

Artículo de revisión bibliográfica

Análisis y cálculo de los caudales de evento extremo mediante tormentas estocásticas en la cuenca de Misicuni – Cochabamba, Bolivia

Analyses and calculation of the extreme event discharges with stochastic storms in the Misicuni basin – Cochabamba, Bolivia

Andrés Cardoso Velasco¹ y Claude Le Noir²

¹ Universidad del Valle, Tiquipaya, Bolivia, andrescardoso35@gmail.com ² Universidad del Valle, Tiquipaya, Bolivia, lenoirclaude10@gmail.com

RESUMEN

El cálculo de los caudales máximos por medio de la generación estocástica de tormentas elípticas dentro de la cuenca Misicuni se realizó con los softwares especializados IT-LluviaNH y IT-Inundación del Banco Interamericano de Desarrollo desarrollado por la plataforma CAPRA, obteniendo las curvas PADF características y 300 escenarios de tormentas estocásticas evaluados en los modelos hidrológicos e hidrodinámicos resultando en hidrogramas a nivel de presa y de subcuenca para diferentes períodos de retorno. Se determinaron también caudales máximos por medio de metodologías convencionales relacionando las curvas IDF y tormentas de diseño.

La comparación gráfica y numérica de los hidrogramas a la salida de la cuenca permitió verificar la variación entre las metodologías aplicadas y el impacto en el aliviadero de la presa a través del tránsito de avenidas sobre el embalse. Los caudales máximos estocásticos resultaron inferiores a los determinados por las metodologías convencionales. Esto se debe a la no uniformidad de las intensidades de precipitación sobre el área de la cuenca. Sin embargo, contemplando la simultaneidad de escenarios de evento extremo independientes en cada subcuenca (aplicando porcentajes muy bajos a la probabilidad de excedencia) se tienen caudales máximos similares entre las metodologías. Asimismo, se calculó la proyección de los caudales con periodo de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años a períodos de retorno de 1000 y 10000 años para ambas metodologías. El impacto de los caudales estocásticos máximos laminados no representa un riesgo para el aliviadero de la presa al ser menores al caudal de diseño.

Palabras clave: PADF, estocástico, determinístico, hidrología, lluvia elíptica, presas

ABSTRACT

The calculation of the maximum flows through the stochastic generation of elliptical storms within the Misicuni basin was realized with the specialized software IT-LluviaNH and IT-Inundación from the Inter-American Development Bank written by the platform CAPRA (Probabilistic Evaluation of Risks and

Citar como: LE NOIR, C., & Cardoso Velasco , A. Análisis y cálculo de los caudales de evento extremo mediante tormentas estocásticas en la cuenca de Misicuni – Cochabamba, Bolivia. *Journal Boliviano De Ciencias*, 19(54). 78-114 <https://doi.org/10.52428/20758944.y19i54.939>

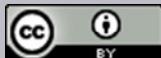
Revisado: 30/08/2023

Aceptado: 01/12/2023

Publicado: 20/12/23

Declaración: Derechos de autor 2023 Y Claude Le Noir, Andrés Cardoso Velasco, Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



Vulnarability) from the Andean University of Colombia, obtaining the characteristic PADF curves and 300 stochastic storm scenarios on the basin evaluated in the hydrological and hydrodynamic models resulting in hydrographs at the level of dam and sub-basins for different return periods. Maximum flows also were determined by conventional methodologies relating the IDF curves and design storms.

The graphic and numerical comparison of the hydrographs at the exit of the basin allowed to verify the variation between the methodologies applied and the impact on the spillway of the dam through the transit of floods on the reservoir. The maximum stochastic flow rates were lower than those determined by conventional methodologies. This is due to the non-uniformity of precipitation intensities over the basin area. However, considering the simultaneity of independent extreme event scenarios in each sub-basin (applying very low percentages to the probability of exceedance) the maximum flows between the methodologies are similar. In addition, projection of the flows with return period of 2, 5, 10, 20, 50 and 100 years to return periods of 1000 and 10000 years for both methodologies was calculated. The laminated maximum stochastic flows do not represent a risk for the +spillway of the dam as they are lower than the design flows.

keywords : PADF, stochastic, deterministic, hydrology, elliptical rain.

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios hidrológicos de eventos extremos representan gran importancia para el diseño, operación y control de embalses (Aldana Flores et al., 2022). Estos estudios pueden resultar simple para cuencas pequeñas, ya que la modelación “convencional-agregado-determinístico”, posibilita analizar un comportamiento hidrológico homogéneo. Por el contrario, el análisis para cuencas de mayor área resulta más complejo (Shaman et al., 2004; Campos Aranda, 1992), debido a que las precipitaciones ocurren por sectores, de este modo, el comportamiento hidrológico resulta variable. Por lo que, para cuencas grandes se recomienda desarrollar estudios de carácter “semi distribuido o distribuido” y “determinístico o estocástico”.

No obstante, es prudente mencionar que toda cuenca presenta un comportamiento heterogéneo a consecuencia del relieve, la capacidad de drenaje, perfil altitudinal, orientación, climas, tipos de suelos, uso de suelo, entre otras. Por lo que diferenciarlas representa cierta dificultad. Ante ello, Chow (1994), distingue a una cuenca pequeña por la sensibilidad a las lluvias de alta intensidad y de corta duración, en la cual predominan las características físicas del suelo respecto a las del cauce y su tamaño puede variar de 4 hasta 130 km². Por su parte, Campos Aranda (1992), por medio de la clasificación de I-Pai Wu y R. Springall, indica que una cuenca pequeña tiene una superficie de 25 a 250 km². Mientras que, Sandoval Erazo y E. P. Aguilera Ortiz (2014), determinan un área máxima de 45 km² para una cuenca homogénea pequeña en terreno montañoso. No obstante, para un relieve plano en área tropical, el World Meteorological Organization (WMO) (1987) indica que una cuenca homogénea pequeña puede tener un área de hasta 600 km².

En Bolivia, tres cuencas grandes ya fueron estudiados de forma positiva con la metodología BID-CAPRA. Rio Grande (102.062 km²) (ITEC 2015), Rio Rocha (3655 km²) (ITEC 2015) y Río Icona (2189 km²) (COCA2021). Ahora la metodología BID-CAPRA será aplicado a la Cuenca del río Misicuni correspondiente al

Proyecto Múltiple Misicuni (PMM), de la ciudad de Cochabamba-Bolivia, (344 km²) y comparado los resultados con los resultados de un cálculo conforme el concepto de una cuenca pequeña.

Este estudio justifica su importancia debido a la magnitud de la demanda hídrica (agua potable y de riego) y energética existente en los municipios del valle central de Cochabamba (Lopez, 2015). Por lo que, compete analizar los estudios convencionales desarrollados para el diseño del PMM. En este sentido, la presente investigación tiene por objetivo calcular los hidrogramas de evento extremo de la cuenca Misicuni mediante la generación de tormentas estocásticas elípticas, comparar con resultados de estudios convencionales, y en caso de grandes diferencias, elaborar alternativas a las políticas de operación del embalse en ocurrencia de crecidas con niveles altos en el embalse.

1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Procesar y llenar las series de precipitación diaria de las estaciones dentro de la cuenca Misicuni en el periodo 1967-2020.
- Determinar y procesar curvas PADF y escenarios estocásticos de tormenta para diferentes periodos de retorno por medio del software IT-LluviaNH del BID en base a series de precipitación diaria de las estaciones de la cuenca.
- Establecer un modelo hidrológico de la cuenca Misicuni mediante HEC-HMS.
- Procesar y generar hidrogramas de evento extremo por medio del software IT-Inundación del BID y HEC-HMS.
- Comparar gráfica y numéricamente, hidrogramas y caudales máximos de los eventos extremos en la cuenca determinados con lluvias estocásticas, con los eventos extremos determinados con tormentas de diseño (método convencional).
- Verificar la consecuencia de los caudales determinados en el nivel de seguridad de las actuales políticas de manejo del embalse Misicuni.

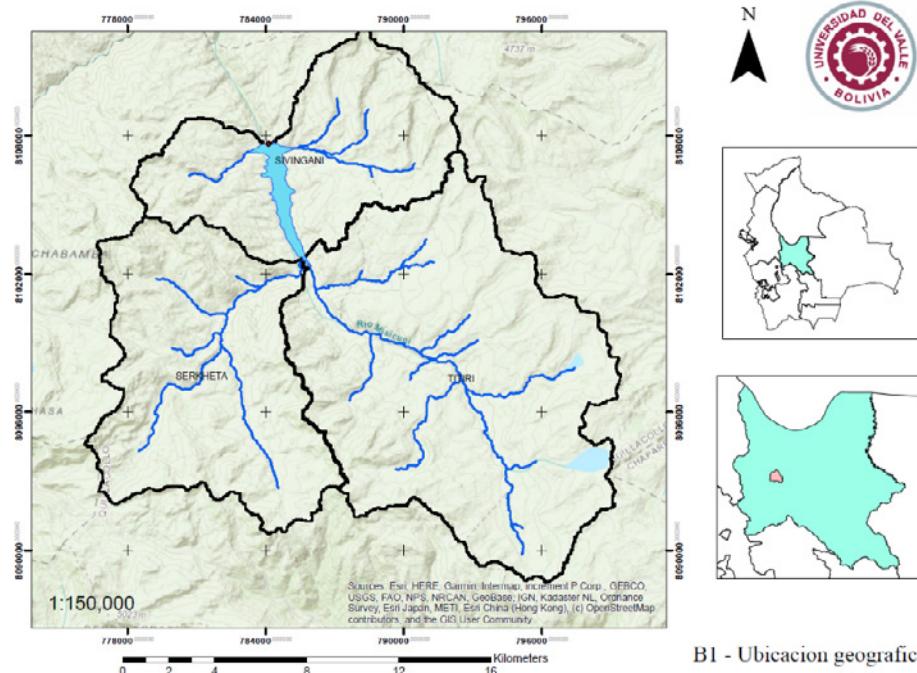
2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DEL ESTUDIO

La presa del embalse Misicuni se sitúa al noreste de la ciudad de Cochabamba (Figura 1) en las coordenadas 17°5'29.98" Sur y 66°19'48. 65" Oeste, la altura de la represa es de 120 m. El nivel de rebalse del vertedero, que proteja la represa vertedero, está en 3774 m s.n.m. El volumen del embalse creado en esta cota es de 180 millones de m³.

La cuenca resulta en la composición de 3 subcuenca (Figura 2). Cuyas características se presentan en la Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3. Su totalidad representa un área de 344.36 km², un perímetro de 130.26 km, una pendiente media de 23.5%, una altura media de 4300 m s.n.m. (nivel más alto=5014 m s.n.m. – nivel más bajo=3692 m

s.n.m.) y, un tiempo de concentración de 4 horas. El área es característico de la zona andina, por lo que se destaca las altas cumbres cordilleranas, registro de bajas temperaturas (entre el día y la noche), nevadas en ciertas épocas del año, vientos y poca cobertura vegetal.



B1 - Ubicación geográfica

Figura 1: Ubicación geográfica – Cuenca Misicuni

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1: Superficies y perímetros por subcuenca

<u>Subcuenca</u>	<u>Área</u> Km ²	<u>Perímetro</u> Km
<i>Sivingani</i>	77.29	61.02
<i>Titiri</i>	167.44	86.70
<i>Serkhetá</i>	99.63	69.54

Fuente: Elaboración propia

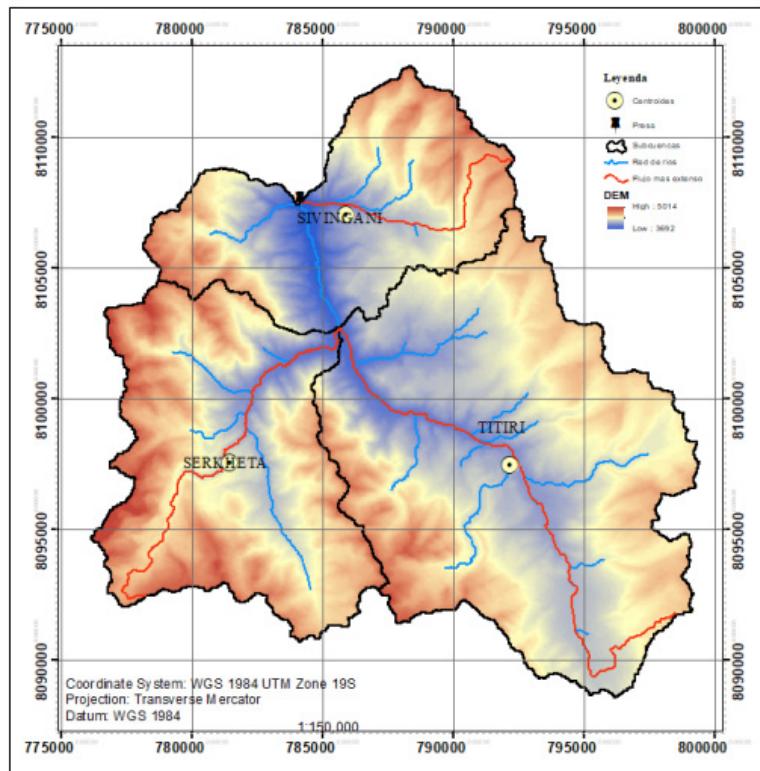


Figura 2: Subcuenca
Fuente: Elaboración propia

Tabla 2: Clasificación del relieve del terreno por subcuenca

<u>Subcuenca</u>	<u>Clasificación del terreno</u>	
	<i>P (%)</i>	<i>Relieve</i>
<i>Sivingani</i>	32.57	Fuertemente accidentado
<i>Titiri</i>	24.55	Fuertemente accidentado
<i>Serkheta</i>	37.85	Muy fuertemente accidentado

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3: Tiempo de concentración por subcuenca

<u>Subcuenca</u>	<u>Promedio</u>	
	<i>Horas</i>	<i>Minutos</i>
<i>Sivingani</i>	1.91	114.80
<i>Titiri</i>	3.96	237.68
<i>Serkheta</i>	2.76	165.34

Fuente: Elaboración propia

Con respecto al modelo de infiltración se aplicó el modelo del Número de la Curva (CN) que fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos [19], para la estimación del escurrimiento en estudios de determinación de caudales máximos sobre los mapas [14 y 15] y, mediante álgebra de mapas en la plataforma SIG ArcGis 10.5, se elaboró el mapa CN_{II} de la Cuenca de Misicuni (Figura 3).

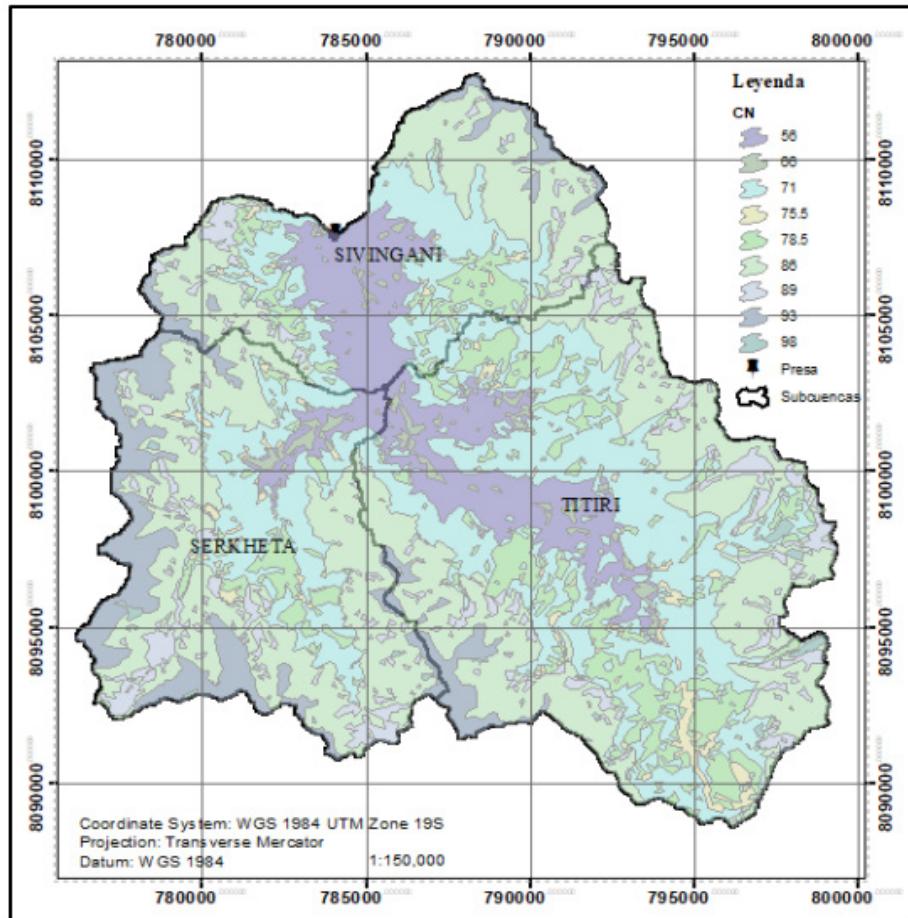


Figura 3: Mapa CN_{II} de la Cuenca Misicuni

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo el CN representativo para la totalidad de la cuenca Misicuni resultando en un CN_{II} igual a 78.20. De igual manera se determinó los números CN_{III} para las 3 principales subcuenca como son Titiri, Serkheta y Sivingani. Obteniendo valores similares para las subcuenca Sivingani y Titiri con valores de 76.51 y 76.10, para la subcuenca Serkheta se obtuvo un CN mayor resultando en 82.65.

2.2. PRECIPITACIONES EN EL ÁREA DE ESTUDIO

La ubicación de las estaciones del Proyecto Misicuni se presentan en la Figura 4, y su información general en la Tabla 4. La base de datos original con los registros de precipitaciones diarias de las estaciones fue proporcionada por parte de la empresa Misicuni. Los datos fueron procesados en planillas Excel para una oportuna identificación de la disponibilidad de datos. La fecha inicial de operación de las primeras estaciones de Misicuni es desde julio de 1967. Según el procesamiento de las series originales de datos, el registro de cada serie es discontinuo (Tabla 5).

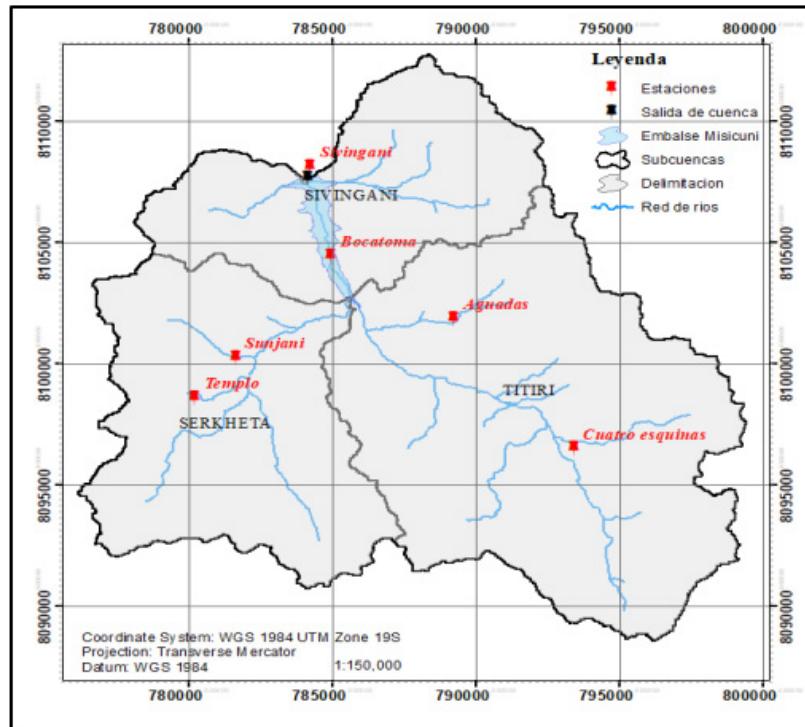


Figura 4: Ubicación de las estaciones pluviométricas
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4: Información general de las estaciones

Estación	Coordenadas UTM		Elevación	Tipo de datos	Periodo de registro
	Este	Sud			
Aguadas	789243.69	8101867.21	3956	Precipitación	2006-2020
Bocatoma	784963.96	8104443.15	3756	Precipitación	2000-2016
C-Esquinas	793422.77	8096505.21	3986	Precipitación	1967-2020
Sivingani	784252.28	8108130.99	3780	Precipitación	1967-2021
Sunjani	781616.68	8100242.29	3964	Precipitación	1967-2022
Templo	780229.67	8098596.78	4278	Precipitación	1967-2023

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5: Disponibilidad de datos de precipitación diaria

Fuente: Elaboración propia

Previamente al relleno de datos, se realizó el análisis de datos dudosos en relación a las precipitaciones máxima diaria anual para la identificación de Outliers para su depuración, se encontró dos Outliers en las estaciones Templo y Bocatoma, los cuales fueron también la causa de dos Outliers en las series de precipitaciones mensual de las mismas estaciones. Estos Outliers fueron depurados según criterio e iteraciones de relleno realizadas con la finalidad de lograr las mejores series posibles.

Para el proceso de relleno de datos de precipitación diaria en el periodo de 1967-2020, se utilizó el software HEC-4, el cual aplica una metodología de regresión lineal múltiple con un componente autorregresivo entre el mes actual y el mes anterior, obteniendo series llenadas a nivel mensual. Posteriormente, se desagregó por medio de la estación más cercana con datos no llenados de manera manual las series a un nivel diario.

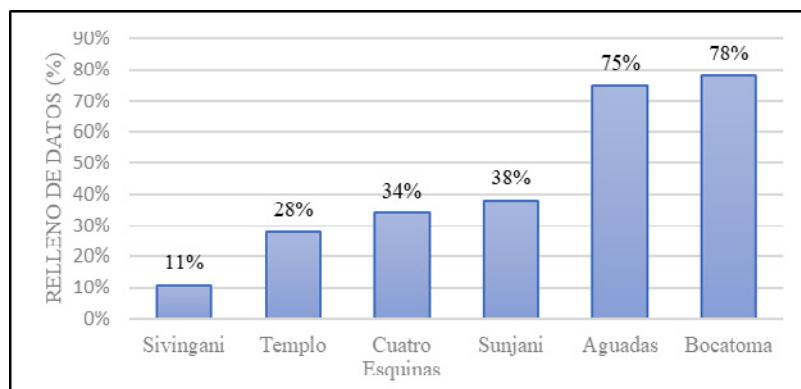


Figura 5: Relleno de datos en porcentajes por estación

Fuente: Elaboración propia

Los porcentajes de relleno de datos de la mayoría de las estaciones son catalogados entre altos (Templo 28%, Cuatro Esquinas 34% y Sunjani 38%) a muy altos (Aguadas 75% y Bocatoma 78%), siendo Sivingani 11% la única estación de registro normal (Figura 5). Bajo este análisis y debido a su retiro desde enero del 2017, por su ubicación dentro del embalse y por el inicio de operaciones del PMM la estación Bocatoma fue descartada, El porcentaje de relleno de datos promedio sobre las 5 estaciones restantes (Sivingani, Templo, Cuatro Esquinas, Sunjani y Aguadas) es de 40 %. Este indicador no es lo ideal, sin embargo, es lo mejor posible en el momento.

Para el análisis de la homogeneidad de las series rellenadas con períodos considerables con falta de datos, se aplicaron dos metodologías: análisis de las curvas doble masa a nivel de precipitaciones mensuales y un análisis de Outliers a nivel de precipitaciones máximas diarias anuales en las series rellenadas. Para el análisis de curvas doble masa, se tomó como base la estación Sivingani, por contar con el mayor periodo de registros respecto a las demás estaciones. Esta estación se relaciona con las cuatro otras estaciones obteniendo un comportamiento gráfico casi perfectamente lineal con coeficientes de determinación R^2 que varían de 0.9973 a 0.999, indicando que para precipitaciones mensuales entre las estaciones existe consistencia.

De igual manera, se realizó el análisis de datos dudosos a nivel de las precipitaciones máximas diarias en el cual no se identificó ningún valor atípico sobre lo permitido.

2.3. ESTUDIO ESTOCÁSTICO

2.3.1. IT-LluviaNH

2.3.1.1. Generación de curvas PADF

Se realizó la construcción de las curvas PADF (Precipitación – Área – Duración – Frecuencia) por medio de la precipitación promedio de un área determinada para una duración y frecuencia de la tormenta. Esta fue determinada por curvas IDF de las estaciones de la cuenca, con ayuda de la duración y la frecuencia de ocurrencia (ERN, 2016).

Se aplicó el programa IT-LluviaNH (ITEC, 2018) bajo los parámetros de las estaciones y de la cuenca:

- El contorno de la cuenca en formato shape (*.SHP) generado con la herramienta HEC-GeoHMS.
- Planilla Excel en formato 2003 que contenga la información específica de las estaciones y los registros por año en una hoja diferente como se puede observar el formato específico en Tabla 6 y Tabla 7.

Tabla 6: Planilla Excel – Información específica de las estaciones

CODIGO	LONGITUD	LATITUD	STATION NAME	COUNTRY	ELEVACION
1	-66.28133	-17.1500	Aguadas	BOLIVIA	3956
3	-66.24138	-17.1975	Cuatro esquinas	BOLIVIA	3986
4	-66.32901	-17.0094	Sivingani	BOLIVIA	3780
5	-66.35250	-17.1653	Sunjani	BOLIVIA	3964
6	-66.36555	-17.1803	Templo	BOLIVIA	4278

Fuente: Elaboración propia

Según las recomendaciones, para realizar un estudio hidrológico como tal, los registros históricos deben abarcar mínimamente 30 años de registro al igual de ser series analizadas y procesadas (ERN, 2016). Se tomó en cuenta para la generación de las curvas PADF las series de precipitación diaria de 53 años de longitud de 1968 a 2020 de las estaciones pluviométricas operadas por la Empresa Misiuni Aguadas, Cuatro Esquinas, Sivingani, Sunjani y Templo, previamente analizadas y subsanadas.

Tabla 7: Planilla Excel – Precipitación diaria (mm/día) por estación año 1968

FECHA	1	3	4	5	6
1/1/1968	0.8	0.3	0.5	0.2	2.0
1/2/1968	0.0	0.0	5.1	20.3	4.0
1/3/1968	0.0	0.0	22.6	20.1	15.0
1/4/1968	0.0	0.0	13.5	19.1	20.0
1/5/1968	11.4	4.2	0.3	0.0	1.2
1/6/1968	1.6	0.6	0.3	0.0	4.0
1/7/1968	0.5	0.2	0.3	0.0	6.0
1/8/1968	0.8	0.3	0.0	1.5	7.0
1/9/1968	14.7	5.4	0.5	6.2	1.0
1/10/1968	6.0	2.2	0.8	3.1	5.0
1/11/1968	0.8	0.3	0.8	8.0	2.0
1/12/1968	2.2	0.8	0.5	0.0	9.0
1/13/1968	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0
1/14/1968	0.0	0.0	0.5	0.0	9.0
1/15/1968	0.0	0.0	1.0	0.0	3.0
...
12/31/1968	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: Elaboración propia

2.3.1.2. Parámetros y límites inferiores

Los parámetros para la identificación de eventos por parte del programa IT-LluviaNH evaluando los registros históricos son determinados mediante análisis estadístico de simultaneidad de los registros de precipitaciones entre las estaciones. Los límites inferiores son necesarios para identificar los eventos extremos.

El límite inferior promedio se determinó a partir de la precipitación promedio diaria por cada año de registro, posteriormente se toma la precipitación promedio máxima por estación y finalmente el promedio de las estaciones resultando un valor de 4.0 mm de precipitación diaria promedio. Para el límite inferior de las precipitaciones máximas se consideran las precipitaciones máximas registradas originales previo al relleno, se identifica la precipitación máxima promedio por estación y finalmente el mínimo de las estaciones resultando en una precipitación máxima (límite inferior) de 25.0 mm.

2.3.1.3. Periodo de retorno

Posteriormente en IT-LluviaNH se eligió los períodos de retorno 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años para la generación de las curvas PADF y los escenarios de tormentas estocásticas.

2.3.1.4. Generación de las curvas PADF

Con toda la información precedente la plataforma IT-LluviaNH mediante análisis de mapas de históricas de isoyetas, procedimientos estadísticos y álgebra de mapas procesa los eventos para los períodos de retorno seleccionados, genera una grilla de generación de tormentas y las curvas PADF para cada período de retorno Figura 6.

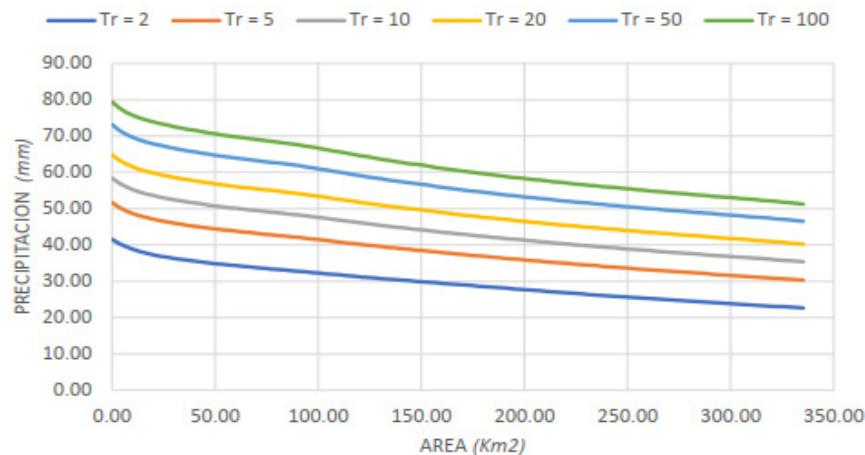


Figura 6: Curvas PADF – Cuenca Misicuni

Fuente: Elaboración propia

2.3.1.5. Generación de escenarios estocásticos de tormentas elípticas

Posteriormente a la determinación de las curvas PADF, IT-LluviaNH con los archivos generados de curvas y la grilla con la distribución espacial de las tormentas estocásticas, ejecuta el proceso de acuerdo a los parámetros definidos por el usuario.

El número de tormentas por período de retorno son de 50 escenarios determinados en 100 simulaciones por cada escenario, la resolución fue determinada en base a un reconocimiento de proporcionalidad al área de la cuenca resultando en un tamaño de celda de 500 x 500 metros. Mediante dicho proceso se obtuvo un total de 300 escenarios, en la Figura 7 se tiene la captura de diferentes escenarios durante proceso del software IT-LluviaNH en las cuales se observa el desarrollo de las tormentas elípticas. Los centros aleatorios de las tormentas elípticas se eligen dentro de los polígonos de eventos de precipitación máxima determinados dentro del análisis para las curvas PADF.

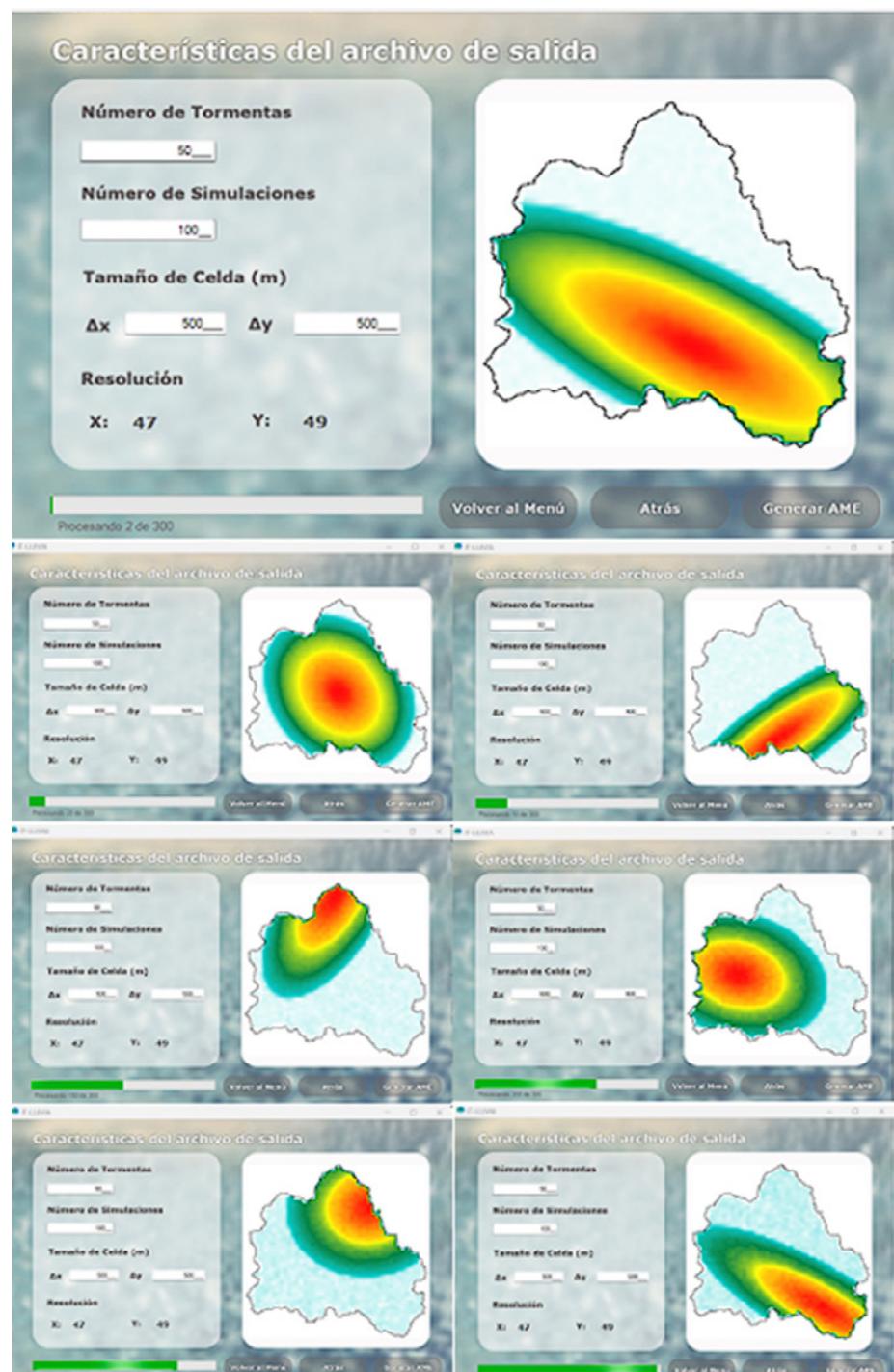


Figura 7: IT-LluviaNH – Procesamiento de escenarios.

Fuente: Elaboración propia

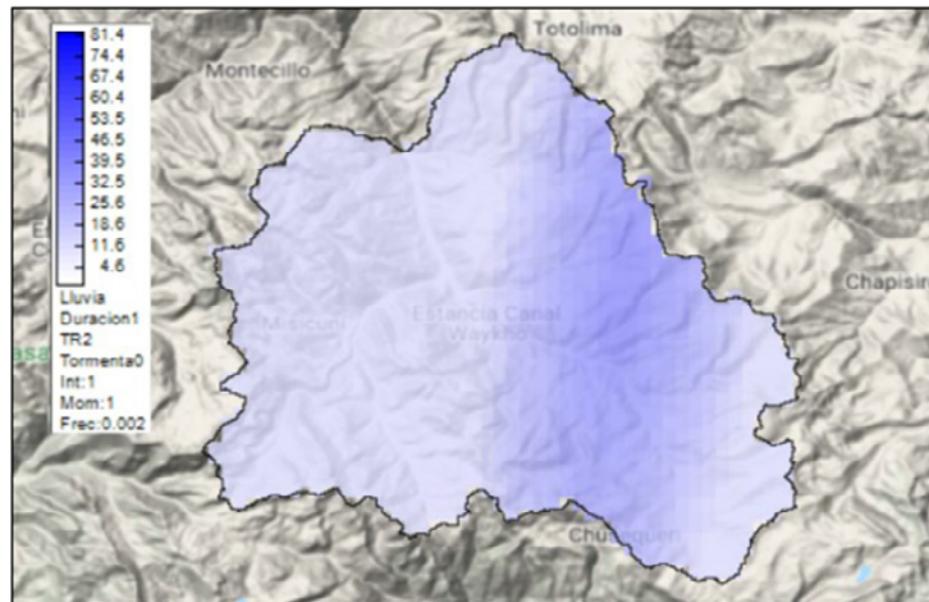


Figura 8: CAPRAGIS – Escenario # 1 para un periodo de retorno de 2 años

Fuente: Elaboración propia

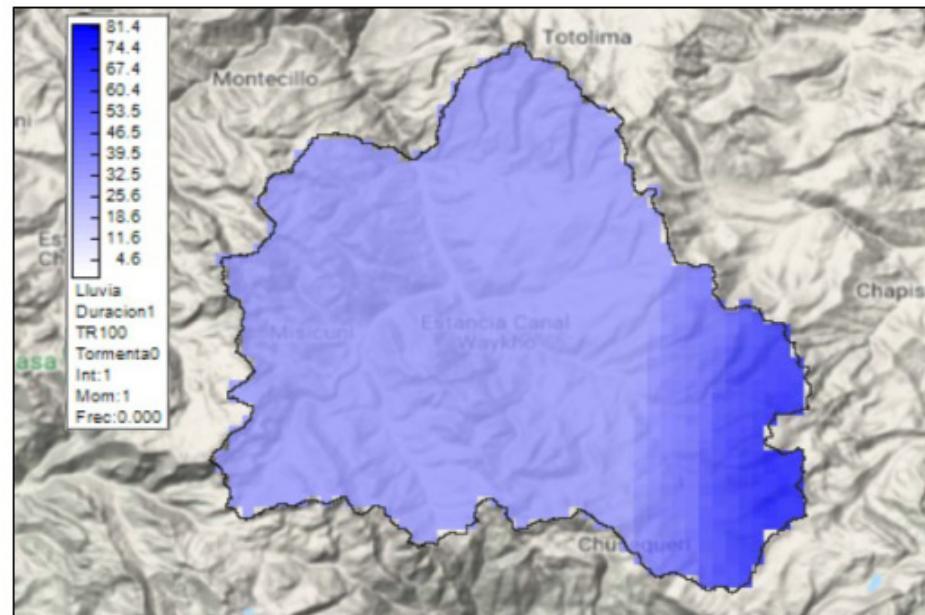


Figura 9: CAPRAGIS – Escenario # 1 para un periodo de retorno de 100 años

Fuente: Elaboración propia

Finalizando el procesamiento, el software IT-LluviaNH genera el archivo de amenazas con formato de salida (.AME). Este contiene la totalidad de escenarios en un mismo archivo. La visualización e interpretación es posible con el SIG desarrollado por CAPRA representado en la Figura 8 y Figura 9.

2.3.2. IT-Inundación

2.3.2.1. Modelo Hidrológico – HEC-HMS

La implementación del modelo hidrológico de la cuenca Misicuni, se realizó con el programa HEC-GeoHMS y ArcGis, posteriormente exportar el modelo a HEC-HMS en la versión 4.0 como lo requiere para el procesamiento en IT-Inundación, en el cual se consideró el aporte de las 3 subcuenca principales, cuyo comportamiento será simulado para cada escenario. En la Figura 10 se presenta el esquema de la simulación.

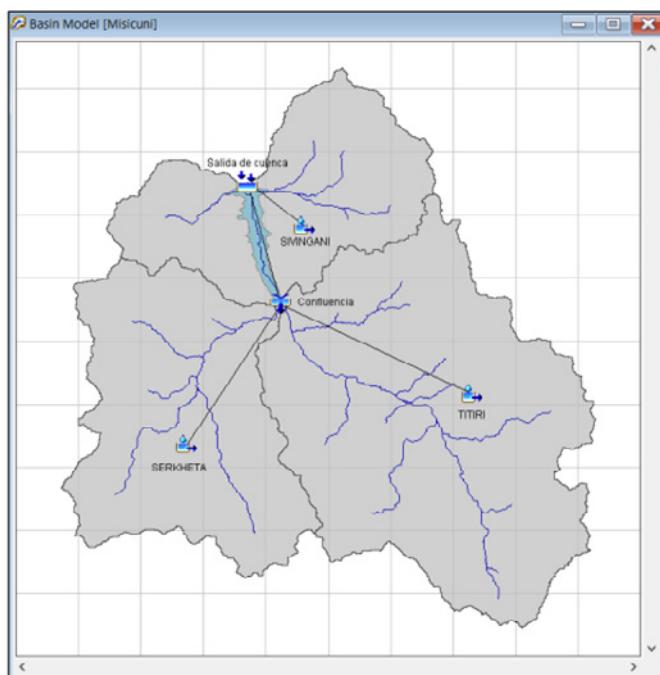


Figura 10: Esquema del modelo hidrológico en HEC-HMS-VER 4.0

Fuente: Elaboración propia 2023

Los parámetros hidrológicos son *exactamente los mismos en tanto a las metodologías de pérdidas por infiltración en el suelo y transformación de lluvia a caudal tomadas en cuenta en la metodología convencional descritas en la sección - 2.4, la precipitación es representada en grilla de resolución de 500x500 metros conjuntamente al archivo ‘.MOD’ (Figura 11), determinada por HEC-GeoHMS y especificado en el modelo hidrológico HEC-HMS.*

La simulación es dada por la especificación de control en una fecha aleatoria con una duración de 24 horas, para la aplicación de cada escenario se especifica el archivo *.DSS (siendo el sistema de almacenamiento de información de HEC-HMS y HEC-RAS) el cual contiene la información del evento respectivo.

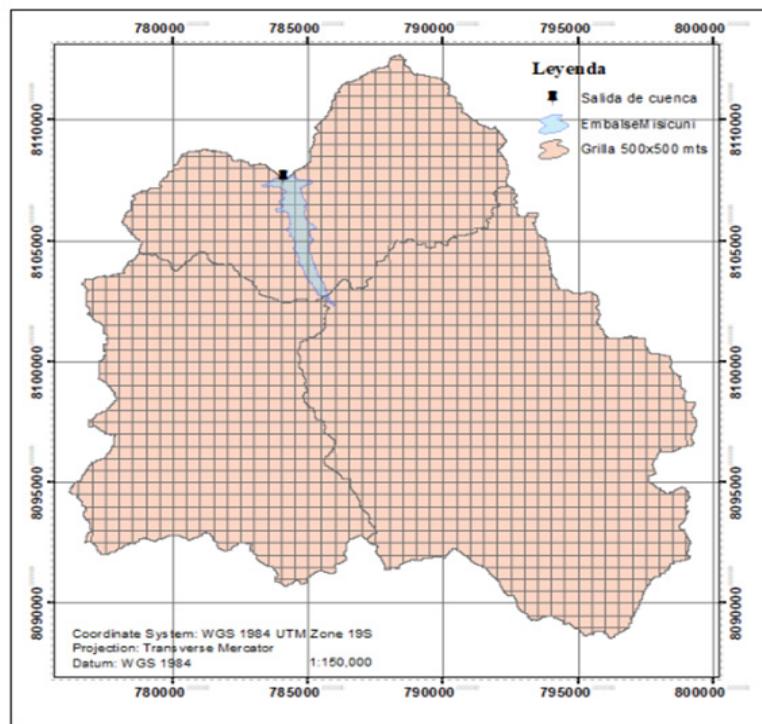


Figura 11: Grilla generada para las precipitaciones para el modelo hidrológico

Fuente: Elaboración propia 2023

2.3.2.2. Modelo Hidrodinámico – HEC-RAS

Un modelo hidrodinámico de flujo no permanente unidimensional es necesario para el correcto procesamiento del software IT-Inundación sucesivamente después de la modelación hidrológica. Sin embargo, en el presente estudio al recaer la importancia en la generación de los eventos extremos de la cuenca Misicuni por la metodología estocástica y su comparación con estudios convencionales, se utilizó un modelo básico en la salida de la Cuenca simulando un canal georreferenciado en el datum WGS-84 zona 19 sur.

2.3.2.3. Procesamiento en IT-Inundación

Se desarrolló el procesamiento del programa IT- Inundación, introduciendo los archivos con los parámetros generales correspondiente al mapa de referencia, el modelo hidrodinámico y el archivo con extensión AME con los escenarios de

precipitación. Posteriormente, se especifica la georreferenciación del proyecto en el Datum WGS-84 y zona 19 sur y la resolución final del archivo de salida en 500x500 metros.

A continuación se selecciona el modelo hidrológico para el procesamiento, especificando la corrida de la simulación, los puntos de entrada de caudal pudiendo resultar en 1 solo punto o más, el factor de tiempo estándar tomando en cuenta la variación de la tormenta dentro de las 24 horas afectado al valor recomendado por el software de 1.5, duración del evento de 1 día y la distribución temporal de tormentas en base a hietogramas de tormentas de diseño y su proporcionalidad en porcentaje de acuerdo a la duración de la tormenta.

Finalmente, el software IT-Inundación calcula para la totalidad de escenarios por períodos de retorno en el punto de interés correspondiente a la salida de la cuenca Misicuni los hidrogramas. De igual manera, se realizó el análisis a nivel de subcuenca para los diferentes períodos de retorno permitiendo la comparación individual.

2.3.2.4. Hidrogramas estocásticos

Posterior al proceso y análisis individual de los archivos *.DSS con la información de los eventos de las tormentas elípticas generadas y evaluadas en el modelo hidrológico HEC- HMS, se tiene hidrogramas a nivel del sitio de la presa y a nivel de subcuenca para los diferentes períodos de retorno (50 escenarios por período de retorno), ver inciso 3.2.

2.4. ESTUDIO CONVENCIONAL

2.4.1. Distribuciones teóricas

Se determinó la función de distribución que mejor se ajusta a las precipitaciones máximas diarias anuales de cada estación. En el punto 3.2 se tiene las precipitaciones máximas diarias anuales subsanadas.

Con la plataforma HIDROESTA 2 se han probado varias funciones de distribución. Por cada estación se ha retenido la distribución que mejor se ajusta conforme la prueba de bondad de ajuste según el criterio de Smirnov Kolomogrov (Tabla 8). Las precipitaciones máximas diarias conforme períodos de retorno según la mejor función de distribución se presentan en la Tabla 9. El criterio de Smirnov-Kolomogrov verifica solamente la máxima diferencia entre la probable función de distribución y la distribución de probabilidades empíricas, es decir, solamente en un punto. Viendo que se trata de series de 53 datos, se ha optado para realizar un control visual entre la (mejor) función teórica de distribución y la distribución empírica de los 53 años de datos. Se vio por conveniente ajustarse a la distribución de las probabilidades empíricas para determinar las precipitaciones máximas para cada período de retorno. En la Tabla 10 se presentan los ajustes optados para la determinación de las precipitaciones máximas por período de retorno y, el criterio visual para el mejor ajuste de distribuciones.

Tabla 8: Prueba de bondad de ajuste – Criterio Smirnov Kolmogorov

Estación	Mejor ajuste	ΔMáximo	ΔTabular
Aguadas	<i>Log Pearson III</i>	0.0288	0.1851
C-Esquinas	<i>Gamma II</i>	0.0692	0.1851
Sivingani	<i>Gumbel</i>	0.0475	0.1851
Sunjani	<i>Log Normal II</i>	0.0844	0.1851
Templo	<i>Gamma III</i>	0.0817	0.1851

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9: Precipitaciones máximas diarias por periodo de retorno – Ajuste teórico

<u>Periodo de retorno</u>	<u>Estación</u>				
	<i>Aguadas</i>	<i>C-Esquinas</i>	<i>Sivingani</i>	<i>Sunjani</i>	<i>Templo</i>
<i>años</i>	<i>mm/día</i>				
2	29.73	33.88	32.51	30.46	26.93
5	38.52	46.26	41.47	41.47	36.95
10	44.45	53.77	47.41	48.73	43.81
20	50.24	60.53	53.10	55.68	50.37
50	57.91	68.75	60.48	64.69	58.75
100	63.83	74.59	66.00	71.49	64.93
<i>Log Pearson</i>	<i>mm/día</i>				
<i>Distribución</i>	<i>III</i>	<i>Gamma II</i>	<i>Gumbel</i>	<i>Normal II</i>	<i>Gamma III</i>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10: Precipitaciones máximas diarias por periodo de retorno – Ajuste visual

<u>Periodo de retorno</u>	<u>Estación</u>				
	<i>Aguadas</i>	<i>C-Esquinas</i>	<i>Sivingani</i>	<i>Sunjani</i>	<i>Templo</i>
<i>Años</i>	<i>mm/día</i>				
2	28.70	33.03	32.51	30.46	26.36
5	37.32	46.56	41.47	41.47	35.23
10	44.42	55.72	47.41	48.73	42.70
20	52.49	64.63	53.10	55.68	51.35
50	65.15	76.37	60.48	64.69	65.18
100	76.61	85.35	66.00	71.49	77.95
<i>Log Gumbel</i>	<i>Log Normal II</i>	<i>Gumbel</i>	<i>Log Normal II</i>	<i>Gumbel</i>	<i>Log Gumbel</i>

Fuente: Elaboración propia

2.4.2. Tormentas de diseño

2.4.2.1. Distribución de la precipitación media por subcuenca

Se aplicó la distribución de las precipitaciones para cada estación y, la metodología Thiessen según los factores de ponderación y su afectación dentro de cada subcuenca.

En la Tabla 11 se presentan las precipitaciones P_{24} horas máximas anuales. Estas fueron determinadas por medio de las precipitaciones máximas diarias, mismas que fueron afectadas por el factor de variación de tormentas, cuyo valor recomendado es 1.13.

Tabla 11: Precipitaciones P_{24} máximas anuales por periodo de retorno

<u>Periodo de retorno</u>	<u>Estación</u>				
	<i>Aguadas</i>	<i>C-Esquinas</i>	<i>Sivingani</i>	<i>Sunjani</i>	<i>Templo</i>
<i>Años</i>	<i>mm/día</i>				
2	32.43	37.32	36.74	34.42	29.79
5	42.17	52.61	46.86	46.86	39.81
10	50.19	62.96	53.57	55.06	48.25
20	59.31	73.03	60.00	62.92	58.03
50	73.62	86.30	68.34	73.10	73.65
100	86.57	96.45	74.58	80.78	88.08

Fuente: Elaboración propia

La distribución de precipitaciones según su localización y afectación son características para cada subcuenca. Por lo tanto, se realizó el cálculo de los factores según las áreas de los polígonos de Thiessen (Figura 12) y la influencia en las subcuenca también conocido como factores de ponderación (Tabla 12).

Tabla 12: Factores de Ponderación de Thiessen por subcuenca

<u>Estación</u>	<u>Subcuenca</u>		
	<i>Serkheta</i>	<i>Sivingani</i>	<i>Titiri</i>
Aguadas	0.005	0.194	0.339
C-Esquinas	0.023	0	0.632
Sivingani	0	0.729	0
Sunjani	0.362	0.077	0.029
Templo	0.61	0	0

Fuente: Elaboración propia

Aplicando los factores de ponderación de los polígonos de Thiessen (Tabla 12) a las precipitaciones P_{24} máximas (Tabla 11) se obtiene las precipitaciones P_{24} máximas anual promedio por cada subcuenca (Tabla 13).

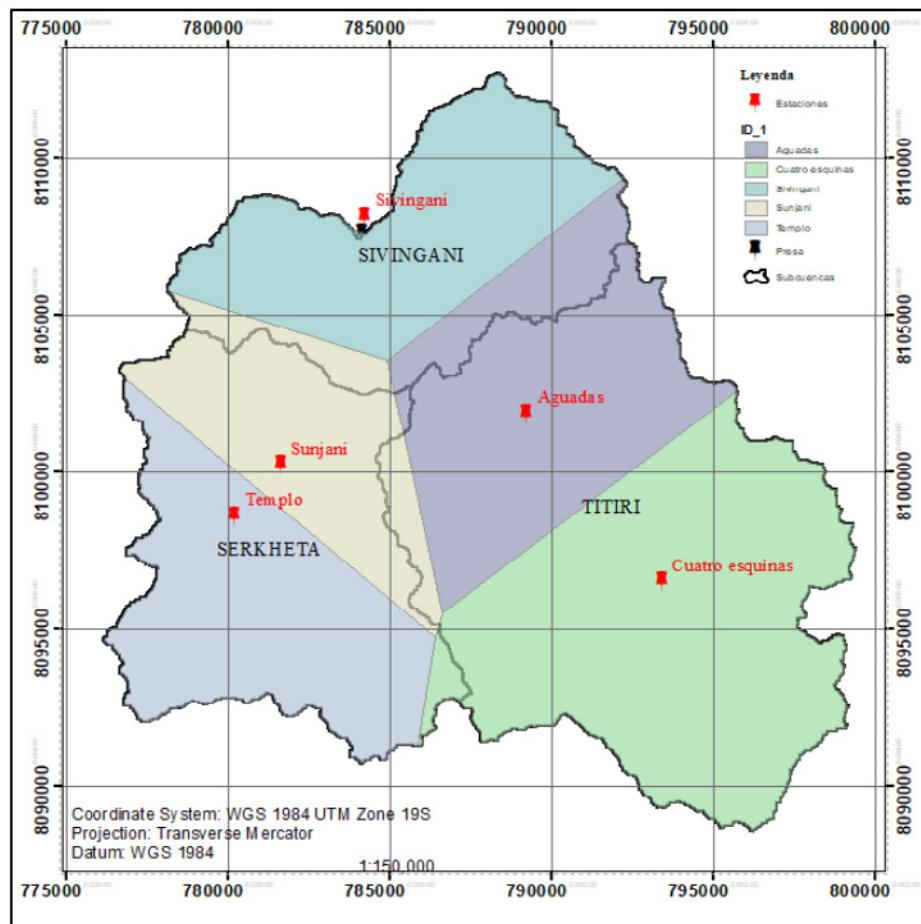


Figura 12: Polígonos de Thiessen

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13: Precipitaciones P24 máximas anual promedio en función periodo de retorno por subcuencas

<u>Periodo de retorno</u>	<u>Subcuenca</u>		
	<i>Serkheta</i>	<i>Sivingani</i>	<i>Titiri</i>
2	31.65	35.72	35.58
5	42.67	45.95	48.91
10	51.07	53.03	58.41
20	60.15	60.09	68.09
50	73.74	69.73	81.62
100	85.63	77.38	92.64

Fuente: Elaboración propia

2.4.2.2. Generación de las tormentas de diseño

La generación de las tormentas de diseño pasa primero por convertir las precipitaciones P_{24} máximas a curvas PDF (Precipitación – Duración – Frecuencia) e IDF (intensidad – Duración – Frecuencia). Se ha usado 2 métodos: conforme (1) los coeficientes de desagregación de la estación AASANA de Cochabamba (Tabla 14) y (2) los coeficientes de desagregación determinadas con la fórmula de Grobe o Dick y Peschke.

Segundo se trabaja con el método de los bloques alternos del USBR para determinar los hietogramas de las tormentas de diseño.

Tabla 14: Coeficientes de desagregación estación AASANA
Cochabamba

Duración	Coeficientes
5.00	0.17
15.00	0.31
30.00	0.40
45.00	0.45
60.00	0.49
120.00	0.58
180.00	0.64
360.00	0.79
720.00	0.96
1440.00	1.14

Fuente: Le Noir, 2017

La metodología Dick y Peschke permite un cálculo de tormentas menores a 24 horas, relacionando la duración de la tormenta con la precipitación máxima de 24 horas representado los coeficientes de desagregación mediante la siguiente ecuación 1:

$$P_d = P_{24} * \left(\frac{D}{1440}\right)^{0.25}$$

Donde:

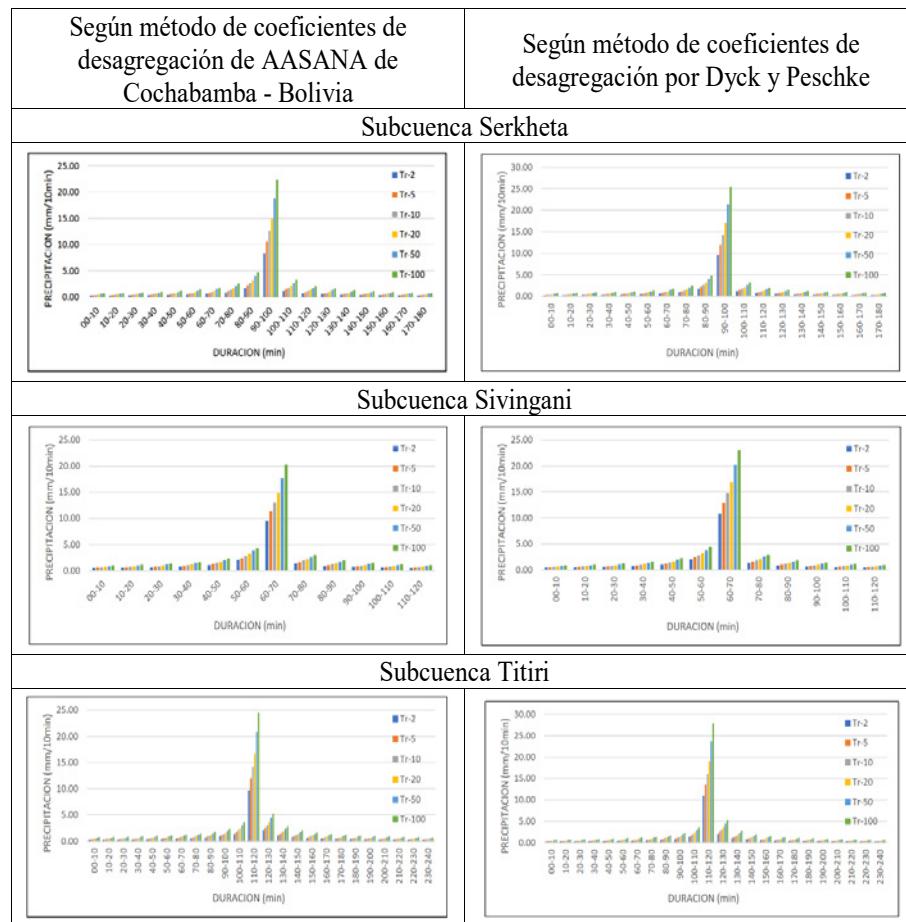
P_d = Precipitación total en mm durante un tiempo de duración de la precipitación de D minutos.

P_{24} = la precipitación máxima en 24 horas en mm (1.13 $P_{\text{diario máximo anual}}$).

En la Figura 13 se tiene los hietogramas de las tormentas de diseño para las tres subcuenca. El tiempo de duración del hietograma (Tabla 15) se ha ajustado a los tiempos de concentración de cada subcuenca (Tabla 3). La discretización de los hietogramas está por intervalos de 10 minutos.

Las tormentas de diseño para evento extremo calculados con el método de Dick y Peschke, resultan 3 a 5 % más fuerte en precipitación total y precipitación pico, en relación a las tormentas determinadas con el método de los coeficientes de desagregación (Tabla 17).

Figura 13: Hietogramas de las tormentas de diseño según dos metodologías para el cálculo de eventos extremos con el método convencional



Fuente: Elaboración propia 2023

Tabla 15. Tiempos de duración de las tormentas de diseño

<u>Subcuenca</u>	<u>Duración de tormenta</u>	
	<i>Horas</i>	<i>Minutos</i>
Sivingani	2.8	168
Serkheta	2	120
Titiri	4	240

Fuente: Elaboración propia 2023

Se determinó que el régimen de lluvias en las 3 subcuenca no es uniforme. Ya que por medio de la combinación de la Tabla 15 y Tabla 16, se demuestra que para el periodo de 100 años la intensidad promedia de la precipitación de la tormenta crítica que corresponde a la duración total para la cuenca Sivingani (20.4 mm/hora) es mayor que para la cuenca Serkheta (18.0 mm/hora) y para la cuenca Titiri (15 mm/hora). La intensidad pico para Titiri (167.4 mm/hora) es mayor que para la cuenca Serkheta (152.4 mm/hora) y cuenca Sivingani (138.6 mm/hora) (Tabla 17)

Tabla 16. Precipitación total y en el pico de las tormentas de diseño

1. METODO COEFICIENTES DE DESAGREGACION - AASANA						
<u>Subcuenca</u>	<u>Precipitación total por periodo de retorno (mm)</u>					
	2	5	10	20	50	100
Serkheta	18.9	23.8	28.3	33.7	42.3	50.3
Sivingani	19.1	22.9	26.1	29.9	35.7	40.8
Titiri	23.5	29.3	34.6	40.8	50.8	59.9
<u>Subcuenca</u>	<u>Precipitación pico por periodo de retorno (mm)</u>					
	2	5	10	20	50	100
Serkheta	8.4	10.6	12.6	14.9	18.8	22.3
Sivingani	9.5	11.4	13.0	14.9	17.7	20.3
Titiri	9.6	12.0	14.2	16.7	20.8	24.5

2. METODO DE DYCK Y PESCHKE						
<u>Subcuenca</u>	<u>Precipitación total por periodo de retorno (mm)</u>					
	2	5	10	20	50	100
Serkheta	19.7	24.8	29.4	35.0	44.0	52.4
Sivingani	20.2	24.1	27.5	31.5	37.6	43.0
Titiri	24.3	30.2	35.7	42.1	52.4	61.8
<u>Subcuenca</u>	<u>Precipitación pico por periodo de retorno (mm)</u>					
	2	5	10	20	50	100
Serkheta	9.6	12.0	14.3	17.0	21.4	25.4
Sivingani	10.8	12.9	14.8	16.9	20.2	23.1
Titiri	11.0	13.7	16.1	19.0	23.7	27.9

Fuente: Elaboración propia 2023

Tabla 17: Comparación del tiempo de duración, de la precipitación total y de las intensidades promedias y pico de las tormentas de diseño para evento crítico periodo de retorno T=100 años sobre las tres subcuenca

<u>Subcuenca</u>	<u>Duración</u>		<u>Intensidad promedio</u>		<u>Intensidad en el pico</u>	
	Horas	Minutos	mm	mm/hora	mm/min	mm/hora
Sivingani	2.8	168	50.3	18.0	2.54	152.4
Serkheta	2	120	40.8	20.4	2.31	138.6
Titiri	4	240	59.9	15.0	2.79	167.4

Fuente: Elaboración propia 2023

3. RESULTADOS

3.1. COMPARACIÓN HIDROGRAMAS DE MÉTODOS CONVENCIONALES

Por medio de las dos metodologías convencionales, se obtuvieron los hidrogramas para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años (Figura 14). El hidrograma resultante de la metodología por coeficientes de desagregación (Coe) presenta caudales inferiores al hidrograma resultante por el criterio de Dicky y Peschke (D y P), en la Tabla 18 se presentan los caudales máximos por período de retorno y la diferencia correspondiente a las dos metodologías convencionales es de 8 a 13%.

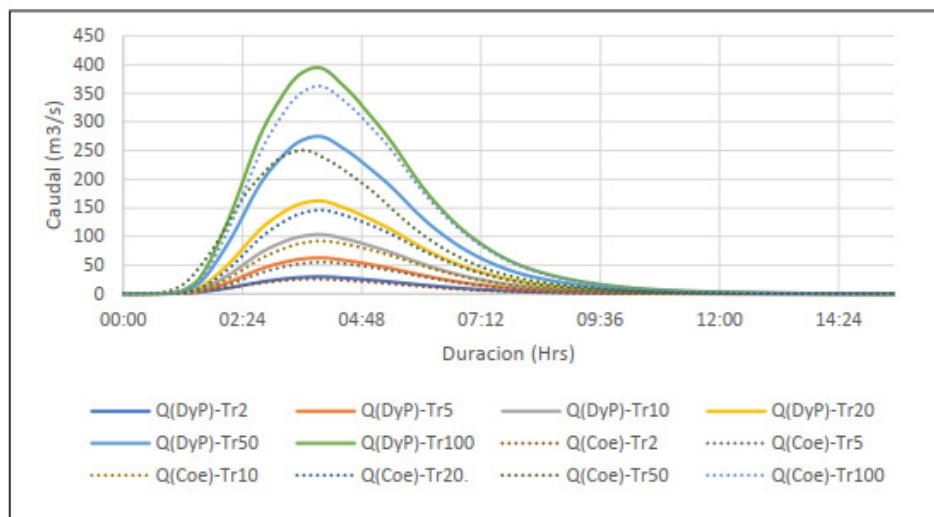


Figura 14: Comparación gráfica de hidrogramas a la salida de la cuenca Misicuni por metodologías convencionales

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18: Comparación numérica de hidrogramas a la salida de la cuenca Misicuni por metodologías convencionales

Metodología	Caudales máximos por período de retorno (m³/s)					
	Tr-2 T	r-5	Tr-10	Tr-20	Tr-50	Tr-100
Dick y Peschke	29.7	62.7	103.3	161.9	274.3	394.3
Coeficientes	25.7	55.2	92.1	146.0	250.3	362.0
Variación (DyP - Coef.)	4.0	7.5	11.2	15.9	24.0	32.3
	13%	12%	11%	10% 9	%	8%

Fuente: Elaboración propia

3.2. COMPARACIÓN HIDROGRAMAS MÉTODOS CONVENCIONALES Y ESTOCÁSTICO

Los hidrogramas, según las limitaciones de los softwares IT-Lluvia e IT-Inundación, se determinaron 50 escenarios para cada periodo de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. En la Figura 15, Figura 16 y Figura 17 se presenta la comparación de hidrogramas entre las metodologías convencionales y los 50 escenarios correspondientes a la metodología estocástica para el periodo de retorno de 100 años para las 3 subcuenca. En la Figura 18 se tiene el mismo análisis para la cuenca Misicuni (sitio actual de la presa del embalse de Misicuni). A cada serie de 50 caudales máximos de 50 escenarios estocásticas se ha ajustado una distribución Gumbel y determinado los caudales máximos con probabilidades de 50, 10, 1 y 0.1 % de excedencia. Estos caudales están anotados en las 4 figuras. En la Tabla 19 se tiene los valores numéricos de estos 16 caudales estocásticos y de los 8 caudales determinísticos de los dos métodos convencionales.

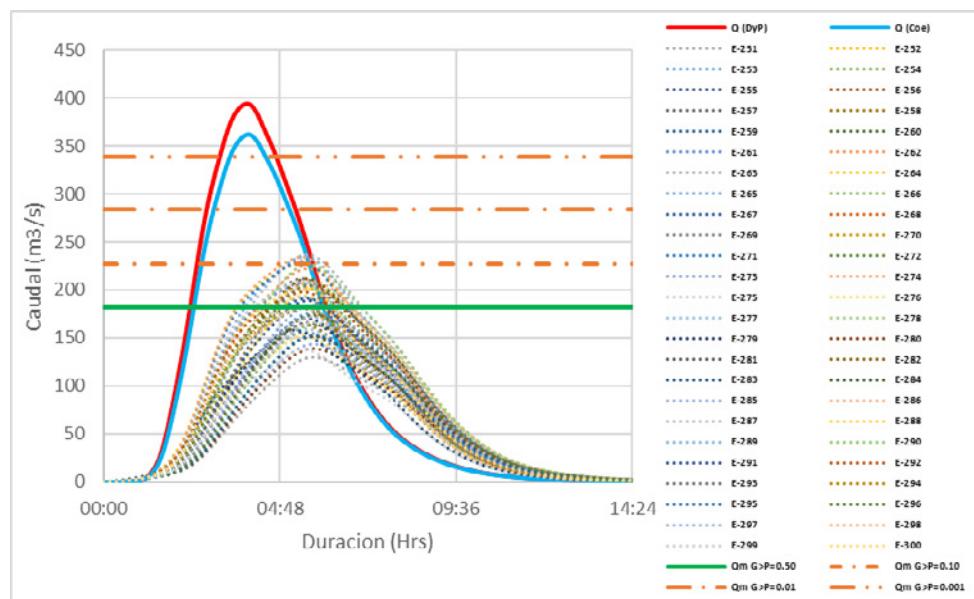


Figura 15. Comparación gráfica de hidrogramas subcuenca Titiri para un periodo de retorno 100 años (métodos convencional y estocástico)

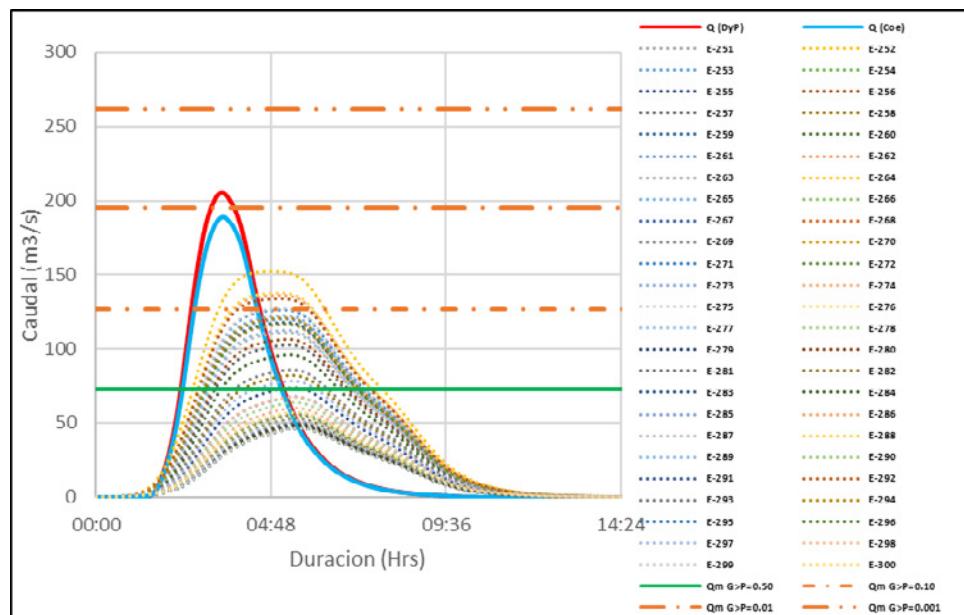
Fuente: Elaboración propia 2023

Tabla 19: Comparación numérica de caudales máximos por subcuenca y cuenca total para un periodo de retorno 100 años (métodos convencional y estocástico)

<u>Caudal Máximo</u>	<i>Sivingani</i>	<i>Serkheta</i>	<i>Titiri</i>	<i>Misicuni</i>
Qmax excedido con P=50%	69.6	127.0	112.8	227.2
Qmax excedido con P=10%	107.3	195.0	168.0	283.6
Qmax excedido con P=1%	144.3	261.7	223.3	338.9
Qmax excedido con P=0.1%	92.0	205.4	222.2	394.0
Qmax conv. (Dick y Peshke)	92.0	205.4	223.3	394.3
Qmax conv. (Coeficientes)	80.0	188.9	207.3	362.0

Fuente: Elaboración propia 2023

Figura 16: Comparación gráfica de hidrogramas subcuenca Serkhetata para un periodo de retorno 100 años (métodos convencional y estocástico)



Fuente: Elaboración propia 2023

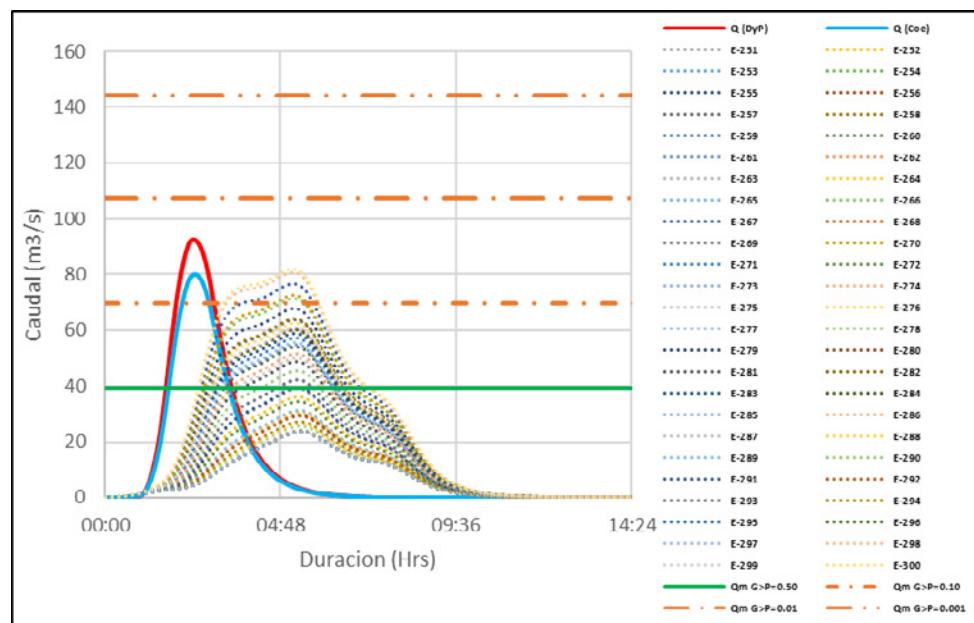


Figura 17. Comparación gráfica de hidrogramas subcuenca Sivingani para un periodo de retorno 100 años (métodos convencional y estocástico)

Fuente: Elaboración propia 2023

Se observa en las 4 figuras y en la tabla que para las 3 subcuenca y para la cuenca en su totalidad que $Q_{\max T=100 \text{ años excedido con } 50\%}$ y $Q_{\max T=100 \text{ años excedido con } 10\%}$ están siempre inferior al máximo caudal simulado con los 50 escenarios $T=100$ años. $Q_{\max T=100 \text{ años excedido con } 1\%}$ siempre está superior al máximo caudal simulado con los 50 escenarios para $T=100$ años. Lo cual es correcto, en base a la aplicación de la función de distribución de Gumbel a series de 50 valores.

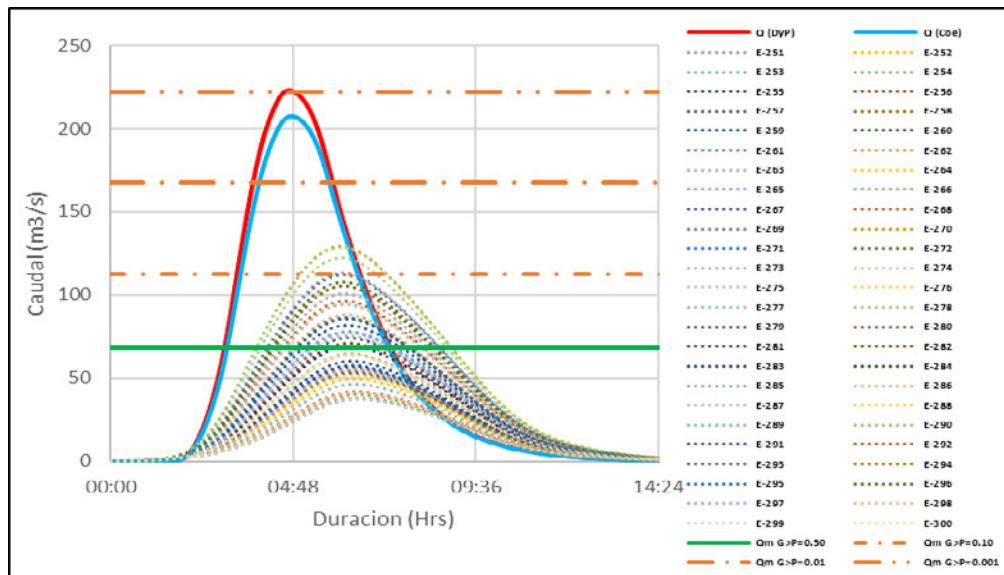


Figura 18. Comparación gráfica de hidrogramas cuenca Misicuni para un periodo de retorno 100 años (métodos convencional y estocástico)

Fuente: Elaboración propia 2023

Los caudales máximos determinísticos de los dos métodos convencionales para las subcuencas Sivingani (Figura 17) y Serkhetá (Figura 16) son superiores a $Q_{\max T=100}$ años excedido con 10 % e inferior e igual a $Q_{\max T=100}$ años excedido con 1 %. Para la subcuenca Titiri (Figura 15) y la cuenca total (Figura 18), son superiores a $Q_{\max T=100}$ años excedido con 10 % e igual y superior a $Q_{\max T=100}$ años excedido con 0.1 %.

Los caudales máximos determinísticos para $T=100$ años resultan superiores a los máximos caudales de los 50 escenarios estocásticos correspondientes. Esto se debe a que están calculados con la metodología Thiessen, la cual considera las máximas precipitaciones diarias en 5 estaciones y, una distribución uniforme de la precipitación conforme polígonos determinados con el criterio “del vecino más cercano” agregada a la salida de las subcuencas. Adoptar el criterio de simultaneidad de máximas precipitaciones entre todas las estaciones no es correcto para la cuenca de Misicuni. Por medio de la Tabla 20 se confirma que, en un periodo de 53 años de registros diarios de precipitación, solamente hubo 2 años donde las 5 estaciones se registraron la máxima precipitación de forma simultánea, 6 años con 4 estaciones, 11 años con 3 estaciones, 22 años con 2 estaciones y 12 años con ninguna simultaneidad entre las máximas precipitaciones diarias en las 5 estaciones.

Tabla 20. Número de eventos con simultaneidad entre las estaciones

<u>Estaciones Simultaneas</u>	<u>Número de eventos</u>	<u>Años de registro en periodo de 1968 a 2020</u>
NS	12	1968-1969-1970-1976-1977-1979-1980-1983-1984-2009-2011-2018
2	29	1975-1973-1974-1975-1978-1981-1982-1985-1986-1987-1988-1989-1990-1993-1994-1996-1998-2000-2005-2006-2008-2019-2020
3	11	1988-1991-1992-1995-2001-2002-2004-2005-2007-2013-2014
4	6	1999-2003-2010-2015-2016-2017
5	2	1997-2012

Fuente: Elaboración propia 2023

Con la presente investigación se han procesado aparte del periodo de retorno 100 años también los periodos de retorno 2, 5, 10, 20 y 50 años para las 3 subcuencas y la cuenca total. En las Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22, y Figura 23 se tiene los hidrogramas de la cuenca total para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20 y 50 años. Para 20 y 50 años de periodo de retorno, los hidrogramas tienen las mismas características ya mencionadas para un periodo de retorno de 100 años. Para pequeños periodos de retorno 2, 5 y 10 años los máximos caudales de los hidrogramas determinísticos se encuentran en la franja de caudales estocásticas $Q_{\max T}$ excedido con 50 % y $Q_{\max T}$ excedido con 10 %. Existiendo una mejor correspondencia entre los máximos caudales de los hidrogramas convencionales y estocásticos.

En la Tabla 21 se tienen para la cuenca de Misicuni y sus subcuencas por periodo de retorno los valores de los máximos caudales que corresponden a los hidrogramas determinísticos (metodologías convencionales) y estocásticos descritos y analizados anteriormente.

En la Figura 24 se tiene graficado para la cuenca de Misicuni curvas Q_{\max} en función del periodo de retorno de 2 años hasta 100 años de hidrogramas determinísticos (metodologías convencionales) y estocásticos descritos y analizados líneas arriba.

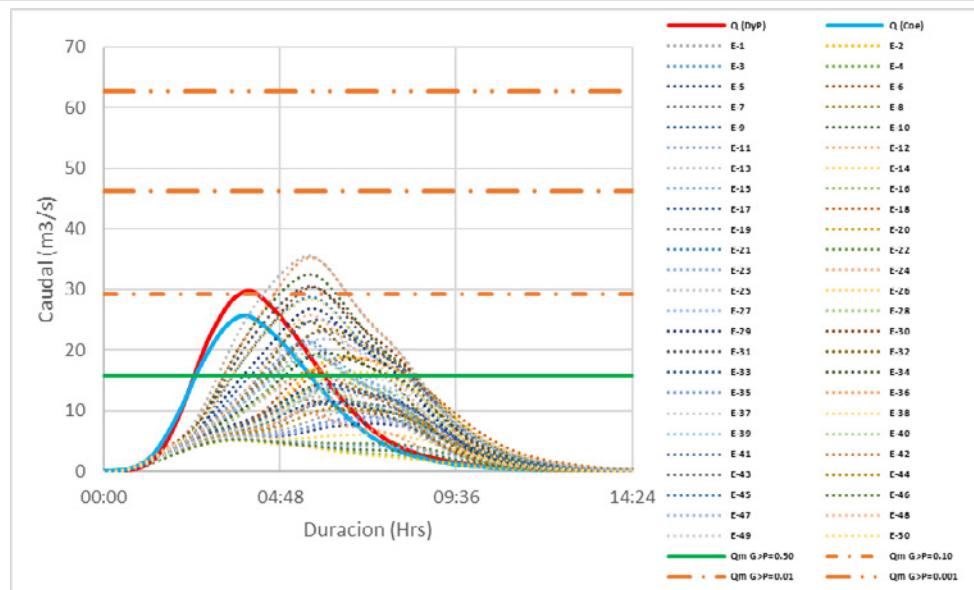


Figura 19. Comparación gráfica de hidrogramas cuenca Misicuni para un periodo de retorno 2 años (métodos convencional y estocástico)

Fuente: Elaboración propia 2023

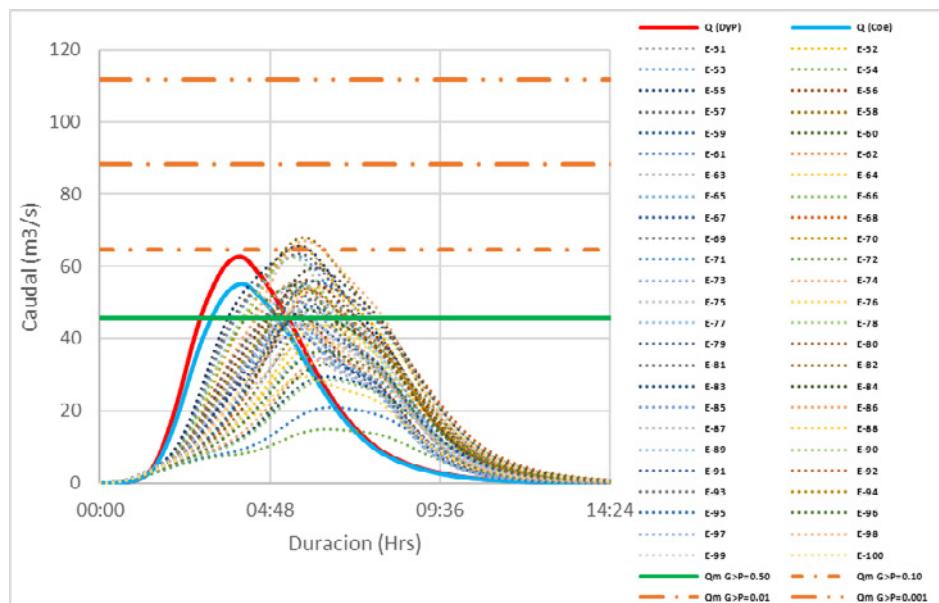


Figura 20. Comparación gráfica de hidrogramas cuenca Misicuni para un periodo de retorno 5 años (métodos convencional y estocástico)

Fuente: Elaboración propia 2023

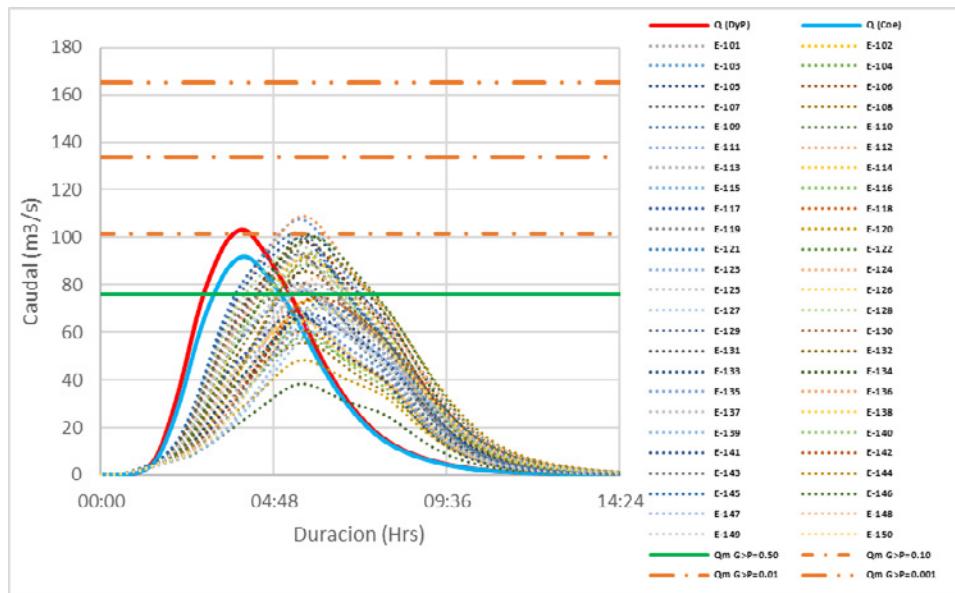


Figura 21. Comparación gráfica de hidrogramas cuenca Misicuni para un periodo de retorno 10 años (métodos convencional y estocástico)

Fuente: Elaboración propia 2023

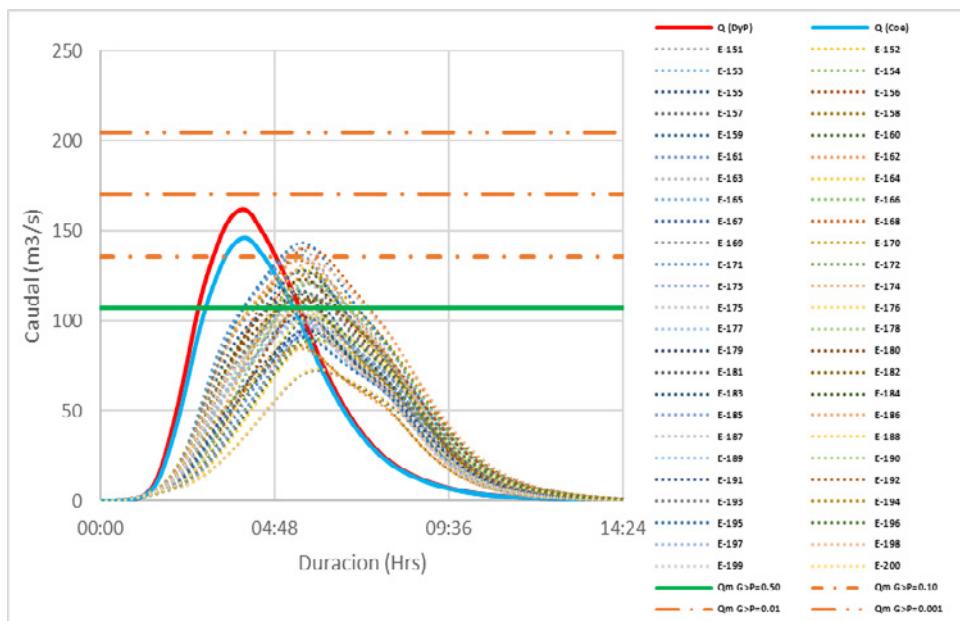


Figura 22. Comparación gráfica de hidrogramas cuenca Misicuni para un periodo de retorno 20 años (métodos convencional y estocástico)

Fuente: Elaboración propia 2023

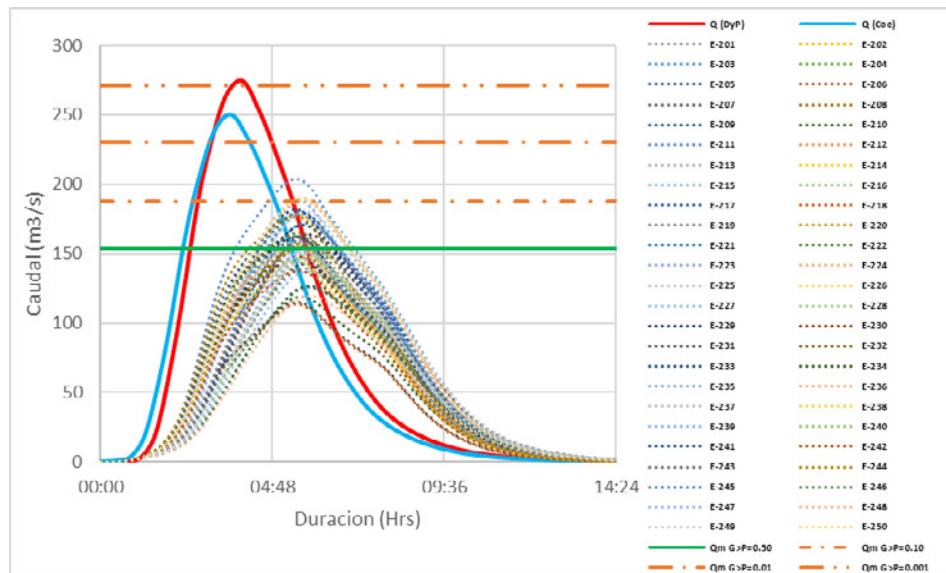


Figura 23. Comparación gráfica de hidrogramas cuenca Misicuni para un periodo de retorno 50 años (métodos convencional y estocástico)

Fuente: Elaboración propia 2023

Tabla 21. Valores de los caudales máximos estocásticos y determinísticos según períodos de retorno para la cuenca de Misicuni y sus subcuenca

<i>Caudales máximos a nivel de subcuenca y cuenca (m³/s)</i>						
<i>Periodo de retorno 2 años</i>	<i>P exc.</i> (50%)	<i>P exc.</i> (10%)	<i>P exc.</i> (1%)	<i>P exc.</i> (0.1%)	<i>Qmax.</i> (DyP)	<i>Qmax.</i> (Coef)
Subcuenca Sivingani	3	9	16	24	7	6
Subcuenca Serkheta	8	23	42	60	17	15
Subcuenca Titiri	5	11	18	25	13	15
Cuenca Misicuni	16	29	46	63	30	26
<i>Periodo de retorno 5 años</i>	<i>P exc.</i> (50%)	<i>P exc.</i> (10%)	<i>P exc.</i> (1%)	<i>P exc.</i> (0.1%)	<i>Qmax.</i> (DyP)	<i>Qmax.</i> (Coef)
Subcuenca Sivingani	11	29	51	73	15	12
Subcuenca Serkheta	19	43	73	103	35	31
Subcuenca Titiri	14	31	52	73	34	30
Cuenca Misicuni	46	65	88	111	63	55
<i>Periodo de retorno 10 años</i>	<i>P exc.</i> (50%)	<i>P exc.</i> (10%)	<i>P exc.</i> (1%)	<i>P exc.</i> (0.1%)	<i>Qmax.</i> (DyP)	<i>Qmax.</i> (Coef)
Subcuenca Sivingani	15	35	59	83	24	20
Subcuenca Serkheta	37	70	111	151	57	51
Subcuenca Titiri	22	48	81	114	56	51
Cuenca Misicuni	76	102	134	165	103	92
<i>Periodo de retorno 20 años</i>	<i>P exc.</i> (50%)	<i>P exc.</i> (10%)	<i>P exc.</i> (1%)	<i>P exc.</i> (0.1%)	<i>Qmax.</i> (DyP)	<i>Qmax.</i> (Coef)
Subcuenca Sivingani	22	47	78	108	38	32
Subcuenca Serkheta	48	85	130	175	88	79
Subcuenca Titiri	35	68	109	150	90	82
Cuenca Misicuni	107	135	170	205	162	146
<i>Periodo de retorno 50 años</i>	<i>P exc.</i> (50%)	<i>P exc.</i> (10%)	<i>P exc.</i> (1%)	<i>P exc.</i> (0.1%)	<i>Qmax.</i> (DyP)	<i>Qmax.</i> (Coef)
Subcuenca Sivingani	32	63	102	140	64	55
Subcuenca Serkheta	59	101	152	203	145	132
Subcuenca Titiri	104	159	154	212	154	142
Cuenca Misicuni	188	230	271	313	274	250
<i>Periodo de retorno 100 años</i>	<i>P exc.</i> (50%)	<i>P exc.</i> (10%)	<i>P exc.</i> (1%)	<i>P exc.</i> (0.1%)	<i>Qmax.</i> (DyP)	<i>Qmax.</i> (Coef)
Subcuenca Sivingani	70	107	144	92	92	80
Subcuenca Serkheta	127	195	262	205	205	189
Subcuenca Titiri	113	168	223	222	223	207
Cuenca Misicuni	227	284	339	394	394	362

Fuente: Elaboración propia 2023

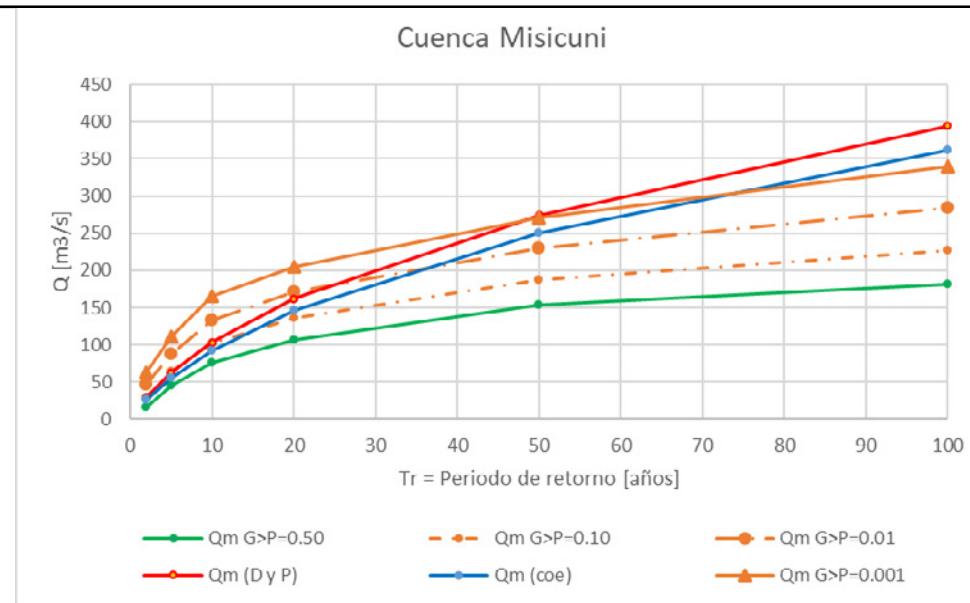


Figura 24. Relaciones $Q_{\max}(T_r)$ para la cuenca total del Proyecto Misicuni métodos convencional y estocástico.

Fuente: Elaboración propia 2023

Las relaciones $Q_{\max}(Tr)$ pueden dibujarse en ejes con escala logarítmica permitiéndose que los caudales estocásticas y convencionales puedan extrapolarse para estimar los caudales con períodos de retorno para 1000 y 10000 años (Figura 25 y Tabla 22).

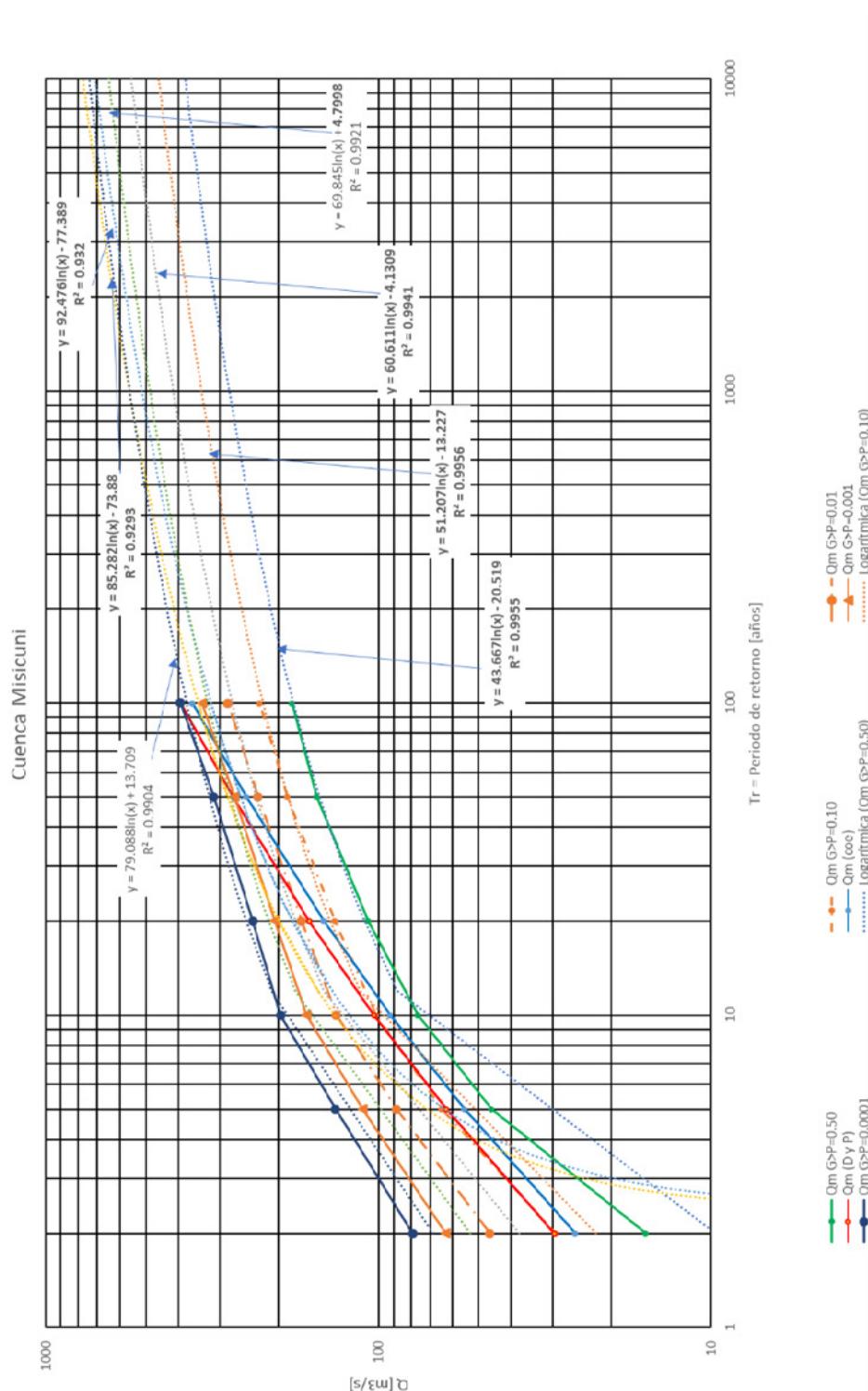


Figura 25. Relaciones Q_{\max}^T para la cuenca total del Proyecto Misicuni proyectados hasta periodo de retorno 10000 años.

Fuente: Elaboración propia 2023

Tabla 22. Estimación de caudales centenario, milenario y decamilenaria proyecto Misicuni

Caudal máximo (m ³ /s)	Periodo de retorno (años)			Caudal máximo probable (m ³ /s)
	100	1000	10000	
Q _{max} excedido con P=50%	182	280	380	-
Q _{max} excedido con P=10%	227	340	470	-
Q _{max} excedido con P=1%	284	410	560	-
Q _{max} excedido con P=0.1%	339	490	640	-
Q _{max} excedido con P=0.01%	394	560	750	-
Q _{max conv} (Coeficientes)	362	510	710	-
Q _{max conv} (Dick y Peshke)	394	560	780	-
Q _{max} informe Misicuni	330	510	680	2306
Q _{max} laminado Misicuni	65	119	178	800

Fuente: Elaboración propia 2023

Los caudales estocásticos se extrapolaron bien con coeficientes de determinación R^2 mayor a 0.99 y con un control visual aceptable. Aunque los caudales convencionales se han extrapolados con coeficientes de determinación R^2 mayor a 0.92 el control visual no demuestra un ajuste bueno con los datos base, pero la gráfica de los valores extrapolados parece aceptable.

En la Tabla 22, se tiene un resumen de los caudales máximos de las crecidas centenaria, milenario y decamilenaria del PMM, en base a las 7 metodologías analizadas (5 metodologías estocásticas: Q_{\max} excedido con P=50%, Q_{\max} excedido con P=10%, Q_{\max} excedido con P=1%, Q_{\max} excedido con P=0.1% y Q_{\max} excedido con P=0.01%) y 2 metodologías determinísticos: $Q_{\max conv (coe)}$ y $Q_{\max conv (D y P)}$). En la misma tabla se tienen los caudales de entrada al embalse y de salida por el vertedero de excedencias del embalse: centenario, milenario, decamilenario y máximo probable que fueron usado para el diseño y ejecución del PMM, ENGEVIX CAEM 2015.

En la Tabla 22, se ve que el método determinístico convencional en base a coeficientes de desagregación $Q_{\max conv (coe)}$ da valores característicos muy similares a las que el PMM ha usado para diseño y ejecución. Es muy probable que el PMM ha debido realizarse en base a un estudio determinístico convencional con coeficientes de desagregación. El método estocástico que entrega valores cercanos a los valores característicos del PMM es el que considera la probabilidad de excedencia de 0.1 % Q_{\max} excedido con P=0.1%. Esta probabilidad es estricta y demuestra que la precipitación máxima diaria no es uniforme sobre la cuenca, ver líneas arriba. La aplicación de Thiessen activando todas las estaciones de forma simultánea no es correcto para el PMM. El método estocástico demuestra que las crecidas del PMM deben ser inferiores a las que el PMM ha considerado para el diseño, construcción y operación. El PMM podrá disminuir las medidas de seguridad que se toma para proteger el embalse y subir la rentabilidad del embalse. No es aconsejable realizar aquello sin haber realizado previamente campañas de aforos y determinado cuantitativamente en qué escenario se encuentra del método estocástico.

4. CONCLUSIONES

- Se obtuvo series de precipitación diaria rellenadas y subsanadas de acuerdo a los análisis de homogeneización propuestos cumpliendo los parámetros establecidos y permitiendo la identificación de las estaciones a ser tomadas en cuenta en los análisis para la determinación de eventos extremos.
- La metodología estocástica en base a la generación de curvas PADF y escenarios de tormentas elípticas sobre la cuenca, permite tener una visión más característica y detallada sobre el comportamiento real en base a registros históricos de precipitaciones y la geomorfología de la cuenca. Sin embargo, donde más llega a destacar es en estudios de cuencas de gran superficie.
- La aplicación estocástica y los softwares especializados (IT-LluviaNH y IT-inundación) sobre la cuenca Misicuni, permitió obtener 300 escenarios de tormentas elípticas con diferentes distribuciones espaciales e intensidades que permiten hacer un control no solo de caudales máximos correspondientes a eventos extremos del PMM, sino también caudales máximos con la realización de estudios o proyectos dentro de la cuenca.
- Para las dos metodologías estocástica y convencional se ha logrado extrapolar los caudales con períodos de retorno, $T_r = 2, 5, 10, 50$ y 100 años a caudales con periodo de retorno 1000 y 10000 años.
- Según la comparación de resultados de las diferentes metodologías y criterios optados, se obtuvieron caudales menores a las convencionales adoptadas para diseño del PMM cercano al 30%, debido a la distribución espacial del evento como tal, una metodología convencional que relaciona su distribución en la totalidad de la superficie de la cuenca no es lo más realista, pero si con más rango de seguridad y contra mayores costos económicos.
- El método estocástico demuestra que las crecidas del PMM deben ser inferiores a las que el PMM ha considerado para el diseño, construcción y operación. El PMM podrá disminuir las medidas de seguridad que se toma para proteger el embalse y subir la rentabilidad económica del embalse. No es aconsejable realizar aquello sin antes haber efectuado campañas de aforos y determinar cuantitativamente en qué escenario se encuentra del método estocástico, vale decir que previo se debe calibrar el método estocástico.
- El modelo hidrológico propuesto relaciona las tres subcuenca principales de aportación, se consideró un ruteo del río Misicuni con un tiempo de retardo, el cual fue descartado por la cobertura actual del embalse sobre el río Misicuni. Los caudales entran directamente al embalse, por lo cual son laminados y no son transportados.
- La metodología estocástica del CAPRA-BID está basado en un escaneo sobre las 5 estaciones de forma simultánea y una distribución de la precipitación conforme a las isoyetas procesadas mediante grilla y red de flujo, lo cual corresponde a un modelo distribuido.
- La metodología Thiessen es artificial, sencillo y menos precisa, pero con resultados al lado de la seguridad. La metodología estocástica es complicada aplicar, pero es basada sobre principios más correctos y entrega resultados que más se aproximan a la realidad.

5. RECOMENDACIONES

Según los análisis, resultados y conclusiones se plantean las siguientes recomendaciones para complementar el estudio: Diseñar, instalar y operar sobre los ríos Serkhetá, Sivingani y Titiri estaciones hidrométricas con aforo continuo de los caudales líquidos que entran al embalse.

- Levantar mapas temáticos a detalle de suelos, vegetación y uso de suelos de la cuenca del PMM.
- Mejorar y subsanar las series de precipitación a nivel diario de las estaciones dentro y fuera de la cuenca para una mejor disponibilidad de datos pluviométricos y series representativas que cumplan los análisis de consistencia y homogeneidad para futuros estudios.
- Diseñar un nuevo modelo hidrológico HEC HMS a nivel de la cuenca del PMM con nuevos mapas temáticos y calibrar el modelo con los aforos realizados.
- Hacer el análisis estocástico con los softwares especializados (IT-LluviaNH e IT-Inundación) del BID, con el nuevo modelo hidrológico HEC HMS y con las nuevas series de precipitación diaria.
- Realizar una modelación convencional determinístico con la metodología de Thiessen con lluvias por sectores.
- En caso, las crecidas que el PMM ha tomado en cuenta para el diseño, construcción y operación resultan (suficientemente) superiores a las crecidas de los modelos actualizados estocástico y Thiessen con lluvias sectorizadas se puede suavizar los caudales característicos y disminuir las medidas de seguridad para proteger el embalse y subir la rentabilidad económica del embalse.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- A. Cardoso Velasco; “Cálculo de los Caudales de Evento Extremo en la Cuenca de Misicuni mediante Tormentas Estocásticas.”, Proyecto de Grado, presentado para optar al Diploma Académico de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Privada del Valle, Departamento Académico de Ingeniería Civil, Carrera de Ingeniería Civil, 2022.
- Aldana Flores, D. A., & Leigue Fernández, M. A. (2022). Estudio hidrológico para determinación de caudales máximos en la cuenca del río San Pedro de la ciudad de Tarija, Bolivia.
- C. Le Noir, (2017). Estudio Hidrológico Misicuni – Rio Titiri, Informe de consultoría - contratación menor.
- Coca Guzman R.; Análisis de eventos extremos por un método probabilístico con generación estocástica de tormentas – río Icona”. Proyecto de Grado, presentado para optar al Diploma Académico de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Mayor de San Simón, Carrera de Ingeniería Civil, 2021
- D. Campos Aranda; “Procesos del Ciclo Hidrológico” (1992); Universidad Autónoma de San Luis Potosí, S.L.P. México.
- ENGEVIX CAEM (2015). “Estudios y evaluaciones hidráulicas en el vertedero del Proyecto Múltiple Misicuni cambios generales” – informe de consultoría PROYECTO MULTIPLE MISICUNI 8990/US-3H-MC-0002

ERN; “Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales y Selección”, Informe Técnico, Tomo 1 (Versión digital) (2016) Recuperado de <https://ecapra.org/sites/default/files/documents/ERN-CAPRA-R6-T1-3%20>

ITEC, (2015); BID Proyecto #: RG-T2416 Perfil de riesgo de desastres para Bolivia ante inundaciones y deslizamientos en cuencas seleccionadas (río Rocha y río Grande – Informe Final, Universidad de los Andes, Colombia. (Versión digital). Recuperado de <https://ewsdata.rightsinddevelopment.org/files/documents/07/IADB-BO-L1107.pdf>.

ITEC, (2018). “Manual de usuario del software IT-Flood V.2.2” (Manual). Universidad de los Andes, Colombia. (Versión digital). Recuperado de <https://ecapra.org/es/topics/it-flood>.

ITEC, (2018). “Manual de usuario del software IT-NHrain V.3.0.” Manual, Universidad de los Andes, Colombia. (Versión digital). Recuperado de <https://ecapra.org/topics/it-nhrain>

J. Shaman, M. Stieglitz y D. Burns; “Are big basins just the sum of small catchments”; Hydrol. Process. 18, 3195-3206 (2004); Published online in Wiley InterScience (0); [DOI: 10.1002/hyp. 5739](https://doi.org/10.1002/hyp.5739)

López, P. (2016). Informe modelo de operación inicial del embalse Misicuni. Informe de consultoría- contratación menor.

M. Villón Béjar, (2012). “HIDROESTA 2 Cálculos Hidrológicos – Manual de Usuario”, Tecnológico de Costa Rica, Lima Perú – Ediciones Villón – 10/2012.

Mapa de Cobertura vegetal y Uso actual de la tierra de Bolivia del 2010 desarrollado por el Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras (MDRyT) – Viceministerio de Tierras disponible en la página web de GeoBolivia (MDRyT, 2011).

Mapa de tipo de suelos de la cuenca Misicuni digitalizado en base a la imagen del mapa de suelos desarrollado por BioTerra para el plan de manejo integral de la cuenca de aporte del embalse Misicuni en 2004.

Rincón, D.; Velandia, J.F.; Tsanis, I.; Khan, U.T. Stochastic Flood Risk Assessment under Climate Change Scenarios for Toronto, Canada Using CAPRA. Water 2022, 14, 227. <https://doi.org/10.3390/w14020227>

V. T. Chow, D. Maidment, y L. Mays; “Hidrología Aplicada” (1994). (Versión digital). Recuperado de <https://www.libreriaingeniero.com/2017/12/hidrologia-aplicada-ven-te-chow.html>.

W. R. Sandoval Erazo y E. P. Aguilera Ortíz; “Determinación de Caudales en cuencas con poca información Hidrológica” (2014), pp.100 – 110, Revista Ciencia UNEMI.

National Engineering Hand Book; National Resources Conservation Service; NRCS part 630 (2004) chapter 9, “Hydrological Soil-Cover Complexes” and chapter 10 “Hydrology”. Recuperado de:

<http://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/NEHhydrology/ch9.pdf> y

<http://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/NEHhydrology/ch10.pdf>

World Meteorological Organization; “Tropical Hydrology” (1987) WMO – No. 655 – Geneva – Switzerland.