

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE HIETOGRAMAS DE INTENSIDAD MÁXIMA DE DISEÑO BASADOS EN CURVAS I-D-F, EN LA CUENCA DEL RÍO TUPIZA

En el presente trabajo se realiza un análisis comparativo de métodos para la estimación de hietogramas de intensidad máxima de diseño para la cuenca del río Tupiza a través del uso de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (I-D-F). Se comparan varios métodos empleados en la literatura técnica y científica y se considera su planteamiento y exactitud para la cuenca objeto de estudio.

La relevancia del presente trabajo se sustenta en su aporte a la elaboración de herramientas y ambientes de experimentación para avanzar hacia una mayor precisión a la hora de estimar eventos extremos en infraestructuras hidráulicas. Insistimos en la importancia para una adecuada caracterización de los hietogramas máximos de diseño en la proyección de obras hidráulicas y en la administración del riesgo frente a eventos hidrometeorológicos no deseables.

El análisis comparativo conducirá a la identificación de las fortalezas y debilidades de los diversos métodos utilizados para la estimación de hietogramas de máxima intensidad de diseño. También proporcionará nuevas posibilidades para la aplicación de las curvas I-D-F en áreas con condiciones hidrológicas especiales como la región del río Tupiza, en la cual la condición limitada de datos y las condiciones topográficas complejas plantean una mayor complejidad.

Este estudio proporcionará conocimientos y recursos que se pueden adaptar a la administración sostenible del agua, la mitigación del riesgo de catástrofes y la infraestructura hidráulica en áreas con características idénticas.

1.1 Antecedentes

1.1.1 Antecedentes nacionales

Gómez García (2009) desarrolló un estudio sobre la estimación de caudales de diseño para eventos extremos de precipitación en Bolivia, utilizando como base las curvas I-D-F y el método del patrón de tormenta crítico. Este trabajo resalta la importancia de contar con hietogramas representativos para simular caudales extremos,

y aunque no compara múltiples métodos, sienta un precedente valioso para estudios aplicados en regiones con escasa información hidrológica.

Gamarra Mendoza (2021) propuso una metodología basada en el coeficiente K_d para distribuir temporalmente la intensidad de precipitación y generar hietogramas de diseño. Aplicó esta técnica a diferentes regiones de Bolivia, demostrando que con datos limitados se pueden construir representaciones aceptables de tormentas de diseño. Este enfoque se alinea con la necesidad de soluciones prácticas en contextos con poca infraestructura de monitoreo.

1.1.2 Antecedentes internacionales

Balbastre Soldevila (2018) realizó un análisis comparativo de métodos para la generación de hietogramas de diseño, combinando tanto enfoques empíricos (rectangular, bloques alternos, Sifalda, triangular y doble triángulo) como modelos ajustados a registros reales, como la función gamma. Su trabajo, aplicado a datos de Valencia, resalta la utilidad de evaluar múltiples metodologías para identificar la que mejor se ajusta a las características locales.

Larriva Vásquez y Genovez Muñoz (2018) desarrollaron un estudio en Cuenca, Ecuador, en el que analizaron eventos extremos de lluvia y generaron hietogramas de diseño basados en curvas I-D-F. El enfoque comparativo permitió observar cómo varía la forma del hietograma dependiendo del periodo de retorno y la duración del evento, lo cual es clave para el diseño de obras hidráulicas.

1.2 Planteamiento y formulación del problema

1.2.1 Planteamiento del problema.

La capacidad para precisar adecuadamente los hietogramas de intensidad máxima de diseño es esencial para evitar y moderar los acontecimientos de inundación del área. Inadecuada precisión en las estimaciones conduciría a una subestimación o a una sobreestimación del riesgo de inundación, con lo cual tendrían repercusiones significativas para la seguridad del público y la infraestructura.

La cuenca hidrográfica se caracteriza por una alta heterogeneidad a causa de las variaciones topográficas, climáticas y en uso del suelo. Su diversidad hace surgir dificultades considerables para la estimación exacta de los hietogramas máxima intensidad de diseño. Por lo tanto, resolver esta problemática requiere la aplicación de

métodos y procedimientos aptos para reproducir y modelar con eficacia esta variabilidad.

La calidad y cantidad adecuadas de datos hidrometeorológicos son elementales para la correcta estimación de los hietogramas máximos de diseño. Pero en la mayor parte del mundo y en la cuenca del río Tupiza en particular, la calidad y la cantidad de datos son generalmente limitadas.

Hay varios métodos utilizados para la estimación del hietograma de intensidad máxima de diseño, todos con sus ventajas respectivas y restricciones. La cuestión es determinar cuál es el más apropiado para la obtención de estimaciones fiables y precisas en la cuenca del río Tupiza.

En esta tarea se va a surgir la necesidad de realizar un análisis comparativo de cinco métodos diferentes. Los métodos son los siguientes: hietogramas de bloques alternos, hietograma rectangular, hietograma triangular, hietograma de Sifalda y el hietograma doble triángulo. Dichos métodos se usan típicamente para estimar hietogramas de máxima intensidad diseñada a partir curvas Intensidad-Duración-Frecuencia I-D-F.

1.2.2 Formulación del problema.

¿Cuál es la metodología más adecuada basada en curvas I-D-F para estimar intensidades máximas de diseño en la cuenca del río Tupiza, considerando la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones?

1.3 Objetivos generales y específicos

1.3.1 Objetivo general.

Analizar y comparar los distintos métodos de estimación de hietogramas de intensidades máximas de diseño basados en curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (I-D-F), para determinar el método más adecuado para su aplicación en la cuenca del río Tupiza.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Elaborar las curvas de intensidad–duración–frecuencia (I-D-F) para distintos períodos de retorno, a partir de registros pluviométricos disponibles, con el fin de establecer la base para el desarrollo de los hietogramas de diseño.

- Determinar la ecuación de intensidad y generar los hietogramas de intensidades máximas, para evaluar su comportamiento a partir de las curvas I-D-F generadas.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos mediante los distintos métodos aplicados, bajo las mismas condiciones de duración y período de retorno, con el propósito de identificar diferencias en los volúmenes, intensidades y caudales estimados.
- Proponer el método de estimación de hietogramas que mejor se adecue a las características hidrológicas de la cuenca del río Tupiza, considerando su morfología, régimen pluviométrico y comportamiento de escorrentía, con miras a su futura aplicación en estudios hidrológicos o de diseño hidráulico.

1.4 Hipótesis.

Con base en la distribución temporal de la lluvia y la forma del hidrograma resultante, se espera que el método de bloques alternos proporcione una estimación más realista y representativa del caudal pico de diseño en la cuenca del río Tupiza, frente a los métodos rectangular, triangular, doble triángulo y Sifalda.

1.5 Justificación.

La estimación exacta del hietograma de máxima intensidad de diseño es esencial en la ingeniería hidrológica para el planeamiento y diseño hidráulico. En la cuenca del río Tupiza, que presenta retos significativos debido a eventos extremos de lluvia y a la gestión del riesgo de inundaciones, esta necesidad se vuelve aún más importante. La falta de estimaciones confiables puede llevar a una subestimación o sobreestimación de los riesgos asociados, lo cual podría acarrear consecuencias graves para la seguridad pública y la infraestructura. Realizar un análisis comparativo de métodos para la estimación del hietograma de máxima intensidad de diseño ofrece una oportunidad única para determinar el enfoque más adecuado a las condiciones particulares de la cuenca del río Tupiza. Esto proporciona una base científica sólida para la toma de decisiones en ingeniería hidrológica y reduce la incertidumbre en el planeamiento y diseño hidráulico.

1.6 Alcance del trabajo

En el presente trabajo se pretende realizar un análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de hietogramas de intensidad máxima de diseño en la cuenca hidrográfica del río Tupiza.

En la Tabla (1.1) se presentan los hietogramas a desarrollar.

Tabla 1.1 Métodos a desarrollar

Datos de entrada: i: intensidad máxima (mm/h) t: duración de la tormenta (h) r: coeficiente de avance de la tormenta (adm)	Hietograma bloques alternos	Se basa en las intensidades máximas para diferentes duraciones y la distribución alternada de las mismas.
	Hietograma rectangular	Se basa en la construcción de un rectángulo cuya base es la duración de la tormenta y su altura es la intensidad media a partir de las curvas I-D-F.
	Hietograma de Sifalda	Se basa en la intensidad máxima de la lluvia de la tormenta y la duración de la tormenta
	Hietograma doble triángulo	Se basa en la intensidad máxima de la lluvia, la duración de la tormenta y el coeficiente de avance de la tormenta.
	Hietograma triangular	Se basa en la intensidad máxima de la lluvia, la duración de la tormenta y el coeficiente de avance de la tormenta.

Fuente: Elaboración propia

El objetivo principal es evaluar la idoneidad y la precisión de dichos métodos para modelar eventos extremos de precipitación, con el fin de mejorar la gestión del riesgo hidrológico en la región.

Se llevará a cabo una revisión de la literatura técnica relacionada con la estimación de hietogramas de intensidad máxima de diseño y la elaboración de curvas

Intensidad-Duración-Frecuencia (I-D-F). Se analizarán diferentes enfoques metodológicos, basados en modelos hidrológicos, con el objetivo de comprender sus fundamentos teóricos y aplicaciones prácticas.

Se procederá a seleccionar los métodos más apropiados para la estimación de hietogramas de intensidad máxima de diseño en la cuenca del río Tupiza, considerando criterios técnicos como la disponibilidad y calidad de los datos hidrometeorológicos, considerando realizar una análisis de las siguientes estaciones, (Tupiza, Cotagaita Mosoj Llajta y Atocha) de las cuales la estación Tupiza se encuentra ubicada dentro la cuenca, mientras que las otras dos estaciones se encuentran en las cuencas vecinas Atocha y Cotagaita.

Tabla 1.2 Estaciones pluviométricas de la cuenca del río Tupiza.

Estación	Ubicación		Altura m.s.n.m.	Registro de datos (P _{máx} 24 h)	Estado
	longitud	latitud			
Tupiza	65,715 O	21,438 S	2.923	1.942-2.024	Activo
Cotagaita	65,659 O	20,821 S	2.616	1.990-2.025	Activo
Mosoj Llajta					
Atocha	66,217 O	20,933 S	3.700	1.984-2.020	Inactivo

Fuente: Elaboración propia

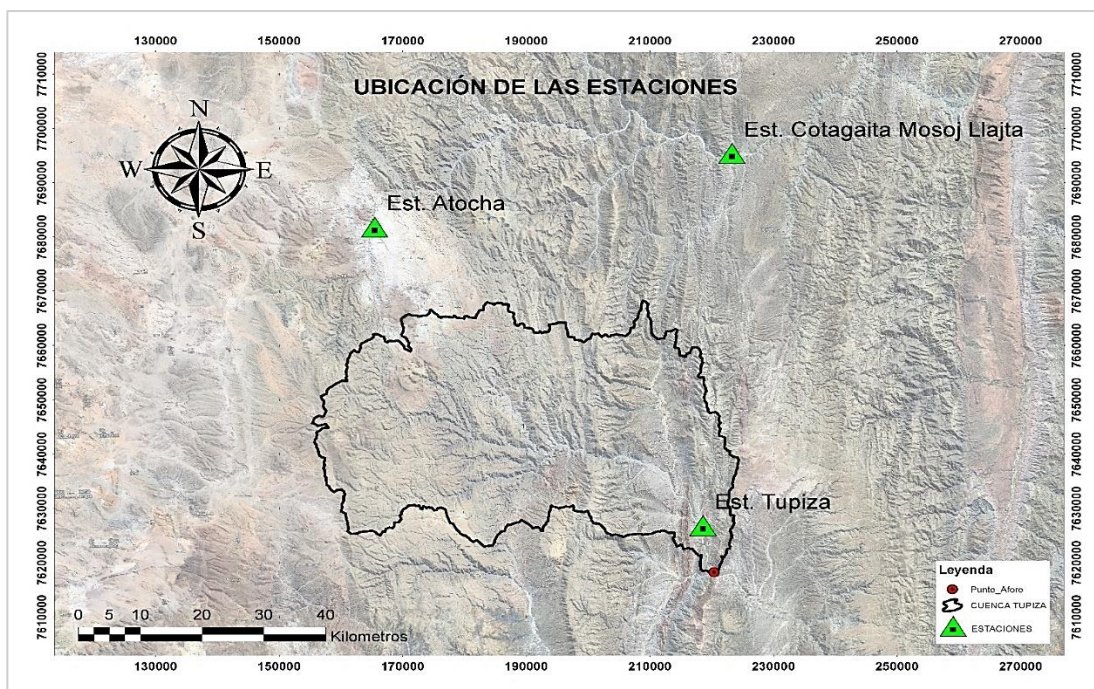


Figura 1.1 Ubicación de las estaciones de cuenca del río Tupiza

Fuente: Elaboración propia

Se llevará a cabo una comparación detallada de los hietogramas de intensidad máxima de diseño estimados mediante los diferentes métodos seleccionados. Se evaluará la concordancia entre los resultados obtenidos. Se identificarán las fortalezas y limitaciones de cada método, proporcionando recomendaciones para su aplicación práctica en la gestión del riesgo hidrológico.

Se presentarán las conclusiones principales del estudio, destacando los métodos más eficaces y apropiados para la estimación de hietogramas de intensidad máxima de diseño en la cuenca del río Tupiza.

1.7 Método de trabajo

El enfoque central de este trabajo consistirá en la aplicación de diferentes métodos basados en curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (I-D-F), ligados a un conjunto de datos disponibles. Estos datos provienen de un análisis previo de series pluviométricas registradas de las estaciones ya mencionadas anteriormente.

Para realizar este trabajo se aplicará lo siguiente:

1.7.1 Obtención de las curvas I-D-F

- Recopilación de datos de precipitación, incluyendo información sobre las estaciones meteorológicas disponibles y su distribución en la cuenca hidrográfica. Esta información será obtenida del portal del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).
- Completado y extensión de los datos faltantes mediante técnicas de interpolación y extrapolación.
- Análisis de consistencia de los datos recopilados.
- Selección del modelo de distribución de probabilidad que mejor se ajuste a los datos disponibles, utilizando métodos estadísticos y de ajuste de curvas.
- Selección de los periodos de retorno de interés basados en consideraciones hidrológicas y de ingeniería.
- Discretización de los datos de lluvia para facilitar su manejo y análisis.
- Cálculo de las intensidades de precipitación correspondientes a los periodos de retorno seleccionados, utilizando la distribución de probabilidad elegida.
- Construcción de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (I-D-F) que representan la relación entre la intensidad de la lluvia, la duración y la frecuencia de ocurrencia de eventos extremos de lluvia en la cuenca hidrográfica.

1.7.2 Aplicación de los métodos basados en las curvas intensidad – duración – frecuencia (I-D-F).

- Revisión de la literatura para identificar y seleccionar diferentes métodos basados en las curvas I-D-F.
- Implementación de cada método seleccionado utilizando los datos recopilados de la cuenca.

1.7.3 Análisis comparativo.

- La comparación entre los métodos se realizará utilizando como criterios técnicos la intensidad máxima y el volumen acumulado de precipitación de los hietogramas generados. Estos parámetros permitirán evaluar la representatividad de cada método respecto al comportamiento pluviométrico esperado en eventos extremos, y contribuirán a determinar cuál de ellos

proporciona una distribución temporal de lluvia más realista para la cuenca del río Tupiza.

1.7.4 Validación

- La validación de los resultados obtenidos mediante cada método de estimación se llevará a cabo mediante la comparación entre los caudales máximos generados a partir de los hietogramas de diseño y el caudal máximo aforado en el punto de control hidrométrico ubicado en la salida de la cuenca. Esta comparación permitirá evaluar la capacidad de cada método para reproducir eventos extremos, y así determinar cuál se ajusta mejor a las condiciones hidrológicas reales de la cuenca del río Tupiza.

1.7.5 Selección del método óptimo.

- Identificación del método que proporciona los resultados más precisos y aplicables para la estimación de intensidades máximas de diseño en la cuenca del río Tupiza.
- Justificación de la selección basada en los análisis comparativos y de validación realizados.

1.7.6 Conclusiones y recomendaciones

- Conclusiones sobre la efectividad de los métodos basados en curvas I-DF evaluadas y aplicadas en la cuenca del río Tupiza.
- Recomendaciones para futuras investigaciones en el área de estimación de intensidades máximas de diseño.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

Una tormenta de diseño es un patrón de precipitación definido para utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico. Usualmente la tormenta de diseño conforma la entrada al sistema, y los caudales resultantes a través de éste se calculan utilizando procedimientos de lluvia-escurrentía y tránsito de caudales. Una tormenta de diseño puede definirse mediante un valor de profundidad de precipitación en un punto, mediante un hietograma de diseño que especifique la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta, o mediante un mapa de isoyetas que especifique el patrón espacial de la precipitación.

Las tormentas de diseño pueden basarse en información histórica de precipitación en un sitio o pueden construirse utilizando las características generales de la precipitación en regiones adyacentes. Su aplicación va desde el uso de valores puntuales de precipitación en el método racional para determinar los caudales picos en alcantarillados de aguas lluvias y alcantarillas de carreteras, hasta el uso de hietogramas de tormenta como las entradas para el análisis de lluvia-escurrentía en embalses de detención de aguas urbanas o en el diseño de vertederos en proyectos que involucren grandes embalses. (Chow et al., 1994)

Las características que definen una tormenta se representan en la Figura (2.1) (Watt, et al., 1986). Se han adaptado las abreviaturas empleadas por los autores para homogeneizar criterios y así emplear la misma notación en el desarrollo del trabajo.(Balbastre Soldevila, 2018)

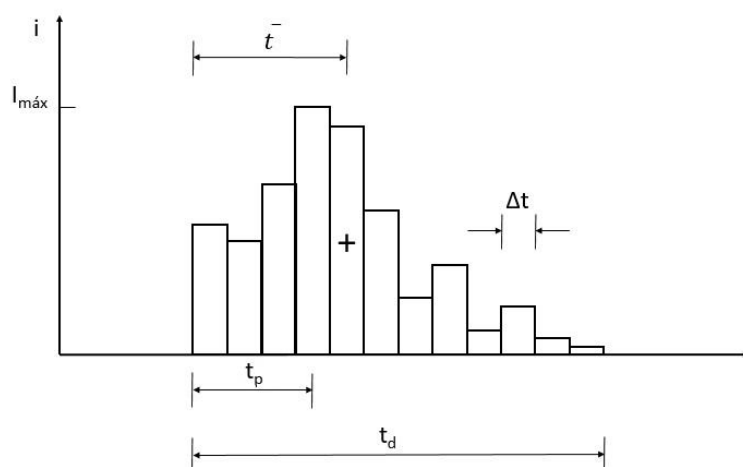


Figura 2.1 Representación esquemática de las características de una tormenta.

Fuente: Balbastre Soldevila, 2018

- Duración de la tormenta, t_d . En términos generales representa el tiempo transcurrido entre el inicio y fin de la lluvia. Sin embargo, es conveniente realizar una aclaración en cuanto al concepto de duración de un evento, ya que cuando el término duración se emplea como un concepto estadístico (por ejemplo, para la construcción de curvas I-D-F), esta representa el intervalo de tiempo pésimo (aquel donde se produce la mayor intensidad) dentro de un evento mayor.
- Intervalo de discretización de tormenta Δt . Es el intervalo de tiempo en el que se divide la duración de la tormenta.
- Intensidad de lluvia, i . Es la cantidad de precipitación por unidad de tiempo.
- Intensidad máxima de lluvia, $I_{\text{máx}}$. Es el valor máximo de la cantidad de precipitación por unidad de tiempo.
- Volumen de lluvia acumulado por intervalo de tiempo Δt , v .
- Volumen total acumulado V .
- Tiempo en el que se alcanza el pico de intensidad de la tormenta, t_p .
- Pico del evento de lluvia expresado en porcentaje, $I_{\text{máx}}/D$.
- Primer momento o centroide del evento de precipitación, \bar{t} . Se define según la expresión

$$\bar{t} = \sum_{j=1}^n \frac{v_j(j - 0.5)\Delta t}{V} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

- v_j : volumen parcial acumulado, en (mm)
- j : duración parcial, en (h)
- Δt : duración del intervalo, en (h)
- V : volumen total acumulado, en (mm)

2.1 Elementos fundamentales del análisis de las tormentas

Durante el análisis de las tormentas hay que considerar:

a) La intensidad, es la cantidad de agua caída por unidad de tiempo. Lo que interesa particularmente de cada tormenta, es la intensidad máxima que se haya

presentado, ella es la altura máxima de agua caída por unidad de tiempo. De acuerdo a esto la intensidad se expresa así:

$$i = \frac{P}{t_d} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

donde:

$i_{m\acute{a}x}$: intensidad máxima, en (mm/h)

P : precipitación en altura de agua, en (mm)

t_d : tiempo de duración en (h)

b) La duración, corresponde al tiempo que transcurre entre el comienzo y el fin de la tormenta. Aquí conviene definir el período de duración, que es un determinado período de tiempo, tomado en minutos u horas, dentro del total que dura la tormenta. Tiene mucha importancia en la determinación de las intensidades máximas.

Ambos parámetros, se obtienen de un pluviograma como se muestra en la Figura

(2.2)

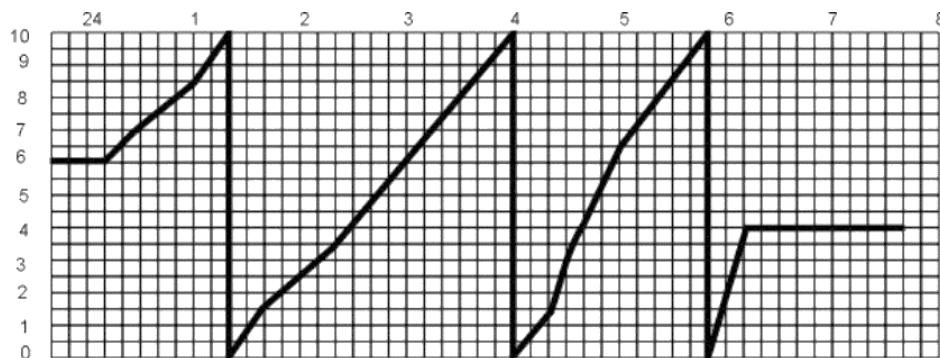


Figura 2.2 Registro de un pluviograma

Fuente: Villón Béjar, 2004

c) La frecuencia, es el número de veces que se repite una tormenta, de características de intensidad y duración definidas en un período de tiempo más o menos largo, tomado generalmente en años.

d) Periodo de retorno, intervalo de tiempo promedio, dentro del cual un evento de magnitud x, puede ser igualado o excedido, por lo menos una vez en promedio. Representa el inverso de la frecuencia, es decir:

$$T = \frac{1}{f} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

(Villón Béjar, 2004)

2.2 Curvas de Intensidad Duración Frecuencia (I-D-F)

Uno de los primeros pasos que debe seguirse en muchos proyectos de diseño hidrológico, como el diseño de un drenaje urbano, es la determinación del evento o los eventos de lluvia que deben usarse. La forma más común de hacerlo es utilizar una tormenta de diseño o un evento que involucre una relación entre la intensidad de lluvia (o profundidad), la duración y las frecuencias o periodos de retorno apropiados para la obra y el sitio. En muchos casos existen curvas estándar de intensidad-duración-frecuencia (I-D-F) disponibles para el sitio, luego no hay que llevar a cabo este análisis. Sin embargo, es conveniente entender el procedimiento utilizado para desarrollar estas relaciones. Usualmente los datos se presentan en forma gráfica, con la duración en el eje horizontal y la intensidad en el eje vertical, mostrando una serie de curvas, para cada uno de los periodos de retorno de diseño, tal como se muestra en la Figura (2.3).

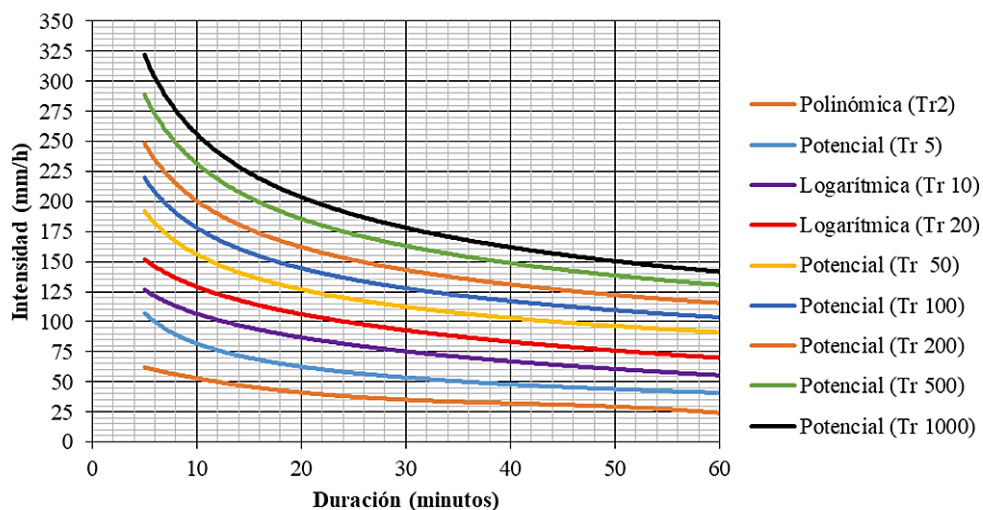


Figura 2.3 Curvas intensidad-duración-frecuencia

Fuente: (Mera Félix et al., 2021)

2.3 Modelos matemáticos más comunes

Las primeras ecuaciones fueron realizadas por Sherman en 1931 y Bernard en 1932 (Pereyra-Díaz, 2005) Para Remenieras, (1974) estos modelos han conducido a

numerosos investigadores del mundo a generar diversas expresiones matemáticas que simulan las relaciones I-D-F, que se presentan como:

2.3.1 Ecuación de Bernard

El modelo de Merrill Bernard, fue presentado en el año 1932 (Chow et al., 1994), por su sencillez y practicidad este modelo matemático es uno de los más utilizados en la actualidad, sin embargo, es bueno mencionar que existen otros modelos que representan la relación I-D-F.

$$I = \frac{a T_r^b}{d^c} \quad (Ec. 2.4)$$

2.3.2 Ecuación de Sherman

Por otro lado, en el año 1931 Sherman presenta una ecuación para relacionar la I-D-F de la ciudad de Boston (Pereyra-Díaz, 2005)

$$I = \frac{a T_r^b}{(d + e)^c} \quad (Ec. 2.5)$$

2.3.3 Ecuación de Chow

El modelo de Chow sugerido en su obra “Hidrología Aplicada”, propone una variante de los modelos propuestos por Sherman y Bernard resultando la siguiente ecuación.

$$I = \frac{a T_r^b}{d^c + e} \quad (Ec. 2.6)$$

2.3.4 Ecuación de Wenzel

Wenzel propuso y estimó los coeficientes a, c y e para algunas ciudades de los Estados Unidos.

$$I = \frac{a}{d^c + e} \quad (Ec. 2.7)$$

2.3.5 Ecuación de Montana

La ecuación muestra los coeficientes a, b que son constantes calculadas mediante una correlación múltiple, usando parámetros estadísticos por la técnica de Montfort, que aplica cuantiles para agregación de tiempos de duración de 15, 30, 45,

60 y 1440 minutos. Esta ecuación fue aplicada en el estudio de las estaciones de karama-Plateau, Rubona y Rwere-Colline en el centro de África (Pereyra-Díaz, 2005)

$$I = a d^b \quad (Ec. 2.8)$$

2.3.6 Ecuación de Keifer-Chu

Keifer y Chu en 1957 construyen este método para el chicao hietograph, basado en las relaciones I-D-F como ecuación general de la intensidad media para su zona de estudio. Por tanto, como se ha definido la intensidad media sobre una zona de estudio. Estos modelos pueden ser aplicados para determinar las relaciones I-D-F sus parámetros a, b, c, d, e, f, que son determinados por medio de la técnica de regresión no lineal múltiple. Estos métodos requieren métodos estadísticos para su solución ya sea por aplicación logarítmica en el caso más sencillo o la aplicación de series numéricas.

$$I = \frac{a}{e + b^d} \quad (Ec. 2.9)$$

Se detalla a continuación la nomenclatura utilizada en las expresiones matemáticas

donde:

- I : intensidad, en (mm/h)
- T_r : Periodo de retorno, en (años)
- d : duración, en (h)
- a , b , c y e son parámetros determinados propios de cada ecuación (adm)

2.3.7 Ecuación usada en USA

La fórmula empírica utilizada en USA, que relaciona la intensidad máxima $i_{m\acute{a}x}$, con la duración D, y el periodo de retorno T, es:

$$i_{max} = \frac{K * T^m}{D^n} \quad (Ec. 2.10)$$

donde:

- $i_{m\acute{a}x}$: intensidad máxima ,en (mm/h)

- m, n, k : parámetros (adm)
- T : periodo de retorno, en (años)
- D : duración, en (min)

Los parámetros m, n , y k , se obtienen aplicando una correlación múltiple. (Villón Béjar, 2004)

Si se toman logaritmos se tienen:

$$\log I = \log K + m \log T - n \log D \quad (\text{Ec. 2.11})$$

O bien

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Dónde:

$$Y = \log I \quad a_0 = \log K, \quad a_1 = m, \quad X_1 = \log T, \quad a_2 = -n, \quad X_2 = \log D$$

Al hacer un ajuste de correlación lineal múltiple de una serie de tres tipos de datos, se obtiene un sistema de ecuaciones como el siguiente:

$$\sum Y = N a_0 + a_1 \sum X_1 + a_2 \sum X_2 \quad (\text{Ec. 2.13})$$

$$\sum X_1 Y = a_0 \sum X_1 + a_1 \sum (X_1^2) + a_2 \sum (X_1 X_2) \quad (\text{Ec. 2.14})$$

$$\sum X_2 Y = a_0 \sum X_2 + a_1 \sum (X_1 X_2) + a_2 \sum (X_2^2) \quad (\text{Ec. 2.15})$$

dónde:

N : número de datos

$a_0, a_1, a_2, X_1, X_2, Y$: son incógnitas para determinar los parámetros de

K, m y n

2.4 Métodos para generar hietogramas de diseño

2.4.1 Hietograma bloques alternos

El hietograma se construye asumiendo que la intensidad media de un conjunto de bloques ha de ser igual a la intensidad obtenida mediante la curva I-D-F para cualquier intervalo de tiempo. Tras seleccionar el período de retorno de diseño, se lee la intensidad en la curva I-D-F correspondiente a la región en la cual se está trabajando para cada una de las duraciones. Los incrementos o bloques obtenidos se deben reordenar de manera que el bloque de intensidad máxima quede en el centro de la duración definida y el resto de bloques se sitúen en orden decreciente alternativamente a derecha e izquierda del bloque central (Chow et al., 1994)

Las intensidades se definen de la siguiente forma:

$$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_j = i(n \Delta t) \quad (\text{Ec. 2.16})$$

donde:

- n : número de bloques
- b_j : intensidad media del conjunto de bloques, en (mm/h)
- $i(n \Delta t)$: intensidad obtenida en la curva I-D-F, en (mm/h)

Despejando de la ecuación las alturas de bloque:

$$b_n = n i(n \Delta t) - \sum_{j=1}^{n-1} b_j \quad (\text{Ec. 2.17})$$

(Balbastre Soldevila, 2018)

2.4.2 Hietograma rectangular

Desarrollado en 1970 por la Federación Ambiental del agua (en inglés Water Environment Federation, WEF), organización de ingenieros antes conocida como Water Pollution Control Federation, (Water Pollution Control Federation, 1970), constituye la representación más sencilla posible de un hietograma, puesto que su obtención se basa en construcción de un rectángulo cuya base es la duración de la tormenta y su altura es igual a la intensidad media obtenida a partir de la curva I-D-F

para esa misma duración, t_d y período de retorno, T , seleccionado. Se emplea en conjunto con el método racional.

El método presenta una serie de limitaciones (Marsalek y Watt, 1983)

- No se puede elegir entre otro método computacional aparte del método racional y sus variaciones.
- No se tienen en cuenta las condiciones antecedentes. No obstante, sería posible considerarlas al seleccionar el coeficiente de escorrentía.
- La intensidad depende del tiempo de concentración, el cual se encuentra mal definido, generalmente. Como la duración, t_d se iguala al tiempo de concentración, t_c , la intensidad media es inversamente proporcional al t_c . De esta forma los errores de definición en el t_c se trasladan a la intensidad, y por tanto a la precipitación calculada.

2.4.3 Hietograma triangular

Este tipo de construcción da como resultado una forma triangular y junto al rectangular, han constituido las formas más habituales adoptadas para representar hietogramas debido a que este tipo de hietograma también es fácil de construir (Chow et al., 1994). El método fue planteado por B. C. Yen y V. T. Chow en 1980 (Marsalek y Watt, 1983)

La duración de la tormenta, t_d , representa la base del triángulo mientras que la altura, h , se obtiene a partir del volumen de precipitación de diseño, P , calculado a partir de la correspondiente curva I-D-F. Por lo tanto, para obtener el triángulo, se tiene que:

$$h = \frac{2P}{T_d} \quad (Ec. 2.18)$$

donde:

- P : precipitación de diseño, en (mm)
- T_d : duración total de la tormenta, en (h)

Para estimar el instante en que se produce el pico de la tormenta, se emplea el anteriormente introducido coeficiente de avance de la tormenta, r :

$$r = \frac{t_p}{T_d} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

donde:

- t_p : tiempo al pico o instante en el que se produce la máxima intensidad, en (h)
- T_d : duración total de la tormenta, en (h)

Definido el coeficiente r , se puede obtener el tiempo de bajada o recesión, t_b como:

$$t_b = T_d - t_p = (1 - r) T_d \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Tras analizar en Estados Unidos 9869 tormentas en cuatro ciudades de los estados de Illinois, Massachusetts, Nueva Jersey y California, los autores del método obtuvieron que la mayoría de los eventos tormentosos más fuertes presentaban la misma forma, con algunas pequeñas diferencias debidas a la duración de la tormenta, las inexactitudes en las mediciones y la localización espacial.(Balbastre Soldevila, 2018)

2.4.4 Hietograma doble triángulo

La siguiente metodología ha sido de las más usadas en Francia (Gómez Valentín, 2007) y también proporciona resultados satisfactorios según los autores en cuencas urbanas pequeñas de Europa y América del Norte. La particularidad de esta tormenta de diseño proviene de su forma en doble triángulo derivada de un estudio de sensibilidad de un modelo de transformación lluvia-escorrentía a partir de características de las tormentas (Arnaud, 1997). Desbordes y Raous, autores del método, observaron que los hidrogramas de salida registrados en las cuencas, muestran una variabilidad de forma mucho menor que la de los hietogramas que los causaron. Este hecho los llevó a buscar las características de la lluvia cuyas variaciones tienen una influencia significativa en el hidrograma de escorrentía para atenerse únicamente a ellas. Estas características principales determinadas por los autores son las siguientes (Hydratec, 2007):

- La duración de la lluvia y la intensidad media asociada.
- Un período de lluvia intensa durante un período crítico para la cuenca.

- La posición del período intenso en el evento.
- La forma de la lluvia y el paso del tiempo de discretización de las intensidades.

La Figura 2.4 muestra la forma de este tipo de tormenta de diseño, mientras que la Figura 2.5 representa un ejemplo discretizado.

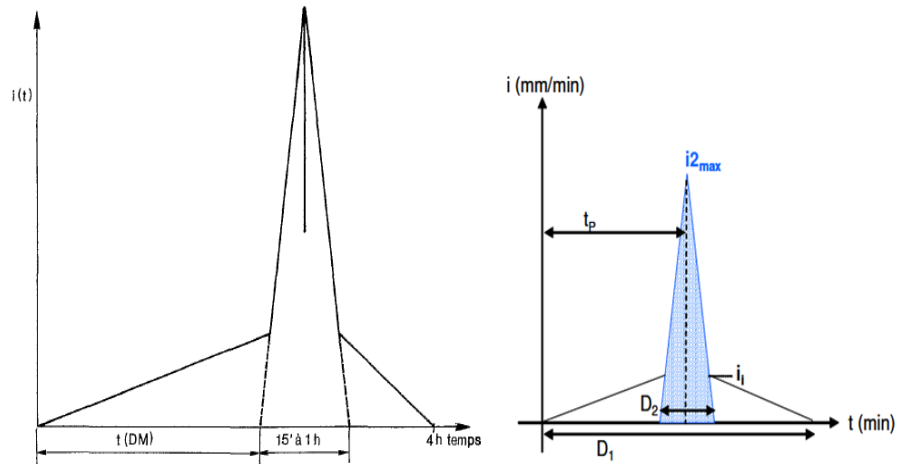


Figura 2.4 Ejemplos de hietogramas tipo doble triángulo.

Fuente: Hydratec, 2007

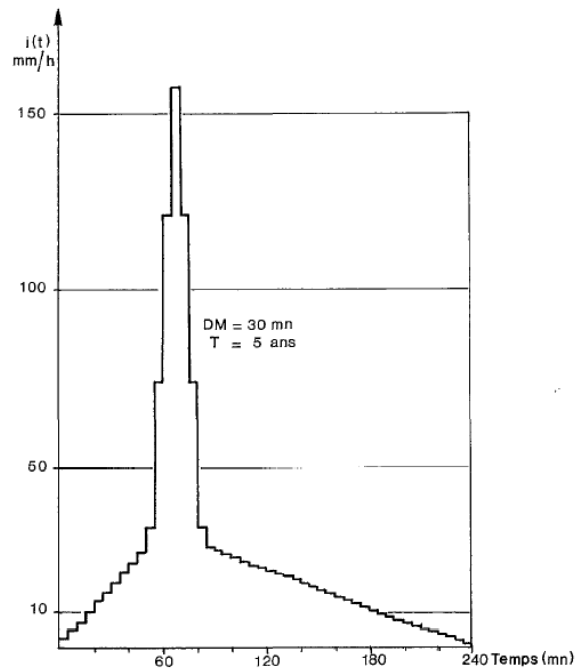


Figura 2.5 Tormenta de diseño doble triángulo. Período de retorno 5 años y duración 4 h.

Fuente: Hydratec, 2007

Se emplea la fórmula de Montana para determinar las curvas I-D-F, cuyos coeficientes a y b se especificaron para cada una de las tres regiones pluviométricas en que se dividió Francia según la instrucción técnica de 1977 relativa a redes de saneamiento urbano (INT 77-284).

La Tabla (2.1) muestra los valores de los coeficientes de Montana, así como el volumen acumulado en milímetros para distintas duraciones y períodos de retorno, mientras que en la Figura (2.6) se delimitan las tres regiones pluviométricas en que la normativa divide el país.

Es posible determinar las relaciones I-D-F en otra zona diferente analizando los eventos de precipitación de una muestra perteneciente a la zona que se quiera estudiar.(Balbastre Soldevila, 2018)

Tabla 2.1 Curvas I-D-F y volúmenes H (mm) recomendados por la INT 77-284

Période de retour T	Paramètres		Durée t (mn) et hauteurs (mm)			
	a(T)	b(T)	15	30	60	120
<u>REGION I</u>						
10 ans	5.9	- 0.59	18	24	31.5	42
5 ans	5.0	- 0.61	14.5	19	24.5	32.5
2 ans	3.7	- 0.62	10.5	13.5	17.5	23
1 an	3.1	- 0.54	8	10.5	13.5	17.5
<u>REGION II</u>						
10 ans	6.7	- 0.55	32.5	31	42.5	58
5 ans	5.5	- 0.57	17.5	23.5	32	43
2 ans	4.6	- 0.62	13	17	22	28.5
1 an	3.5	- 0.62	10	12.5	16.5	21.5
<u>REGION III</u>						
10 ans	6.1	- 0.44	28	41	60.5	39
5 ans	5.9	- 0.51	22	31	44	61.5
2 ans	5.0	- 0.54	17.5	24	33	45
1 an	3.8	- 0.53	13.5	19	26	36

Fuente: Hydratec, 2007

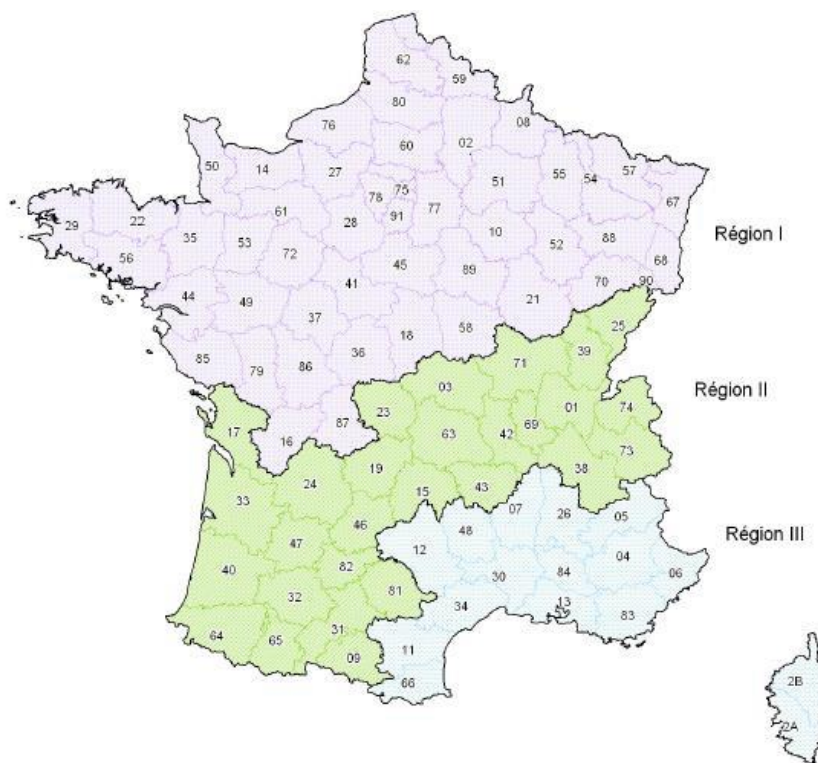


Figura 2.6 Delimitación de regiones pluviométricas en Francia según la INT 77-284

Fuente: Hydratec, 2007

2.4.5 Hietograma de Sifalda

Sifalda describió una metodología de construcción de tormentas de diseño directamente a partir de la evaluación de datos medidos en varias zonas de la antigua Checoslovaquia (Arnell, 1978). La lluvia de diseño se calcula a partir de características tales como la media de los volúmenes de las lluvias observadas, la duración, y la posición en el tiempo y magnitud del pico de intensidad (Marsalek, 1984). El hietograma resultante presenta una forma compuesta por un área rectangular correspondiente a la máxima intensidad (cuyo valor se obtiene a partir de las curvas I-D-F) y dos secciones trapezoidales a ambos lados del rectángulo de distintas duraciones cada una. De esta forma se tiene en cuenta la lluvia antecedente y posterior al tramo de precipitación más intenso y se consigue una mejor aproximación al volumen total que sólo a partir de las curvas I-D-F. La Figura 2.7 muestra cómo construir un hietograma de este tipo. (Balbastre Soldevila, 2018)

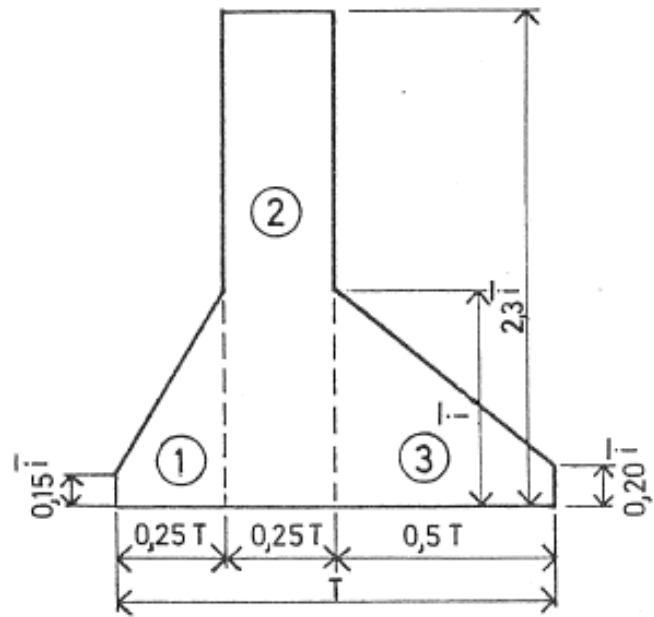


Figura 2.7 Hietograma de diseño propuesto por Sifalda

Fuente: Arnell, 1978

CAPÍTULO III.

CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO TUPIZA

3.1 Ubicación geográfica de la cuenca

La cuenca del río Tupiza se encuentra ubicada al sureste del departamento de Potosí y abarca una superficie aproximada de 2,310 km². La parte más baja de la cuenca se encuentra en el margen oriental a una altitud aproximada de 2,867 msnm (Figura 3.1). Esta zona corresponde a la zona de valles de los ríos Tupiza y Salo, donde se desarrolla agricultura de riego y secano. La parte más alta de la cuenca está sobre los 4,844 msnm y corresponde a la zona occidental del territorio destinado principalmente a la minería y al pastoreo extensivo.

Desde el punto de vista hidrográfico, la cuenca está drenada por varios ríos secundarios como: Salo, Chilco, Sorokhaya y Tatasi; estos son afluentes del río Tupiza. A su vez el río Tupiza es afluente del río San Juan del Oro, que drena sus aguas al río Pilcomayo. Con base en esto y de acuerdo con la metodología de Pfafstetter de Bolivia, se han delimitado 57 microcuencas de Nivel 6. Estas microcuencas cumplen con el criterio de las inversiones para su manejo, es decir, sus áreas son menores a 100 km².(Lima Quispe y Balderrama, 2022)

Geográficamente, la cuenca se encuentra entre las coordenadas:

Punto alto (cabecera de la cuenca):

- **Latitud:** 21° 17' 34,65" S
- **Longitud:** 66°17' 08,63" O
- **Altitud:** 4842 m.s.n.m.

Punto bajo (aforo):

- **Latitud:** 21° 30' 59.45" S
- **Longitud:** 65°41' 56.17" O
- **Altitud:** 2866 m.s.n.m.

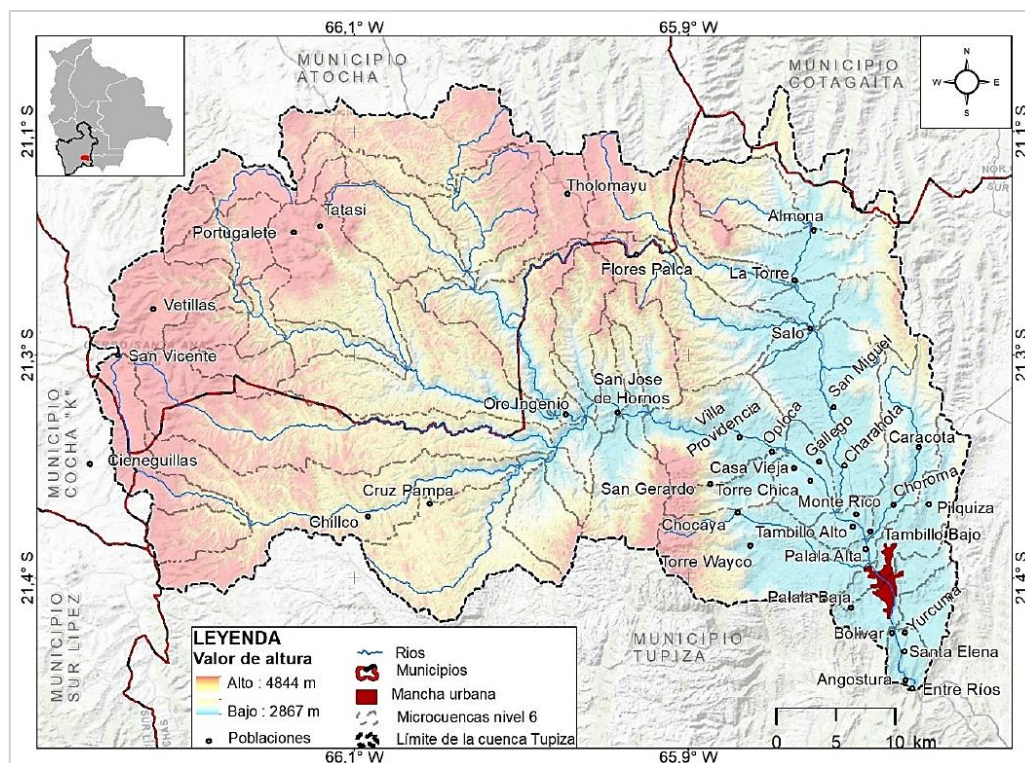


Figura 3.1 Mapa de ubicación y delimitación de las unidades hidrográficas de la cuenca del río Tupiza.

Fuente: Lima Quispe y Balderrama, 2022

3.2 Morfometría de la cuenca

El análisis morfométrico se basa en tres aspectos principales: forma, relieve e hidrografía. Los parámetros relacionados con la forma (como el área, el perímetro y el índice de forma) determinan la capacidad de respuesta de la cuenca ante eventos pluviales. El relieve (pendiente media, altitud media) influye en la velocidad de escurrimiento y la potencial erosión. Finalmente, la hidrografía, que incluye la longitud de los cauces, la densidad de drenaje y la jerarquía de los ríos, determina cómo el agua fluye a través de la cuenca y se distribuye en su red hidrográfica (Villón Béjar, 2004)

El análisis de estos parámetros es crucial para realizar modelos hidrológicos como la estimación de caudales máximos y el diseño de infraestructuras hidráulicas en la cuenca del río Tupiza, dado su variado relieve y el alta pendiente de la zona. Así, el estudio morfométrico ofrece información valiosa para la correcta gestión del agua y el control de inundaciones en la región.

Para la caracterización fisiográfica de la cuenca del río Tupiza y el cálculo de parámetros morfométricos necesarios para el análisis hidrológico, se empleó un Modelo Digital de Elevación (DEM) con una resolución espacial de 12,5 x 12,5 metros, proveniente de la misión satelital ALOS PALSAR (Advanced Land Observing Satellite – Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar).

La Tabla (3.1) resume los parámetros morfométricos de la cuenca del río Tupiza

Tabla 3.1 Resumen de los parámetros morfométricos de la cuenca del río Tupiza

Parámetros de forma de la cuenca				
Parámetro	Símbolo	Fórmula / Método	Unidad	Valor
Área de la cuenca	A	Delimitación en SIG	km ²	2.310,37
Perímetro de la cuenca	P	Medido en SIG	km	288,21
Longitud del cauce principal	L	Medida desde naciente hasta salida	km	97,45
Ancho medio	B	Medido en SIG	km	43,90
Factor de forma	F	A / L	adm	0,64
Índice de compacidad	K	$0,28 \times P / \sqrt{A}$	adm	1,68
Parámetros de relieve de la cuenca				
Parámetro	Símbolo	Fórmula / Método	Unidad	Valor
Elevación máxima	H _{máx}	Extraída del DEM	m.s.n.m.	4.842
Elevación mínima	H _{mín}	Extraída del DEM	m.s.n.m.	2.866
Altitud media	H _{med}	Extraída del DEM	m.s.n.m.	3.854
Rango altitudinal	ΔH	H _{máx} - H _{mín}	m	1.976
Pendiente media de la cuenca	S	Derivada del DEM	%	27
Pendiente media del cauce	S _c	$(H_{\text{inicio}} - H_{\text{salida}}) / L \times 100$	%	2
Relieve relativo	Rr	H _{máx} - H _{mín}	m	1.976
Parámetros hidrográficos complementarios				
Parámetro	Símbolo	Fórmula / Método	Unidad	Valor
Densidad de drenaje	D _d	Longitud total de cauces / A	km/km ²	0,36
Orden del cauce principal	W	Método de Strahler	ordinal	5
Longitud total de drenaje	L _t	Suma de longitudes de cauces	km	835,16
Frecuencia de cauces	F _c	N° total de cauces / A	cauces/km ²	0,11

Fuente: Elaboración propia

3.2.1 Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes

Es la curva que puesta en coordenadas rectangulares, representa la relación entre la altitud, y la superficie de la cuenca que queda sobre esa altitud (Villón Béjar, 2004).

La curva de frecuencia de altitudes es la representación gráfica, de la distribución en porcentaje de las superficies ocupadas por diferentes altitudes (Villón Béjar, 2004).

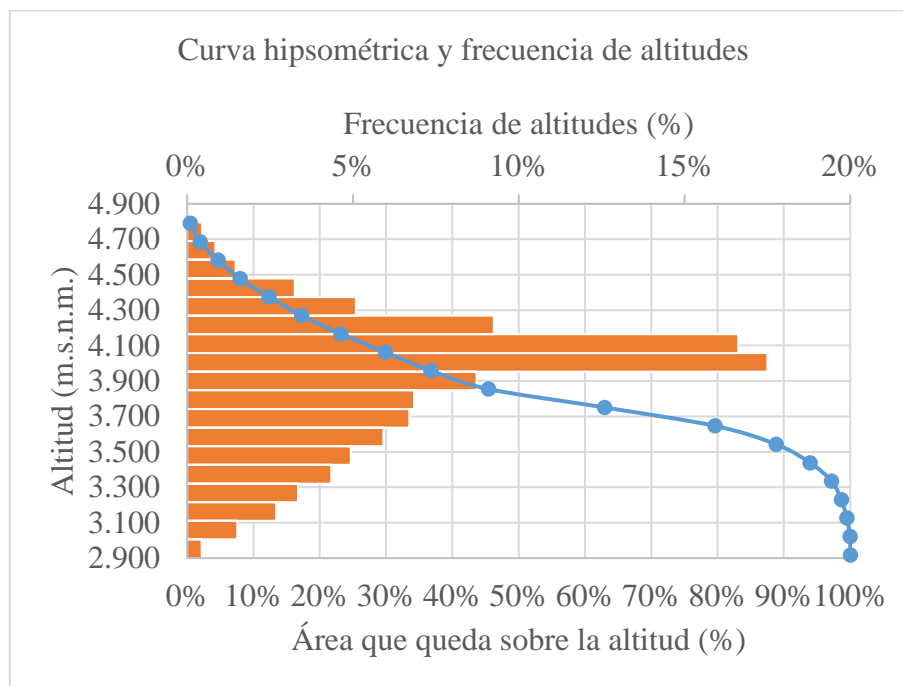


Figura 3.2 Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes de la cuenca del río Tupiza

Fuente: Elaboración propia

Con base en el análisis de la curva hipsométrica de la cuenca del río Tupiza, se puede clasificar dicha cuenca como una cuenca madura o en equilibrio geomorfológico. Esta clasificación se fundamenta en la forma de la curva hipsométrica, la cual presenta una morfología suavemente cóncava, con tendencia a una forma en S, lo que sugiere un estado intermedio en el ciclo de evolución del relieve fluvial.

En términos de distribución altitudinal, se observa que la altitud mínima de la cuenca es de aproximadamente 2.900 m.s.n.m., mientras que la altitud máxima alcanza los 4.900 m.s.n.m. lo que implica un rango altitudinal de 2.000 metros. La mayor concentración de área se encuentra en los intervalos entre 3.900 y 4.100 m.s.n.m. los

cuales concentran casi el 18% del área total. Este comportamiento se refleja también en el histograma de frecuencias, donde los intervalos de altitud media son los más representativos.

La curva hipsométrica muestra que cerca del 50% del área de la cuenca se encuentra por encima de los 3.800 m.s.n.m., lo que indica que existe una distribución relativamente equilibrada entre las zonas altas y bajas. Esto sugiere que los procesos de erosión en las partes altas y los de sedimentación en las partes bajas se encuentran en relativo balance.

Geomorfológicamente, esta condición implica que la cuenca presenta un relieve moderadamente disectado, con pendientes activas pero no excesivamente abruptas, características típicas de cuencas en estado de madurez. Este tipo de cuencas suele tener un desarrollo estructural más avanzado, con redes de drenaje bien organizadas y mayor estabilidad topográfica.

3.2.2 Cálculo del tiempo de concentración

Se denomina tiempo de concentración, al tiempo transcurrido, desde que una gota de agua cae, en el punto más alejado de la cuenca hasta que llega a la salida de ésta (estación de aforo). Este tiempo es función de ciertas características geográficas y topográficas de la cuenca. (Villón Béjar, 2004)

El tiempo de concentración T_c de una cuenca puede ser estimado mediante diversos enfoques, que van desde métodos empíricos hasta modelos hidrodinámicos más complejos. En el presente estudio, se optó por la utilización de fórmulas empíricas, las cuales permiten una estimación práctica del T_c a partir de parámetros morfométricos de la cuenca. A continuación, se presentan las expresiones seleccionadas para su determinación.

Fórmula de Giandotti

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5 * L}{25,3 * S * L} = \frac{4\sqrt{2.310,37} + 1,5 * 97,45}{25,3 * 0,02 * 97,45} = 6,77 h$$

Fórmula californiana

$$T_c = 0,066 * \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,77} = 0,066 * \left(\frac{97,45}{\sqrt{0,02}} \right)^{0,77} = 10,06 \text{ h}$$

Fórmula de Ventura y Heras

$$T_c = 0,05 * \sqrt{\frac{A}{S}} = 0,05 * \sqrt{\frac{2.310,37}{0,02}} = 16,88 \text{ h}$$

Fórmula de Kirpich

$$T_c = 0,000325 * \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}} = 0,000325 * \frac{97,45^{0,77}}{0,02^{0,385}} = 10,12 \text{ h}$$

Se detalla a continuación la nomenclatura utilizada en las expresiones matemáticas

donde:

- A : área de la cuenca, en (km²)
- L : longitud del cauce principal, en (km)
- S : pendiente del cauce principal, en (m/m)
- H : desnivel máximo del cauce principal, en (m)

Para la estimación del tiempo de concentración T_c de la cuenca, diferentes métodos empíricos comúnmente utilizados en estudios hidrológicos. Estas fórmulas consideran parámetros morfométricos como la longitud del cauce principal, la pendiente media y el desnivel máximo de la cuenca.

Dado que los resultados obtenidos mediante la fórmula Californiana y Kirpich presentaron valores muy similares entre sí, se optó por emplear el promedio aritmético de los tiempos estimados, a fin de representar un valor único y representativo del tiempo de concentración de la cuenca. Esta estrategia permite reducir el sesgo asociado a la aplicación individual de un método y mejora la robustez del valor adoptado para su posterior utilización en el modelado hidrológico.

$$T_c = \frac{10,06 + 10,12}{2} = 10,09 \text{ h}$$

3.3 Cobertura vegetal y uso de suelos

La cuenca del río Tupiza está caracterizada por presentar los siguientes pisos ecológicos: semiárido, árido y altiplánico con dominio andino. El mapa de cobertura vegetal elaborado en el año 2019 se presenta en la Figura (3.3). La cobertura dominante son los matorrales ralos altoandinos 41% de la cuenca, ver Tabla (3.2) distribuidos en el piso ecológico subpuna semiárida. Esta unidad de cobertura se localiza principalmente al este y oeste de los ríos Tupiza y Salo en la zona de baja altitud de la cuenca, también se encuentra dispersa hacia la parte centro – oeste de la cuenca en zonas de altura media. La composición florística de esta unidad de cobertura se constituye mayormente por vegetación arbustiva densa espinosa de porte bajo, desarrollada en suelos semiáridos de profundidad media y con escasa cobertura herbácea. La especie de mayor presencia es la “Acacia caven” de nombre común churqui.(Lima Quispe y Balderrama, 2022)

Tabla 3.2 Área de las unidades de cobertura de la tierra en la cuenca del río Tupiza.

Unidades de cobertura	Área (km ²)	Porcentaje de la cuenca
Matorrales y monte ralo andino de subpuna semiárida	946,39	40,98
Vegetación dispersa vivaz en pedregales puna alto andino	845,14	36,60
Depósitos de arena playas y dunas. Suelo desnudo	479,47	20,76
Bosques nativos altos andinos de subpuna semiárida	14,96	0,65
Cultivos de agricultura múltiple	15,22	0,66
Estructura urbana y rural ciudades y pueblos	4,29	0,19
Nieve estacional	2,37	0,10
Cuerpos de agua	1,39	0,06
Bofedales	0,17	0,01

Fuente: Lima Quispe y Balderrama, 2022

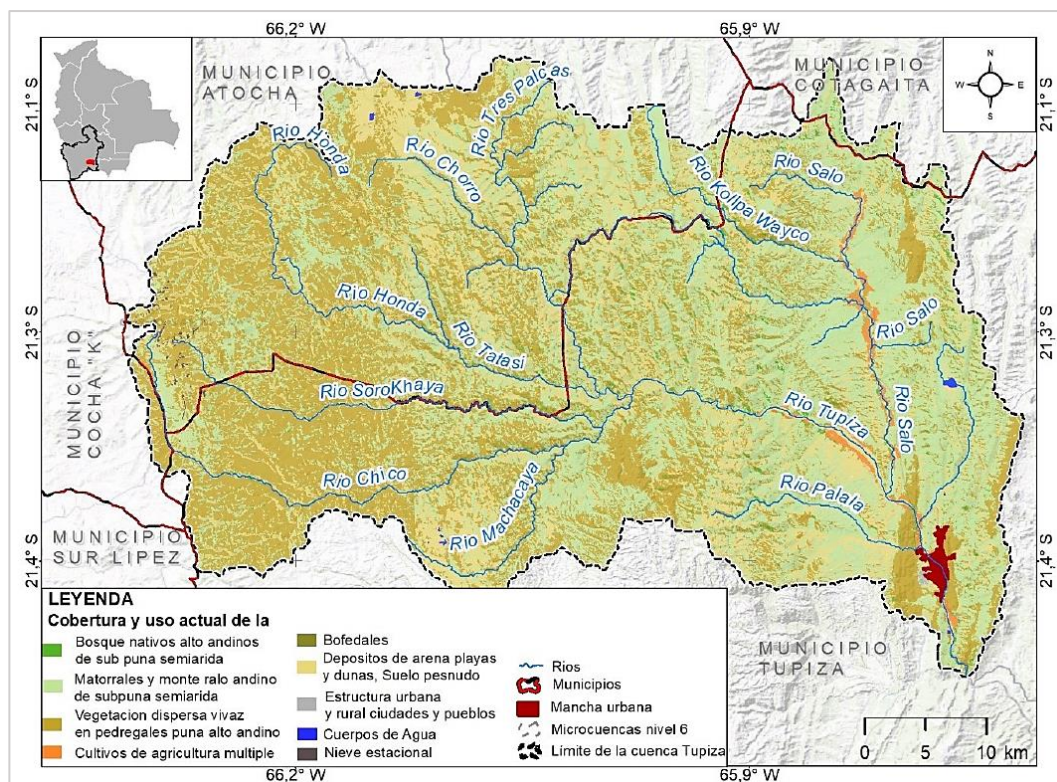


Figura 3.3 Mapa de cobertura de la tierra de la cuenca Tupiza. elaborado con una imagen Sentinel del año 2019

Fuente: Lima Quispe y Balderrama, 2022

3.4 Fisiografía y topografía

La cuenca pertenece a la provincia fisiográfica Cordillera Oriental. Las unidades fisiográficas varían desde llanuras aluviales de poca pendiente en las inmediaciones de la Quebrada Tambillo Bajo y los ríos Salo y Tupiza; hasta serranías altas en el nororiente de la cuenca, en los límites con la Provincia Nor Chichas. En la Figura (3.4) se presenta el mapa de las unidades fisiográficas de la cuenca. Asimismo, en la Tabla (3.3) se presenta la relación de áreas y porcentajes correspondientes a las unidades fisiográficas presentes. La unidad fisiográfica predominante corresponde a las Montañas Bajas con Disección Fuerte ocupando el 29% del territorio de la cuenca, con presencia en la zona centro – oeste, en el área de influencia de los ríos Chorro, Tres Palcas, Tatesi, Honda y la parte alta del río Tupiza. Por su parte, la unidad fisiográfica Montañas Medias con Disección Moderada ocupa el 9% del área, con presencia en los municipios de Atocha y Tupiza, en dicha unidad se localizan los nacimientos de los ríos Chorro y Sorokhaya.

Las Colinas Medias con Disección Moderada poseen una de las menores proporciones en la cuenca con un valor equivalente al 1%, distribuyéndose en la divisoria de las Provincias Sur Chichas y Nor Lipez. La unidad correspondiente a Colinas Bajas con Disección Moderada (13%), se ubica en el suroeste de la cuenca e incluye el territorio de la comunidad de Chillco, en el cual las pendientes son bajas con ondulaciones suaves. Las unidades correspondientes a serranías representan el 34% del área total de la cuenca, del cual el 1% corresponde a Serranías Altas con Disección Moderada ubicadas entre los municipios Tupiza y Cotagaita, el 13% corresponde a Serranías Medias con Disección Moderada ubicadas en el extremo suroriente en inmediaciones de los ríos Chico y Sorokhaya; y el 20% corresponde a Serranías Medias con Disección Fuerte con presencia en el centro y el extremo oriental de la cuenca, abarcando los nacimientos de los ríos Kollpa Wayco y de la Quebrada Tambillo Bajo. Las cuestas (pendientes) se localizan en la zona de confluencia de los ríos Salo y Tupiza, ocupando un porcentaje equivalente al 11% del territorio, caracterizado por sus pendientes moderadas a bajas. La llanura aluvial representa el 3% y circunda el río principal de la cuenca Tupiza y el río Salo, con pendientes bajas. (Lima Quispe y Balderrama, 2022)

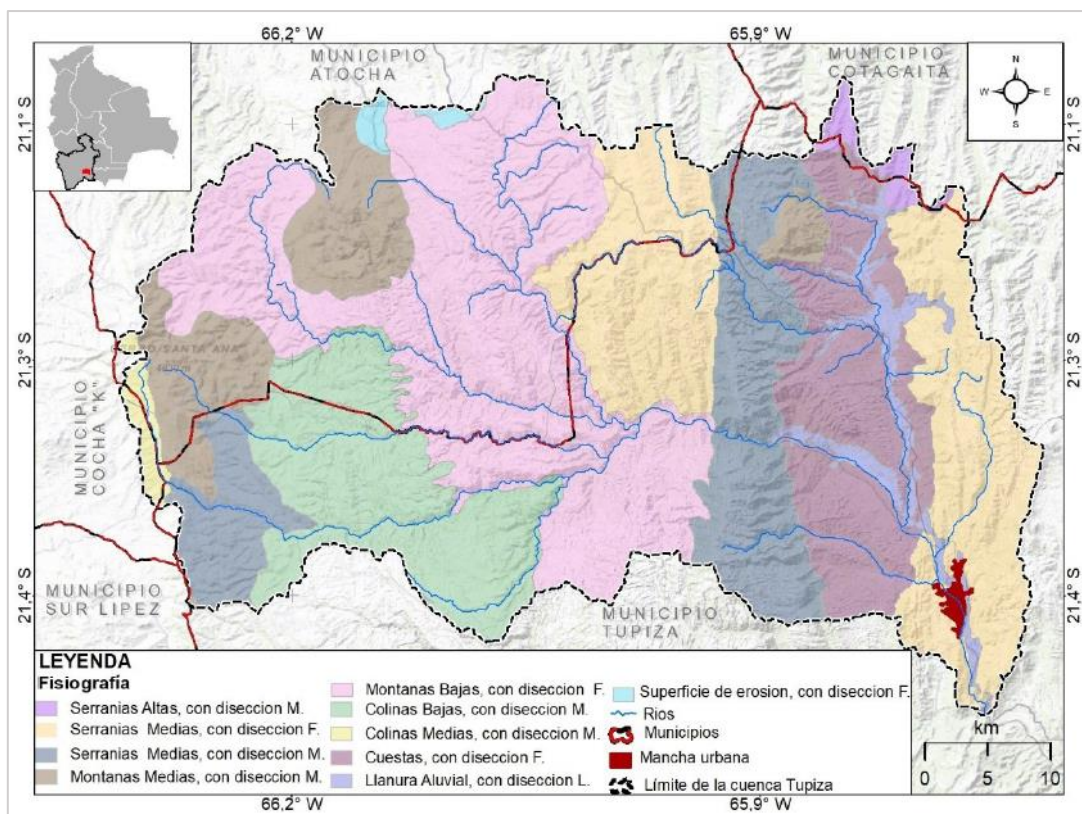


Figura 3.4 Mapa de unidades fisiográficas de la cuenca del río Tupiza

Fuente: Lima Quispe y Balderrama, 2022

Tabla 3.3 Distribución de áreas fisiográficas en la cuenca del río Tupiza

Unidades fisiográficas	Área (km ²)	Porcentaje de la cuenca
Serranías altas con disección moderada	23,78	1,03
Serranías altas con disección fuerte	454,87	19,70
Serranías medias con disección moderada	302,02	13,08
Serranías medias con disección fuerte	678,62	29,39
Montañas medias con disección moderada	207,35	8,98
Colinas medias con disección moderada	23,32	1,01
Colinas bajas con disección moderada	290,70	12,59
Llanura aluvial con disección ligera	57,73	2,50
Superficie de erosión con disección fuerte	14,08	0,61
Cuestas (pendientes) con disección fuerte	256,30	11,10

Fuente: Lima Quispe y Balderrama, 2022

CAPÍTULO IV. DESARROLLO DE LAS CURVAS I-D-F

4.1 Descripción de la muestra

Para el presente estudio se ha recopilado información pluviométrica de tres estaciones meteorológicas ubicadas dentro y en el entorno de la cuenca del río Tupiza, con el objetivo de realizar el análisis hidrológico correspondiente. Las estaciones consideradas son: **Estación Tupiza, Estación Cotagaita – Mosoj Llajta y Estación Atocha.**

Cada una de estas estaciones cuenta con una serie histórica de registros de precipitación diaria con una extensión de **31 años**, permitiendo una caracterización confiable del comportamiento pluviométrico de la región.

Detalles técnicos:

Tabla 4.1 Detalles técnicos de las estaciones pluviométricas

Tipo de datos: Precipitación máxima diaria (mm)
Frecuencia: Registros diarios consolidados
Periodo de análisis: 1990 – 2020 (31 años continuos, sujetos a verificación por calidad de datos)
Cobertura espacial:
Estación Tupiza: Parte baja de la cuenca
Estación Cotagaita – Mosoj Llajta: cuenca vecina, útil para análisis regional
Estación Atocha: Zona alta, aportante indirecta

Fuente: Elaboración propia

La muestra presenta un volumen de datos suficientemente representativo para realizar análisis estadísticos robustos, tales como la estimación de precipitaciones máximas diarias anuales, elaboración de curvas I-D-F, y generación de hietogramas de diseño. Asimismo, la homogeneidad temporal y la distribución espacial de las estaciones permiten abordar con mayor confiabilidad el comportamiento extremo de eventos de lluvia en la cuenca.

Tabla 4.2 Descripción de la muestra

AÑO	Precipitación máxima diaria		
	Est. Tupiza	Est. Cotagaita Mosoj Llajta	Est. Atocha
	(mm)	(mm)	(mm)
1.990	18,5	22,0	19,5
1.991	20,1	38,0	13,0
1.992	28,4	28,0	17,5
1.993	38,5	20,3	40,6
1.994	25,9	39,0	20,5
1.995	29,0	42,5	16,5
1.996	20,5	23,0	14,5
1.997	22,5	31,0	20,5
1.998	20,0	34,0	16,5
1.999	21,4	30,0	19,5
2.000	36,8	40,5	21,1
2.001	24,6	30,0	14,6
2.002	19,5	34,0	18,3
2.003	27,5	22,0	12,9
2.004	20,0	29,0	17,2
2.005	26,2	35,0	46,5
2.006	24,2	20,0	22,7
2.007	44,0	27,0	30,5
2.008	58,0	33,0	24,9
2.009	49,0	18,0	50,5
2.010	49,5	37,0	45,5
2.011	25,2	14,0	16,5
2.012	54,8	27,0	28,1
2.013	48,0	18,0	35,5
2.014	48,0	22,0	30,6
2.015	28,4	28,0	30,5
2.016	24,2	16,0	28,7
2.017	20,5	10,0	17,6
2.018	21,0	18,5	20,7
2.019	22,0	21,0	12,9
2.020	20,5	24,0	16,5

Fuente: Elaboración propia

4.2 Análisis estadístico y depuración de datos

4.2.1 Análisis de consistencia

La selección de las estaciones meteorológicas Tupiza y Cotagaita Mosoj Llajta como estaciones patrón se fundamenta en criterios técnicos de representatividad espacial, disponibilidad temporal de datos, y confiabilidad de los registros. Estas estaciones han sido determinadas como adecuadas para el análisis hidrológico debido a las siguientes consideraciones:

1. Representatividad espacial dentro de la cuenca

Estación Tupiza, se encuentra ubicada dentro de la cuenca del río Tupiza, en su parte media baja, lo cual la convierte en una fuente directa de información climática local. Su ubicación permite reflejar de manera adecuada el comportamiento pluviométrico en zonas pobladas y críticas para el diseño hidráulico.

Estación Cotagaita – Mosoj Llajta, si bien no se encuentra estrictamente dentro de la cuenca de Tupiza, se ubica en una cuenca vecina con condiciones fisiográficas y climáticas similares, lo cual la hace útil para realizar análisis regionales comparativos y ajustes de series mediante métodos de regionalización o ponderación.

2. Longitud y calidad de la serie de datos

Ambas estaciones cuentan con series históricas continuas de 31 años, lo cual cumple con el mínimo recomendable para análisis de frecuencia y generación de curvas de intensidad-duración-frecuencia (I-D-F). Además, los registros presentan una baja proporción de datos faltantes, lo que garantiza una mayor confiabilidad en el tratamiento estadístico.

3. Consistencia y comportamiento hidrológico compatible

El análisis preliminar de consistencia climática muestra que las estaciones presentan una correlación significativa en los eventos máximos anuales, así como un comportamiento coherente en los valores extremos, lo cual fortalece su validez como estaciones representativas del régimen de lluvias en la región.

En el presente estudio, se identificaron inconsistencias y vacíos en los registros pluviométricos de la Estación Atocha, correspondientes a un total de cinco años faltantes dentro del período de análisis (1990–2020). Para garantizar la calidad y la

continuidad de la información, se aplicó el método de curva doble masa, empleando como estaciones patrón a Tupiza y Cotagaita – Mosoj Llajta.

En la Figura (4.1) se presenta la curva doble masa de la estación Atocha sin corregir.

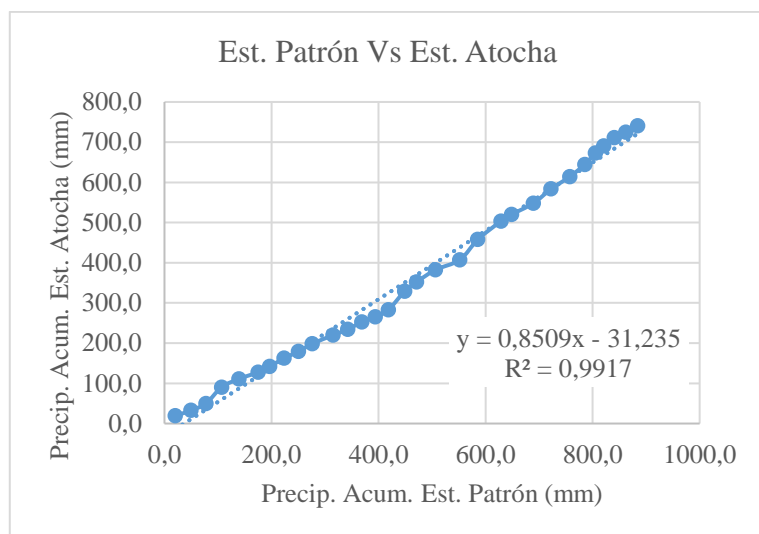


Figura 4.1 Curva doble masa estación Atocha sin corregir

Fuente: Elaboración propia

En la Figura (4.2) se presenta la curva doble masa de la estación Atocha ya corregido.

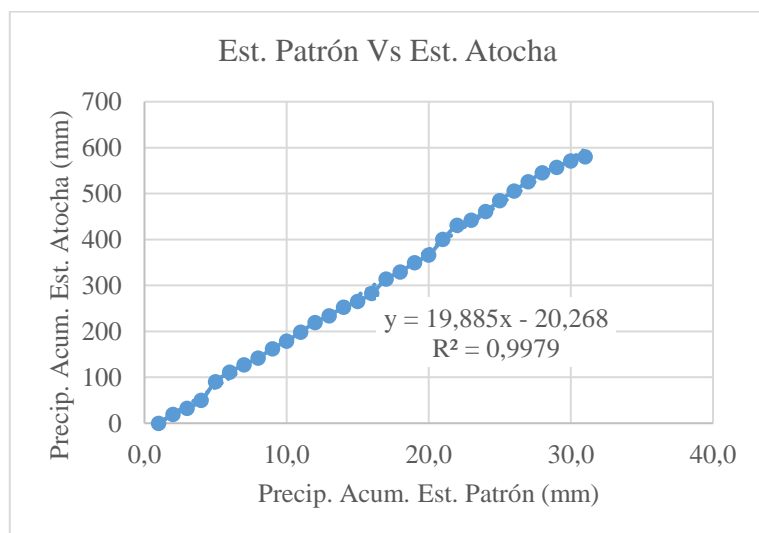


Figura 4.2 Curva doble masa estación Atocha corregido

Fuente: Elaboración propia

La Tabla (4.3) presenta los datos corregidos de la estación Atocha del periodo (2.005-2.020)

Tabla 4.3 Muestra corregida

AÑO	Precipitación máxima diaria		
	EST. TUPIZA	EST. COTAGAITA MOSOJ LLAJTA	EST. ATOCHA
	(mm)	(mm)	(mm)
1.990	18,5	22,0	19,5
1.991	20,1	38,0	13,0
1.992	28,4	28,0	17,5
1.993	38,5	20,3	40,6
1.994	25,9	39,0	20,5
1.995	29,0	42,5	16,5
1.996	20,5	23,0	14,5
1.997	22,5	31,0	20,5
1.998	20,0	34,0	16,5
1.999	21,4	30,0	19,5
2.000	36,8	40,5	21,1
2.001	24,6	30,0	14,6
2.002	19,5	34,0	18,3
2.003	27,5	22,0	12,9
2.004	20,0	29,0	17,2
2.005	26,2	35,0	31,3
2.006	24,2	20,0	15,3
2.007	44,0	27,0	20,5
2.008	58,0	33,0	16,8
2.009	49,0	18,0	34,0
2.010	49,5	37,0	30,6
2.011	25,2	14,0	11,1
2.012	54,8	27,0	18,9
2.013	48,0	18,0	23,9
2.014	48,0	22,0	20,6
2.015	28,4	28,0	20,5
2.016	24,2	16,0	19,3
2.017	20,5	10,0	11,8
2.018	21,0	18,5	13,9
2.019	22,0	21,0	8,7
2.020	20,5	24,0	11,1

Fuente: Elaboración propia

4.3 Análisis de la pluviometría

4.3.1 Distribución Gumbel

En el presente estudio, se justifica la utilización de la distribución de Gumbel debido a su idoneidad para analizar eventos hidrológicos extremos, como las precipitaciones máximas en intervalos determinados, que son la base para la construcción de hietogramas de intensidad máxima de diseño. Según (Villón Béjar, 2004), esta distribución es ampliamente aplicada en hidrología para modelar valores máximos anuales de variables como la lluvia o el caudal, ya que permite estimar la probabilidad de ocurrencia de eventos de gran magnitud que superan los datos observados históricamente. Esta capacidad resulta especialmente útil en regiones con series de datos limitadas, como ocurre en la cuenca del río Tupiza, permitiendo extrapolar valores para distintos periodos de retorno con un sustento estadístico confiable. Por tanto, su inclusión en el presente análisis contribuye a mejorar la precisión del diseño hidrológico y a la toma de decisiones en la gestión del riesgo.

En la Tabla (4.4) se presentan los parámetros estadísticos estimados con la distribución Gumbel.

Tabla 4.4 Parámetros estadísticos distribución Gumbel

Parámetros estadísticos de la distribución Gumbel			
	Est. Tupiza	Est. Cotagaita Mosoj Llajta	Est. Atocha
Media (\bar{x})	30,216	26,832	19,065
Desviación estándar (s)	12,043	8,302	7,013
Coef. De varianza (Cv)	0,399	0,309	0,368
Parámetro de posición (μ)	24,797	23,096	15,909
Parámetro de escala (α)	9,390	6,473	5,468
Δ calculado	0,160	0,110	0,133
Δ_0 critico		0,244	

Fuente: Elaboración propia

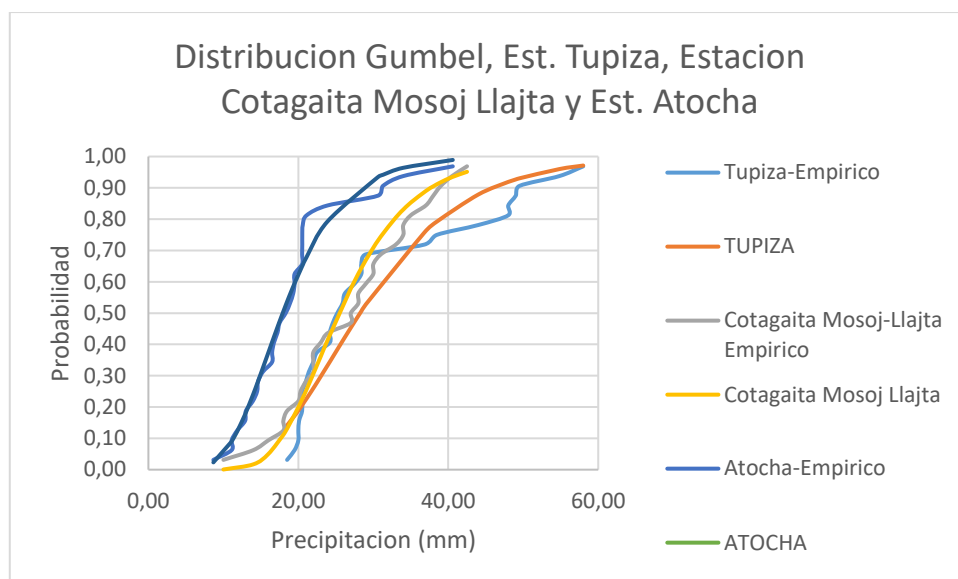


Figura 4.3 Distribución de Gumbel para las 3 estaciones

Fuente: Elaboración propia

Para la estimación de la precipitación máxima esperada asociada a diferentes períodos de retorno en la cuenca de estudio, se utilizó la distribución de Gumbel.

Los resultados obtenidos son los valores de precipitación máxima esperada **p(mm)** para los distintos períodos de retorno especificados.

Tabla 4.5 Precipitación máxima esperada Est. Tupiza

Estación Tupiza		
Precipitación máxima esperada		
T (años)	P($P_{\text{máx}} \leq p$)	p (mm)
10	0,9000	45,93
25	0,9600	54,83
50	0,9800	61,43
100	0,9900	67,99
150	0,9933	71,81
200	0,9950	74,52
500	0,9980	83,14

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.6 Precipitación máxima esperada Est. Mosoj Llajta Cotagaita

Estación Mosoj Llajta Cotagaita		
Precipitación máxima esperada		
T (años)	P($P_{\text{máx}} \leq p$)	p (mm)
10	0,9000	37,66
25	0,9600	43,80
50	0,9800	48,35
100	0,9900	52,87
150	0,9933	55,51
200	0,9950	57,38
500	0,9980	63,32

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.7 Precipitación máxima esperada Est. Atocha

Estación Atocha		
Precipitación máxima esperada		
T (años)	P($P_{\text{máx}} \leq p$)	p (mm)
10	0,9000	28,21
25	0,9600	33,40
50	0,9800	37,25
100	0,9900	41,06
150	0,9933	43,29
200	0,9950	44,87
500	0,9980	49,89

Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Precipitación máxima media areal de la cuenca

La estimación de la precipitación máxima media areal de la cuenca para diferentes períodos de retorno (10, 25, 50, 100, 200 y 500 años) se realizó aplicando el método de las Isoyetas, utilizando herramientas de sistemas de información geográfica en el software ArcMap.

El resultado final del análisis, correspondiente a las precipitaciones máximas en la cuenca para cada período de retorno, se resume en la Tabla (4.8)

Tabla 4.8 Precipitación máxima media areal de la cuenca del río Tupiza

Precipitación máxima media areal de la cuenca del río Tupiza	
T (años)	p (mm)
10	37,93
25	45,14
50	50,51
100	55,84
200	68,14
500	68,16

Fuente: Elaboración propia

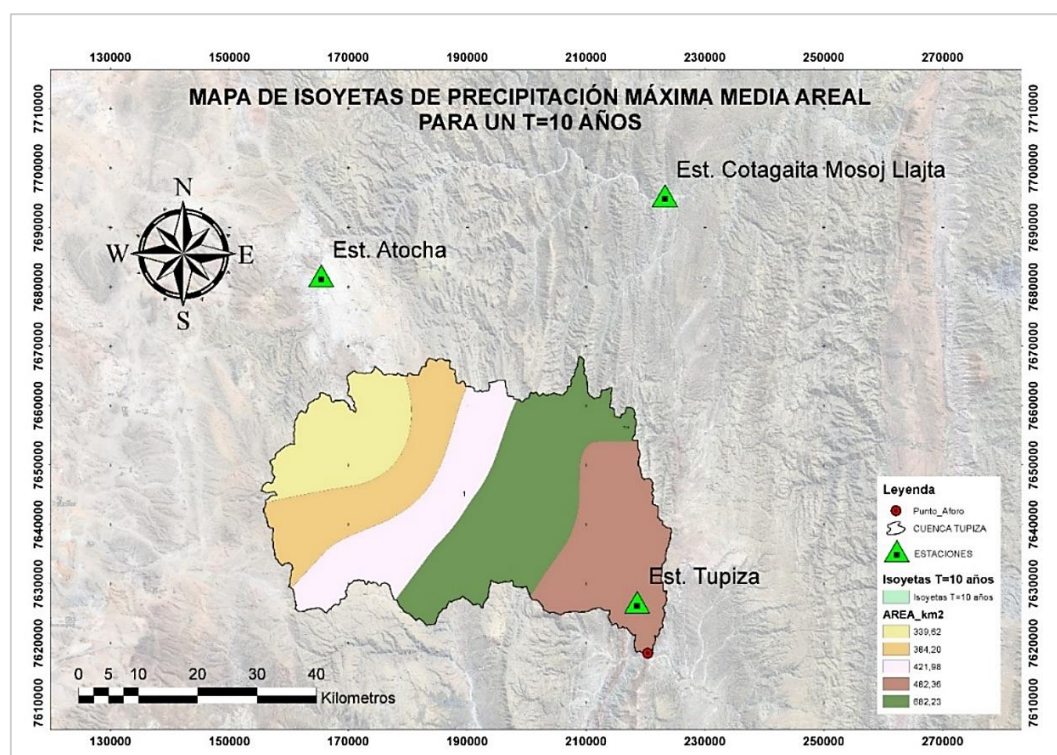


Figura 4.4 Mapa de isoyetas de precipitación máxima media areal para un T= 10 años

Fuente: Elaboración propia

4.4 Obtención de las curvas I-D-F

En este trabajo, la obtención de las curvas I-D-F se basa en una serie de métodos combinados que permiten un tratamiento riguroso de los datos hidrometeorológicos disponibles. Inicialmente, se aplicó la distribución de Gumbel para modelar la frecuencia de las precipitaciones máximas anuales, permitiendo estimar eventos de

distintas recurrencias. Posteriormente, para obtener precipitaciones de duración inferior a 24 horas, se utilizó la ecuación empírica propuesta por Dyck y Peschke, la cual permite discretizar la precipitación diaria en eventos de menor duración.

La ecuación es la siguiente:

$$P_D = P_{24h} * \left(\frac{D}{1440} \right)^{0,25} \quad (Ec. 4.1)$$

donde:

- P_D : precipitación máxima de duración D, en (mm)
- P_{24h} : precipitación máxima de 24 horas, en (mm)
- D : duración de la precipitación, en (h)

Luego, las precipitaciones discretizadas se transformaron en intensidades, y se ajustó a la ecuación usada en USA (Ec. 2.10). Esta calibración se realizó utilizando técnicas de regresión múltiple, logrando obtener los parámetros óptimos que permiten describir de manera precisa las curvas I-D-F para la cuenca en estudio.

A continuación, en la Figura (4.5) se presentan las curvas I-D-F obtenidas para la cuenca del río Tupiza

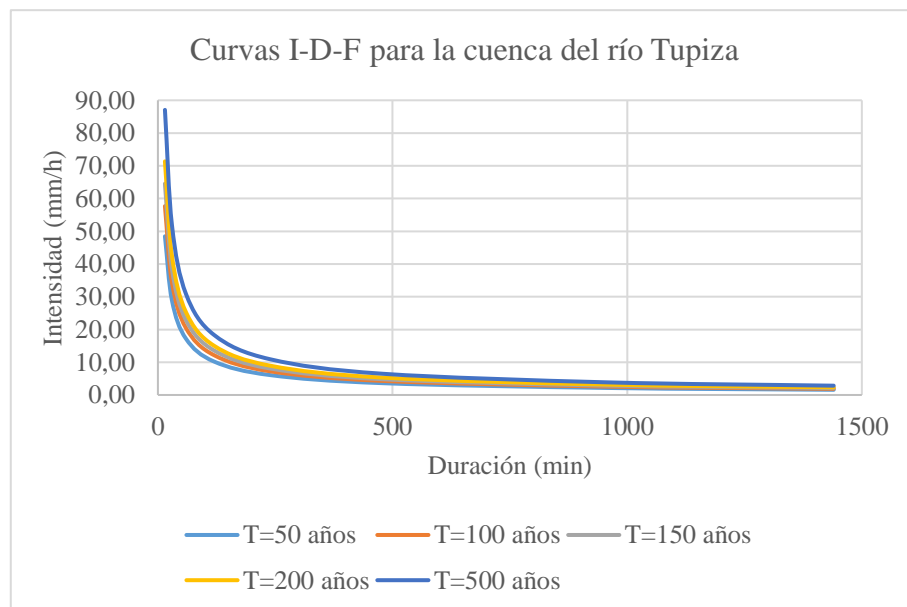


Figura 4.5 Curvas I-D-F para diferentes periodos de retorno para la Cuenca Río Tupiza

Fuente: Elaboración propia

La Ecuación (4.2) refleja la función calibrada de intensidad-duración-frecuencia (I-D-F) obtenida específicamente para la cuenca de Tupiza, a partir del procesamiento y ajuste de los datos de precipitaciones máximas.

$$I_{max} = \frac{261,68 * T^{0,16}}{D^{0,75}} \quad (Ec. 4.2)$$

donde:

- $I_{m\acute{a}x}$: intensidad máxima, en (mm/h)
- T : periodo de retorno, en (años)
- D : duración en, (min)

CAPÍTULO V. APLICACIÓN DE MÉTODOS PARA ESTIMAR HIETOGRAMAS

A continuación, se aplicarán los métodos para la obtención de los hietogramas de diseño, cada procedimiento será ejecutado siguiendo sus fundamentos teóricos respectivos, con el objetivo de realizar una comparación estructurada de los resultados.

Para la aplicación de los distintos métodos de generación de hietogramas de intensidad máxima, es fundamental establecer un período de retorno que represente adecuadamente las condiciones extremas de precipitación en la cuenca de estudio. En este trabajo, se recurrió a los datos hidrométricos de la estación La Angostura, donde se registró la altura máxima de lámina de agua aforada.

A partir de esta altura, se procedió a la estimación del caudal máximo mediante la construcción de una curva de descarga, utilizando la ecuación de Manning, considerando la geometría de la sección transversal del río en el punto de medición. El resultado de este análisis arrojó un caudal pico de 508,19 m³/s para una altura de 3,5 m. A continuación, se presenta la ecuación calibrada para la estación La Angostura.

$$Q = 6,986 * H^{3,422} \quad (Ec. 5.1)$$

donde:

- Q : caudal, en (m³/s)
- H : altura o nivel de agua, en (m)

Con este valor, se aplicó un análisis de frecuencia extrema utilizando la distribución de Gumbel, la cual es adecuada para modelar eventos hidrológicos extremos. El análisis determinó que el caudal obtenido se asocia a un período de retorno de 73 años.

Este período de retorno fue adoptado como base para extraer, desde las curvas I-D-F desarrolladas para la cuenca, la intensidad de precipitación máxima diaria correspondiente, garantizando que el hietograma generado represente condiciones hidrológicas de diseño compatibles con el evento de caudal extremo observado. Así, se asegura coherencia en la comparación entre los diferentes métodos de hietogramas, bajo un mismo escenario de recurrencia.

Además, todos los hietogramas evaluados en esta investigación se desarrollaron considerando una duración de 10 horas, correspondiente al tiempo de concentración de la cuenca, calculado previamente con base en sus características morfométricas. Esta

elección garantiza que los hietogramas generados representen eventos críticos con capacidad de producir escorrentías máximas.

5.1 Aplicación del hietograma bloques alternos

Para la generación del hietograma sintético mediante el método de los bloques alternos, se ha seguido la metodología descrita en el apartado (2.4.1) siguiendo la premisa de que la intensidad media del conjunto de bloques debe corresponder a la intensidad obtenida a partir de la curva I-D-F para el período de retorno seleccionado, que en este caso es de 73 años.

Se calcula la intensidad media de cada intervalo con la ecuación (4.3). Posteriormente, estas intensidades se ordenan de mayor a menor y se redistribuyen alternadamente hacia los extremos del evento, colocando el mayor valor en el centro, lo que representa un patrón típico de tormenta de diseño.

La Tabla (5.1) muestra la aplicación de este procedimiento para la cuenca del río Tupiza:

Tabla 5.1 Construcción del hietograma por bloques alternos

① t h	② I(idf) mm/h	③ I(Δt) mm/h	④ Bloque	⑤ I(t) mm/h
1	24,11	24,11	1	1,11
2	14,34	4,56	2	1,33
3	10,58	3,06	3	1,68
4	8,53	2,37	4	2,37
5	7,21	1,96	5	4,56
6	6,29	1,68	6	24,11
7	5,60	1,48	7	3,06
8	5,07	1,33	8	1,96
9	4,64	1,21	9	1,48
10	4,29	1,11	10	1,21

Fuente: Elaboración propia

Nota: La columna final (5) representa la redistribución de intensidades conforme al método, con el pico máximo en el centro (hora 6), simulando el comportamiento de una tormenta intensa asociada al período de retorno de 73 años.

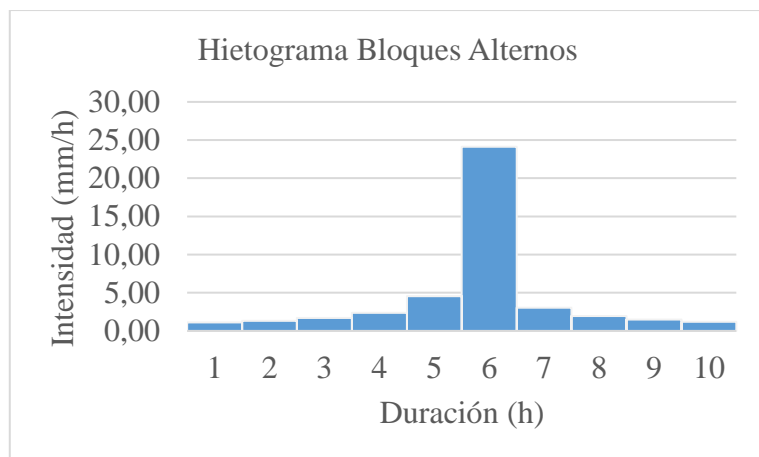


Figura 5.1 Hietograma de bloques alternos ($\Delta t=1h$) y ($T=73$ años)

Fuente: Elaboración propia

5.2 Aplicación del hietograma rectangular

Este hietograma rectangular se construye bajo el supuesto de que la intensidad de precipitación se mantiene constante durante todo el evento. Esta simplificación permite representar de forma uniforme la distribución de la lluvia en el tiempo, facilitando su comparación con otros métodos más complejos.

$$I_{max} = \frac{261,68 * 73^{0,16}}{(10 * 60)^{0,75}} = 4,29 \text{ mm/h}$$

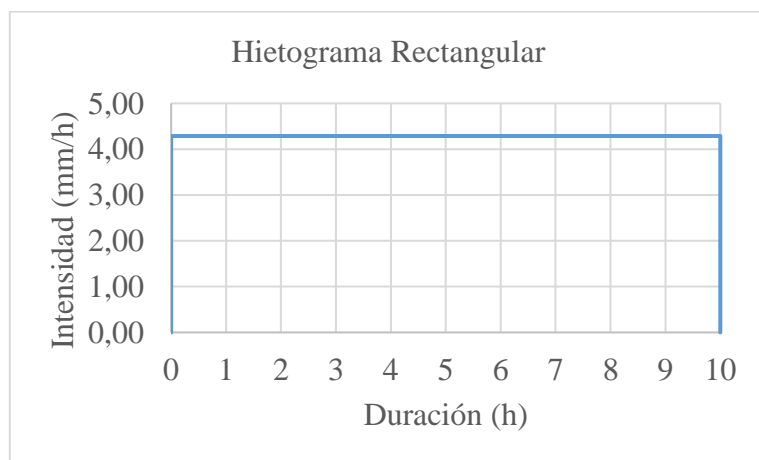


Figura 5.2 Hietograma rectangular para ($D=10h$) y ($T=73$ años)

Fuente: Elaboración propia

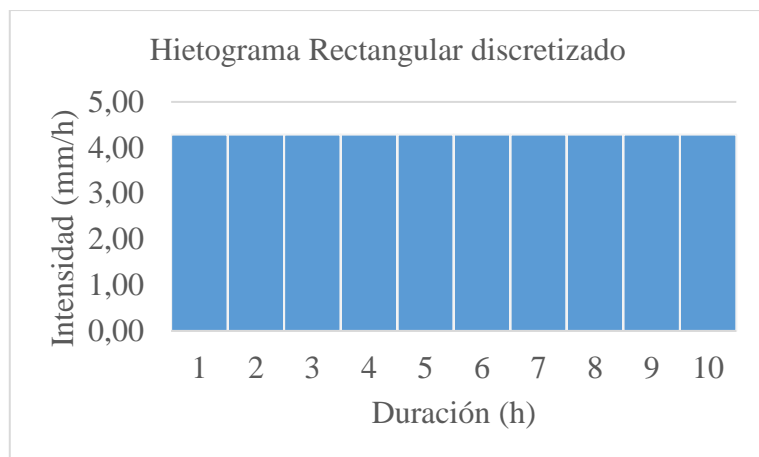


Figura 5.3 Hietograma rectangular discretizado para (D=10h) y (T=73 años)

Fuente: Elaboración propia

5.3 Aplicación del hietograma triangular

Para la construcción del hietograma triangular se requiere definir el coeficiente de avance (r), que representa la proporción del tiempo total de la tormenta en la que ocurre la intensidad máxima de precipitación. Dado que en la cuenca del río Tupiza no se dispone de registros pluviográficos de alta resolución que permitan analizar patrones temporales de tormentas reales, se optó por utilizar un valor estándar de $r = 0,5$ lo cual implica que el pico de intensidad ocurre en la mitad del evento.

Esta elección se fundamenta en criterios frecuentemente adoptados en la literatura hidrológica y en normativas técnicas de países de la región. Por ejemplo, la Norma Técnica Peruana (Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento, 2021) recomienda el uso de un valor de $r=0,6$ para zonas urbanas, lo que supone una precipitación más temprana dentro del evento. Sin embargo, en ausencia de información detallada que justifique un sesgo hacia el inicio de la tormenta (como es el caso de registros históricos de tormentas intensas en ciudades peruanas), se considera más adecuado adoptar un valor simétrico de $r=0,5$. El uso de este valor neutro permite una representación equilibrada del evento de lluvia y evita introducir sesgos en el análisis comparativo de métodos, manteniendo la consistencia en todos los hietogramas evaluados.

$$i_{p,T} = 2 * i_{T,d} = 2 * 4,29 = 8,58 \text{ mm/h}$$

El pico del hietograma se sitúa mediante el coeficiente de avance de la tormenta, el cual se ha adoptado un valor de 0,5 según la ecuación (2.19) el tiempo al pico es de:

$$t_p = r * t_d = 0,5 * 10 = 5 \text{ h}$$

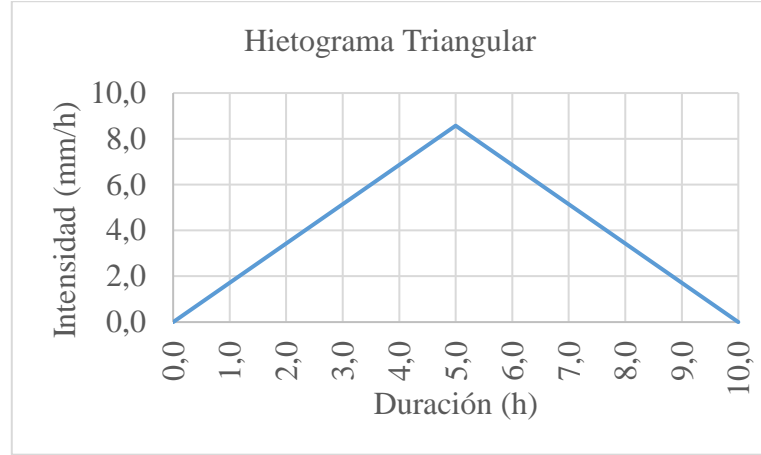


Figura 5.4 Hietograma triangular para (D=10h) y (T=73 años)

Fuente: Elaboración propia

Se puede obtener la intensidad en un instante de tiempo cualquiera siguiendo las ecuaciones de las rectas que definen los tramos ascendente y descendente del hietograma anterior.

$$\left[\begin{array}{l} 0 \leq t \leq t_p : i(t) = i_p * \frac{t}{t_p} \\ t_p \leq t \leq t_d : i(t) = i_p * \left(\frac{t}{t_d - t_p} - \frac{t}{t_d - t_p} \right) \end{array} \right. \quad (Ec. 5.2)$$

Para obtener las intensidades medias discretizadas temporalmente cada 1 hora se promedian los valores instantáneos al comienzo y fin de cada intervalo, excepto en el intervalo que incluye la intensidad pico, en el que se deben considerar las tres intensidades diferentes que aparecen:

$$i_n = \frac{i_c + i_p}{2} \frac{t_p - t_c}{t_f - t_c} + \frac{i_p + i_f}{2} \frac{t_f - t_p}{t_f - t_c} \quad (Ec. 5.3)$$

donde:

- I_c : intensidad al comienzo del intervalo, en (mm/h)

- I_f : intensidad al final del intervalo, en (mm/h)
- I_p : intensidad pico, en (mm/h)
- t_c : tiempo al comienzo del intervalo, en (h)
- t_f : tiempo al final del intervalo, en (h)
- t_p : tiempo al pico, en (h)

(Balbastre Soldevila, 2018)

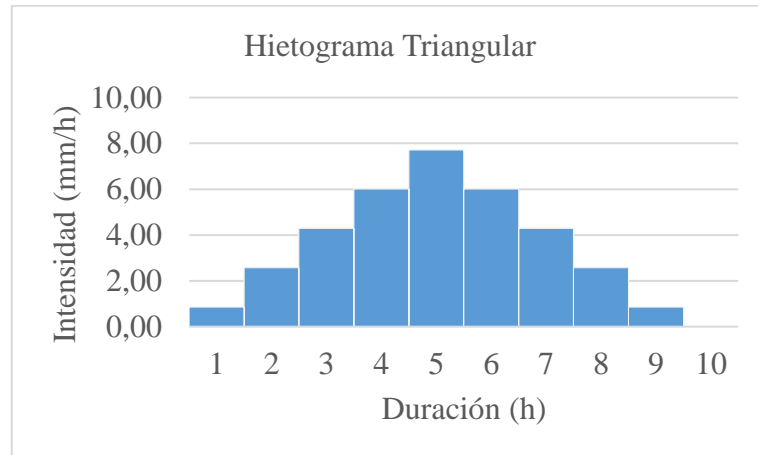


Figura 5.5 Hietograma Triangular discretizado c/1h

Fuente: Elaboración propia

5.4 Aplicación del hietograma doble triángulo

Para la construcción de este hietograma es necesario establecer el período de retorno correspondiente a cada duración para calcular las intensidades asociadas mediante la curva I-D-F. Se ha adoptado una duración de 30 minutos para representar el intervalo de precipitación más intenso, ya que diversos estudios y experiencias prácticas indican que, en eventos de lluvia convectiva típicos de regiones tropicales y subtropicales como Bolivia, la mayor intensidad de precipitación se concentra durante los primeros 30 minutos del evento y se ha asignado el período de retorno de 73 años, mientras que para la intensidad media de precipitación durante la duración completa se ha propuesto un período de retorno de 29 años por ser la relación recomendada entre los períodos de retorno según estudios realizados por el laboratorio de hidrología matemática de Montpellier (Hydratec, 2007)

Para situar el pico del hietograma se ha empleado el mismo coeficiente de avance que para el hietograma triangular (0,5) en la duración total y el intervalo más intenso

se ha situado centrado respecto a este de forma simétrica para facilitar la tarea de construcción (Gómez Valentín, 2007)

Tabla 5.2 Intensidad máxima asociada a los periodos de retorno obtenidos con la ecuación (4.3)

D	T	I_{máx}	t_p
(h)	(años)	(mm/h)	(h)
10	29	3,70	5,00
0,50	73	40,55	0,25

Fuente: Elaboración propia

En las siguientes Figuras se muestra la construcción del hietograma doble triángulo.

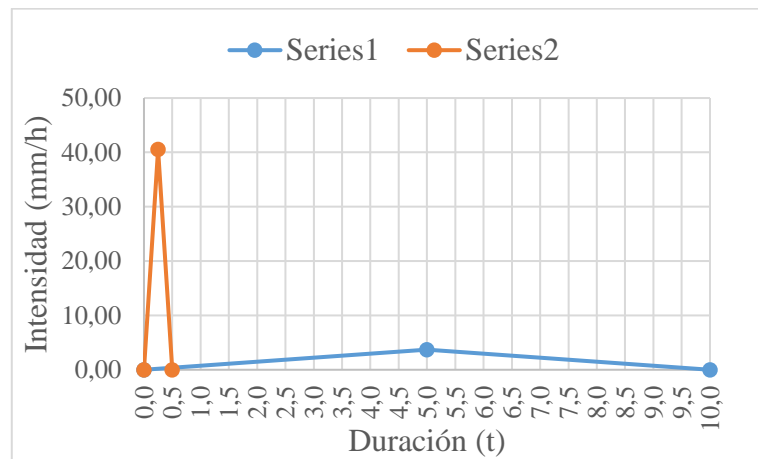


Figura 5.6 Intensidades para (0.5h) y (10h)

Fuente: Elaboración propia

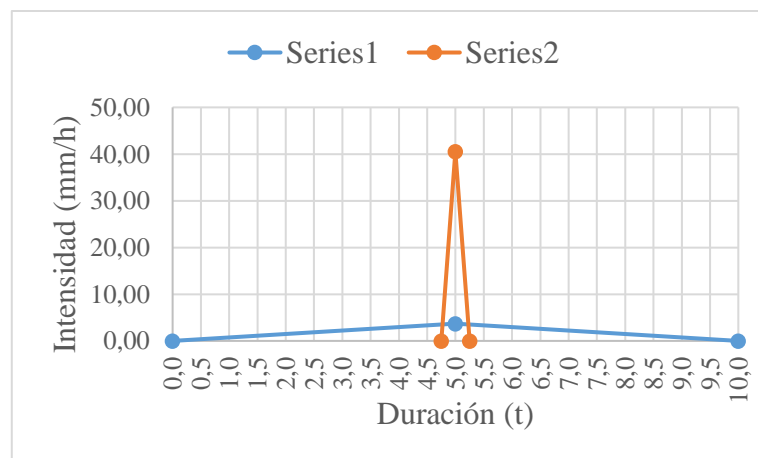


Figura 5.7 Centrado de la intensidad máxima

Fuente: Elaboración propia

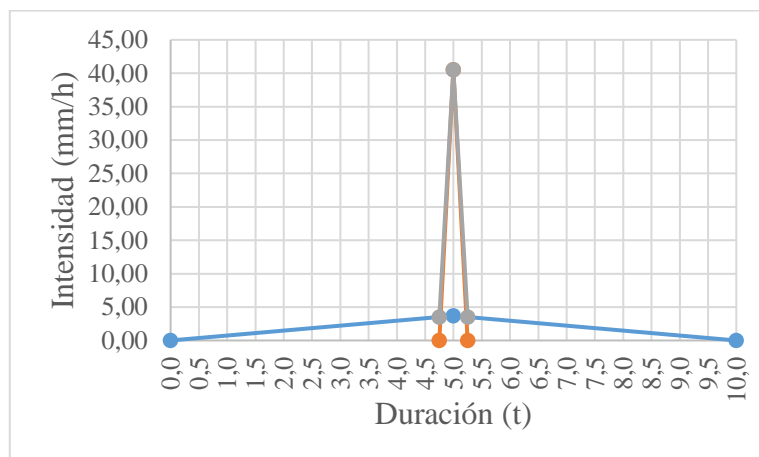


Figura 5.8 Intersección del punto de inicio y final de la intensidad máxima con la intensidad media

Fuente: Elaboración propia

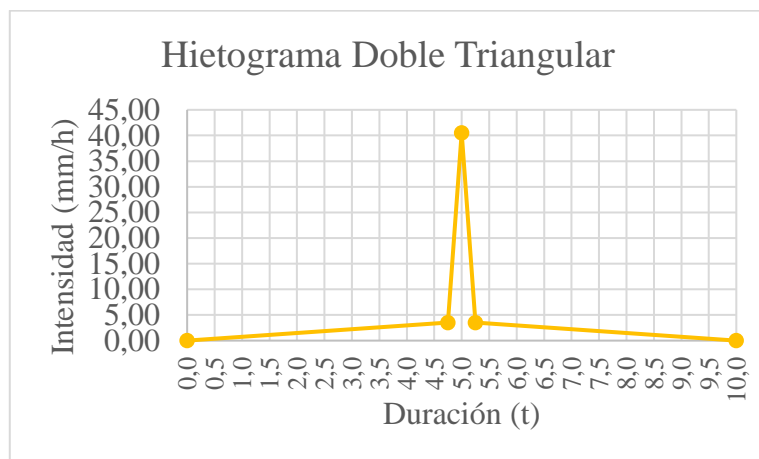


Figura 5.9 Hietograma doble triángulo para (D=10h) y (T=73 años)

Fuente: Elaboración propia

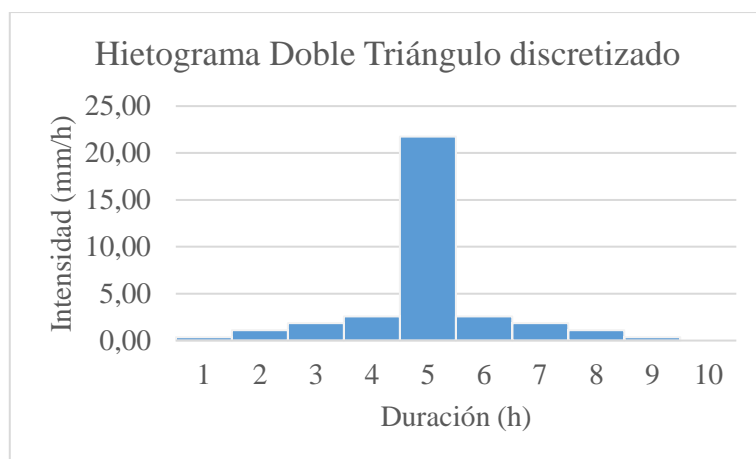


Figura 5.10 Hietograma doble triángulo discretizado c/1h para (D=10h) y (T=73 años)

Fuente: Elaboración propia

5.5 Aplicación del hietograma de Sifalda

Para la construcción del hietograma de Sifalda, se han definido tres bloques principales conforme a la metodología descrita en el capítulo anterior (Figura 2.7), utilizando como base la intensidad obtenida de la curva I-D-F correspondiente a una duración de 10 horas y un período de retorno de 73 años. En la Tabla (5.3) se presentan las intensidades al inicio y al final de cada bloque, los intervalos de tiempo correspondientes, así como el volumen acumulado en cada segmento, calculado a partir del área bajo la curva del hietograma.

Tabla 5.3 Intensidades al inicio y el final de cada bloque, intervalos de tiempo y volumen acumulado.

Bloque	Ii (mm/h)	If (mm/h)	t (h)	Pacum (mm)	Pacum (%)
Bloque 1	0,64	4,29	2,50	6,16	14,11
Bloque 2	9,86	9,86	2,50	24,66	56,44
Bloque 3	4,29	0,86	5,00	12,86	29,45
				43,68	100,00

Fuente: Elaboración propia

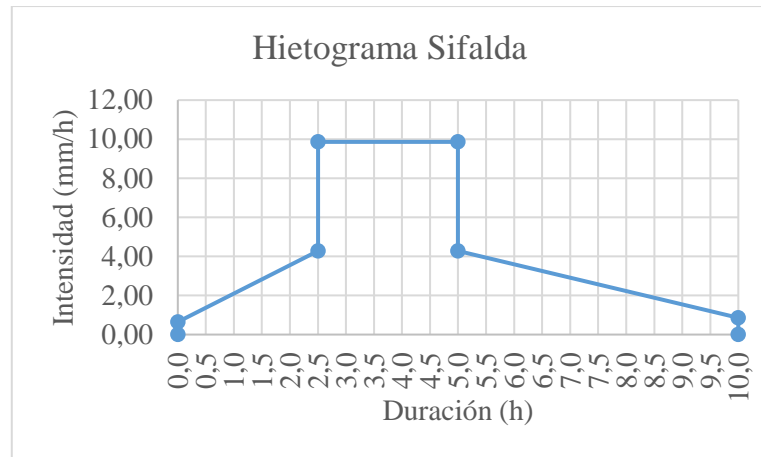


Figura 5.11 Hietograma de Sifalda para (D=10h) y (T=73 años)

Fuente: Elaboración propia

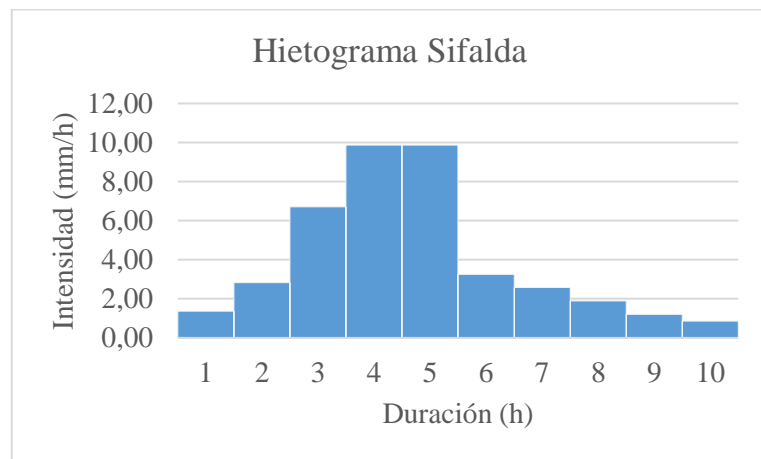


Figura 5.12 Hietograma de Sifalda discretizado c/1h para (D=10h) y (T=73 años)

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO VI. COMPARACIÓN Y SELECCIÓN DEL MÉTODO DE HIETOGRAMA MÁS APROPIADO

6.1 Intensidad máxima de precipitación

Una de las primeras variables clave a comparar entre los distintos métodos de generación de hietogramas es la intensidad máxima obtenida en cada uno. Con el objetivo de facilitar esta comparación, en la Figura (6.1) se representan gráficamente dichas intensidades junto con el valor promedio calculado entre ellas. Esta representación permite visualizar, de manera preliminar, cuáles métodos podrían resultar menos representativos o adecuados para simular eventos extremos de precipitación, especialmente en el contexto del diseño hidrológico.

El método doble triángulo y bloques alternos representa el escenario más extremo en cuanto a intensidad máxima, mientras que el rectangular se ubica en el otro extremo con la estimación más baja. Los restantes métodos ofrecen estimaciones más equilibradas entre simplicidad y realismo, destacándose como alternativas intermedias útiles para el diseño hidrológico en zonas donde se busca un equilibrio entre seguridad y optimización de costos. Esta diversidad de resultados justifica la aplicación comparativa entre métodos, como se plantea en la presente investigación, para evaluar su influencia en el cálculo de caudales máximos y en la definición de medidas de mitigación del riesgo hídrico.

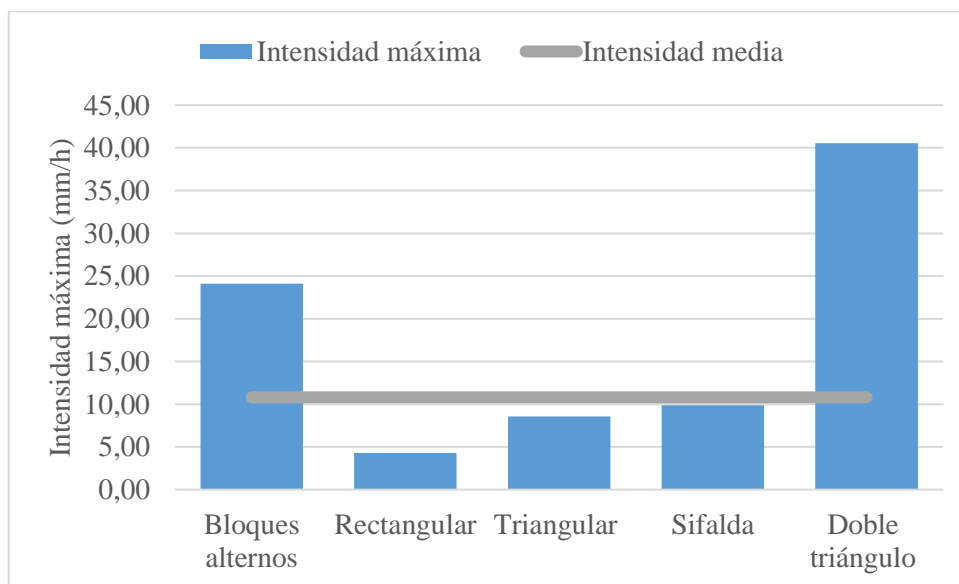


Figura 6.1 Comparación de intensidades máximas (mm/h) de distintos métodos

Fuente: Elaboración propia

6.2 Volumen de lluvia acumulado

La Tabla 6.1 presenta un resumen de los volúmenes totales acumulados obtenidos para cada uno de los métodos de generación de hietogramas empleados. En los métodos de Bloques Alternos, Rectangular y Triangular, se observa una coincidencia en los resultados, alcanzando un volumen total acumulado de 42,88 mm. Este valor corresponde directamente a la precipitación determinada a partir de la curva I-D-F para una duración de 10 horas y un período de retorno de 73 años, y refleja una aplicación directa del volumen total previsto en la curva, bajo el supuesto de que toda la lluvia significativa se concentra dentro del intervalo de diseño.

El método de Sifalda, en cambio, presenta un volumen acumulado ligeramente superior, alcanzando los 43,68 mm, lo que representa un incremento del 1,87% respecto al valor base. Este aumento se explica por la estructura del método, que considera la inclusión de precipitación antecedente y posterior al núcleo de máxima intensidad. De este modo, se consigue una representación más realista del evento completo, especialmente útil en contextos donde la precipitación no se concentra únicamente en un intervalo central, sino que se extiende en el tiempo con intensidades variables.

En cuanto al método Doble Triángulo, se obtiene un volumen acumulado de 55,35 mm, lo que representa un aumento del 29% en comparación con los métodos convencionales. Esta diferencia se debe a que este modelo distribuye la lluvia únicamente en torno al núcleo del evento, estructurado en dos fases (ascendente y descendente) en forma de triángulos consecutivos, sin considerar explícitamente la lluvia menos intensa que puede preceder o seguir al tramo principal. Esta simplificación puede ser válida para diseños rápidos o comparativos, pero debe ser cuidadosamente evaluada en aplicaciones donde se requiere precisión en el cálculo del volumen total precipitado.

En conjunto, estos resultados demuestran que la forma del hietograma influye de manera significativa en la estimación del volumen total de lluvia acumulada. Por tanto, la elección del método de generación del hietograma no debe tomarse a la ligera, ya que puede tener consecuencias directas en el dimensionamiento de infraestructuras hidráulicas y en la evaluación del riesgo hidrológico, particularmente en cuencas donde

la distribución temporal de la lluvia tiene un rol determinante en la respuesta hidrológica del sistema.

Tabla 6.1 Volúmenes acumulados para cada tormenta de diseño

Método	Volumen Acum. (mm)
Bloques alternos	42,88
Rectangular	42,88
Triangular	42,88
Sifalda	43,68
Doble Triángulo	55,35

Fuente: Elaboración propia

A partir del análisis gráfico de la Figura (6.2) de la precipitación acumulada en función del porcentaje de duración del evento, se observa que la mayoría de los métodos de hietogramas evaluados presentan una distribución con la forma característica de curva en "S". Esta morfología refleja un comportamiento típico en los eventos de precipitación natural, donde se identifican tres fases: un inicio con pendiente reducida (lluvias leves), una fase central más intensa (mayor pendiente) que concentra el grueso del volumen precipitado, y una fase final nuevamente con baja intensidad.

Sin embargo, existen dos excepciones notables a este comportamiento general. En primer lugar, el hietograma rectangular exhibe una acumulación lineal, como es de esperarse, ya que su construcción se basa en una distribución uniforme de la intensidad de lluvia durante todo el evento. Esto implica que el volumen de precipitación acumulado aumenta de forma constante a lo largo del tiempo.

En segundo lugar, el hietograma de bloques alternos se aparta también de la forma en "S". Esta distribución presenta una acumulación más rápida del volumen en los primeros tramos del evento, lo que se debe a que se ha construido con base en el primer cuartil de distribución promedio, el cual asume que el 50% del volumen total precipitado ocurre en los primeros 60 minutos del evento de 10 horas. Este comportamiento hace que la curva tenga una pendiente elevada desde el inicio, lo que lo distingue del resto de métodos evaluados.

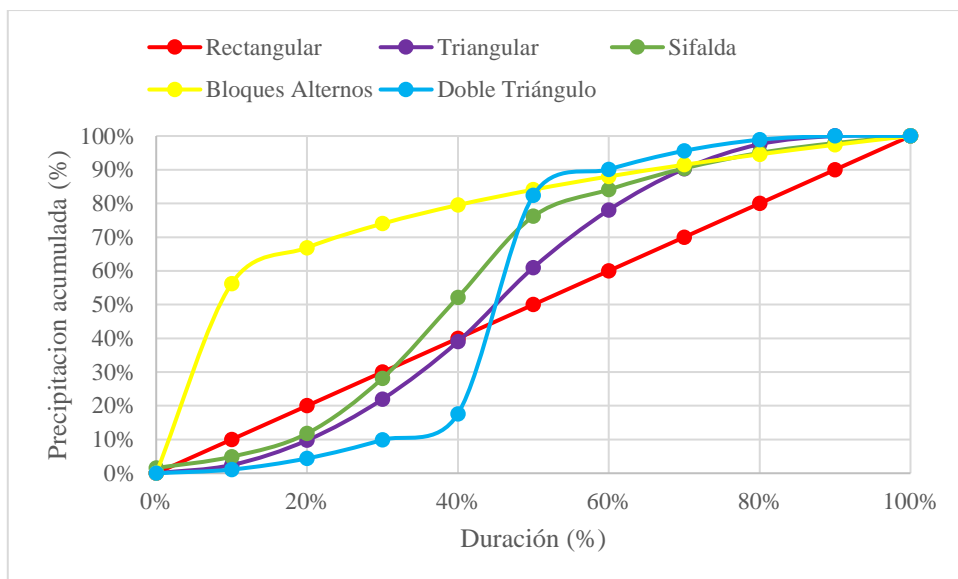


Figura 6.2 Volumen acumulado durante la duración del evento (%)

Fuente: Elaboración propia

6.3 Comparación entre los caudales simulados a partir de los hietogramas y el caudal aforado en la Cuenca del río Tupiza

6.3.1 Hidrogramas asociados a los hietogramas

Los hidrogramas serán generados individualmente para cada uno de los métodos considerados, ya que cada uno representa una distribución temporal distinta de la precipitación., lo cual influye directamente en la magnitud y forma del caudal generado. Los hietogramas construidos fueron digitalizados e incorporados al software HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) como insumo para la modelación hidrológica del evento de diseño.

Para la transformación de la precipitación en escorrentía, se empleó el método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS, por sus siglas en inglés), ampliamente reconocido por su aplicación práctica en cuencas rurales y semiurbanas. Este método requiere como parámetro principal el Número de Curva (Curve Number, CN), el cual fue determinado mediante el análisis del uso de suelo, cobertura vegetal y tipo de suelo en la cuenca, utilizando para ello los mapas temáticos generados por la plataforma ZONISIG (Proyecto de Zonificación Agroecológica y Establecimiento de una Base de Datos y Red de Sistema de Información Geográfica de Bolivia).

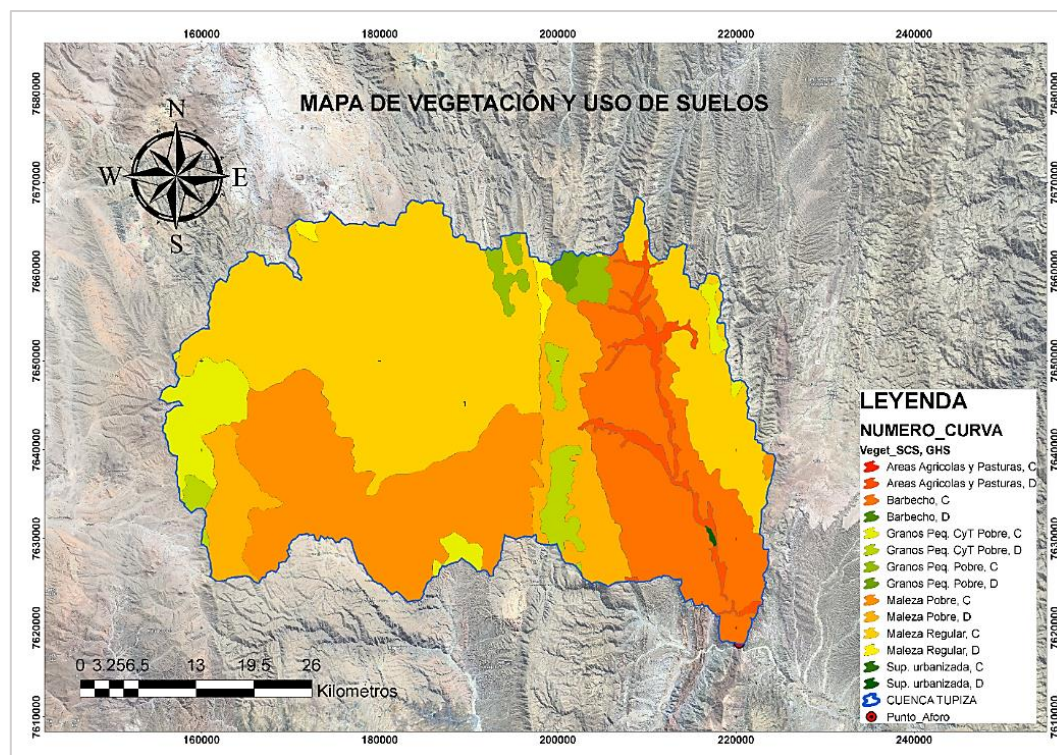


Figura 6.3 Mapa de vegetación y uso de suelos para la cuenca del río Tupiza

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.2 Número de curva ponderado para la cuenca del río Tupiza

FID	Vegetación_SCS	GHS	C_N	Area_Km ²	C_N * Área
0	Áreas Agrícolas y Pasturas	C	75	1,86	139,67
1	Áreas Agrícolas y Pasturas	D	83	59,06	4.902,00
2	Barbecho	C	91	380,62	34.636,16
3	Barbecho	D	94	1,73	162,96
4	Granos Peq. CyT Pobre	C	80	109,83	8.786,31
5	Granos Peq. CyT Pobre	D	83	57,01	4.732,08
6	Granos Peq. Pobre	C	80	39,98	3.198,56
7	Granos Peq. Pobre	D	83	10,06	835,17
8	Maleza Pobre	C	77	470,12	36.199,51
9	Maleza Pobre	D	83	232,29	19.279,66
10	Maleza Regular	C	70	933,69	65.358,13
11	Maleza Regular	D	77	12,90	993,13
12	Sup. urbanizada	C	91	0,02	1,67
13	Sup. urbanizada	D	91	1,20	109,28
Total				2.310,37	179.334,29
Número de curva ponderado					77,62

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, los demás parámetros de entrada necesarios para la simulación, tales como el área de la cuenca, pendiente media, tiempo de concentración, longitud del cauce principal y características geomorfológicas, fueron obtenidos mediante análisis del modelo digital de elevación (DEM), imágenes satelitales y datos disponibles de estaciones hidrometeorológicas de la región presentados en la Tabla (3.1). Estos insumos permitieron una caracterización hidrológica precisa del sistema.

La implementación de los diferentes hietogramas en HEC-HMS permitió evaluar la sensibilidad del caudal pico y del volumen escurrido frente a la variación en la distribución temporal de la precipitación, constituyéndose en una herramienta clave para el análisis comparativo de metodologías en el diseño de tormentas representativas.

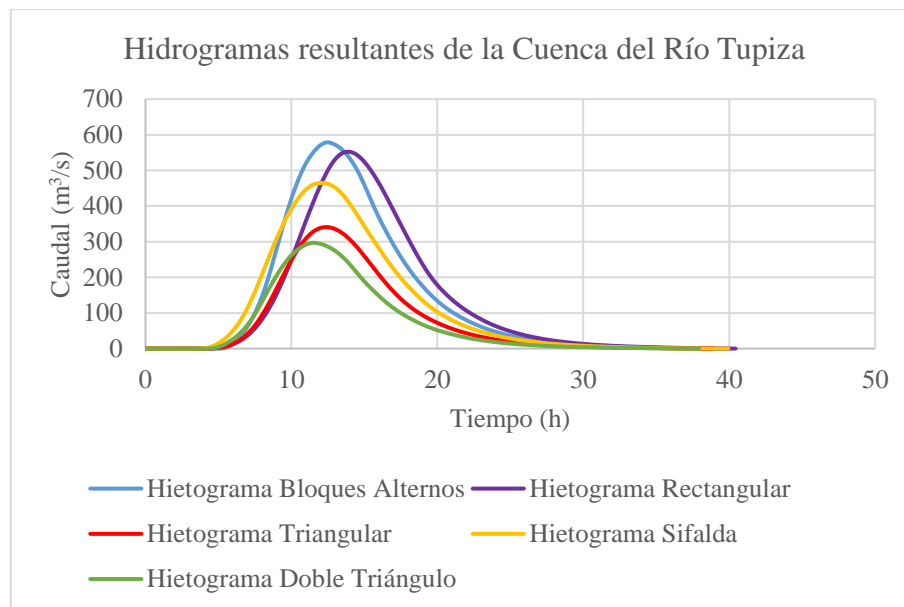


Figura 6.4 Hidrogramas resultantes de las tormentas de diseño para una ($D=10h$) y ($T=73$ años)

Fuente: Elaboración propia

La Tabla (6.3) presenta las características de los hidrogramas obtenidos para cada tormenta de diseño.

Tabla 6.3 Características de los hidrogramas

Características Hidrogramas		
Tormenta de diseño	Q_p	t_p
	m ³ /s	hh:mm
Bloques alternos	578,7	12:30
Rectangular	552,4	14:00
Triangular	340,9	12:30
Sifalda	464,7	12:00
Doble Triángulo	296,8	11:30

Fuente: Elaboración propia

Con el objetivo de evaluar la capacidad de representación hidrológica de los distintos métodos empleados para la generación de hietogramas de intensidad máxima, se procedió a comparar los caudales picos simulados mediante el modelo hidrológico HEC-HMS con un caudal aforado en la cuenca del río Tupiza.

Para cada hietograma generado (bloques alternos, rectangular, triangular, Sifalda y doble triángulo) se utilizó el mismo modelo físico y parámetros de entrada hidrológicos, asegurando así que las diferencias en los caudales obtenidos fueran exclusivamente atribuibles a la distribución temporal de la lluvia.

Los resultados fueron contrastados con un valor de caudal máximo observado durante un evento de precipitación significativo registrado en la cuenca, el cual se considera representativo del comportamiento hidrológico del área en condiciones extremas.

Esta comparación permite identificar qué hietograma genera una respuesta hidrológica más cercana a la realidad medida, considerando la morfología de la cuenca, su régimen pluviométrico y las características de escorrentía superficial. Dicho análisis resulta fundamental para seleccionar el método más adecuado en futuras aplicaciones de diseño hidrológico o planificación de obras de drenaje.

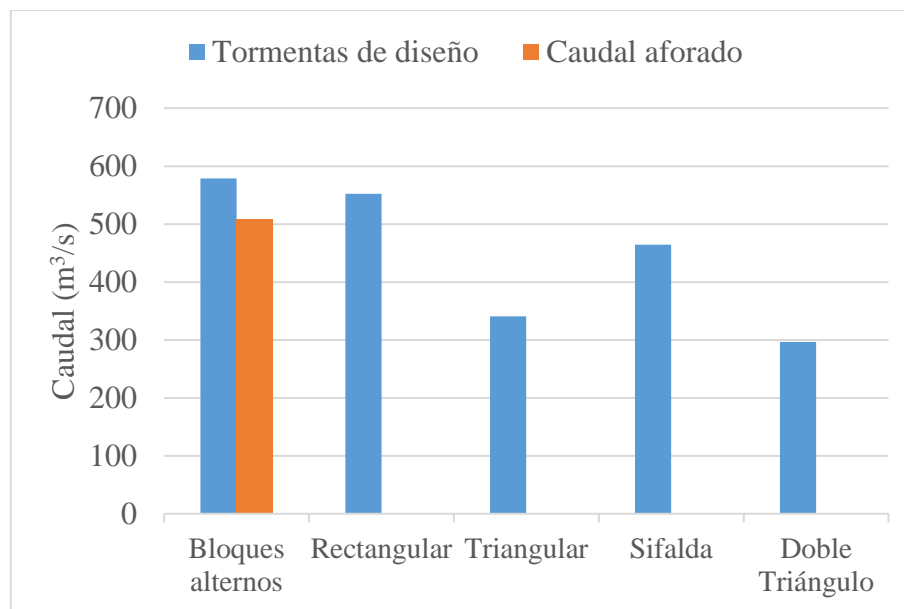


Figura 6.5 Caudales asociados a las tormentas de diseño para (T=73 años)

Fuente: Elaboración propia

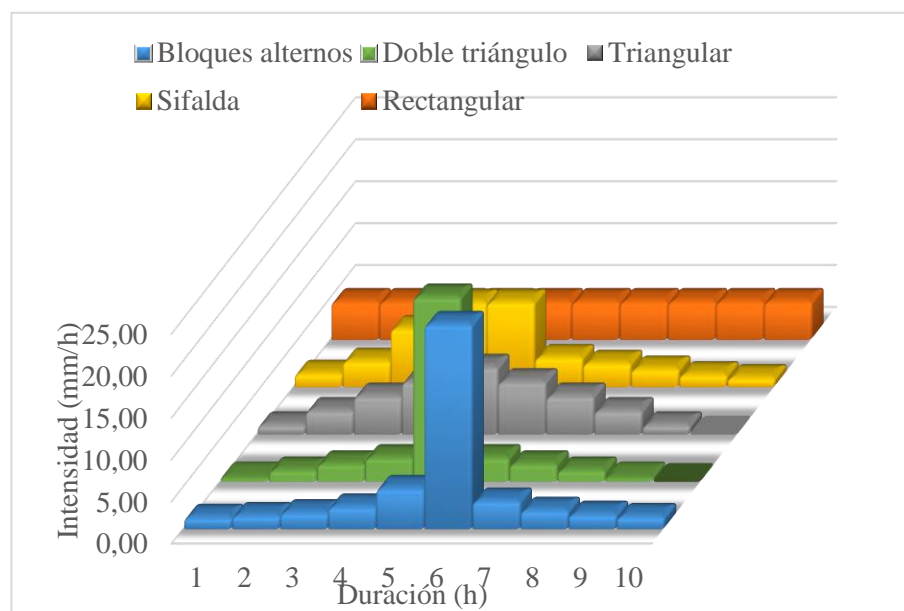


Figura 6.6 Hietogramas de diseño para una (D=10 h) y (T=73 años)

Fuente: Elaboración propia

6.3.1.1 Bloques alternos

Intensidad máxima: 24,11 mm/h

- Caudal generado: 578,7 m³/s

Comentario:

Este método presenta una alta concentración de lluvia en el centro del evento, lo que generó el caudal pico más elevado entre todos los métodos evaluados. Aunque sobreestimó el caudal real (508,2 m³/s), con una diferencia de (13,8%), por lo que puede considerarse como una opción conservadora y representativa para diseño. Es el método que mejor se aproxima al evento extremo registrado, lo que es consistente con tormentas orográficas frecuentes en zonas de montaña.

6.3.1.2 Rectangular

- Intensidad máxima: 4,29 mm/h
- Caudal generado: 552,4 m³/s

Comentario:

A pesar de presentar la menor intensidad máxima, este método generó un caudal elevado, cercano tanto al valor aforado (508,2 m³/s) como al estimado mediante el método de bloques alternos con una diferencia del (8,7%) respecto al caudal aforado. Este comportamiento se explica porque la lluvia se distribuye uniformemente durante las 10 horas de duración, lo que resulta en un volumen total significativo. No obstante, esta condición es poco representativa de eventos naturales, donde la precipitación suele ser variable y concentrada en ciertos momentos. Como consecuencia, este enfoque puede sobreestimar el volumen efectivo y producir hidrogramas de respuesta más extendida, lo cual no resulta ideal para evaluar con precisión el instante crítico del caudal pico. Sin embargo, su simplicidad y carácter conservador lo hacen útil en etapas tempranas de diseño, como el predimensionamiento de obras hidráulicas, o en análisis de beneficio-costos donde se prioriza la estimación global del volumen sobre la caracterización exacta del pico de escorrentía.

6.3.1.3 Triangular

- Intensidad máxima: 8,58 mm/h
- Caudal generado: 340,9 m³/s

Comentario:

Este método presenta una evolución más progresiva del evento, con un solo pico al centro. Su intensidad y volumen son más moderados, lo que resultó en un caudal significativamente menor al caudal aforado (−33%). Aunque su forma se asemeja a muchas tormentas reales, la subestimación del caudal lo hace poco confiable como base para diseño en esta cuenca.

6.3.1.4 Sifalda

- Intensidad máxima: 9,86 mm/h
- Caudal generado: 464,7 m³/s

Comentario:

Representa una lluvia con intensidad creciente hacia el final, típica de tormentas de avance lento. Aunque no alcanzó el caudal aforado, su aproximación fue razonable (−8,6%), lo que la convierte en una alternativa intermedia válida. Útil para estudiar drenajes con sensibilidad a eventos tardíos.

6.3.1.5 Doble triángulo

- Intensidad máxima: 40,55 mm/h (la más alta)
- Caudal generado: 296,8 m³/s

Comentario:

A pesar de tener la mayor intensidad puntual, este método generó el caudal más bajo de todos los evaluados (−42% respecto al aforado). Esto indica que el método concentra demasiado la lluvia en pocas horas, sin sostener el volumen total necesario para simular el evento real. En este caso, una intensidad muy alta no garantizó un caudal realista.

Los resultados obtenidos en este estudio revelan que el método de bloques alternos es el que mejor reproduce el caudal pico observado durante el evento hidrológico más extremo registrado en la cuenca. El valor estimado de 578,7 m³/s representa un error relativo del 13,8% respecto al valor observado de 508,2 m³/s, lo cual es notable considerando la incertidumbre asociada a eventos extremos. Este resultado refuerza su validez práctica y su capacidad predictiva para esta región.

Dado que los eventos de diseño derivados del método de bloques alternos tienden a sobreestimar el caudal pico respecto a otros métodos más suavizados (triangular, Sifalda y doble triángulo), su uso garantiza un margen de seguridad en el diseño de infraestructuras hidráulicas, como alcantarillas, canales y defensivos, que deben resistir crecidas extremas.

El método Rectangular, por su parte, también representa una alternativa válida dada su cercanía al caudal aforado y su simplicidad de aplicación. Los demás métodos pueden utilizarse para análisis comparativos o estimaciones preliminares, pero deben aplicarse con cautela en diseños definitivos donde la precisión del caudal pico es crítica.

CAPÍTULO VII.

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

En el presente trabajo se pudo cumplir con la finalidad general para comparar y analizar diversos métodos de cálculo de hietogramas de máxima intensidad de diseño a partir de curvas I-D-F con la finalidad de determinar el método más apropiado para su implementación en la cuenca del río Tupiza. Se utilizaron cinco métodos reconocidos a la fecha en la literatura técnica: método de bloques alternos, rectangular, triangular, Sifalda y doble triángulo desarrollados a partir de curvas I-D-F ajustadas a tres estaciones pluviométricas representativas del área.

La elaboración de las curvas I-D-F para diferentes períodos de retorno marcó la base fundamental para la elaboración de los hietogramas de diseño. Dichas curvas se obtuvieron a partir del tratamiento a series pluviométricas históricas utilizando métodos de ajuste estadístico que permitieron la definición de la ecuación de intensidad y el cálculo de las precipitaciones a las diferentes duraciones.

Los hietogramas desarrollados se evaluaron y compararon bajo parámetros técnicos definidos y se destacan: la máxima intensidad del evento, el volumen acumulado de precipitación de diseño y el caudal pico asociada al hidrograma resultante y el cual se contrajo con un caudal máximo aforado en la respectiva cuenca asociada a un período de retorno de 73 años.

Se realizó la comparación manteniendo constantes las condiciones de duración y período de retorno y lo cual le permitió el análisis equitativo del método. Los resultados difirieron notablemente frente a la forma y magnitud a la cual se simuló el evento a través de los métodos considerados. El método de los bloques alternos se presentó como la más idónea para las condiciones a la cuenca del río Tupiza al lograr reproducir con más regularidad la intensidad pico esperada, un volumen acumulado representativo y un caudal pico hidrológicamente consistente con el observado en campo. Por otra parte, su configuración temporal resulta muy acertada en cuencas como la del Tupiza, con pendientes altas, respuesta rápida a la precipitación y poca disponibilidad pluviográfica.

Por último, se concluye que el método de los bloques alternos es una herramienta fiable y técnicamente apropiada para la preparación de hietogramas de proyecto en trabajos hidrológicos o de infraestructura hidráulica en la cuenca del río Tupiza al

combinar precisión, facilidad en su aplicación y consistencia con las condiciones físicas e hidrometeorológicas del área.

7.2 Recomendaciones

Es recomendable utilizar el método de bloques alternos como método principal para la obtención de hietogramas de diseño en la cuenca río Tupiza y en cuencas hidrología similar. Este ha demostrado ser más adecuado para reproducir la máxima intensidad observada y el caudal pico observado, por ser una opción fiable y robusta en condiciones limitadas de información pluviográfica.

Es necesario ampliar y modernizar la red pluviométrica dirigida a la cuenca del río Tupiza a través de la instalación de pluviógrafos automáticos. A través de esta actividad se podrá realizar registros de precipitación con alta resolución temporal y se favorecerá la calibración y validación respectivos producidos.

Es necesario replicar el enfoque metodológico del presente trabajo a otras cuencas andinas con características climáticas y geomorfológicas similares. A través de esto se podrá verificar la validez del método de bloques alternantes para otros ambientes y aportar a la generalización del uso en planeación y diseño hidráulico.

Para ampliar la indagación de la respuesta hidrológica en la cuenca se recomienda la inclusión de herramientas hidrológicas de simulación distribuida tales como SWAT o HEC-HMS. Estas herramientas seguirán a la simulación más realista del comportamiento de la escorrentía y la evaluación sensibilidad del caudal pico a las variaciones en el campo temporal de la precipitación.

Es aconsejable realizar análisis de sensibilidad e incertidumbre al seleccionar hietogramas a la escala del diseño a utilizar en casos con series históricas cortas o huecos en la información. Esto ayudará a determinar márgenes de seguridad adecuados y a reforzar la confianza en la obra hidráulica de diseño.