

04-019

### **HYDROLOGICAL STUDY TO DETERMINE MAXIMUM FLOW IN THE SAN PEDRO RIVER BASIN IN THE CITY OF TARIJA, BOLIVIA**

Aldana Flores, Diego Aníbal (1); Leigue Fernández, María Alejandra (1)

(1) Universidad Católica Boliviana

With the present investigation, the values of maximum flows and the height that these can reach for different return periods were obtained during a rainstorm or extreme event in a section of analysis the area of the San Pedro basin, city of Tarija-Bolivia. These values have been obtained by means of a statistical-probabilistic process, through empirical equations and the use of geographic information software (GIS). For data analysis, the GIS ArcMap 10.3 delimiting the study area at the intersection of the central axis of the San Pedro River with the alignment of the "Second Ring Road of the City of Tarija" project, establishing the intersection as the closing point with which the delimitation of the basin was defined to determine its drainage network and find its contribution limits. The hydraulic analysis and the calculation of the height levels that the flows can reach was carried out by modeling in HEC-RAS, from the export of ArcMap 10.3 data to obtain the levels of the head of each flow in the return periods. It was determined that the basin is in equilibrium phase, of oblong rectangular shape that tends to have a slow reaction and regular drainage to precipitation events.

Keywords: hydrological study; maximum flows; geographic information systems

### **ESTUDIO HIDROLÓGICO PARA DETERMINACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO DE LA CIUDAD DE TARIJA, BOLIVIA**

Con la presente investigación se obtuvieron los valores de caudales máximos y la altura que estos pueden alcanzar para distintos periodos de retorno, durante una tormenta de precipitación o evento extremo en una sección de análisis del área de la cuenca San Pedro, ciudad de Tarija-Bolivia. Estos valores han sido obtenidos mediante un proceso estadístico-probabilístico, a través de ecuaciones empíricas y el uso de software de información geográfica (SIG). Para el análisis de los datos se utilizó SIG ArcMap 10.3 delimitando la zona de estudio en la intersección del eje central del río San Pedro con el alineamiento del proyecto "Segunda Circunvalación de la Ciudad de Tarija", estableciendo la intersección como punto de cierre y determinando su red de drenajes y límites de aporte. El análisis hidráulico y cálculo de los niveles de la altura que pueden alcanzar los caudales se realizaron mediante modelación en HEC-RAS, a partir de la exportación de los datos del ArcMap 10.3 obteniendo niveles de tirante de cada caudal en los periodos de retorno. Se determinó que la cuenca que se encuentra en fase de equilibrio, de forma rectangular oblonga que tiende a tener una reacción lenta y un drenaje regular ante eventos de precipitación.

Palabras clave: estudio hidrológico; caudales máximos; sistemas de información geográfica.

Correspondencia: María Alejandra Leigue Fernández

aleigue@ucb.edu.bo



©2022 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente en Bolivia no se cuenta con una planificación de riesgos en particular los referidos al problema de inundaciones por agua escurrida, por lo que el presente trabajo de investigación pretende realizar un estudio hidrológico para proyectar el comportamiento de un área delimitada ante las precipitaciones pluviales, con información sistematizada y actualizada de la zona de estudio: la cuenca de San Pedro ubicada en el municipio de Cercado, aproximadamente a diez kilómetros de la ciudad de Tarija -Bolivia. La cuenca de San Pedro está conformada, principalmente, por quebradas y pequeños ríos que alimentan su cauce principal.

En los últimos años, Tarija se ha visto afectada por precipitaciones intensas durante periodos cada vez más reducidos. Esta situación climática ocasiona una gran acumulación de agua en los cauces, que podrían desbordarse y causar daños a la población aledaña. a pesar de ello, los estudios realizados a la cuenca San Pedro son escasos y están desactualizados porque se la considera pequeña en comparación a otras cuencas cercanas; sin embargo, si consideramos los antecedentes históricos de la cuenca, evidenciamos que tuvo varios desbordes.

Además, con el crecimiento demográfico acelerado de la ciudad las autoridades se han visto motivadas a impulsar proyectos de impacto para disminuir el riesgo de las poblaciones aledañas a sufrir daños, debido a las crecidas de los cauces en la cuenca. Es así, que se ha previsto para la ciudad de Tarija la construcción de una avenida denominada segunda circunvalación la cual cruzará el río principal de la cuenca San Pedro (El Periódico, 2021).

Los estudios hidrológicos son fundamentales para el diseño de obras hidráulicas, el correcto conocimiento del comportamiento hidrológico de un río, arroyo o un lago es fundamental para establecer áreas vulnerables a los eventos meteorológicos extremos y para prever un correcto diseño de infraestructura vial (camino, carreteras, ferrocarriles, etc.)

Según el manual técnico para el diseño de carreteras (Administradora Boliviana de Carreteras) debe haber un estudio hidrológico para obtener datos, parámetros, completos y coherentes para poder establecer un futuro proyecto de drenaje ya sea un puente o una alcantarilla, en una zona de riesgo y necesidad para la población.

Por lo expuesto, la hipótesis de esta investigación hidrológica está basada íntegramente en los registros históricos climatológicos y actualizados de las estaciones pluviométricas, que se encuentran cercanas al área de estudio; además de la utilización de sistemas de información geográfica, que permiten predecir las ocurrencias de crecidas máximas para diferentes periodos de retorno.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

Realizar un estudio hidrológico de la cuenca San Pedro de la ciudad de Tarija en Bolivia, con la finalidad de establecer los caudales y tirantes máximos en el punto de análisis; mediante la utilización de métodos empíricos y aplicación de herramientas SIG, utilizando todos los datos actualizados y disponibles del área de estudio

### 2.2. Objetivos Secundarios

- Establecer un punto de cierre conveniente que delimite la cuenca y obtener las características morfométricas del área de estudio para la evaluación del proceso de transformación lluvia/escorrentía en la zona de estudio; mediante el empleo de software con herramientas SIG.

- Determinar la confiabilidad de la información meteorológica, obtenida mediante la realización de pruebas estadísticas probabilísticas de ajuste.
- Aplicar herramientas SIG para elaborar un álgebra de mapas, que determinen el coeficiente de escorrentía en base a las características del suelo del área de estudio.
- Determinar la precipitación media y precipitaciones máximas en el área de estudio para los distintos tiempos de retorno.
- Realizar el trazado de las curvas intensidad, duración y frecuencia de la cuenca.
- Realizar un análisis hidráulico del cauce del río San Pedro en un punto conveniente, donde los resultados sean de utilidad en un futuro.

### **3. METODOLOGÍA Y/O CASO DE ESTUDIO**

En esta investigación se propuso obtener todos los parámetros y características de la cuenca San Pedro; para que con los mismos se pueda calcular los caudales máximos para los periodos de retorno y tirantes máximos.

Para lograr estos objetivos se procedió a elaborar una metodología donde tenemos que cumplir 4 aspectos importantes en el proceso de la investigación, estos son:

#### **Metodología Secuencial para el cálculo de los caudales máximo y tirantes máximos**

- 1) Obtencion y recopilacion de todos los datos disponibles necesarios y actualizados a traves de instituciones y base de datos actualizadas y verificadas a nivel tecnico-gubernamental
- 2) Mediante el uso de un software SIG obtener los parámetros morfométricos de la cuenca en estudio para determinar el Tiempo de concentración, el Coeficiente de escorrentía y la Precipitación Media de la Cuenca
- 3) Mediante la utilizacion de los registros pluviometricos, determinar por la metodologia mas conveniente, el calculo de la Intensidad de precipitacion en la cuenca y el trazado de las Curvas Intensidad Duracion Frecuencia (I-D-F)
- 4) Utilizando la intensidad de precipitacion, realizar el calculo de los caudales maximos esperados en la cuenca para un periodo de retorno de 200 años y estimar el Tirante maximo que pueda alcanzar dicho caudal.

#### **3.1 RECOPIACION DE INFORMACION**

Se utilizo el software SIG (Sistema de Información Geografica), que es un conjunto de hardware y software diseñado específicamente para la almacenar, consultar, analizar y presentar todo tipo de información geográfica (González, 2008), se trata de una base de datos espacial. Al cumplir con los requerimientos para la presente investigación, se escogio el software ArcGIS como herramienta para poder integrar y procesar toda la información que se requiera en nuestra investigación.

Los Modelos Digitales de Elevación (DEM) fueron extraídos de la Infraestructura de Datos Espaciales de nuestro país (IDE-EPB), que a través de su plataforma GeoBolivia (Borries, s.f.) es posible descargar los DEM referidos a nuestra zona de estudio, correspondientes a la zona 20S con una resolución espacial de 30x30 metros.

Los registros pluviométricos se los obtuvieron del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI, s.f.) que es la institución gubernamental de llevar un registro histórico de las precipitaciones en nuestro país.

Y se estableció que el punto de cierre de la cuenca será entre la intersección del alineamiento del proyecto carretero denominado segunda circunvalación y el cauce principal de la cuenca de estudio, por lo que los resultados serán de gran ayuda para establecer los correctos criterios de construcción y proyectar zonas de riesgo de la población aledaña.

### 3.2 OBTENCIÓN DE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA

El análisis de las características morfométricas y funcionales de una cuenca hidrográfica a través de parámetros de forma, relieve y red de drenaje es básico en la modelación hidrológica para determinar el movimiento y captación de lluvia (Fernanda J. Gaspari et al. 2012). Empleando el software ArcGIS se comenzó a realizar los geoprocursos en nuestro DEM. Los principales geoprocursos fueron los de transformación, corrección y delimitación de la cuenca. La transformación de nuestro DEM es necesaria para poder trabajar en un sistema de coordenadas UTM y no geográficas como está en la IDE-EPB (coordenadas geográficas) para una mejor interpretación y manejo de los resultados. La corrección del DEM se realizó para rellenar píxeles vacíos de la imagen mediante interpolaciones. Para el análisis de delimitación de la cuenca se estableció un punto de cierre estratégico de análisis, del cual a partir de ese punto se generaron las redes de drenaje existentes en la cuenca hasta encontrar su parteaguas. Con la cuenca delimitada se procedió a encontrar las principales características morfométricas.

El tiempo de concentración es el tiempo necesario para que toda la cuenca aporte eficazmente a la generación de flujo en el sitio de desagüe (Chow, 1994). Se escogieron varios autores y se determinó el promedio de todas las ecuaciones que satisfacen nuestras características morfométricas. Utilizando el Área (A), Pendiente (J), Longitud de cauce (Lc) y el Desnivel (H) se procedió al cálculo del tiempo de concentración de nuestra cuenca.

Para determinar el Coeficiente de escorrentía se utilizaron los coeficientes de escorrentía propuestos por Prevert en base al uso del suelo (Treviño, 2002). Para poder obtener valores reales, se descargaron desde GeoBolivia los mapas que contengan información respecto a las variables que propone Prevert para determinar el coeficiente. Estos mapas fueron de Tipo de Cobertura Vegetal, Tipo de Suelo y con el DEM se realizó un mapa de Pendientes.

Utilizando el geo proceso Map Algebra en ArcGIS se procedió a trabajar en estas variables; las mismas que fueron codificadas de manera estratégica para poder realizar una mejor interpretación de los resultados, así mismo se obtuvo el coeficiente de escorrentía utilizando la ecuación del coeficiente ponderado. Obteniendo los valores expresados en la Tabla 3.

$$C = \frac{\sum C_i * A_i}{\sum A_i} \quad (1)$$

Para la precipitación media de la cuenca se realizó un análisis de las estaciones y cuáles de ellas tenían influencia en nuestra cuenca por lo que se realizó el método recomendado de los Polígonos de Thiessen (Administradora Boliviana de Carreteras). De las estaciones que tienen influencia en nuestra cuenca se utilizaron los valores de las precipitaciones medias anuales y se procedió a calcular la precipitación media de la cuenca evaluada bajo la siguiente expresión. Los resultados se expresan en la Tabla 4.

$$P_{med} = \frac{\sum A_i * P_i}{A} \quad (2)$$

### 3.3 OBTENCIÓN DE LAS CURVAS IDF

La forma más común de realizarlo es utilizar una tormenta de diseño que involucre la relación entre la intensidad, la duración, frecuencias apropiadas para la obra y sitio (Chow, 1994).

Análisis de Frecuencia. - El cálculo debe abarcar 200 años (Administradora Boliviana de Carreteras) y de requerirse de una visión más amplia del comportamiento de la cuenca y de la serie de caudales máximos que se podrían generar las tormentas, se consideró realizar un análisis para 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años.

Modelo Probabilístico. – Siguiendo lo recomendado en la bibliografía de (Chereque, 1989) se utilizó el método de distribución de valores extremos Tipo I o Gumbel como modelo probabilístico.

$$7) \quad 8) \quad F(x, \mu, \alpha) = e^{-e^{-\left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)}} \quad 9) \quad (3)$$

con el método de los momentos para obtener los parámetros del modelo y la prueba de Kolmogorov-Smirnov aplicado al análisis de consistencia y ajustes de bondad de los datos a utilizar. Los resultados obtenidos indican que las estimaciones futuras obtenidas por esta serie de datos tendrán un error máximo de 5% porque se ajustan a una distribución de Gumbel.

Posteriormente se calcularon las precipitaciones máximas diarias (mm/día) para cada estación mediante la distribución de Gumbel. Estas precipitaciones son en 1 día y se debe convertir las precipitaciones en periodos menores a 24 horas por lo que se utilizaron los factores de reducción para lluvias menores a 24 horas propuestos por (Campos, 1998). Así de esta manera se encontraron las precipitaciones máximas en periodos de duración de 1,2,3,4,5,6,8,12,18 y 24 horas. Se aplicó una distribución por Thiessen a las precipitaciones para unificar y encontrar las precipitaciones máximas en nuestra cuenca de estudio.

Con las precipitaciones máximas se procedió al cálculo de las intensidades de precipitación de la cuenca dividiendo las precipitaciones máximas entre el tiempo de duración de lluvia (horas). Utilizando la ecuación de Intensidad de precipitación (Administradora Boliviana de Carreteras) donde intervienen la variable de tiempo de concentración y el periodo de retorno:

$$1) \quad 11) \quad I = \frac{K * T^m}{t^n} \quad 12) \quad (4)$$

Y donde “k”, “m” y “n” son constantes encontradas mediante una regresión potencial de los valores obtenidos por ser el método de regresión que mejor se adapta a la hidrología. La ecuación característica de la regresión potencial es:

$$1) \quad 14) \quad y_c = a * x^b \quad 15) \quad (5)$$

Por lo que se realizó un cambio de variable en nuestro dividendo para ajustar la ecuación a la forma de la ecuación característica de la regresión potencial, obteniendo:

$$1) \quad 17) \quad d = K * T^m \quad 18) \quad (4.1)$$

Entonces se obtiene:

$$1) \quad 20) \quad I = \frac{d}{t^n} \xrightarrow{\text{entonces}} I = d * t^{-n} \quad 21) \quad (4.2)$$

Por lo que se debe realizar la regresión potencial entre la intensidad encontrada y la duración de precipitación en minutos para encontrar los valores de “d” y “n”, con estos valores se simplifica encontrar las constantes “K” y “m” porque se aplica otra regresión entre el Periodo de Retorno y el valor de “d” para determinar la ecuación de intensidad de la cuenca. En la ecuación (6) se desarrolla la ecuación de Intensidad de Precipitación de la Cuenca San Pedro.

### 3.4 CALCULO DEL CAUDAL MÁXIMO Y TIRANTE MÁXIMO

Teniendo las intensidades para cada periodo de retorno y el coeficiente de escorrentía se procedió a calcular los caudales máximos con la ecuación del método racional (Bejar, 2002).

$$23) \quad Q = \frac{C.I.A}{360} \quad (24) \quad (5)$$

Los caudales máximos encontrados se expresan en la tabla 6

Para poder determinar los tirantes máximos se utilizó el software HEC-RAS con su extensión HEC-GEORASS para ArcGIS y poder exportar los datos necesarios de nuestro proyecto en ArcGIS al HEC-RAS.

El punto de análisis es el punto de cierre de la cuenca, ubicado estratégicamente entre el alineamiento de una avenida muy importante en nuestra región y el cauce de la quebrada principal de la cuenca de estudio. Exportados los datos se hizo correr el HEC-RAS y se obtuvieron los siguientes tirantes para cada periodo de retorno.

## 4. RESULTADOS

### OBTENCION DE LAS CARACTERISTICAS MORFOMETRICAS

Tabla 1

**Características Morfométricas de la Cuenca San Pedro**

Área (km <sup>2</sup> )	32,46
Perímetro (km)	31,92
Longitud cuenca (km)	11,87
Ancho de la cuenca	2,73
Relación elongación	0,54
Índice de corma	0,23
Coficiente de compacidad	1,58
Elevación mínima (m.s.n.m.)	1911
Elevación máxima (m.s.n.m.)	2649
Elevación media	2155,76
Pendiente media de la cuenca	27,93
Long. río principal (km)	13,03
Pendiente río principal (m/m)	0,027
Pendiente río principal (%)	2,66
Relación bifurcación	0,57
Tiempo de Concentración (Hrs.)	1,64

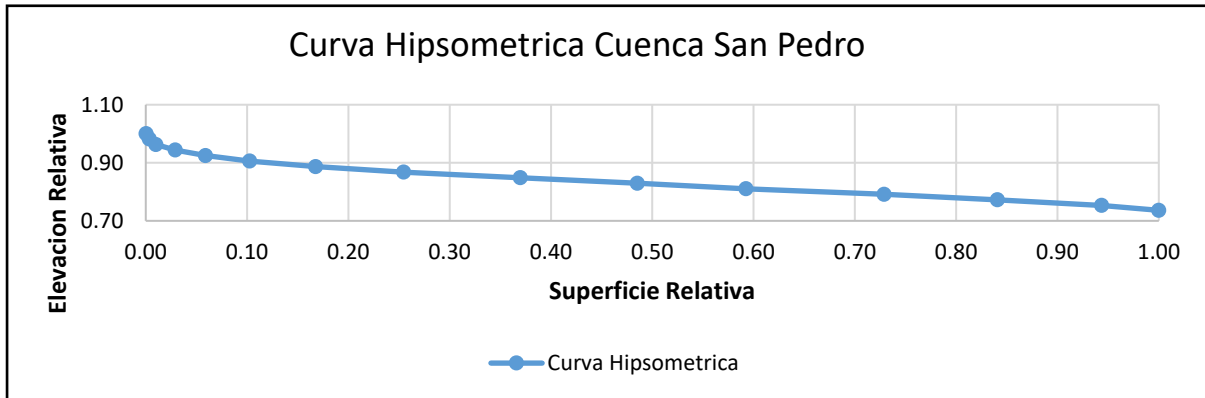
**Fuente: Elaboración Propia**

Como se mencionó en el punto 3.1 y 3.2 se puede interpretar según (Bejar, 2002) que con los resultados morfométricos obtenidos, se establece que la cuenca se encuentra en una fase de

equilibrio o etapa madura, la cuenca de estudio es una pequeña y en fase de equilibrio con un área de 32,46 km<sup>2</sup> y una longitud de 11,87 km. Sus cauces siguen un modelo dendrítico con una forma rectangular oblonga o alargada, esto reduce las probabilidades que la cuenca sea cubierta en su totalidad por una tormenta, figura 1.

**Figura 1**

### Curva Hipsométrica de la Cuenca San Pedro

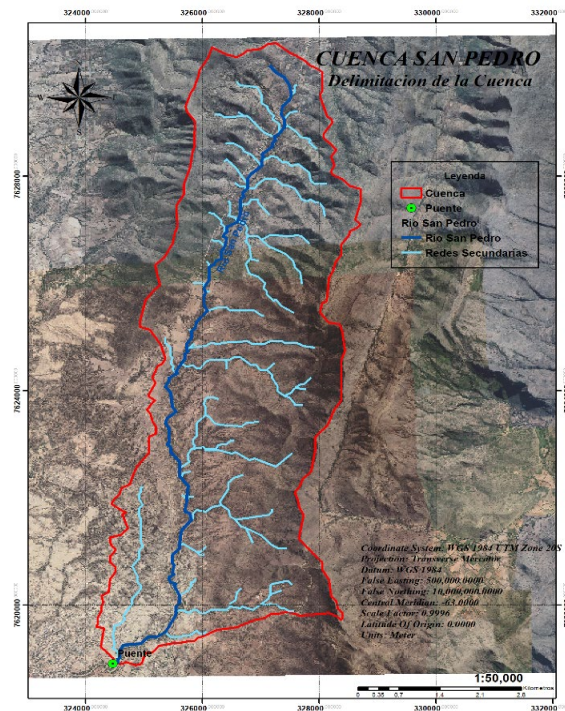


**Fuente: Elaboración Propia**

Asimismo, tiende a tener una reacción lenta y un drenaje regular ante estos eventos. En la figura 2 se puede apreciar la imagen satelital de la cuenca de estudio junto a su delimitación, el área de influencia y su cauce principal con sus cauces secundarios

**Figura 2**

### Delimitación de la Cuenca San Pedro



**Fuente: Elaboración Propia**

Siguiendo lo establecido en el punto 3.2 para la determinación del coeficiente de escorrentía se realizó un geo proceso en el software ArcMap denominado Map Algebra (por su nombre en inglés) en el cual se pueden realizar varias operaciones entre mapas que contengan información geográfica para poder obtener un mapa con los resultados que necesitamos encontrar.

Para este estudio primero se estableció que la bibliografía a utilizar sería los coeficientes de escorrentía propuestos por Prevert. Posteriormente se descargaron mapas de información geográfica desde GeoBolivia para cada variable que intervienen según Prevert para la determinación del coeficiente de escorrentía. Se descargó el mapa del Tipo de Cobertura Vegetal, el mapa del Tipo de Suelo y con los mapas ya existentes se procedió a encontrar un mapa de pendientes mediante geo procesos.

Obteniendo como resultado al Coeficiente de escorrentía ponderado de 0,42 para toda la cuenca.

**Tabla 2**

<b>Precipitación Media de la Cuenca</b>			
<b>Estación</b>	<b>Área de influencia (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Precipitación (mm)</b>	<b>Pi*Ai</b>
El Tejar	2,29	630,4	1443,00
Yesera			
Sud	7,33	448,7	3287,24
Aeropuerto	22,84	597,6	13652,08
<b>Total:</b>	<b>32,46</b>	<b>Suma:</b>	<b>18382,31</b>
<b>Precipitación media de la cuenca</b>			
<b>Pmed=</b>	<b>566,31</b>	<b>mm</b>	

**Fuente: Elaboración Propia**

La precipitación media se obtuvo aplicando el método de los Polígonos de Thiessen en el cual a través de geo procesos en ArcMap se pudo obtener las estaciones pluviométricas que tienen influencia en nuestra cuenca de estudio, además que con los datos de precipitación brindados por SENAMHI se determinó su precipitación media, con la precipitación media anual multiplicado por su área de influencia se determinó la precipitación media de la cuenca.

## **OBTENCIÓN DE LAS CURVAS I-D-F**

**Tabla 3**

### **Intensidad de Precipitación de la Cuenca San Pedro**

<b>Tiempo de duración</b>		<b>Intensidad de la lluvia (mm /hr)</b>							
<b>Hr.</b>	<b>min</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>200</b>	<b>500</b>
24	1440	2,392	3,020	3,435	3,960	4,349	4,736	5,121	5,629
18	1080	2,903	3,664	4,168	4,224	5,277	5,746	6,213	6,830
12	720	3,827	4,831	5,496	6,336	6,959	7,577	8,193	9,006
8	480	4,880	6,160	7,007	8,078	8,873	9,661	10,447	11,483
6	360	5,837	7,368	8,381	9,662	10,612	11,555	12,495	13,735
5	300	6,545	8,262	9,398	10,834	11,900	12,957	14,011	15,401
4	240	7,464	9,421	10,717	12,355	13,570	14,776	15,977	17,562



3	180	8,803	11,112	12,641	14,572	16,005	17,428	18,845	20,715
2	120	11,195	14,132	16,076	18,532	20,355	22,164	23,966	26,344
1	60	17,224	21,741	24,732	28,511	31,315	34,098	36,871	40,529

Fuente: Elaboración Propia

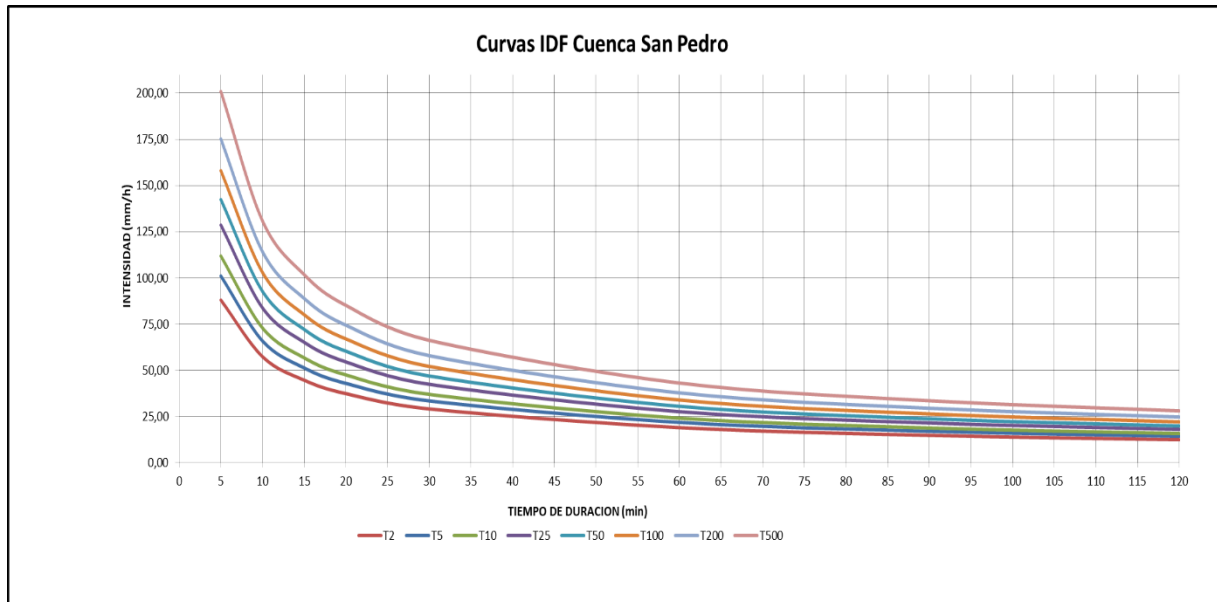
### Ecuación de Intensidad de la Cuenca San Pedro

$$26) \quad I = \frac{214,99 * T^{0,1494}}{t^{0,619}} \quad 27) \quad (6)$$

Para la obtención de las Intensidades de Precipitación en la cuenca se determinó un análisis de frecuencia de 200 años, pero para una visión más amplia del comportamiento de la cuenca y caudales que se podrían generar se consideró un análisis para 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 años. El modelo probabilístico que se empleo es el Método de Gumbel Tipo I con un análisis de consistencia de datos mediante la prueba de Kolmogorov – Smirnov. Con el método de Gumbel, se pudo encontrar las precipitaciones máximas en 24 horas por lo que se procedió a convertir a precipitaciones menores a 24 horas. Estas precipitaciones distribuidas en la cuenca nos permitieron encontrar las intensidades de precipitación de la cuenca (Tabla 5). Los parámetros de la ecuación modificada de Intensidad, se obtuvieron mediante el cambio de variable (ecuación 4.1, 4.2) para realizar una regresión potencial, siendo la ecuación 6 la ecuación de intensidad de nuestra cuenca de estudio.

Figura 3

### Curvas IDF de la Cuenca San Pedro



Fuente: Elaboración Propia

La figura 3 nos muestra las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia para nuestra cuenca de estudio. Cada línea representa un año distinto de retorno, establecidos previamente para 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 años para un mejor análisis del comportamiento de la cuenca.

## CAUDALES Y TIRANTES MAXIMO ESPERADOS DE LA CUENCA SAN PEDRO

Tabla 4

Periodo de retorno	Tiempo concentración		Intensidad mm/hr	Coef. Esco	Caudal m <sup>3</sup> /s
	Horas	Minutos			
2	1,64	99	13,9	0,42	53,157
5	1,64	99	15,9	0,42	60,952
10	1,64	99	17,7	0,42	67,600
25	1,64	99	20,3	0,42	77,514
50	1,64	99	22,5	0,42	85,969
100	1,64	99	24,9	0,42	95,346
<b>200</b>	<b>1,64</b>	<b>99</b>	<b>27,6</b>	<b>0,42</b>	<b>105,745</b>
500	1,64	99	31,7	0,42	121,253

Fuente: Elaboración Propia

Con base en la figura y o reemplazando en la ecuación de intensidad de nuestra cuenca, podemos determinar que para nuestro periodo de estudio necesario (200 años) se puede obtener un caudal esperado de 105, 75 m<sup>3</sup>/s.

Tabla 5

### Tirantes Máximos esperados en función al caudal calculado

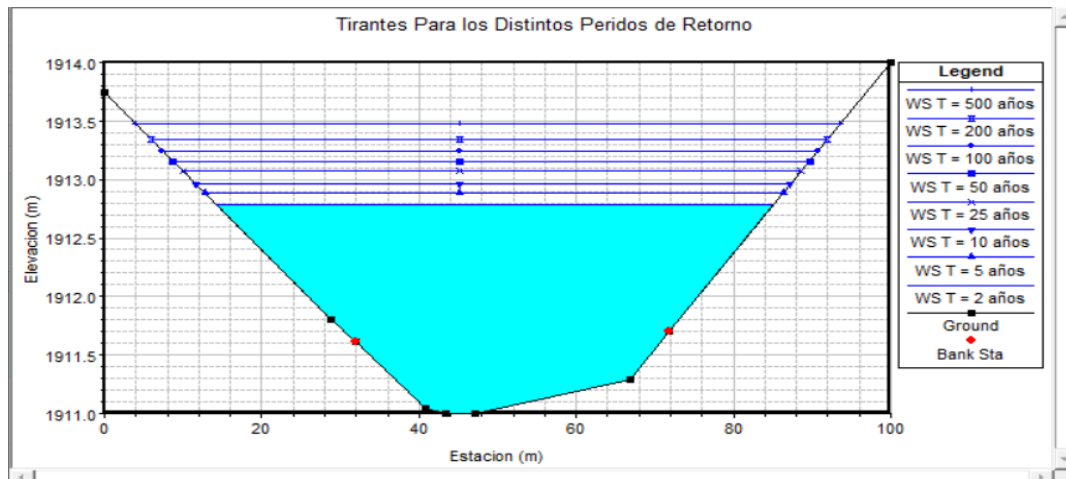
Periodo de Retorno	Caudal m <sup>3</sup> /s	Cota Pto. Aforo (m.s.n.m.)	Tirante (m)	Nivel (m.s.n.m.)
2	53,157	1911	1,8	1912,8
5	60,952	1911	1,9	1912,9
10	67,600	1911	1,95	1912,95
25	77,514	1911	2,05	1913,05
50	85,969	1911	2,15	1913,15
100	95,346	1911	2,25	1913,25
200	105,745	1911	2,35	1913,35
500	121,253	1911	2,45	1913,45

Fuente: Elaboración Propia

Con los caudales calculados se estableció una sección de análisis (tabla 5), siendo la misma el punto de cierre como punto recomendado para la construcción de un puente vehicular por lo que se esperan caudales entre 1,8m a 2,45m, estimando un tirante máximo para un periodo de retorno de 200 años de 2,35 metros desde el punto más bajo de la sección.

Figura 4

### Tirantes Máximos Esperados para los Periodos de Retorno, Cuenca San Pedro



Fuente: Elaboración Propia

La figura 4 nos muestra el resultado de la modelación del flujo en HEC-RAS para la cuenca de estudio en el punto de análisis donde se puede evidenciar los tirantes máximos previstos en los años de estudio.

## 5. CONCLUSIONES

- Después de realizar un análisis de los datos disponibles y actualizados, establecer una metodología adecuada para el manejo estadístico y el manejo de mapas con información geográfica en un software SIG se puede establecer que el caudal máximo esperado para la cuenca San Pedro en un periodo de retorno de 200 años es de 105,745 m<sup>3</sup>/s. con una probabilidad de ocurrencia del 99,5%, según la función de distribución de Gumbel.
- Para una futura construcción de una obra vial, obra de protección o de desagüe, se estableció que el punto de cierre sea entre el cauce principal de la cuenca de estudio y el eje principal del diseño geométrico de un proyecto de gran importancia para la región.
- Los resultados obtenidos del análisis de consistencia a la información recopilada permitió trabajar con datos de las estaciones, que tienen influencia en la cuenca al haberse ajustado a los modelos probabilísticos utilizados, lo cual brindó confianza en los resultados.
- Establecido el punto de análisis, se estableció una sección hidráulica para realizar el análisis hidráulico del cauce principal de la cuenca San Pedro, estableciendo que el tirante máximo, en la sección propuesta, para un periodo de retorno de 200 años es de 2,35 metros desde el punto más bajo de la sección analizada. Por lo que se recomienda una altura mínima de 4 metros para la realización de futuros proyectos tanto viales, como de protección y desagüe.



11 CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES



13 ACCIÓN POR EL CLIMA



15 VIDA DE ECOSISTEMAS TERRESTRES



La presente comunicación está alineada a los ODS 11: ciudades y comunidades sostenibles, puesto que el estudio hidrológico de una zona de estudio es posible identificar zonas de

riesgos de inundación y planificar obras de impacto, previniendo los futuros asentamientos informales. También está alienada el ODS 13: acción por el clima, ya que identifica una cuenca en fase de equilibrio, que al igual que muchas han sufrido cambios por las precipitaciones intensas y altas temperaturas, que se refleja en fenómenos meteorológicos más extremos, a consecuencia del cambio climático.

## 6. REFERENCIAS

- Administradora Boliviana de Carreteras, A. (s.f.). *Manual de Hidrología y Drenaje para el Diseño de Carreteras*. Administradora Boliviana de Carreteras, Bolivia.
- Bejar, M. V. (2002). *Hidrología*. Lima - Peru: Editorial Villon.
- Borries, E. G. (s.f.). *GeoBolivia*. Obtenido de <https://geo.gob.bo/portal>
- Campos, A. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Mexico.
- Chereque, M. W. (1989). Hidrología para estudiantes de Ingeniería Civil. En C. Wendor Moran, *Hidrología para estudiantes de Ingeniería Civil* (pág. 35). Lima, Peru: Pontificia Universidad Católica de Peru.
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santa Fe, Bogotá, Colombia: NOMOS S.A.
- El Periódico. (1 de Diciembre de 2021). *Alcaldía informa avances en la construcción de la Segunda Circunvalación de Tarija*. Obtenido de [elperiodico.com.bo](https://elperiodico.com.bo): <https://elperiodico.com.bo/>
- Fernanda J. Gaspari, A. M. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGMDOMUS - Asociación de Universidades Grupo Montevideo*, 16.
- González, J. L. (2008). *Consulta, Edición y Análisis Espacial con ArcGIS 9.2 TOMO I: TEORÍA*. Virginia Behm Chang.
- SENAMHI. (s.f.). *senamhi.gob.bo*. Obtenido de <https://senamhi.gob.bo/>
- Treviño, G. E. (2002). *Evaluación del Flujo Hídrico Superficial en la sierra de San Carlos, Tamaulipas*. Tamaulipas: UANL, VOL 4.