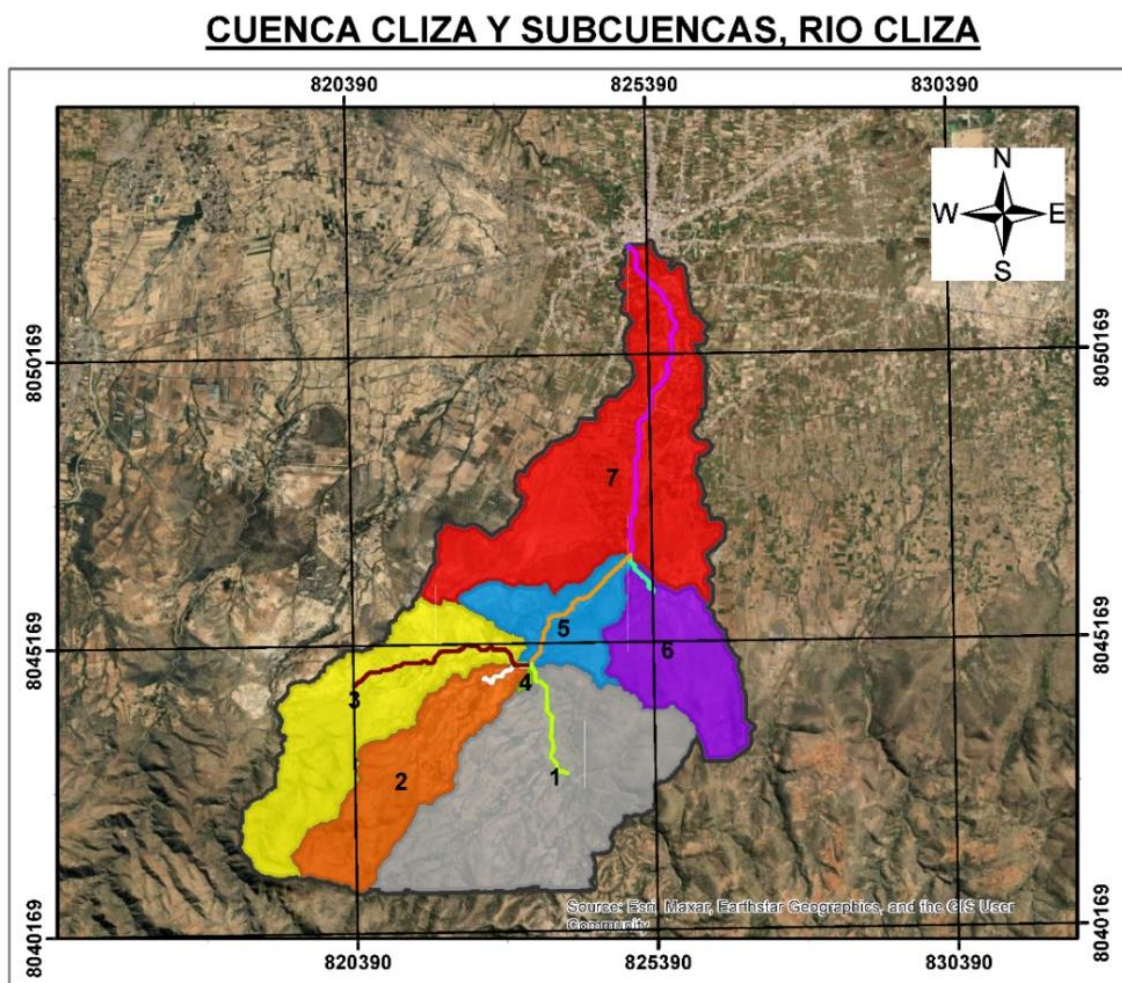


Figura 4. Mapa de División en subcuencas de la Cuenca Cliza.

Tabla 1. Características Morfométricas de las subcuencas de Cuenca Cliza.

SUB CUENCA	ÁREA [km ²]	LONGITUD [m]	PERÍMETRO [Km]	ALTURA MÁXIMA [msnm]	ALTURA MÍNIMA [msnm]	DESNIVEL [m]	PENDIENTE [m/m]
1	12,31	2.328,66	9,46	2.828,00	2.812,00	16,00	0,01
2	5,46	933,44	13,49	2.826,00	2.812,00	14,00	0,01
3	7,95	3.505,88	17,62	2.862,00	2.812,00	50,00	0,01
4	0,08	113,14	1,79	2.812,01	2.812,00	0,01	0,00
5	3,19	2.712,00	10,55	2.812,82	2.792,00	20,82	0,01
6	4,70	834,17	10,94	2.803,38	2.792,00	11,38	0,01
7	13,02	6.157,46	25,38	2.792,61	2.758,00	34,61	0,01
Total	46,71	16.584,75					

Tabla 2. Tiempos de concentración de la subcuenca Cliza

SUB CUENCA	TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN					
	Temez [h]	Passini [h]	Kirpich [h]	California [h]	PROMEDIO [min]	LAG [min]
1	1,47	0,36	0,86	0,48	47,59	28,56
2	0,63	0,22	0,32	0,28	21,71	13,03
3	1,75	0,33	0,89	0,47	51,46	30,88
4	0,34	0,54	0,45	0,47	26,86	16,12
5	1,62	0,37	0,93	0,50	51,06	30,64
6	0,59	0,22	0,30	0,28	20,77	12,46
7	3,20	0,51	1,97	0,73	96,02	57,61
					315,48	180,30

4.3.3 Esguerrimiento superficial y rugosidad.

El esguerrimiento en la subcuenca se estimó mediante el método SCS-CN, utilizando la intersección espacial en ArcGIS de mapas de cobertura (GeoBolivia/Google Earth) y suelos (FAO/UNESCO) (Figura 5). Esta integración permitió clasificar el territorio en los Grupos Hidrológicos C, caracterizados por su baja capacidad de infiltración.

Bajo una condición de humedad antecedente media (AMC II) y tablas estándar del NRCS, se determinó un CN promedio de 78. Este valor refleja la alta respuesta hidrológica de los suelos agrícolas y compactos de la zona, permitiendo transformar los hietogramas de diseño en

caudales de esguerrantía confiables. Los resultados fundamentan técnicamente el análisis de riesgo y el diseño hidráulico de las medidas de mitigación estructural propuestas. (Figura 6).

Los coeficientes de rugosidad de Manning para la subcuenca Cliza, con el fin de representar la resistencia del terreno al paso del agua son de **0.015** para cauces definidos, **0.030** para áreas agrícolas y **0.050** para zonas con vegetación densa o superficie urbana (Figura 6). Estos datos permiten entender cómo varía la velocidad del flujo según el tipo de suelo, siendo más rápida en cauces y más lenta en terrenos irregulares o con obstáculos.

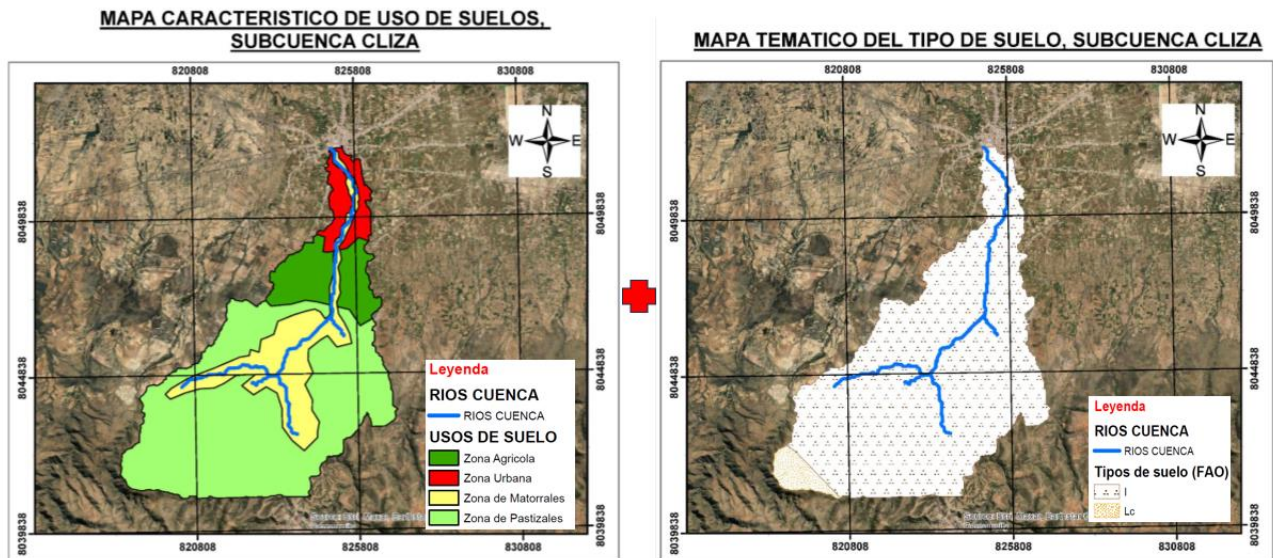


Figura 5. Mapas uso de suelo y tipo de suelo

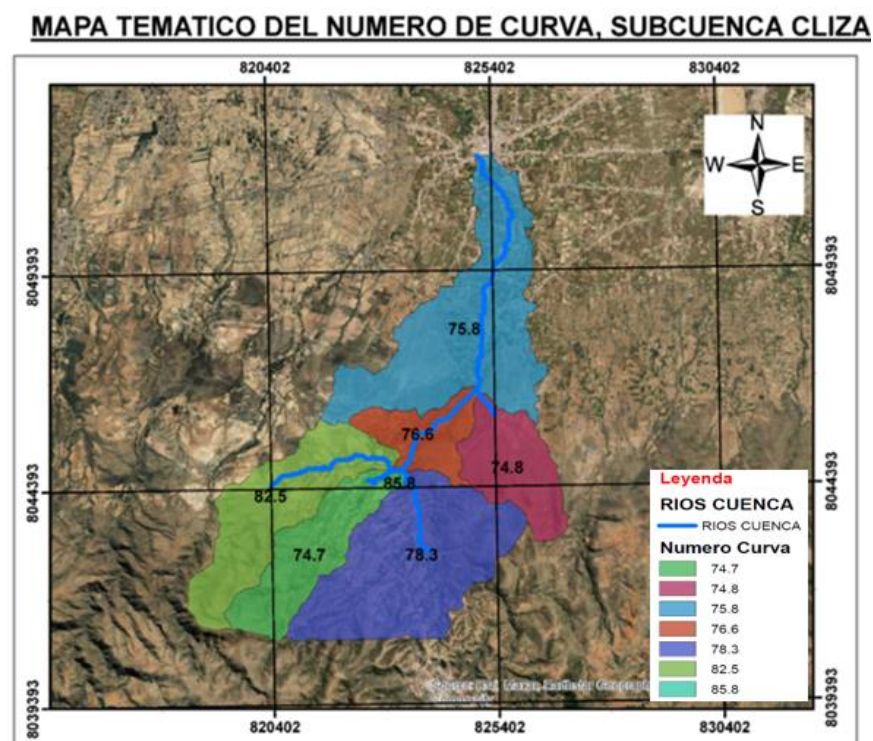


Figura 6. Mapa temático del número de curva, subcuena Cliza

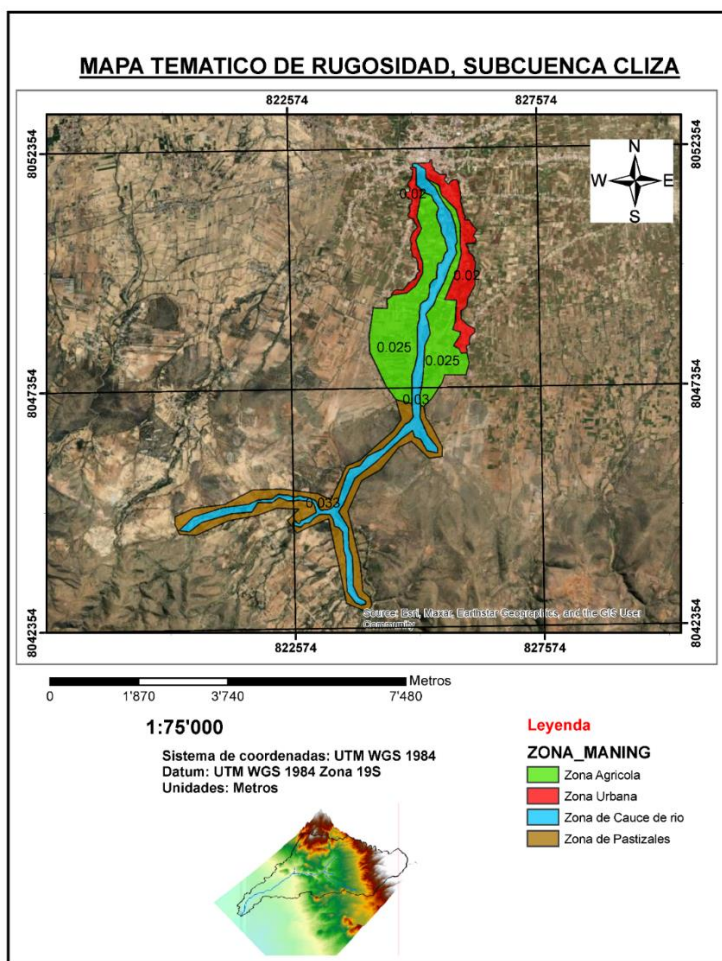


Figura 7. Mapa temático de rugosidad, subcuenca Cliza

4.4 Modelos Climáticos Globales

4.4.1 Selección de los modelos climáticos globales.

Se eligieron los modelos MIROC-ESM e IPSL-CM5A-MR del CMIP5, debido a su ampliación a América del Sur brindando confiabilidad para este tipo de estudios (Berri, 2020). Para reducir la escala de estos modelos, se empleó la técnica de downscaling estadístico mediante el método Delta, referente a la Plataforma de Simulación Climática del CR2. Este procedimiento aplicó una corrección de sesgo (Bias Correction) de forma independiente para la variable de precipitación, ajustando las salidas globales a

la serie histórica de la estación San Benito para obtener una resolución temporal diaria y una resolución espacial de 5 kilómetros. Estos valores indican una tendencia a la intensificación de eventos de precipitación extrema. Estas proyecciones sugieren que, aunque la precipitación promedio podría no cambiar drásticamente, no obstante, la frecuencia e intensidad de los picos de precipitación se incrementaría en el transcurso del siglo XXI. (Figura 8).

Las proyecciones muestran una posible disminución de las lluvias totales, pero con eventos más intensos y concentrados en los meses más lluviosos (enero y febrero) (Figura 9).

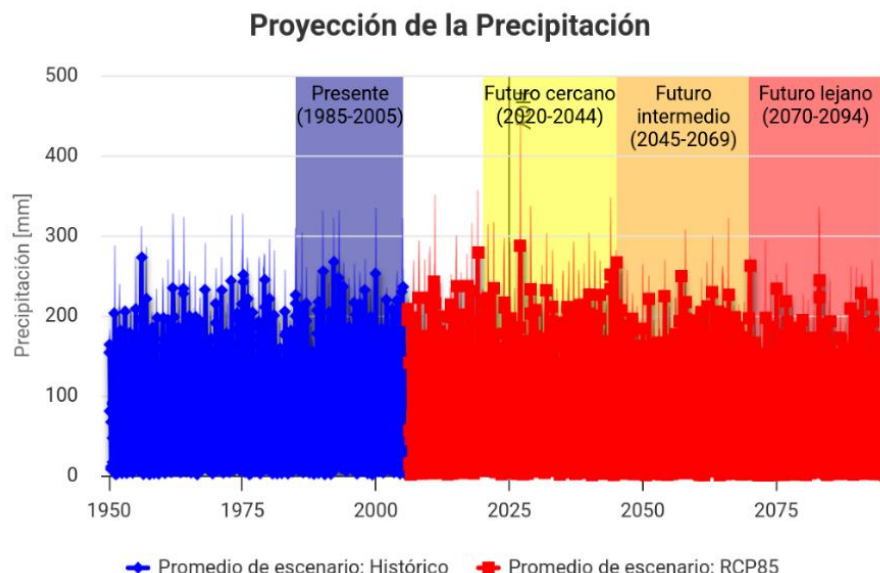


Figura 8. Distribución de precipitaciones bajo escenarios GCM.

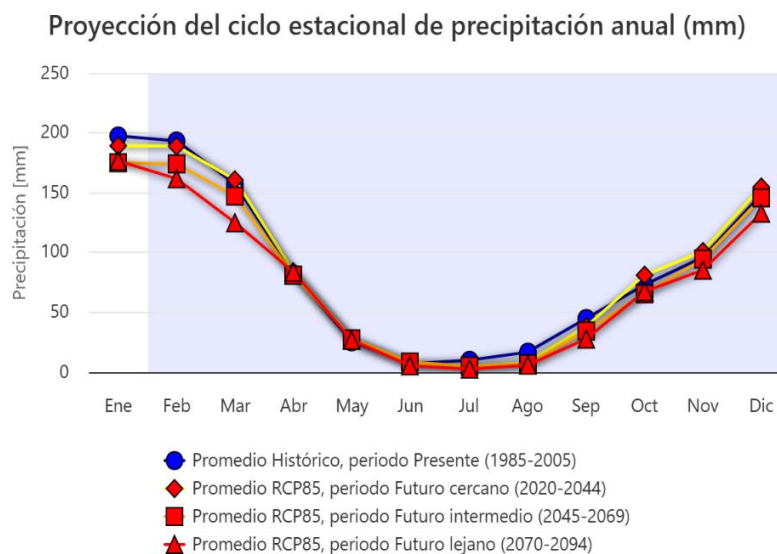


Figura 9. Proyección del ciclo estacional de precipitación anual

Aunque el uso del método Delta permite capturar las anomalías climáticas locales, se reconoce una incertidumbre derivada de la variabilidad de los modelos GCM y la simplificación de los procesos de downscaling.

Se priorizó el modelo MIROC-ESM por presentar una mayor sensibilidad en la detección de eventos críticos mensuales, lo que permite una apreciación más asertiva para el diseño de medidas de adaptación en zonas vulnerables como Cliza (Sillmann et al., 2017). Para la obtención de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) bajo escenarios de cambio climático, se aplicó el método Delta para el escalamiento (downscaling)

y la corrección de la dispersión de los datos provenientes del modelo de circulación global MIROC-ESM. Dado que los modelos globales no proporcionan directamente intensidades subdiarias, las series resultantes del método Delta fueron procesadas mediante métodos probabilísticos, empleando la distribución de Gumbel para ajustar los eventos extremos de precipitación. Este procedimiento permitió derivar las intensidades para diferentes duraciones, observándose que los períodos de retorno más altos (T50 y T100) presentan valores significativamente superiores; esto indica que, bajo las proyecciones del modelo, los eventos de precipitación

extrema en la subcuenca serán menos frecuentes, pero de mayor magnitud (Figura 10).

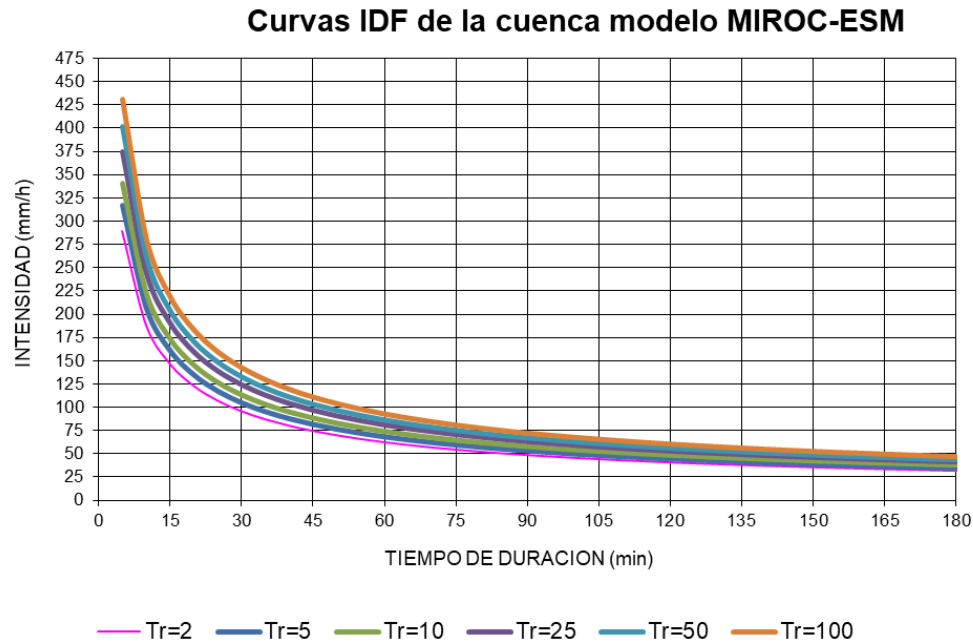


Figura 10. Diagrama de curvas IDF Cliza modelo MIROC-ESM

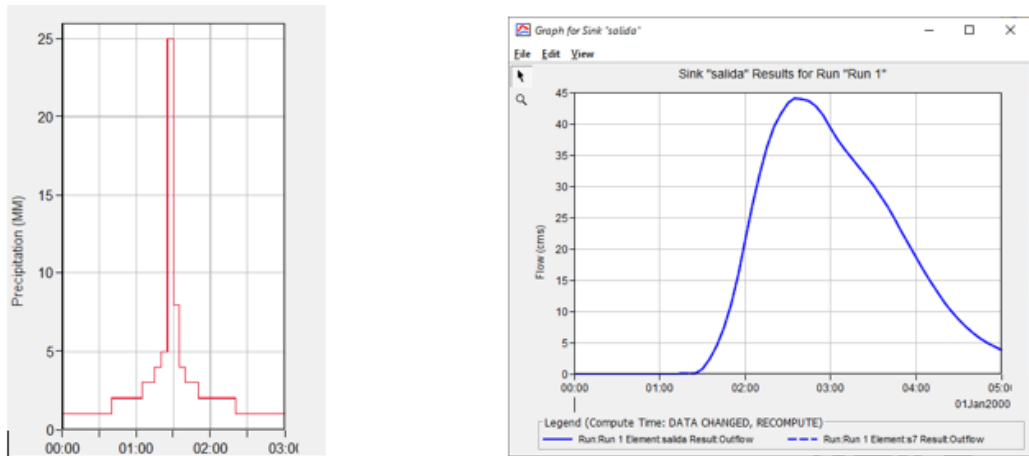


Figura 11. Hietograma y Curva Resultante de modelación hidrológica

4.5 Modelo hidrológico

La modelación en HEC-HMS se basó en hietogramas de diseño derivados de la calibración del modelo MIROC-ESM con el registro histórico de la estación San Benito mediante el método Delta (Figura 10) (Figura 11). Esta discretización permitió transformar los datos globales a

escala diaria en intensidades locales, procesadas estadísticamente con la distribución Gumbel para obtener curvas IDF representativas.

El flujo se transformó en escorrentía mediante el Hidrograma, simulando un evento extremo de 100 años que alcanzó un caudal pico de 44 m³/s. (Tabla 3).

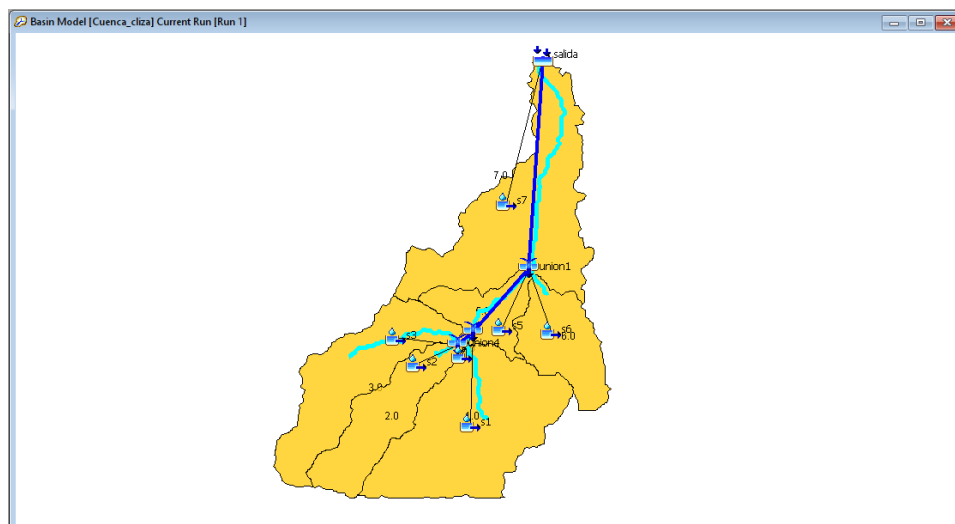


Figura 12. Modelo hidrológico subcuenca Cliza

Tabla 3. Caudales de crecida máxima consecuentes al cambio climático.

Modelo Climático	Periodo de Retorno [T años]			
	25	50	75	100
MIROC-ESM				
Q[m3/s]	30,54	35,26	38,84	44

4.6 Modelo hidrodinámico.

La modelación hidrodinámica se realizó con el software IBER, utilizando el Modelo Digital de Elevación (DEM) mediante ALOS PALSAR con una resolución de 12.5 metros, mallado de 10 metros y 5 metros para el cauce del río, los caudales del modelo HEC-HMS, con un caudal pico de $44 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para un periodo de retorno de 100 años ingresados en base a un hietograma resultado de la modelación. Se asignaron valores de rugosidad de Manning según la cobertura del suelo.

Se generó un mapa de tirantes de agua, identificando áreas de alto riesgo de inundación cerca de los cauces y en zonas bajas urbanas y agrícolas, con tirantes de hasta 2.5 metros. Esto señala la necesidad de implementar medidas de reducción de riesgos de desastres de inundaciones en estas áreas vulnerables (Figura 11).

Se elaboró un mapa de velocidades de flujo, destacando que las mayores velocidades se dan en los cauces, con valores superiores a $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Esto representa riesgos para la infraestructura y la seguridad de la población, lo que resalta la importancia de la implementación de medidas estructurales y no estructurales de reducción de riesgo de inundaciones (Figura 12).

4.7 Evaluación de exposición y vulnerabilidad.

4.7.1 Exposición.

La exposición se determinó mediante el análisis espacial de los elementos localizados dentro del área inundable, utilizando datos del Censo de Población y Vivienda 2024 y cartografía municipal (Figura 13). Se consideraron cinco indicadores principales: población, viviendas, infraestructura básica, conectividad y actividad productiva (Tabla 4)

sociales relativamente favorables. La vulnerabilidad institucional registró un valor de 0.48, vinculado a una capacidad de respuesta intermedia. La integración de estos componentes permitió estimar una vulnerabilidad total de 0.46, clasificada como media (Tabla 6).

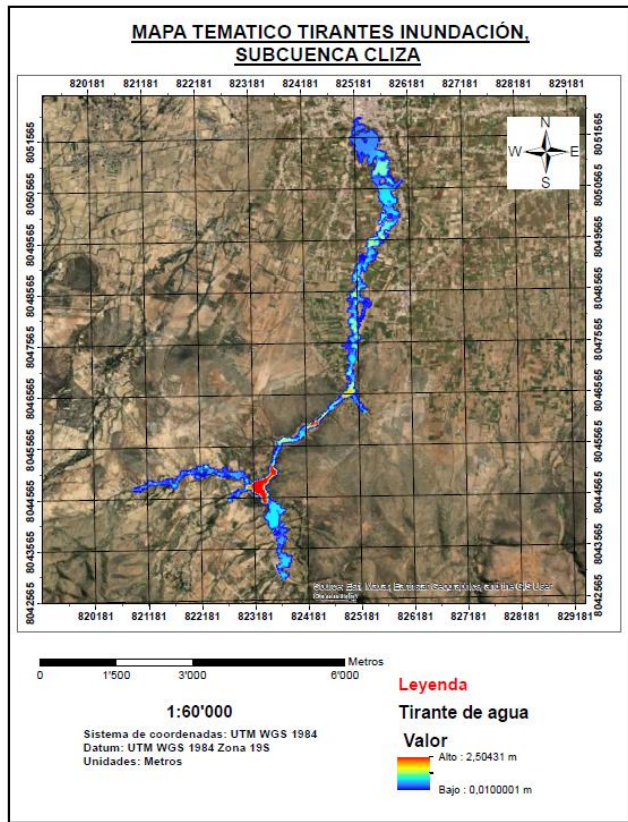


Figura 13. Mapa temático altura de agua en inundaciones, Municipio de Cliza.

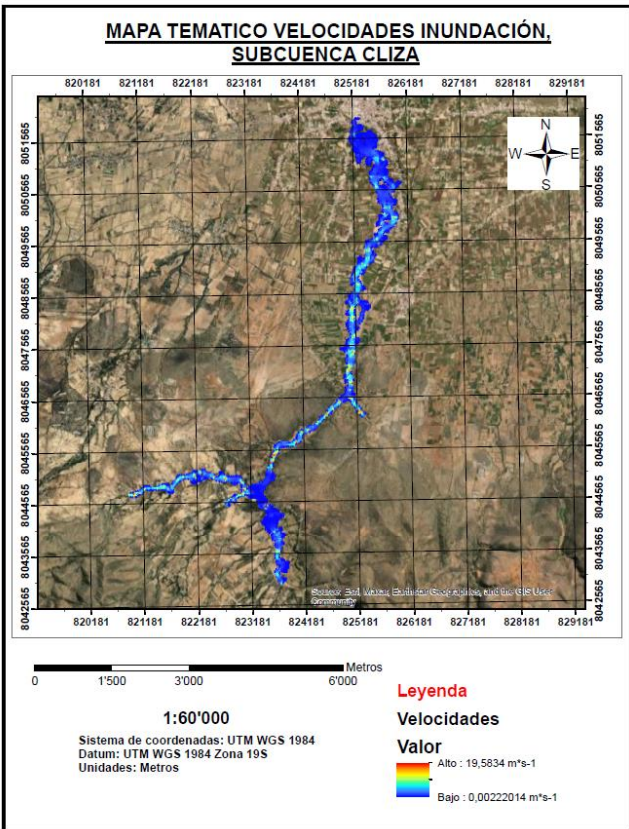


Figura 14. Mapa temático velocidades de inundación, subcuenca Cliza

Tabla 4. Datos INE Censo 2024 municipio Cliza

Componente	Indicador	Unidad	Municipio de Cliza	Manzanas afectadas	Uso en el índice
Población	Población total	Habitantes	21.155	1.146	Exposición (E1)
Vivienda	Viviendas ocupadas	Viviendas	6.338	344	Exposición (E2)
Servicios básicos	Viviendas totales	Viviendas	6.338	417	Exposición
	Viviendas con agua por red	Viviendas	4.811	252	Exposición (E3) / Vulnerabilidad (VS3)
	Viviendas con alcantarillado	Viviendas	3.443	276	Exposición (E3) / Vulnerabilidad (VS3)
	Viviendas con electricidad	Viviendas	6.152	339	Exposición (E3) / Vulnerabilidad (VS3)
Conectividad	Viviendas con telefonía celular	Viviendas	5.626	294	Exposición (E4)

	Viviendas con internet	Viviendas	4.715	251	Exposición (E4)
Actividad económica	Población Económicamente Activa (PEA)	Personas	11.306	589	Exposición (E5) / Vulnerabilidad (VS1, VS2)
	PEA en agricultura	Personas	3.174	126	Exposición (E5) / Vulnerabilidad (VS2)
Empleo	Trabajadores por cuenta propia	Personas	5.736	311	Vulnerabilidad (VS1)
Educación	Población con secundaria completa	Personas	5.109	272	Vulnerabilidad (VS4)
	Población con educación superior	Personas	4.579	236	Vulnerabilidad (VS4)
Salud	Afiliados al SUS	Personas	15.277	881	Vulnerabilidad institucional (VI1)
	Población con seguro de salud	Personas	20.555	1.112	Vulnerabilidad institucional (VI1)

MAPA DE EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD

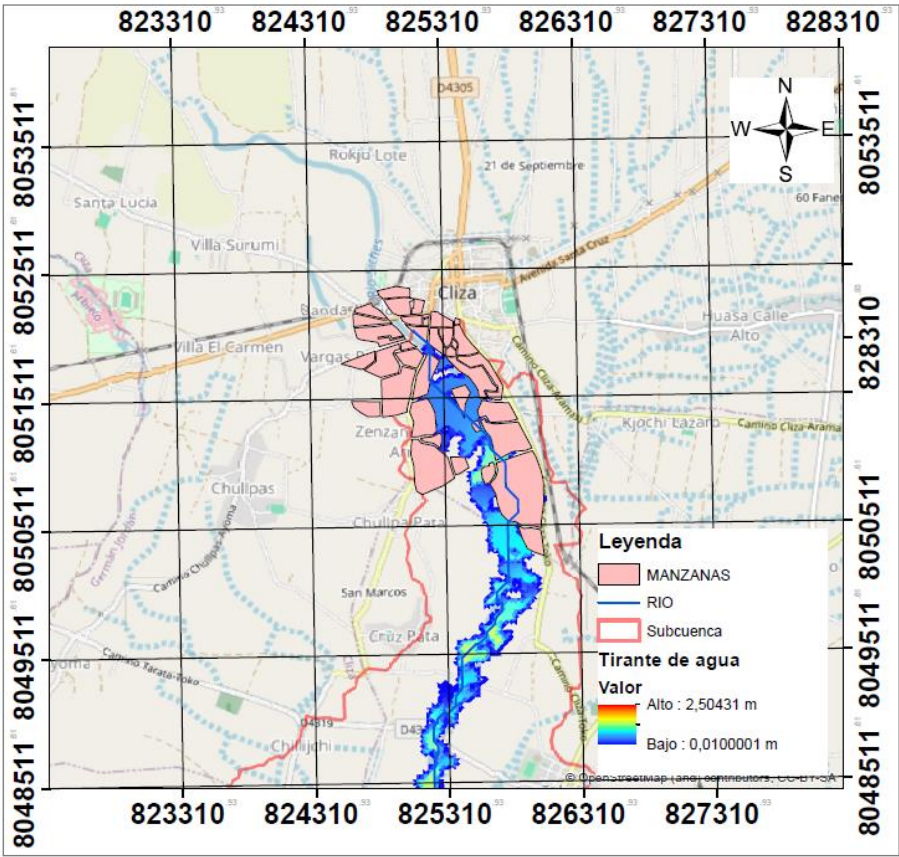


Figura 15. Mapa de Exposición y Vulnerabilidad

Tabla 5. Indicadores de Exposición.

Índice	Indicador	Valor	Método de cálculo
E1	Población expuesta	5,40%	Población inundable / población total
E2	Viviendas expuestas	5,40%	Viviendas ocupadas / viviendas totales
E3	Infraestructura básica	6,20%	Promedio agua, alcantarillado y electricidad
E4	Conectividad	5,30%	Promedio celular, internet y TV
E5	Actividad agrícola	4%	PEA agrícola / PEA total
IE	Índice de Exposición	5,26%	Promedio E1, E2, E3, E4, E5

Tabla 6. Tabla de Vulnerabilidad

Evalúadores	Indicadores	Valoración	Promedio
Vulnerabilidad Física	Material predominante ladrillo	0,5	0,6
	Altura de piso bajo	0,7	
	Proximidad río alta	0,6	
	Uso residencial	0,6	
Vulnerabilidad Socioeconómica	Informalidad	0,53	0,31
	Agricultura	0,21	
	Servicios	0,16	
	Educación	0,33	
Vulnerabilidad Institucional	SUS buena cobertura	0,3	0,48
	Vías	0,4	
	SAT	0,7	
	Gestión	0,5	
ÍNDICE DE VULNERABILIDAD EN EL MUNICIPIO DE CLIZA			0,46

4.8 Priorización de medidas de Reducción de Riesgos de Desastres (RRD).

Aplicando la matriz CEDRIG (COSUDE, 2013) de priorización de medidas de reducción de riesgo de desastres (RRD) muestran que, la Protección y Restauración de Ecosistemas, implementación de Sistemas de Alerta Temprana (SAT) y Planes de Ordenamiento Territorial, representan las opciones de

mitigación con la mayor sostenibilidad y resiliencia a largo plazo con una prioridad alta y tipos de medida blanda y verde. En tanto que las medidas estructurales como la construcción de Diques y Embalses presentan una prioridad media a baja con el tipo de medidas Gris debido a su alta vulnerabilidad a fallos futuros y elevados costos de implementación (Tabla 4). La implementación conjunta de medidas estructurales y no estructurales permitirá la Reducción del Riesgo de Desastres de Inundaciones de manera más rápida, efectiva y sostenible.

Tabla 7. Tabla de Análisis para las medidas de reducción de riesgos de desastres de inundación

Criterios de Evaluación CEDRIG	Sistema de Alerta Temprana	Ordenamiento Territorial y Mapeo de Riesgos	Protección y Restauración de Ecosistemas en la Subcuenca	Control de flujo por diques de contención	Retención de picos por embalse de laminación
Eficacia RRD	+	+	0	+	+
Resiliencia / Adaptación al CC	+	++	++	--	-

(Riesgo de Falla Futura)					
Impacto Ambiental (Daño/Beneficio)	0	+	++	--	-
Mitigación (Huella GEI)	+	+	++	--	-
Factibilidad & Aceptación Social	+	-	+	0	0
Puntaje Total	3	3	7	-3	-1
Prioridad	Alta	Alta	Muy Alta (Prioridad)	Baja (Condicional)	Media (Requiere MEA)
Tipo de Medida	Blanda	Blanda/Legal	Verde	Gris	Gris

4.8.1 Medidas estructurales.

4.8.1.1 Diques

La ubicación estratégica de los dos diques de protección responde a un análisis de los puntos críticos de desborde identificados en el modelado de tirantes, situándose específicamente en los tramos donde el cauce amenaza con invadir el casco urbano y las zonas de producción agrícola.



Figura 16. Mapa temático tirante con diques en eventos extremos, subcuenca Cliza

Para garantizar la durabilidad ante las crecidas del río, se diseñaron muros de gaviones de 2 metros de ancho y 4 metros de altura, aprovechando la abundancia de piedra y materiales locales en Cliza. Esta estructura es flexible y permeable, lo que le permite adaptarse al terreno e incluye un borde libre de un metro adicional como margen

de seguridad ante oleajes o caudales imprevistos durante eventos climáticos extremos.

La implementación de estos diques reduce la vulnerabilidad de las riberas al mitigar la erosión y estabilizar el cauce, protegiendo a la población e infraestructura en las zonas de mayor amenaza. Esta solución técnica no solo minimiza posibles pérdidas materiales, sino que fortalece la resiliencia de la subcuenca de forma sostenible y acorde con las necesidades de seguridad de la comunidad. (Figura 16).

4.8.2 Medidas no estructurales.

4.8.2.1 Sistemas de Monitoreo y Alerta Temprana

La implementación de sistemas de monitoreo hidrometeorológico permite anticipar crecidas y activar planes de emergencia y contingencia en tiempo real. Estos sistemas incluyen estaciones pluviométricas, sensores de nivel de agua y plataformas de comunicación para difundir alertas a la población y a los organismos de respuesta (Unidades de Gestión de Riesgos y Centros de Operaciones de Emergencia Municipal y Departamental).

4.8.2.2 Ordenamiento Territorial y Mapeo de Riesgos

El establecimiento de regulaciones para evitar construcciones en zonas de alto riesgo es fundamental para reducir la exposición a inundaciones. La planificación territorial debe basarse en estudios de modelación hidrológica y mapas de riesgos, delimitando áreas seguras para el desarrollo urbano y restringiendo la ocupación en zonas inundables.

4.8.2.3 Protección y Restauración de Ecosistemas

La conservación y recuperación de ecosistemas, como humedales y zonas de amortiguamiento, ayudan a regular el ciclo hidrológico y reducir la velocidad de la escorrentía. La reforestación de la subcuenca aguas arriba también disminuye la erosión y mejora la infiltración del agua, reduciendo el impacto de las crecidas.

5. Discusión

Los resultados obtenidos mediante la integración de los modelos hidrológico HEC-HMS e hidrodinámico IBER, basados con proyecciones de modelos de circulación global y procesados mediante herramientas SIG, evidencian una elevada vulnerabilidad de la subcuenca de Cliza frente a eventos de inundación. La metodología aplicada permitió simular escenarios extremos y analizar la respuesta hidrológica del sistema bajo condiciones climáticas futuras, fortaleciendo la interpretación de los resultados.

La respuesta hidrológica observada se asocia principalmente con las características geomorfológicas de la región, como pendientes pronunciadas, baja capacidad de infiltración y alta densidad de drenaje. Estos factores, incorporados en los parámetros del modelo HEC-HMS, favorecen para la conversión de la precipitación en escorrentía superficial, reduciendo los tiempos de concentración y aumentando los caudales pico, en concordancia con lo señalado por (Buytaert 2010).

Los resultados espaciales obtenidos con el modelo IBER muestran que las zonas urbanas y agrícolas presentan los mayores niveles de exposición al riesgo, debido a la ocupación de áreas inundables, la modificación de los cauces naturales y la limitada capacidad hidráulica existente. En comparación con estudios previos realizados en Cochabamba (García *et al.*, 2021), la subcuenca de Cliza presenta una mayor sensibilidad a eventos intensos, posiblemente asociada a procesos de urbanización no planificada.

En relación con las proyecciones climáticas, los escenarios analizados indican que, aunque algunos estudios proyectan una disminución de la precipitación total (Berri, 2020), en Cliza se observa un incremento en la concentración temporal de las lluvias. Esto genera eventos de alta intensidad que superan rápidamente la capacidad de infiltración del suelo, incrementando el riesgo de inundación. La incorporación en HEC-HMS confirman que la distribución temporal de la precipitación constituye un factor determinante en la generación de crecidas.

El uso integrado de datos de teledetección, SIG y modelación hidrológica permitió analizar de manera dinámica la interacción entre variables climáticas, físicas y morfológicas. A diferencia de estudios principalmente descriptivos (Arévalo *et al.*, 2012), el presente trabajo incorpora simulaciones, lo que amplía su aplicabilidad en procesos de planificación territorial y gestión del riesgo.

Desde una perspectiva de gestión, los resultados sugieren que las medidas estructurales, como defensivos y encauzamientos, deben complementarse con estrategias no estructurales, incluyendo la regulación del uso del suelo, sistemas de alerta temprana y programas de

educación ambiental. La reducción del riesgo depende no solo de la infraestructura, sino también del fortalecimiento institucional y comunitario.

No obstante, el estudio presenta limitaciones asociadas a la incertidumbre proveniente a los modelos climáticos, resolución espacial de los datos y a la limitada disponibilidad de registros hidrometeorológicos locales para la calibración. Estas restricciones pueden afectar la precisión de las simulaciones. Este estudio aporta evidencia empírica sobre los procesos hidrológicos que condicionan el riesgo de inundación en Cliza y demuestra la utilidad de la integración en elementos SIG y modelos hidrológicos e hidrodinámicos para el análisis de escenarios climáticos futuros.

6. Conclusiones

El presente estudio demuestra que la subcuenca de Cliza presenta una alta sensibilidad hidrológica frente a eventos de precipitación intensa, resultado de la interacción entre factores climáticos, geomorfológicos. La integración de información observada, proyecciones climáticas y modelación hidrológica-hidrodinámica permitió identificar los mecanismos que intensifican la generación de crecidas y su impacto sobre áreas vulnerables.

Los resultados indican que el incremento del riesgo de inundación no depende únicamente del volumen total de precipitación, sino principalmente de su concentración temporal y de las condiciones físicas de la cuenca. En este contexto, las simulaciones realizadas con el modelo MIROC-ESM y su regionalización evidencian que los eventos de corta duración y alta intensidad constituyen el principal factor desencadenante de inundaciones repentinas en Cliza.

La aplicación combinada de HEC-HMS e IBER permitió cuantificar los caudales extremos y delimitar espacialmente las zonas críticas de inundación, aportando una base técnica sólida para la planificación territorial y la gestión del riesgo. No obstante, la confiabilidad de estas estimaciones se encuentra condicionada por la disponibilidad limitada de registros hidrometeorológicos y por las incertidumbres inherentes a los modelos climáticos utilizados.

Por este motivo, los resultados deben ser interpretados como aproximaciones razonables bajo escenarios de cambio climático, y no como predicciones determinísticas. La ausencia de una calibración exhaustiva con series de largo plazo y la dependencia de un número reducido de modelos climáticos constituyen restricciones que limitan la generalización de los hallazgos.

Desde una perspectiva aplicada, el estudio evidencia que las intervenciones exclusivamente estructurales resultan insuficientes para reducir de manera sostenible el riesgo

de inundación. La gestión efectiva requiere la integración de medidas no estructurales, fortalecimiento institucional y planificación del uso del suelo, orientadas a disminuir la exposición y la vulnerabilidad.

Finalmente, este trabajo aporta un enfoque metodológico integrador para el análisis del riesgo hídrico en cuencas andinas de tamaño medio, combinando proyecciones climáticas, SIG y modelación numérica. Futuras investigaciones deberán incorporar enfoques multi-modelo, series observadas de mayor duración, con el fin de fortalecer la toma de decisiones y mejorar las estrategias de adaptación al cambio climático en contextos similares.

BIBLIOGRAFÍA

- (CR2), C. (s.f.). Plataforma de Simulaciones Climáticas.: <https://www.cr2.cl>
- Arévalo Boris, García Willman, Ledezma Mauricio y Delfin Mirko. (2012). Empleo de Sistemas de Información Geográfica, Datos de Sensoramiento Remoto y Fuentes de Acceso Libre Global, como herramienta para modelar agua, energía y cambio climático en Bolivia. *Acta Nova*, 5(2), 273-286.
- Berri, G. e. (2020). Climate change impact projections for South America under RCP 8.5. *Journal of Climate Research*, 33(5), 1-20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11069-019-03712-0>
- Bladé, E. C.-C. (2012). *Iber: a two-dimensional numerical model for the simulation of free surface flow*. Asociación Española de Ingeniería Hidráulica.
- Blancas, M. G. (2013). Impacto de la deforestación en las inundaciones en regiones andinas. *Revista de Estudios Ambientales*.
- Buytaert, W. C. (2010). Hydrological impacts of climate change in the Andes. *Climatic Change*, 99(1), 187-203.
- COSUDE. (2013). *CEDRIG - Guía para la Integración del Clima, el Medio Ambiente y la Reducción del Riesgo de Desastres*. Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación.
- Feldman, A. (2000). *Sistema de modelado hidrológico HEC-HMS: Manual de referencia técnica*. <https://en.hec.usace.ejército.mil>
- Hallegatte, S., Bangalore, M., Bonzanigo, L., Fay, M., Kane, T., Narloch, U., Rozenberg, J., & Treguer, D. (2013). *Shock Waves: Managing the Impacts of Climate Change on Poverty*. World Bank Publications.
- García Willman, Delfín Mirko, Ledezma Mauricio y Arévalo Boris. (2021). *Integrando métodos de evaluación de riesgos de deslizamientos e inundaciones en cuencas del Tunari y zona de Alto Cochabamba*. Universidad Católica Boliviana "San Pablo". ACTA NOVA; Vol. 10, N° 1, marzo 2021, ISSN 1683-0768.
- García Willman, Ysamar Suarez y Estela Herbas (2017). Evaluación del riesgo y medidas de mitigación para eventos de inundación en el Municipio de Santa Ana Del Yacuma (Beni, Bolivia). *Acta Nova*, 8(2), 241-255.
- IPCC, G. I. (2021). *Cambio climático 2021: la base científica física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Cambio climático 2021: la base científica física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático .
- López, A. Q. (2015). *Uso del suelo y su relación con eventos hidrometeorológicos extremos en Bolivia*. *Revista Boliviana de Ingeniería*.
- Mejía Santiago, García Willman y Fabio Bruschetta. (2017). *Sistema de detección y monitoreo permanente por imagen de incendios y contaminación atmosférica en la ciudad de Cochabamba*. ACTA NOVA; Vol. 8, N° 2, septiembre 2017, ISSN 1683-0768.
- Opinión. (15 de marzo de 2024). Inundaciones: atienden a Cliza; hay 15 puentes afectados y cayeron 23 casas. <https://www.opinion.com.bo/articulo/cochabamba/inundaciones-atienden-cliza-15-puentes-afectados-cayeron-23-casas/20240315000025939843.html>
- SENAMHI, S. N. (2019). *SENAMHI*. Informe sobre riesgos climáticos en los valles interandinos de Bolivia.
- Sillmann, J., & al, e. (2017). Downscaling climate models for regional impact assessment: A review of methodologies. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(6), 3162-3184. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2017JD026532>
- Smith, J. &. (2022). Climate Change Adaptation in Vulnerable Regions: Strategies for Hydrological Risk Management. *Environmental Science Publishing*.
- Taylor, K., Stouffer, R., & y Meehl, G. (2012). Una descripción general del CMIP5 y el diseño del experimento. *Boletín de la Sociedad Meteorológica Estadounidense*. (93). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/BAMS-D-11-00094.1>
- UNDP. (2017). Understanding Disaster Risk in a Changing Climate. *United Nations Development Programme*.
- Wei, G., Tang, Q., Liu, X., Jiang, S., Wu, J., & Wang, D. (2018). Quantifying the impacts of land use and cover change on urban flood regulation service: A case study in Beijing, China. *Journal of Hydrology*, 563, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.043>