



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HIDRICA DEL RÍO HUANCANÉ**  
**MEDIANTE LA GENERACIÓN DE DESCARGAS MEDIAS**  
**MENSUALES APLICANDO EL MODELO DETERMINÍSTICO**  
**ESTOCÁSTICO DE LUTZ SCHOLZ**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. EDGAR BLANCO TORRES**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO AGRÍCOLA**

**PUNO - PERÚ**

**2020**



## DEDICATORIA

*A mi familia por su gran apoyo, comprensión y paciencia que contribuyeron a la culminación de mis estudios universitarios.*

*Mis padres Sergio, Fortuna y mis hermanos Yhonny, Efraín Clotilde, Hilda, Nidia, Elizabeth, de quienes siempre recibí su apoyo en los momentos difíciles y gratos.*

*En especial a mi esposa y mi hija Hillary Andrea.*

**EDGAR BLANCO**



## AGRADECIMIENTOS

A nuestra Alma Mater la Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería Agrícola, por darme la oportunidad de formarme como Ingeniero Agrícola.

A los docentes y personal administrativo de la Facultad de Ingeniería Agrícola, por sus enseñanzas y recomendaciones a cerca de la vida profesional como Ingeniero Agrícola.

A mis grandes amigos y compañeros de estudios.

***EDGAR BLANCO***



# ÍNDICE GENERAL

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTOS**

**ÍNDICE GENERAL**

**ÍNDICE DE TABLAS**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**ÍNDICE DE ACRÓNIMOS**

**RESUMEN ..... 9**

**ABSTRACT..... 10**

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

**1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA ..... 11**

**1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA ..... 12**

**1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN..... 12**

**1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN ..... 14**

1.4.1. Objetivo general. .... 14

1.4.2. Objetivos específicos. .... 14

## **CAPÍTULO II**

### **REVISIÓN DE LITERATURA**

**2.1. ANTECEDENTES..... 15**

**2.2. MARCO TEÓRICO ..... 17**



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO .....	52
3.2. PERIODO DE DURACIÓN DEL TRABAJO.....	56
3.3. PROCEDENCIA DEL MATERIAL UTILIZADO .....	56
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO .....	57
3.5. DISEÑO ESTADÍSTICO.....	57
3.6. VARIABLES .....	58
3.7. PROCEDIMIENTO .....	58
3.8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	58

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA AREAL.....	66
4.2. TEMPERATURA MEDIA MENSUAL EN LA CUENCA.....	69
4.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.....	69
V. CONCLUSIONES.....	87
VI. RECOMENDACIONES.....	88
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
ANEXOS.....	94

**Área** : Recursos Hídricos.

**Línea** : Recursos hídricos

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 17 de enero 2020.



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Ubicación de las estaciones meteorológicas.....	57
<b>Tabla 2.</b> Coeficientes de almacenamiento hídrico durante la época de lluvias. (valores de “ai” en %).....	64
<b>Tabla 3.</b> Precipitación media areal mensual (mm) – Estación Huancané.....	68
<b>Tabla 4.</b> Temperatura media mensual (°C) – Cuenca Huancane. ....	69
<b>Tabla 5.</b> Evapotranspiración potencial (mm/mes) .....	70
<b>Tabla 6.</b> Coeficiente de escurrimiento – Método Turc. ....	71
<b>Tabla 7.</b> Coeficiente de escurrimiento – Método empírico.....	71
<b>Tabla 8.</b> Precipitación efectiva según el Bureau of Reclamation (USBR) .....	73
<b>Tabla 9.</b> Coeficientes de regresión para las curvas de precipitación efectiva.....	73
<b>Tabla 10.</b> Precipitación efectiva mensual (mm) .....	76
<b>Tabla 11.</b> Gasto de la retención mensual (mm/mes).....	78
<b>Tabla 12.</b> Generación de caudales mensuales para el año promedio( $m^3/s$ ). ....	79
<b>Tabla 13.</b> Precipitación efectiva (mm) generada en la cuenca del río Huancane .....	81
<b>Tabla 14.</b> Números aleatorios generados con distribución normal.....	83
<b>Tabla 15.</b> Descargas medias mensuales generados (mm) – Cuenca Huancane. ....	84



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ciclo hidrológico global.....	22
<b>Figura 2.</b> Sistema hidrológico global en un diagrama de bloques.....	29
<b>Figura 3.</b> Modelo hidrológico.....	30
<b>Figura 4.</b> Cuenca del rio Huancané.....	53
<b>Figura 5.</b> Variación de la precipitación media mensual INEI.....	67
<b>Figura 6.</b> Ecuación polinómica de la precipitación efectiva de la curva I.....	74
<b>Figura 7.</b> Ecuación polinómica de la precipitación efectiva de la curva II.....	74
<b>Figura 8.</b> Ecuación polinómica de la precipitación efectiva de la curva III.....	75
<b>Figura 9.</b> Calibración de los caudales medios calculados y aforados.....	80
<b>Figura 10.</b> Serie de tiempo de los caudales aforados y generados de la cuenca del río Huancane.....	86



## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

- DRA** : Dirección Regional Agraria.
- MINAGRI** : Ministerio de Agricultura y Riego.
- SENAMHI** : Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.
- TDPS** : Titicaca, Desaguadero, Poopó y Salar de Coipaza.
- FAO** : Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la  
Agricultura.
- USBR** : US Bureau of Reclamation.
- PELT** : Proyecto Especial Lago Titicaca
- IGM** : Instituto Geográfico Militar



## RESUMEN

El trabajo de investigación tiene como objetivo estimar la oferta hídrica del río Huancané, mediante la generación de caudales medios mensuales aplicando el modelo determinístico-estocástico de Lutz, cuya metodología empleada es el siguiente: a) caracterización de la cuenca del río Huancané, b) obtención de información meteorológica e hidrométrica de las oficinas del servicio nacional de meteorología e hidrología con sede en Puno, c) modelamiento hidrológico mediante el modelo propuesto por Lutz Scholz, considerando primero la determinación del caudal mensual para el año promedio, luego realizar la calibración y segundo la generación de caudales mensuales para periodos extendidos. Los resultados obtenidos son: la precipitación media anual en la cuenca es de 659.9 mm, la evapotranspiración potencial anual es de 1272.42 mm, el coeficiente de escurrimiento estimado mediante el método de Turc es de 0.36, el coeficiente de correlación entre la serie de caudales generados y aforados es de 97.5 %; se concluye que el modelo matemático precipitación-escurrimiento del Lutz Scholz puede ser empleado para la generación de caudales en la cuenca del río Huancané tomando en cuenta que el régimen de aporte y almacenamiento que se produce dentro de las subcuencas tienen un comportamiento particular debido a la presencia de los Nevado y lagunas y se recomienda aplicar esta metodología para otras cuencas de la región

**Palabras clave:** Caudal, cuenca, Huancané, Lutz Scholz, oferta hídrica, precipitación.



## ABSTRACT

The research work aims to estimate the water supply of the Huancané River through the generation of monthly average flows by applying Lutz's deterministic-stochastic model, whose methodology is as follows: a) characterization of the Huancané river basin, b) obtaining of meteorological and hydrometric information of the offices of the national meteorology and hydrology service based in Puno, c) Hydrological modeling using the model proposed by Lutz Scholz, first considering the determination of the monthly flow for the average year, then perform the calibration and second the generation of monthly flows for extended periods. The results are: the average annual rainfall in the basin is 659.9 mm, the annual potential evapotranspiration is 1272.42 mm, the estimated runoff coefficient using the Turc method is 0.36, the correlation coefficient between the flow series generated and settled is 97.5%; It is concluded that the mathematical precipitation-runoff model of Lutz Scholz can be used for the generation of flows in the Huancané river basin, taking into account that the contribution and storage regime that occurs within the sub-basins have a particular behavior due to the presence of the Snowy and lagoons and it is recommended to apply this methodology to other basins of the region.

**Keywords:** Flow, basin, Huancané Lutz Scholz, water supply, precipitation



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La importancia de los estudios hidrológicos constituye una herramienta básica para establecer, hasta qué punto es factible un proyecto de desarrollo hidráulico, dentro de una cuenca hidrográfica. Cuando una cuenca no dispone de información de caudales se utiliza diversos métodos y procedimientos que a partir de los elementos o variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura, etc.)(Belizario, 2014, 2015), y los elementos geográficos (forma de la cuenca, fisiografía, vegetación, etc.), todos ellos permitan generar las descargas a nivel mensual.

Los procedimientos para la generación de descargas mensuales se denominan modelos hidrológicos, los mismos que pueden ser determinísticos si representa una realidad a escala, por ejemplo, se dice que todo lo que entra a un sistema, sale o estocástica si se incluye una variable aleatoria por ejemplo todo lo que entra al sistema no necesariamente sale del sistema.

En nuestro país, en muchos casos no se cuentan con estaciones hidrométricas; en consecuencia, no hay registros de caudales disponibles que puedan ser utilizados para los estudios hidrológicos de los diseños de obras hidráulicas. La propuesta del modelo Lutz Scholz nos permite solucionar este problema, porque se genera caudales medios mensuales en una cuenca hidrográfica a partir de la precipitación media mensual (Scholz, 1980).



Para lograr el cumplimiento de los objetivos de la investigación, se recurrirá a la aplicación de metodologías empíricas o indirectas para determinar las características geomorfológicas de las cuencas, la obtención de información de precipitación media mensual de las estaciones ubicadas dentro y zonas aledañas a la cuenca y la aplicación del modelo determinístico-estocástico Lutz Scholz para generar los caudales medios mensuales de la cuenca.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Las interrogantes a responder en la investigación son las siguientes:

### **Problema general**

¿Cuánto es la oferta hídrica del río Huancané estimado mediante la generación de caudales medios mensuales aplicando el modelo determinístico-estocástico Lutz Scholz?

### **Problemas específicos**

1. ¿Es posible determinar los caudales medios mensuales mediante el método propuesto por Lutz Scholz para un año promedio y realizar su calibración?
2. ¿Es posible generar los caudales medios del río Huancané para un periodo extendido mediante el modelo Lutz Scholz, para determinar la oferta hídrica de la cuenca?

## **1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

En la región Puno no hay estudios hidrológicos en donde utilicen el modelo hidrológico Lutz Scholz para determinar los caudales medios a nivel de cuencas hidrográficas, la Autoridad Nacional del Agua, el año 2008 ha hecho estudios de los recursos hídricos de las cuencas Huancané, Ramis, Coata e Ilave sin embargo se ha



utilizado el modelo Lutz Scholz a nivel de subcuencas, no en todas las subcuencas, solo en subcuencas con información meteorológica e hidrométrica.

En situaciones en que los equipos hidrométricos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología se deterioren, malogren o sean hurtados, ya no se podría medir los caudales; en consecuencia, no se tendría información hidrométrica durante el tiempo hasta que lo repongan (Belizario et al., 2013b, 2013a), con la metodología del experto Lutz Scholz se puede generar caudales medios durante este periodo sin información.

Entre las principales variables meteorológicas se puede mencionar: la temperatura, la velocidad del viento, precipitación, caudal y la humedad atmosférica; los procedimientos son las formas como estas variables se asocian. Cuando una cuenca no dispone de información de caudales se utiliza diversos métodos y procedimientos que a partir de los elementos o variables meteorológicas y los elementos geográficos (forma de la cuenca, fisiográfica, vegetación, etc.), todos ellos permitan generar las descargas a nivel mensual. Los procedimientos para la generación de descargas mensuales se denominan modelos hidrológicos, los mismos que pueden ser determinísticos si representa una realidad a escala (todo lo que entra, sale) o estocástica si se incluye una variable aleatoria (todo lo que entra no necesariamente sale).

El abastecimiento limitado de agua y una demanda creciente tanto en el espacio como en el tiempo tiende a una escasez de recurso hídrico; en la sierra peruana es cada vez más notoria al mismo tiempo en él se observa que las fuentes hídricas en el transcurrir de los años han ido disminuyendo sus caudales, produciendo la demanda hídrica insatisfecha en cultivos, por esta razón la tecnología y la globalización han traído a nuestros pueblos alto andinos sistemas de riego que distribuyen el agua a los cultivos de



una manera eficiente y uniforme, logrando satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos de una determinada cedula de cultivos.

Siguiendo los procedimientos elaborados por el experto Lutz Scholz, se puede generar y verificar la aplicación de los sub modelos determinísticos parciales y generar una serie de caudales confiables aplicando un modelo estocástico; para esto se realizará una revisión de la fuente bibliográfica y el análisis del modelo, el mismo que será aplicado a la costa de la cuenca del río Huancané que cuenta con información de precipitación y descarga.

#### **1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **1.4.1. Objetivo general.**

Estimar la oferta hídrica del río Huancané mediante la generación de caudales medios mensuales aplicando el modelo determinístico-estocástico de Lutz Scholz.

##### **1.4.2. Objetivos específicos.**

1. Determinar los caudales medios mensuales mediante el método propuesto por Lutz-Scholz para un año promedio y realizar su calibración.
2. Generar los caudales medios para un periodo extendido mediante el modelo Lutz-Scholz para determinar la oferta hídrica de la cuenca.



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. ANTECEDENTES

Julcamoro (2017) aplicó el modelo hidrológico Lutz Scholz para determinar la disponibilidad del recurso hídrico en la microcuenca del río El Tuyo en el distrito de Catilluc, provincia de San Miguel, región Cajamarca, los resultados de las descargas medias mensuales generadas en la microcuenca del río El Tuyo es de  $8.37 \text{ m}^3/\text{s}$ , y se concluye que, con un período de retorno de 5 años, se espera alcanzar caudales medios mensuales que superen los  $10.53 \text{ m}^3/\text{s}$  anuales.

Díaz (2017) aplicó el modelo hidrológico Lutz Scholz para determinar la disponibilidad hídrica superficial mediante balance hídrico en la cuenca del río Cumbaza-San Martín, los resultados que obtuvieron son: existe presencia de caudal en los 12 meses del año, tiene una oferta hídrica promedio de  $5.37 \text{ m}^3/\text{s}$ , tiene un caudal mínimo de  $4.45 \text{ m}^3/\text{s}$  en el mes de agosto y un caudal máximo de  $6.35 \text{ m}^3/\text{s}$  en el mes de abril.

Canaza & Gamarra (2017) utilizaron el modelo hidrológico Lutz Scholz para determinar la alteración de los caudales del río Asmayacu ocasionados por la presencia de los fenómenos del Niño y de la Niña en los últimos 30 años e identificar las probables zonas de inundación en la cuenca Asmayacu – Curahuasi.

Sarango et al. (2012) utilizaron el modelo de precipitación – escorrentía Lutz Scholz para la determinación del recurso hídrico en la parte alta de la cuenca del río Grande del distrito de Ananea-Puno, los resultados muestran un caudal promedio anual



de  $3.22 \text{ m}^3/\text{s}$  y un volumen promedio anual de 100.07 MMC en el sitio de emplazamiento de la presa a implementarse en la parte alta de la cuenca del río Grande.

Mendoza (2012) utiliza el método de Lutz Scholz para generar descargas medias mensuales en la microcuenca Pallcca a 3075 msnm – María Parado de Bellido, Cangallo, Ayacucho.

Tarazona (2005) desarrolló el modelo matemático “Precipitación-Descarga” del Experto Lutz Scholz para la generación de descargas medias mensuales de las subcuencas del río Santa.

Lutz Scholz (1980), aplicó un modelo matemático “Transformación de Precipitación en Descarga” para el Proyecto Nacional de Pequeñas y Medianas irrigaciones ofrecerá una metodología para la calibración de los parámetros hidrológicos, presenta una serie de expresiones empíricas regionalizadas que en teoría permitirán estimar los valores de los caudales a escala mensual en cuencas sin información. La aplicación del modelo determinístico estocástico Lutz Scholz tiene dentro de sus antecedentes más recientes los siguientes trabajos:

Tito (2010) empleó en la calibración del modelo Lutz Scholz en la sub cuenca del río Ayaviri.

Todos estos investigadores obtuvieron resultados satisfactorios, razón por el cual en esta investigación se pretende utilizar este modelo matemático para generar caudales medios mensuales a partir de la precipitación mensual.



## 2.2. MARCO TEÓRICO

### 2.2.1. CUENCA HIDROGRÁFICA.

Vásquez et al. (2017) menciona que cuenca hidrográfica es el área o unidad de territorio, delimitada por una divisoria topográfica (*divortium aquarum*), que capta la precipitación y drena el agua de escorrentía hasta un colector común, denominado río principal. La cuenca hidrográfica es un ámbito geográfico natural donde ocurre el ciclo hidrológico; es el área drenada hacia un río, identificado por su topografía y delimitada por su divisoria de las aguas; en un sentido amplio incluye el agua, suelo, aire, la luz solar, la flora y la fauna.

Faustino (2006) define a la cuenca hidrográfica como un ecosistema en el cual interactúan y se interrelacionan variables biofísicas y socioeconómicas que funcionan como un todo, con entradas y salidas, límites definidos, estructura interna de subsistemas jerarquizados (por ejemplo, en el sistema biofísico: los subsistemas biológicos y físicos). En este sistema ocurren entradas como la energía solar, hídrica, eólica y gases como el CO<sub>2</sub>, además ingresan insumos como semillas, alimentos, tecnologías y otros, ambos dan origen a procesos como el flujo de energía, ciclo de nutrientes, ciclo hidrológico, erosión y actividades productivas. Las cuencas son espacios socio geográficos donde las personas y sus organizaciones comparten el territorio, sus identidades, tradiciones y culturas; socializan y trabajan en función de la disponibilidad de recursos. Las cuencas hidrográficas se reconocen como un sistema debido a la existencia de interacciones entre el sistema natural del suelo, el agua y biodiversidad y el sistema socioeconómico, que si bien éste no tiene un límite físico, sí depende de la oferta, calidad y disposición de los recursos. Los diferentes componentes del sistema cuenca no siempre se encuentran dispuestos de manera coordinada. Por ejemplo, la división político-administrativa de un



país puede no coincidir con las divisiones de las cuencas hidrográficas, por lo tanto, se tiene en la cuenca, injerencia de varios municipios distritales, provinciales, departamentos u organizaciones estatales, todo en función a la dimensión de cada territorio.

Villón (2020) menciona que la cuenca de drenaje de una corriente, es el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se unen para formar un solo curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien definida, para cada punto de su recorrido.

La delimitación de una cuenca, se hace sobre un plano o mapa a curvas de nivel siguiendo las líneas de *divortium acuarum* (parteaguas), la cual es una línea imaginaria, que divide a las cuencas adyacentes y distribuye el escurrimiento originado por la precipitación, que en cada sistema de corriente, fluye hacia el punto de salida de la cuenca (Gonzales & Alejo, 2008).

Aparicio (1992) denomina a la cuenca hidrográfica al área territorial de drenaje natural donde todas las aguas pluviales confluyen hacia un colector común de descarga. Los límites de una cuenca están determinados por la línea de «*divortium aquarum*» o divisoria de aguas. Debemos señalar que no siempre los límites geográficos (superficiales) suelen coincidir con los límites del acuífero (subterráneo), pudiendo existir transferencias de masas líquidas entre una cuenca y otra adyacente o cercana.

## **2.2.2. ELEMENTOS METEOROLOGICOS.**

### **2.2.2.1. Temperatura.**

La temperatura es una medida del movimiento de traslación medio de las moléculas de un sistema, que en nuestro caso se trata del aire. Para evitar perturbaciones



por la incidencia directa de los rayos solares sobre los termómetros, se colocan dentro de un abrigo meteorológico, que permite el paso del aire a través de unas rendijas que forman parte de las paredes. Los valores máximos suelen ocurrir después del mediodía y los mínimos en la madrugada (Breña & Jacobo, 2006).

La radiación solar absorbida por la atmósfera y el calor emitido por la tierra elevan la temperatura del aire. El calor sensible del aire circundante transfiere energía al cultivo y entonces ejerce un cierto control en la tasa de evapotranspiración. En un día soleado y cálido, la pérdida de agua por evapotranspiración será mayor que en un día nublado y fresco. Para la aplicación de métodos para la determinación de la evapotranspiración de referencia se requiere información de temperatura diaria (promedio) máxima y mínima en grados centígrados ( $^{\circ}\text{C}$ ) (Allen et al., 2006).

#### **2.2.2.2. Humedad.**

El contenido de humedad en la atmósfera se caracteriza a través del parámetro humedad relativa, el cual se define como la relación de la densidad del vapor de agua en un volumen de aire dividido por la densidad de vapor de agua en condiciones de saturación (Breña y Jacobo, 2006).

Guevara (1991) indica que la humedad es la fracción de la atmósfera conformada por el vapor de agua, es muy pequeña comparada con los otros componentes, pero es extremadamente importante ya que determina las condiciones meteorológicas prevalecientes (La precipitación se deriva de esta agua atmosférica). El contenido de humedad del aire es también un factor significativo en el proceso de evaporación local, Por lo tanto, es necesario que el hidrólogo esté al corriente de lo que ocurre en la atmósfera y comprender los efectos termodinámicos de la humedad atmosférica.



### **2.2.2.3. Velocidad del viento.**

Breña y Jacobo (2006) mencionan que el viento se genera cuando existen diferencias de temperatura en puntos geográficos cercanos o por cambios en la presión atmosférica. Así, se presentan variaciones fuertes en intervalos de tiempo cortos en un lugar particular. Las montañas se enfrían más rápidamente que las partes bajas que las rodean, de modo que en la noche los vientos mostrarán una dirección descendente; en la mañana, la situación cambiará, de modo que al recibir primero los rayos solares las partes altas, se provocarán vientos con dirección ascendente.

El proceso de remoción de vapor depende en alto grado del viento y de la turbulencia del aire, los cuales transfieren grandes cantidades de aire hacia la superficie evaporante. Considerando ello, el aire sobre la superficie evaporante se satura gradualmente con vapor de agua. Si este aire no se substituye continuamente por un aire más seco, disminuye la intensidad de remoción de vapor de agua y la tasa de evapotranspiración disminuye (Allen *et al.* 2006).

Guevara & Cartaya (2004) menciona que el viento se origina por las diferencias de presiones y temperaturas y, se manifiesta como el movimiento de las masas de aire. Es un factor muy importante que se relaciona con otros parámetros hidrometeorológicos tal como: la evaporación, la precipitación y los fenómenos de difusión del vapor de agua, del calor y elementos contaminantes.

### **2.2.2.4. Radiación solar.**

La radiación solar es la más importante fuente de energía en el planeta y cambia gran cantidad de agua líquida en vapor de agua, y por ende afecta el proceso de evapotranspiración. La cantidad potencial de radiación que puede llegar a una superficie



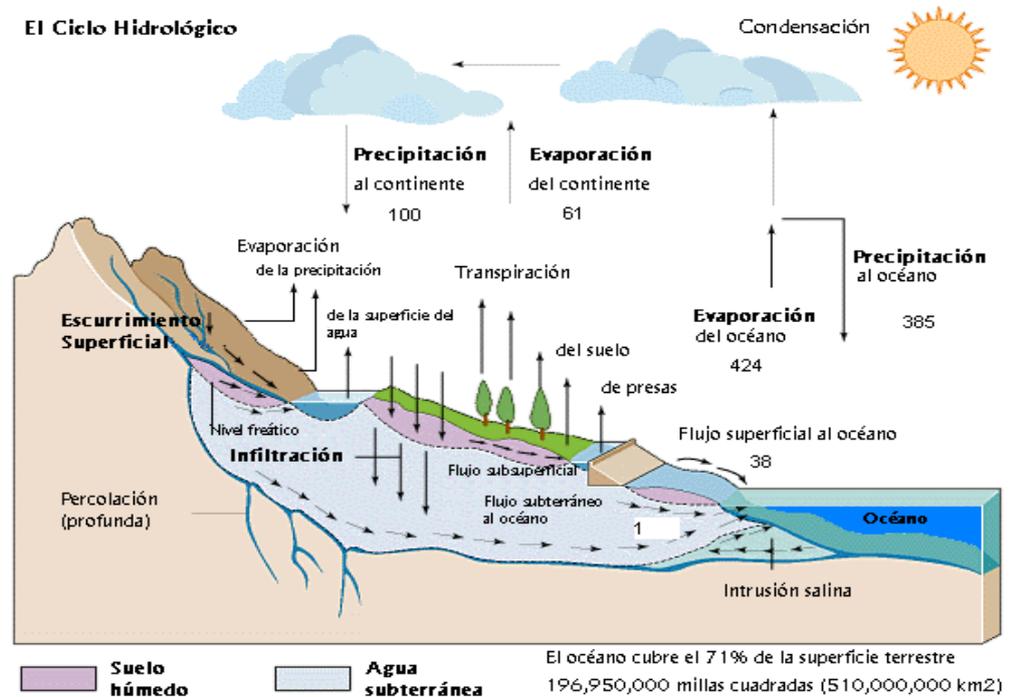
que permita la evaporación o superficie evaporante, y está determinada por su localización y época del año. Debido a las diferencias en la posición del planeta y a su movimiento alrededor del sol. Cuando se determina el efecto de la radiación solar en la evapotranspiración, se debe también considerar que no toda la energía disponible se utiliza para evaporar el agua. Parte de la energía solar se utiliza para calentar la atmósfera y el suelo. Estos datos no están disponibles comúnmente en forma directa, pero pueden derivarse de la radiación de onda corta (promedio) medida a partir de la duración real diaria (promedio) del sol brillante (horas por día) medida con el heliógrafo (Allen *et al.* 2006).

### **2.2.3. CICLO HIDROLÓGICO Y SUS COMPONENTES.**

Vásquez et al. (2016) definen al ciclo hidrológico como la sucesión de cambios que sufre el agua en la hidrosfera, y que obedece a leyes físicas. El ciclo hidrológico no tiene principio ni fin, es un proceso continuo y es el aspecto más importante de la hidrología. El ciclo hidrológico es conocido también como el ciclo del agua y es el proceso que describe los sucesivos y diferentes cambios de estado del agua: líquido a vapor, de vapor a líquido, de movimiento y el cambio de estados del agua (líquido, vapor o sólido) en la tierra, ya sea del líquido a sólido, de sólido (hielo) a líquido o de hielo a vapor (sublimación).

Según Gamez (2010) el ciclo hidrológico es la interminable circulación que siguen las partículas de agua en cualquiera de sus tres estados físicos, cuya circulación se efectúa en forma natural, sufriendo transformaciones físicas. Los procesos que intervienen en el ciclo hidrológico son: evaporación, condensación, precipitación, intercepción, infiltración, percolación, afloramiento, almacenamiento, escurrimiento, transpiración.

En la figura 1, se muestra datos del ciclo hidrológico global, considerando a la precipitación terrestre como el 100 %.



**Figura 1.** Ciclo hidrológico global.

**Fuente:** Ven Te Chow (2000)

### 2.2.3.1. Precipitación.

La precipitación es una variable hidrológica de carácter aleatorio, variando drásticamente en el tiempo (variación temporal) y en el espacio (variación espacial). Es común que, en un determinado período de tiempo, mientras que en una zona ocurre una lluvia, en otra zona próxima no hay precipitación ninguna. Justamente esta característica típica de la precipitación es la que introduce ciertas dificultades en su evaluación correcta. La unidad de medición es el milímetro de lluvia, definido como la cantidad de precipitación correspondiente a un volumen de 1 litro por metro cuadrado de superficie,



conocido como la lámina de agua o altura de lluvia depositada sobre esa superficie (Vásquez *et al*, 2017)

La precipitación se produce cuando las gotas minúsculas de agua que forman las nubes se enfrían y se produce la condensación, generándose la unión de las minúsculas gotas de agua para formar gotas de mayor tamaño y de mayor peso y que finalmente debido a ello terminan precipitándose a la superficie terrestre. Los componentes de la precipitación son lluvia, granizo, nieve, neblina (niebla), rocío y granizo con agua. Estas formas de precipitación son las principales fuentes de agua en el mundo (Vásquez *et al*, 2016).

Precipitación es toda forma de humedad, que, originándose en las nubes, llega hasta la superficie terrestre. De acuerdo a esta definición, las lluvias, las granizadas las garúas, y las nevadas son formas distintas del mismo fenómeno de la precipitación. También se denomina precipitación al agua que proviene de la humedad atmosférica y cae a la superficie terrestre, principalmente en estado líquido como lluvia y llovizna o en estado sólido como escarcha, nieve o granizo (Pérez, 2015).

Fattorelli & Fernandez (2011) indican que las nubes son arrastradas por los vientos, algunas permanecen sobre los océanos y, otras, son trasladadas hacia los continentes. En estos movimientos pueden enfriarse, por medio de los cuales las gotitas que forman las nubes se pueden agrandar, ya sea porque se juntan entre ellas o porque se aglomeran alrededor de partículas que flotan en la atmósfera. Al agrandarse, las gotas de agua caen por su propio peso hacia la superficie de la Tierra, provocando las precipitaciones. Las precipitaciones que se producen con temperaturas sobre 0°C, caen en forma de lluvia. Las gotas de lluvia se congelan si la temperatura es bajo 0°C y la precipitación es en forma de nieve o de granizo, estado sólido del agua.



Guevara y Cartaya (2004) indica que la precipitación es el principal vector de entrada del ciclo hidrológico y se refiere a la cantidad total de agua que cae sobre la superficie terrestre. Se presenta en forma líquida (lluvia, niebla y rocío o escarcha), o sólida (nieve y granizo). Se deriva del vapor de agua atmosférica; sus características están sometidas a la influencia de otros factores climáticos, tales como viento, temperatura y presión atmosférica.

Villon (2002) menciona que la altura de precipitación que cae en un sitio dado, difiere de la que cae en los alrededores, aunque sea en sitios cercanos. Los pluviómetros registran la lluvia puntual, es decir, la que se produce en el punto en la que está instalada el aparato. Para muchos problemas hidrológicos, se requiere conocer la altura de precipitación media de una zona, la cual puede estar referida a la altura de precipitación diaria, mensual, anual, media mensual, media anual.

**Altura de precipitación diaria**, es la suma de las lecturas observadas en un día.

**Altura de precipitación media diaria**, es el promedio aritmético de las lecturas observadas en un día.

**Altura de precipitación mensual**, es la suma de las alturas diarias, ocurridas en un mes.

**Altura de precipitación media mensual**, es el promedio aritmético de las alturas de precipitación mensual, correspondiente a un cierto número de meses.

**Altura de precipitación anual**, es la suma de las alturas de precipitación mensual, ocurridas en un año.



**Altura de precipitación media anual**, es el promedio aritmético de las alturas de precipitación anual, correspondiente a un cierto número de años.

### **2.2.3.2. Evaporación.**

Pérez (2015) define a la evaporación como el proceso por el cual, el agua pasa del estado líquido en que se encuentra en los almacenamientos, en el suelo y en las capas cercanas a la superficie, al estado gaseoso en condiciones naturales y se transfiere a la atmósfera.

La evaporación es un fenómeno que aparece como consecuencia del calentamiento que los rayos solares producen sobre la superficie líquida de mares, lagos y ríos, así como en los suelos húmedos, convirtiendo el agua en vapor, mientras la atmósfera no esté saturada de vapor a la temperatura ambiente. En este fenómeno el agua toma calor de su alrededor, por lo que la evaporación siempre va acompañada de enfriamiento de la superficie líquida o del suelo (Breña y Jacobo, 2010).

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua y se retira de la superficie evaporante, el agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada, para cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere energía. La radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura ambiente del aire, proporcionan esta energía (Allen *et al.* 2006).

### **2.2.3.3. Evapotranspiración.**

Vásquez *et al.*, (2017) definen a la evapotranspiración como el proceso de flujo de agua hacia la atmósfera proveniente de la evaporación del agua del suelo y de la transpiración de las plantas. Es complejo y depende no sólo de los elementos físicos



(climáticos) que afectan la evaporación, sino también de las características morfológicas y fisiológicas de la cobertura vegetal, del suelo y de su nivel de humedad. En el periodo vegetativo de un cultivo, hay etapas críticas durante las cuales las plantas son exigentes en agua o, por el contrario, según la fisiología de cada cultivo, requieren de un stress o déficit de agua para lograr el óptimo rendimiento y calidad de los productos en la cosecha.

La evapotranspiración es la suma de las cantidades de agua evaporada desde el suelo y la transpirada por las plantas (Evaporación + Transpiración) (Pérez, 2015).

La evapotranspiración ocurre debido a dos fenómenos que se da en la relación cultivo-suelo, la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo, la misma constituye la pérdida fundamental de agua, a partir de la cual se calcula la necesidad de agua de los cultivos. La evapotranspiración es un parámetro de interés común en estudios climatológicos, hidrológicos, agrícolas y forestales (Guevara y Cartaya, 2004).

Allen *et al* (2006) mencionan que la evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal.



#### **2.2.3.4. Infiltración.**

Según Vásquez *et al.* (2016) la infiltración es el proceso mediante el cual el agua al entrar en contacto con el suelo, penetra al interior del perfil del suelo (se infiltra) a través de los poros; a medida que va humedeciéndose el suelo por efecto de la gravedad y a diferencias de potenciales que puedan existir entre las diferentes capas del suelo sigue avanzando el agua hacia capas más profundas; llegando en muchos casos a ser almacenada en los acuíferos o reservorios subterráneos.

Pérez (2015) define a la infiltración como el paso del agua a través de la superficie del suelo hacia el interior de la tierra, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares.

#### **2.2.3.5. Escorrentía.**

El escurrimiento es el agua proveniente de la precipitación, que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. La Escorrentía superficial, es la parte de la precipitación que se escapa de la infiltración y de la evapotranspiración y que consecuentemente, circula por la superficie (Pérez, 2015)

Según Gámez (2010), el escurrimiento superficial o flujo superficial es el flujo de agua sobre la superficie del terreno sin un cauce definido, que corre en todas direcciones. El escurrimiento superficial, viaja por la superficie del terreno hacia los cauces durante y después de ocurrida la precipitación y está determinado por las propiedades hidrofísicas de los suelos.

La escorrentía se puede definir como la porción de la precipitación pluvial que ocurre en una zona o cuenca hidrológica y que circula sobre o debajo de la superficie



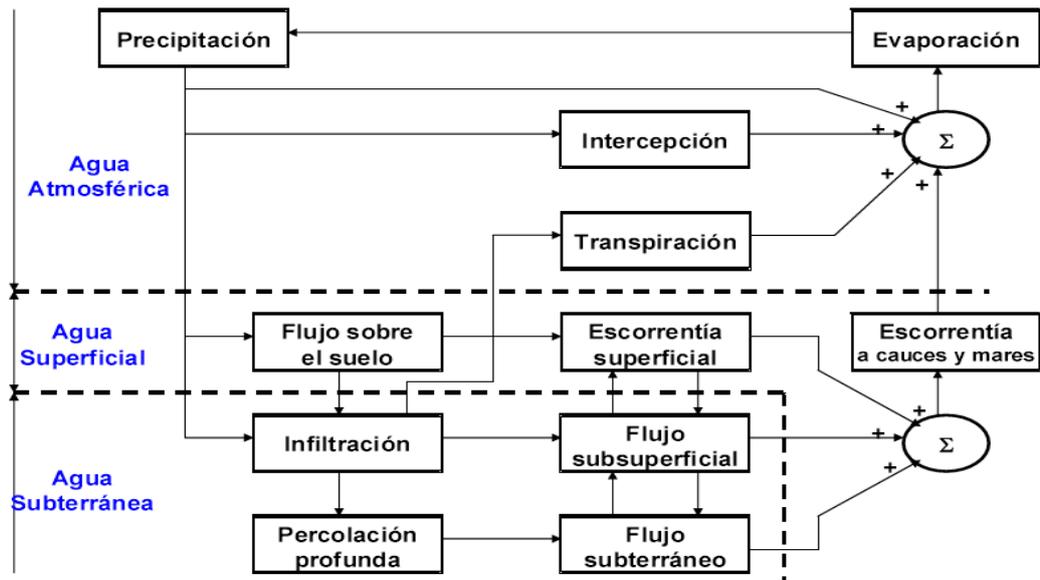
terrestre y que llega a una corriente para ser drenada hasta la salida de una cuenca o bien alimentar un lago, si se trata de cuencas abiertas o cerradas, respectivamente. Las fuentes principales del escurrimiento en cauces se pueden clasificar en cuatro tipos: precipitación directa sobre el cauce, flujo subsuperficial, flujo base; y escurrimiento directo (Breña y Jacobo, 2006).

Guevara y Cartaya (2004) menciona que el escurrimiento superficial o caudal se conforma de cuatro procesos o componentes que se diferencian por el tiempo que tardan en llegar a la estación de medición y por la vía de llegada: Escurrimiento superficial, escurrimiento sub superficial, escurrimiento subterráneo y lluvia que cae sobre el cauce.

#### **2.2.4. CICLO HIDROLÓGICO COMO SISTEMA.**

##### **2.2.4.1. Sistema hidrológico.**

Según Mejía (2006) los fenómenos hidrológicos son muy complejos, por lo que casi nunca pueden ser totalmente conocidos; sin embargo, a falta de una concepción perfecta, se pueden representar de una manera simplificada mediante el concepto de sistema. El ciclo hidrológico podría considerarse como un sistema, cuyos componentes son: precipitación, evaporación, escorrentía, y las otras fases del ciclo hidrológico. Estos componentes pueden reagruparse en subsistemas separadamente, igualmente se pueden combinar los resultados de acuerdo con las interacciones entre ellos.



**Figura 2.** Sistema hidrológico global en un diagrama de bloques.

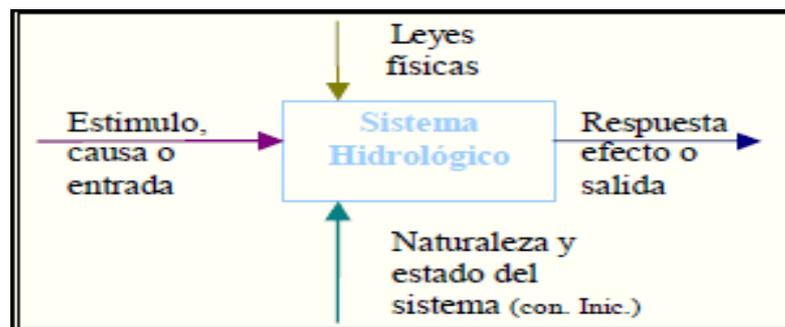
**Fuente:** Mejía (2006)

En la figura 2 se presenta el ciclo hidrológico global como un sistema; las líneas punteadas dividen el sistema total en tres subsistemas: 1) El sistema del agua atmósfera, que contiene los procesos de precipitación, evaporación, intercepción y transpiración. 2) El sistema del agua superficial, con los procesos de escorrentía superficial, flujo sobre el suelo, flujo subsuperficial y subterráneo (hacia los cauces y océanos). 3) El sistema del agua subsuperficial, que contiene los procesos de infiltración, recarga del agua subterránea, flujo subsuperficial y subterráneo. El flujo subsuperficial ocurre en los estratos del perfil del suelo en la cercanía de la superficie; el flujo subterráneo ocurre en los estratos más profundos.

#### 2.2.4.2. Modelo hidrológico.

Aguirre (1992) menciona que un sistema es una estructura, mecanismo, esquema o procedimiento, real o abstracto, que relaciona en el tiempo y/o espacio una causa,

entrada o estímulo de materia, energía o información con un efecto, salida o respuesta de materia, energía o información. Se puede resumir simbólicamente los métodos de síntesis o análisis de sistemas hidrológicos considerando la figura 3. Estos métodos permiten diferenciar claramente sistemas hidrológicos: Hidrología física (o científica) y la investigación de sistemas hidrológicos (Hidrología aplicada). En hidrología física se relacionan diversas disciplinas del campo de las ciencias naturales para tratar de entender el funcionamiento de un sistema hidrológico. Permite efectuar descripciones cuantitativas completas excepto para sistemas de gran simplicidad o demasiado idealizados, sin embargo, los conocimientos desarrollados han ejercido una profunda influencia sobre los métodos de investigación de sistemas hidrológicos y sobre las limitaciones e interpretaciones de los resultados obtenidos.



**Figura 3.** Modelo hidrológico

**Fuente:** Aguirre (1992).

### 2.2.5. MODELOS MATEMÁTICOS EN HIDROLOGÍA.

Chavarri (2010) menciona que los modelos hidrológicos son representaciones simplificadas de los sistemas hidrológicos reales, a partir del cual podemos estudiar la relación causa-efecto de una cuenca a través de los datos de entrada y salida, con los cuales se logra un mejor entendimiento de los procesos físicos hidrológicos que tienen lugar dentro de la cuenca.



Además, nos permite simular y predecir el comportamiento hidrológico de los procesos físicos en la cuenca.

Según Chow et al. (2000) un modelo matemático es una formulación matemática que simula un fenómeno hidrológico, el cual es considerado como un proceso o como un sistema y provee una forma de transferir conocimiento de un área estudiado o medido a otra área donde se requiere información y decisiones de orden hidrológico.

Según Aguirre (1992) existe una variedad de problemas hidrológicos, que requieren el uso de diferentes tipos de modelos matemáticos de simulación. Estos modelos pueden ser clasificados de acuerdo a diversos criterios tales como: la función, estructura, nivel de desagregación espacial, descripción del proceso hidrológico y nivel tecnológico.

Ponce (1989) menciona que, en ingeniería hidrológica, existe cuatro tipos de modelos matemáticos: 1) Determinístico, 2) Probabilístico, 3) Conceptual y 4) Paramétrico. Un modelo conceptual es una representación simplificada del proceso físico, obtenida por las variaciones espacial y temporal, agregado, y descrito en términos de cualquiera de las ecuaciones diferenciales ordinarias o ecuaciones algebraicas. Un modelo paramétrico representa procesos hidrológicos por medio de ecuaciones algebraicas, este contiene parámetros claves para ser determinados en forma empírica.

Clark (1973) menciona que un modelo matemático es una representación simplificada de un sistema complejo, en el cual, el comportamiento del sistema está representado por una serie de ecuaciones y sentencias lógicas que expresan relaciones entre variables y parámetros. Es importante la distinción entre los modelos que son construidos para proveer una predicción del comportamiento del sistema, de acuerdo a un determinado nivel de precisión, y aquellos modelos desarrollados por la teoría



científica para proveer una visión al interior del modelo y explicar la naturaleza del sistema hidrológico. Esta distinción, divide el uso de modelos hidrológicos en dos diferentes categorías: modelos prescriptivos y modelos descriptivos:

#### **2.2.6. CLASIFICACIÓN DE MODELOS EN HIDROLOGÍA.**

Chavarri (2010) menciona que los modelos matemáticos en hidrología se clasifican en:

- a. Modelo determinístico. - es aquel que tiende a establecer relaciones cuantitativas de causa-efecto, utilizando una relación directa para obtener una respuesta debida a un requerimiento, sea por medio de una ecuación empírica o por medio de un operador desarrollado a partir de criterios e hipótesis experimentales. Un modelo determinístico se utiliza en el caso que se disponga de poca información, caso frecuente de las obras de ingeniería hidráulica, en los cuales uno tiende a reconstruir indirectamente la evolución de los escurrimientos y flujos superficiales a partir del conocimiento de los eventos de lluvia diaria, de la cual se dispone generalmente de series temporales de datos.
- b.- Modelos estadísticos, - se basan en los métodos y las técnicas estadísticas para hacer notar sus relaciones de entrada y salida, en concordancia con el interés secundario de los procesos físicos del sistema. El uso de los modelos estadísticos para una predicción, permite la explotación racional de la información disponible a corto y mediano plazo. Su uso es posible, cuando se dispone de series suficientemente grandes de información.
- c. Modelos probabilísticos. - utilizan la noción de frecuencia para analizar el comportamiento de un fenómeno hidrológico. La información utilizada para la



calibración debe ser independiente del tiempo. Como la muestra disponible para caracterizar la población y/o el proceso físico hidrológico es generalmente limitada, en la extrapolación de resultados se debe considerar un concepto de riesgo o error probable que el modelo debe cuantificar y considerar.

- d. Modelos estocásticos. - la información que se utiliza se trata como datos históricos a manera de secuencia cronológica. Este tipo de modelos se utiliza frecuentemente para la predicción a corto plazo y a largo plazo de series hidrológicas, pero es necesaria la comparación de las series observadas y simuladas.

Según Aguirre (1992) existe una abundante variedad de problemas hidrológicos, que requieren el uso de diferentes tipos de modelos matemáticos de simulación. Estos modelos pueden ser clasificados de acuerdo a diversos criterios tales como:

- a. La función
- b. Estructura
- c. Nivel de desagregación espacial
- d. Descripción del proceso hidrológico y
- e. Nivel tecnológico

Así mismo menciona que es importante la distinción entre los modelos que son construidos para proveer una predicción del comportamiento del sistema, de acuerdo a un determinado nivel de precisión, y aquellos modelos desarrollados por la teoría científica para proveer una visión al interior del modelo y explicar la naturaleza del sistema hidrológico. De esta forma su función es diferente, existiendo



modelos predictivos y modelos explicatorios. Esta distinción, divide el uso de modelos hidrológicos en dos diferentes categorías: modelos prescriptivos y modelos descriptivos:

- a. Modelación Prescriptiva, es concerniente con la forma de realizar predicciones para la solución de problemas ingenieriles.
- b. Modelación Descriptiva, es concerniente principalmente con el deseo de ampliar nuestro entendimiento científico del comportamiento del sistema de una cuenca.

### **2.2.7. RELACIÓN PRECIPITACIÓN ESCORRENTÍA.**

Nanía (2003) menciona que, una vez que se ha estudiado el régimen de precipitaciones de una cuenca, obtenido una lluvia de diseño asociada a un determinado período de retorno y estimado las pérdidas con alguno de los modelos disponibles, de manera tal de encontrar la lluvia neta o efectiva, el paso siguiente es transformar esa lluvia efectiva en escorrentía o caudal.

Aparicio (1992) menciona que los registros de precipitaciones son más abundantes que los de escurrimiento y, además, no se afectan por cambios en la cuenca, como construcción de obras de almacenamiento y derivación, talas, urbanización, etc. Por ello, es conveniente contar con métodos que permitan determinar el escurrimiento en una cuenca mediante las características de la misma y la precipitación. Las características de la cuenca se conocen por planos topográficos y de uso de suelo, y la precipitación a través de mediciones directas en el caso de predicción de avenidas frecuentes, o bien usando los métodos de análisis de datos de precipitación en el caso de avenidas de diseño. Los principales parámetros que intervienen en el proceso de conversión lluvia a escurrimiento son los siguientes:



- a. Área de la Cuenca.
- b. Altura total de precipitación.
- c. Características de la cuenca: forma, pendiente, vegetación, etc.
- d. Distribución de la lluvia en el tiempo.
- e. Distribución en el espacio de la lluvia.
- f. Eventos extremos.

### 2.2.8. HIDROLOGÍA ESTADÍSTICA

Según Chow et al. (2000) **la definición de conceptos estadísticos es:**

- a. **Espacio Muestral.** - Es el conjunto de todos los resultados posibles de un experimento estadístico y se representa con el símbolo  $S$ . Cada resultado de un Espacio Muestral se le llama elemento o miembro del Espacio Muestral o simplemente punto Muestral.
- b. **Eventos.** - Un evento es un subconjunto de un Espacio Muestral. Son los resultados posibles que se pueden presentar en la realización de un experimento.
- c. **Probabilidad.** - La probabilidad de un evento,  $P(A)$  es la posibilidad de que este ocurra cuando se hace una observación de la variable aleatoria. Si una muestra de  $N$  observaciones tiene  $N_A$  valores en el rango del evento  $A$ , entonces  $P(A) = N_A/N$ .

Las probabilidades obedecen a ciertos principios:



Probabilidad total: si en el Espacio Muestral  $S$ , está completamente divididos en “ $m$ ” eventos o áreas no traslapadas  $A_1, A_2, \dots, A_m$ , entonces:

$$P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_m) = P(S) = 1.$$

Complementariedad: En un Espacio Muestral  $S$ , si  $A'$  es el complemento de  $A$ , entonces:  $P(A') = 1 - P(A)$ .

Probabilidad condicional: En un Espacio Muestral  $S$ , si existen en ella dos eventos  $A$  y  $B$ , la probabilidad de que el evento  $B$  ocurra cuando ya ocurrió algún evento  $A$ , se denomina probabilidad condicional y se denota por  $P(BA)$ . Esta probabilidad se define como:

$$P(BA) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)}, \text{ Si } P(A) > 0$$

- d. Variable aleatoria.** - Es una función que asocia un número real con cada elemento del Espacio Muestral. A una variable aleatoria se le conoce también como una variable estocástica, porque sus valores son números reales que no pueden predecirse con certeza antes de ocurrir el fenómeno, es decir ocurren al azar.

Las clases de variables aleatorias son:

Variable aleatoria discreta. - Se dice que una variable aleatoria es discreta si se pueden contar su conjunto de resultados posibles. El Espacio Muestral contiene un número finito de posibilidades.



Variable aleatoria continua. - Se dice que una variable aleatoria es continua cuando sus valores se encuentran en un rango continuo y pueden ser representados por cualquier número entero o decimal

- e. **Funciones de frecuencia y probabilidad.** - Si las observaciones de una muestra están idénticamente distribuidas (cada valor de la muestra extraído de la misma distribución de probabilidad) estas pueden ordenarse para formar un histograma de frecuencia. Primero, el rango factible de la variable aleatoria se divide en intervalos discretos, luego se cuenta el número de observaciones que cae en cada uno de los intervalos y finalmente el resultado se dibuja como una gráfica de barras.

El ancho  $\Delta x$  del intervalo utilizado para construir el histograma de frecuencia se escoge tan pequeño como sea posible y de tal manera que caigan suficientes observaciones dentro de cada uno de los intervalos para que el histograma tenga una variación razonablemente suave en el rango de la información.

Si el número de observaciones  $n_i$  en el intervalo  $i$ , que cubre el rango  $[X_i - \Delta x, X_i]$ , se divide por el número total de observaciones  $n$ , el resultado se conoce como la función de frecuencia relativa  $f_s(x)$ :

$$f_s(x_i) = \frac{n_i}{n}$$

- f. **Parámetros estadísticos.** - El objetivo de la estadística es extraer la información esencial de un conjunto de datos, reduciendo un conjunto grande de números a un conjunto pequeño de números. Las estadísticas



son números calculados de una muestra los cuales resumen sus características más importantes.

Los parámetros estadísticos son características de una población, tales como  $\mu$  y  $\sigma$  en una ecuación. Un parámetro estadístico es el valor esperado  $E$  de alguna función de una variable aleatoria. Un parámetro simple es la media  $\mu$ , el valor esperado de la variable aleatoria. Para una variable aleatoria  $X$ , la media es  $E(X)$ , y se calcula como el producto de  $x$  y la correspondiente densidad de probabilidad  $f(x)$ , integrando sobre el rango factible de la variable aleatoria.

La estimación por la muestra de la media está dada por:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

El valor estimado de la muestra de la varianza está dado por.

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

En la cual el divisor es  $n-1$  en lugar de  $n$  para asegurar la que la estadística de la muestra no sea sesgada, es decir, que no tenga una tendencia, en promedio, a ser mayor o menor que el valor verdadero. La varianza tiene dimensiones de  $[X]^2$ .

La desviación estándar  $\sigma$  es una medida de la variabilidad que tiene las mismas dimensiones de  $X$ . La cantidad de  $\sigma$  es la raíz cuadrada de la varianza y se estima por  $s$ , a medida que la desviación estándar aumenta, aumenta la dispersión de la información. –

El coeficiente de variación  $CV = \sigma/\mu$ , estimado por  $s/\bar{x}$ , es una medida adimensional de la variabilidad.

- g. Métodos de estimación de parámetros.** Para estimar los parámetros estadísticos tenemos los siguientes métodos: método gráfico, método de mínimos cuadrados, método de momentos y método de máxima verisimilitud.

Los métodos de momentos y de máxima verisimilitud son los que tienen mayor aplicación en hidrología.

#### **Método de momentos.**

El método de momentos fue desarrollado por primera vez por Karl Pearson en 1902. él considero que unos buenos estimativos de los parámetros de una función de probabilidad son aquellos para los cuales los momentos de la función de densidad de probabilidad alrededor del origen son iguales a los momentos correspondientes de la información de la muestra.

$$\alpha = f_1(\mu_1, \mu_2, \dots)$$

$$\beta = f_2(\mu_3, \mu_4, \dots)$$

$$\gamma = f_3(\mu_5, \mu_6, \dots)$$

Donde:

$\mu_1, \mu_3, \mu_5$  Son los momentos con respecto a la media, o momentos centrales de la población.

$\alpha, \beta, \gamma$  Son los parámetros de la función de distribución.

### **Método de máxima verosimilitud.**

Chow et al. (2000) el método de máxima verosimilitud fue desarrollado por R. A. Fisher. El razonó que el mejor valor de un parámetro de una distribución de probabilidad debería ser el valor que maximizara la verosimilitud o probabilidad conjunta de ocurrencia de la muestra observada.

Dada una función de distribución

$$f = (x; \alpha, \beta, \gamma, \dots)$$

Donde:

$\alpha, \beta, \gamma$  Son los parámetros que deben ser estimados.

Se define la función verosimilitud de la muestra, como la productoria de:

$$L = \prod_{i=1}^N f(x; \alpha, \beta, \gamma, \dots)$$
$$L = f_1(x; \alpha, \beta, \gamma, \dots) * f_2(x; \alpha, \beta, \gamma, \dots) * \dots * f_N(x; \alpha, \beta, \gamma, \dots)$$

Siendo N tamaño de la muestra

### **2.2.9. MODELO DETERMINÍSTICO Y ESTOCÁSTICO DE LUTZ SCHOLZ**

Scholz (1980), menciona que, este modelo hidrológico, es combinado por que cuenta con una estructura determinística para el cálculo de los caudales mensuales para el año promedio (Balance Hídrico - Modelo determinístico); y una estructura estocástica para la generación de series extendidas de caudal (Proceso Markoviano - Modelo Estocástico).



Determinado el hecho de la ausencia de registros de caudal en la sierra peruana, el modelo se desarrolló tomando en consideración parámetros físicos y meteorológicos de las cuencas, que puedan ser obtenidos a través de mediciones cartográficas y de campo. Los parámetros más importantes del modelo son los coeficientes para la determinación de la precipitación efectiva, déficit de escurrimiento, retención y agotamiento de las cuencas. Los procedimientos que se han seguido en la implementación del modelo son:

- a. Cálculo de los parámetros necesarios para la descripción de los fenómenos de esorrentía promedio.
- b. Establecimiento de un conjunto de modelos parciales de los parámetros para el cálculo de caudales en cuencas sin información hidrométrica. En base a lo anterior se realiza el cálculo de los caudales necesarios.
- c. Calibración del modelo y generación de caudales extendidos por un proceso markoviano combinado de precipitación efectiva del mes con el caudal del mes anterior.

Este modelo fué implementado con fines de pronosticar caudales a escala mensual, teniendo una utilización inicial en estudios de proyectos de riego y posteriormente extendiéndose el uso del mismo a estudios hidrológicos con prácticamente cualquier finalidad (abastecimiento de agua, hidroelectricidad etc). Los resultados de la aplicación del modelo a las cuencas de la sierra peruana, han producido una correspondencia satisfactoria respecto a los valores medidos (Traverso et al., 2019).



### 2.2.10. ANÁLISIS DE REGRESIÓN.

Según Chereque (1989) la ecuación de Regresión Lineal Simple, es lineal porque genera una línea y es simple porque intervienen solamente dos variables. La representación matemática es:

$$Y_i = \alpha + \beta * X_i \quad \text{Modelo matemático}$$

$$Y_i = \alpha + \beta * X_i + \epsilon_i \quad \text{Modelo estocástico}$$

Donde:

$Y_i$  : Es la variable dependiente

$X_i$  : Es la variable independiente

$\alpha, \beta$  : Son los parámetros de la ecuación de regresión,  $\alpha$  es el punto de intersección entre la línea de regresión y el eje “Y”;  $\beta$  es el coeficiente de regresión o pendiente de la línea de regresión el mismo que explica cuan rápido aumenta o disminuye la variable dependiente “Y” con un cambio “X”; el residuo que queda de la variable “Y” que no ha sido considerado en “X”, existe debido a que las muestras son al azar y debido al efecto de otras variables

Para que el proceso de inferencia sea válido es necesario que las variables cumplan ciertas condiciones a las que se denomina suposiciones y son (Alfaro & Gonzales, 2008):

- a. Que el modelo propuesto sea el adecuado.
- b. Para cada valor de X se genera una distribución de valores Y los cuales son normales.



- c. Los errores se distribuyen normalmente e independientes con media cero y variancia  $\sigma^2$ .
- d. Existe homogeneidad de varianza.
- e. Las muestras son al azar.

### **2.3. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE LA INFORMACIÓN HIDROLÓGICA.**

Villon (2002) menciona que, el hidrólogo o especialista que desea desarrollar un estudio hidrológico debe buscar la información de la cuenca en estudio en las instituciones encargadas de su recopilación, pero una vez obtenido ésta, una de las interrogantes que se debe hacer, ¿es confiable la información disponible? La respuesta a esta pregunta, se obtiene realizando un análisis de consistencia de la información disponible mediante criterios físicos y métodos estadísticos que permitan identificar, evaluar y eliminar los posibles errores sistemáticos que han podido ocurrir, sea por causas naturales u ocasionadas por la intervención de la mano del hombre.

Pierola (1993) menciona que el análisis de consistencia es una técnica que permite detectar, corregir y eliminar errores sistemáticos y aleatorios que se presentan en series hidrométricas; en consecuencia, la serie analizada debe ser homogénea, consistente y confiable.

La no homogeneidad he inconsistencia en series hidrológicas son causadas por errores aleatorios y sistemáticos; entre ellas se tiene:

- a. Los errores aleatorios se presentan a causa de la inexactitud en las mediciones, mala lectura, mal funcionamiento del instrumento, errores de copia, etc.



- b. Los errores sistemáticos son los de mayor importancia, como consecuencia de los mismos, los datos pueden ser incrementados o reducidos sistemáticamente y pueden ser naturales, (derrumbes, colmatación y erosión de la sección transversal de la estructura de la estación de aforo; en general llamados como desastres naturales); artificiales y ocasionados por la mano del hombre (déficit en la toma de datos, cambio de la estación de aforo, construcción de estructuras hidráulica, explotación de aguas subterráneas, tala de árboles, etc.).

La no homogeneidad he inconsistencia en la serie histórica puede producir errores significativos en todos los análisis futuros y obtendría resultados altamente sesgados.

La no homogeneidad he inconsistencia en la serie histórica se presentan en forma de saltos y/o tendencias (Kuriqi et al., 2020). Antes de realizar el modelamiento matemático de una serie hidrológica es importante efectuar el análisis de consistencia respectivo con el fin de obtener una serie homogénea, consistente y confiable.

Los saltos “Jump” llamados también resbalamientos, son componentes determinísticas transitorias que se manifiestan en forma de cambios bruscos haciendo posibles que en la serie se presentan periodos de distinto comportamiento. Los saltos generalmente se presentan en la media y desviación estándar.

### **Análisis de saltos:**

El análisis de saltos se realiza desde tres puntos de vista: Análisis Visual de Hidrogramas, Análisis de doble masa y Análisis estadístico.



**a. Análisis visual de hidrogramas.**

Consiste en analizar visualmente la información histórica un hidrograma ploteado en coordenadas cartesianas, en el eje de las abscisas se plotea el tiempo (en años o meses) y en el eje de las ordenadas las variables hidrometeorológicas. La apreciación visual de estos gráficos permite observar la distribución de las variables en estudio con respecto al tiempo, e indicar el periodo o periodos dudosos, lo cual se puede reflejar como saltos y/o tendencias.

Para indicar en este primer análisis los periodos y aceptables se puede analizar en diversas formas:

- Cuando se tiene estaciones vecinas, se comparan sus hidrogramas y se ve cual periodo vario notoriamente uno respecto al otro.
- Cuando se tiene una sola estación, esta se divide en varios periodos y se compara con la información obtenida en campo, tratando de no confundir un salto con la ocurrencia de varios periodos húmedos o prolongadas sequías (Real-Rangel et al., 2020).
- En lo posible se debe mantener el periodo más largo como la más confiable.

**b. Análisis de doble masa.**

El análisis de doble masa o de dobles acumulaciones es una herramienta que sirve para detectar la inconsistencia de la información hidrometeorológica, mediante los puntos de quiebres que se presentan en los diagramas respectivos.

El procedimiento para realizar este análisis es el siguiente:



- Obtener la información original de dos o más estaciones de registro.
- Calcular los caudales máximos anuales acumulados de cada estación y el promedio de los caudales máximos anuales acumulados de todas las estaciones.
- Plotear los valores obtenidos en el paso anterior en sistema de coordenadas cartesianas, en el eje de abscisas el promedio de las precipitaciones anuales acumulados y en el eje de ordenadas las precipitaciones anuales acumulados de cada estación en estudio.
- En estos gráficos se define los quiebres que pueden ser significativos o no para su posterior análisis estadístico.

**c. Análisis estadístico.**

Una vez obtenido de los hidrogramas originales y del análisis de doble masa los periodos de posible corrección y los periodos de datos que se mantendrán con sus valores originales y cuales se modificarán, se procede a analizar estadísticamente tanto en la media como en la desviación estándar.

**c.1. Consistencia de la media.**

Mediante la prueba estadística “T” de Student se analiza si los valores promedios son estadísticamente iguales o diferentes con un 95% de nivel de significancia, de la siguiente forma:

**Prueba Estadística “T”:**

Planteamiento de las hipótesis:



$$H_p : \mu_1 = \mu_2 \text{ (media poblacional)}$$

$$H_a : \mu_1 \neq \mu_2$$

$$\alpha : 0.05$$

Cálculo de la desviación estándar de las diferencias de los promedios:

$$S_d = S_p \times \sqrt{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}$$

$$S_p = \sqrt{\frac{((n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2)}{(n_1 + n_2 - 2)}}$$

Donde:

$S_d$  : Desviación estándar de las diferencias de los promedios.

$S_p$  : Desviación estándar ponderada.

$n_1$  : Número de datos del primer periodo

$n_2$  : Número de datos del segundo periodo

$S_1^2$  : Varianza del primer periodo.

$S_2^2$  : Varianza del segundo periodo

Cálculo del valor de  $T_c$ , según:

$$T_c = \frac{[(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)]}{S_d}$$



Donde  $\mu_1 - \mu_2 = 0$ , por hipótesis.

Hallar el valor de “ $T_t$ ” de las tablas de T de Student con:

N.C = con 95% de probabilidad.

$\alpha = 0.05$

G. L =  $n_1 + n_2 - 2$

Donde:

G. L = grados de libertad.

$T_t$  = T tabulado.

$T_C$  = T calculado.

Conclusión:

Si  $(T_c) \leq T_t$  (95%)  $\rightarrow \bar{x}_1 = \bar{x}_2$  (estadísticamente).

Si  $(T_c) > T_t$  (95%)  $\rightarrow \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$  (estadísticamente), en este caso se debe corregir la información.

## c.2 Consistencia de la desviación estándar

El análisis de consistencia en la desviación estándar se realiza mediante la prueba estadística “F” de Fisher, si las desviaciones estándar ( $S_1$  y  $S_2$ ) de las submuestras son estadísticamente iguales o diferentes con un 95% de nivel de significancia, de la siguiente forma:



### Prueba estadística F:

Planteamiento de las hipótesis:

$$H_p : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \text{ (varianzas poblacionales)}$$

$$H_a : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

$$\alpha : 0.05$$

Cálculo de  $F_c$ , según:

$$F_c = \frac{S_2(x)}{S_1(x)}, \text{ si. } S_2(x) > S_1(x)$$

$$F_c = \frac{S_1(x)}{S_2(x)}, \text{ si. } S_1(x) > S_2(x)$$

Hallar el valor de  $F_t$  en las tablas con:

N.C. = 95% de probabilidad.

$$\alpha = 0.05$$

$$\text{G.L. N} = n_1 - 1$$

$$\text{G.L.D.} = n_2 - 1$$

Donde:

$F_c$  = valor de F calculado

$F_t$  = valor de F tabular



$\alpha$  = nivel de significación

G.L.N.= grados de libertad del numerador

G.L.D = grados de libertad del denominador.

Conclusiones:

Si  $F_c \leq F_t$  (95%)  $\rightarrow S_1(x) = S_2(x)$  (estadísticamente).

Si  $F_c > F_t$  (95%)  $\rightarrow S_1(x) \neq S_2(x)$  (estadísticamente). en este caso se debe corregir la información.

#### d. Corrección de la información.

Si los parámetros media y desviación estándar resultasen estadísticamente iguales, entonces la información original no se corrige por ser consistente con 95% de probabilidad, aun cuando en la recta de doble masa presenta pequeños quiebres. En caso contrario se debe corregir los datos de las sub muestras con las siguientes ecuaciones.

Para corregir el primer periodo, se emplea la siguiente ecuación:

$$X'(t) = \left( \frac{x_t - \bar{x}_1}{S_1} \right) \times (S_2 + \bar{x}_2)$$

Para corregir el segundo periodo:

$$X'(t) = \left( \frac{x_t - \bar{x}_2}{S_2} \right) \times (S_1 + \bar{x}_1)$$

Donde:

$X'(t)$  = valor corregido de la información



$X_t$  = valor a ser corregido.

**e. Bondad de la información corregida.**

Para comprobar la información corregida, comparando con el periodo confiable se repite el procedimiento ya descrito, vale decir desarrollando la prueba estadística T y F respectivamente, cuyos resultados deben ser confiables con 95% de probabilidad de aceptación.



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO

##### 3.1.1. Ubicación del área en estudio.

La cuenca del río Huancané presenta la siguiente ubicación geográfica y política:

##### a. Ubicación Geográfica:

La cuenca Huancané se encuentra ubicada en coordenadas UTM WGS84):  
Este: 376030 – 468557, Norte: 8301965 – 8397410 y a una altitud: 3,806  
- 5,100 msnm

##### b. Ubicación Política:

La cuenca del río Huancané, políticamente se encuentra en la región Puno, provincias: Huancané, San Antonio de Putina, Azángaro y Moho, y abarca distritos: Huancané, Moho, Huayrapata, Rosaspata, Vilque Chico, Cojata, Inchupalla, Huatasani, Pedro Vilca Apaza, Quilcapuncu, Putina, Muñani, Ananea y Potoni.

La cuenca del río Huancané gráficamente se presenta en la Figura 4



**Figura 4.** Cuenca del río Huancané

**Fuente:** Ministerio de Agricultura (2010)

### 3.1.2. Morfología de la cuenca del río Huancané.

Según Ministerio de Agricultura (2010) la morfología de una cuenca queda definida por su forma, relieve y drenaje, para lo cual se han establecido una serie de parámetros, que a través de ecuaciones matemáticas, sirven de referencia para la clasificación y comparación de las cuencas. Para un mejor enfoque sobre el estudio de las cuencas se establece los parámetros de forma, parámetros de relieve y parámetros de la red hidrográfica, generalmente.

Las características físicas desempeñan un papel esencial en la respuesta hidrológica de una cuenca hidrográfica. Recíprocamente, el carácter hidrológico de la misma contribuye considerablemente a formar sus características físicas.



Entonces, esta interrelación debería suministrar la base para predecir cuantitativamente la respuesta hidrológica, a partir de aquellos parámetros físicos que son fáciles de medir

La geomorfología de la cuenca del río Huancané, presenta cinco características diferentes, los que a continuación se describen:

- a. Planicie–Altiplanicie (A-a).- es la región de la sierra altoandina, y se localiza en diferentes zonas de la parte baja y media de la cuenca del río Huancané, abarca una superficie total de 313.40 km<sup>2</sup> (8.63%). En esta zona la pendiente de la cuenca es baja.
- b. Planicie Ondulada a Disectada–Altiplanicie Disectada (Ad-c). - se localiza en la parte alta de la subcuenca Muñani, abarcando un área de 24.41 km<sup>2</sup> (0.67%). En esta zona la pendiente de la cuenca es alta.
- c. Planicie Ondulada a Disectada–Altiplanicie Ondulada (Ao-b). - esta característica geomorfológica se localiza en la parte baja de la cuenca, abarca una superficie de 24.0 km<sup>2</sup> (0.66%). La pendiente de la cuenca en esta zona es moderada.
- d. Colina y Montaña–Vertiente Montañosa y Colina Moderadamente Empinada (Vs1-d). - es la segunda característica geomorfológica que ocupa mayor área de drenaje, localizada en toda parte de la cuenca y abarca una superficie de 795.13 km<sup>2</sup> (21.90%). En esta zona la pendiente de la cuenca es variable de baja a alta.
- e. Colina y Montaña–Vertiente Montañosa y Colina Empinada a Escarpada (Vs1-e).- es la primera característica geomorfológica de la



cuenca que ocupa mayor área y abarca una superficie de 2451.49 km<sup>2</sup> (67.51%) y localizada en toda la cuenca Huancané. En esta zona la pendiente de la cuenca es alta.

- f. Lagunas. - en la cuenca existen áreas pequeñas ocupadas por lagunas naturales, que abarca una superficie de 22.76 km<sup>2</sup> y representa 0.63% del total de la cuenca Huancané

### 3.1.3. Parámetros geomorfológicos de la cuenca.

- a. Perímetro de la cuenca, es la longitud de la línea de divortium aquarum. Se mide mediante el curvímetro o directamente se obtiene del Software en sistemas digitalizados. El perímetro de la cuenca del río Huancané es de 421.97 km.
- b. Longitud del río principal (L), es la longitud mayor de recorrido que realiza el río, desde la cabecera de la cuenca, siguiendo todos los cambios de dirección o sinuosidades, hasta un punto fijo de interés, puede ser una estación de aforo o desembocadura, expresado en unidades de longitud. La longitud del río principal de la cuenca del río Huancané es de 142.05 km
- c. Ancho promedio de la cuenca (Ap), el ancho promedio de la cuenca del río Huancané es de 25.56 km.
- d. Área de la cuenca (A), es la superficie de la cuenca comprendida dentro de la curva cerrada de divortium aquarum. La magnitud del área se obtiene mediante el planimetrado de la proyección del área de la cuenca sobre un plano horizontal. La superficie total de la cuenca del río Huancané es de 3631.19 km<sup>2</sup>



### **3.2. PERIODO DE DURACIÓN DEL TRABAJO**

La duración fue un aproximado de 1 año, desde el momento de la presentación del proyecto.

### **3.3. PROCEDENCIA DEL MATERIAL UTILIZADO**

#### **3.3.1. Información cartográfica.**

Los planos utilizados corresponden a sub cuenca del río Huancané, a escala de 1:100 000 los mismos que fueron proporcionados por el Proyecto Especial Lago Titicaca (PELT). Elaborados por el Instituto Geográfico Militar - IGM, el formato digital del plano base utilizado, está en el sistema de coordenadas UTM WGS84, proyectadas para la zona 18, que es donde se ubica la zona en estudio.

#### **3.3.2. Información meteorológica.**

La información meteorológica de precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y horas de sol se obtuvo del Servicio Nacional de Meteorología (SENAMHI), se utilizó registros históricos mensuales y anuales de las estaciones Huancané, Putina y Muñani, cuya ubicación política y geográfica se presenta en la siguiente tabla.

#### **3.3.3. Equipos y materiales para el procesamiento.**

Los equipos y materiales utilizados en el procesamiento e impresión son:

- Hardware: Computadora, Impresora y accesorios.
- Software: Office 2013, Auto CAD v.13., Arc Gis v.4, HIDROESTA y CROPWAT.

- Materiales de escritorio.

### 3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO

**Tabla 1.** Ubicación de las estaciones meteorológicas.

Estación	Tipo	Ubicación Política			Ubicación Geográfica		
		Región	Provincia	Distrito	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud (msnm)
Huancané	CO	Puno	Huancané	Huancané	69°45'29.7"	15°12'24.8"	3840
Putina	CO	Puno	San Antonio de Putina	Putina	69°52'25.7"	14°55'16.9"	3856
Muñani	CO	Puno	Azángaro	Muñani	69°57'6.07"	14°45'42.02"	3948

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 3.4.1. Información hidrométrica.

En el ámbito de la cuenca Huancané existe una estación hidrométrica en el Puente Huancané, controlada por SENAMHI Puno, cuya ubicación es el siguiente: Ubicación política; región Puno, provincia Huancané y distrito Huancané. Ubicación geográfica; Latitud sur 15°12'57.1", Longitud oeste 69°47'33.37" y altitud 3814.0 m.s.n.m.

### 3.5. DISEÑO ESTADÍSTICO

La metodología empleada es el siguiente: a) caracterización de la cuenca del río Huancané, b) obtención de información meteorológica e hidrométrica de las oficinas del servicio nacional de meteorología e hidrología con sede en Puno, c) Modelamiento hidrológico mediante el modelo propuesto por Lutz Scholz, considerando primero la determinación del caudal mensual para el año promedio,



luego realizar la calibración y segundo la generación de caudales mensuales para periodos extendidos.

### **3.6.VARIABLES**

Las variables para la investigación son:

OFERTA HÍDRICA DEL RÍO HUANCANÉ Y LA GENERACIÓN DE  
DESCARGAS MEDIAS MENSUALES.

### **3.7. PROCEDIMIENTO**

- Primero: Se ejecutó el proyecto de investigación.
- Segundo: Se analizó e interpretó los instrumentos evaluados.
- Tercero: Se redactó la tesis de acuerdo al esquema de la UNA-Puno.

### **3.8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

#### **Para el objetivo específico 1:**

La metodología a utilizar es propuesta por el experto Lutz Scholz (1980), que a continuación se describe:

#### **3.8.1. Precipitación media de la cuenca**

La precipitación media mensual en la cuenca del río Huancané, se determinará mediante el método de promedio aritmético de las estaciones meteorológicas dentro y alrededor de la cuenca, teniendo en cuenta la gradiente de la precipitación.



### 3.8.2. Precipitación efectiva

La precipitación efectiva se calcula mediante la ecuación de un polinomio de quinto grado, elaborado por la Misión Técnica Alemana en 1980 para el Ex - Programa Nacional de Pequeñas y Medianas Irrigaciones – Plan Meris II.

$$PE = a_0 + a_1P + a_2P^2 + a_3P^3 + a_4P^4 + a_5P^5$$

Donde:

PE = precipitación efectiva mensual (mm/mes).

P = precipitación total mensual (mm/mes).

$a_i$  = coeficiente del polinomio.

$$a_0 = 0$$

### 3.8.3. Retención en la cuenca.

Si para el año promedio existe un equilibrio entre el gasto y el abastecimiento de la reserva de la cuenca y admitiendo que el caudal total sea igual a la precipitación efectiva anual, se puede calcular la contribución de la reserva hídrica al caudal según la fórmula siguiente:

$$R_i = CM_i - PE_i$$

$$CM_i = PE_i + G_i - A_i$$

Donde:

$R_i$  = retención de la cuenca (mm/mes).



$CM_i$  = caudal mensual (mm/mes).

$PE_i$  = precipitación efectiva mensual (mm/mes).

$G_i$  = gasto de la retención de la cuenca (mm/mes).

$A_i$  = abastecimiento de la retención de la cuenca (mm/mes).

$R_i$  =  $G_i$  para valores mayores de cero (mm/mes).

$R_i$  =  $A_i$  para valores menores de cero (mm/mes).

#### 3.8.4. Gasto de la retención de la cuenca ( G )

Es el volumen de agua que descarga la cuenca durante la época de estiaje, llamado también agotamiento de la cuenca y alimenta al río en forma de caudal natural. Los parámetros para calcular el gasto de la cuenca se describen a continuación:

##### **Coefficiente de agotamiento ( a )**

Para el cálculo del coeficiente de agotamiento de la cuenca, hay cuatro ecuaciones para cuatro clases de cuencas según el modelo. Las ecuaciones se eligen según las características de la cuenca.

*Agotamiento muy rápido*, cuencas con temperatura elevada mayor de 10°C y retención reducida (50 mm/año) hasta retención mediana (80 mm/año).

$$a = -0.00252\text{Ln}(AR) + 0.034$$

*Agotamiento rápido*, por la retención en 50 y 80 mm/año y vegetación poco desarrollada (puna).

$$a = -0.00252\text{Ln}(AR) + 0.030$$



*Agotamiento mediano*, por retención mediana (alrededor de 80 mm/año) y vegetación mezclada (pastos, bosques y terrenos cultivados).

$$a = -0.00252\text{Ln}(\text{AR}) + 0.026$$

*Agotamiento reducido*, por alta retención (más de 100 mm/año) y vegetación mezclada.

$$a = -0.00252\text{Ln}(\text{AR}) + 0.023$$

Donde:

**a** = coeficiente de agotamiento por día.

**AR** = área de la cuenca (Km<sup>2</sup>).

**Ln** = logaritmo natural o neperiano.

**Coficiente de gasto de la retención ( $b_i$ )**

Relación entre la descarga del mes actual y del mes anterior:

$$b_0 = \frac{Q_t}{Q_0} = e^{-a \cdot t}$$

Donde:

**$Q_t$**  = descarga en el tiempo t.

**$Q_0$**  = descarga inicial.

**a** = coeficiente de agotamiento.

**t** = tiempo (número de días del mes).

Por lo tanto, el coeficiente de gasto de la retención de la cuenca  $b_i$ , es igual a:



$$b_i = b_0$$

$$b_i = e^{-a.t}$$

Donde:

t = tiempo (N.º días del mes, es acumulativo para los meses siguientes).

e = base del logaritmo neperiano.

### **Cálculo de gasto de la retención ( G )**

La contribución mensual de la retención durante la estación seca se calcula mediante la siguiente relación:

$$G_i = \left( \frac{b_i}{\sum_{i=1}^m b_i} \right) \times R$$

Donde:

$G_i$  = gasto de la retención para el mes i (mm/mes).

R = retención de la cuenca (mm/año)

m = número de meses de estiaje.

$b_i$  = coeficiente de gasto de la retención.

### **3.8.5. Abastecimiento de la retención de la cuenca ( A )**

Es el volumen de agua que retiene la cuenca durante la época de lluvias, almacenando naturalmente en acuíferos, lagunas, pantanos y nevados como reserva hídrica. Para posteriormente alimentar al río en época de estiaje.



La lámina de agua  $A_i$  que entra en la reserva de la cuenca se muestra en forma de un déficit mensual de la precipitación efectiva mensual. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$A_i = a_i R$$

Donde:

$A_i$  = abastecimiento de la retención en el mes  $i$  (mm/mes).

$a_i$  = coeficiente de abastecimiento.

$R$  = retención de la cuenca (mm/año).

$i$  = mes del año, de 1 a 12.

El coeficiente de abastecimiento de la retención, es la proporción de retención hídrica de la cuenca durante la época de lluvias. Se puede estimar con la siguiente relación:

$$a_i = \frac{PE_i}{PE_T}$$

Donde:

$a_i$  = coeficiente de abastecimiento.

$PE_i$  = precipitación efectiva del mes  $i$  (mm/mes).

$PE_T$  = precipitación efectiva total de la cuenca (mm/mes).

Se puede determinar el coeficiente de abastecimiento real de la cuenca mediante aforo de descargas en el río durante la estación lluviosa. Pero cuando no

exista ningún aforo, se utiliza como referencia los valores obtenidos en las cuencas de las regiones de Cuzco, Huancavelica, Junín y Cajamarca.

**Tabla 2.** Coeficientes de almacenamiento hídrico durante la época de lluvias.

(valores de “ai” en %)

Region	Ener	Feb	Mar	Oct	Nov	Dic	S
Cuzco	40	20	0	0	5	35	100
Huancavelica	30	20	5	10	0	35	100
Junín	30	30	5	10	0	25	100
Cajamarca	20	25	35	25	-5	0	100

**Fuente:** Generación de caudales mensuales en la sierra peruana – Programa nacional de pequeñas y medianas irrigaciones – Plan Meris II, marzo 1980.

La suma de los valores relativos del abastecimiento “a<sub>hi</sub>” es igual a 1 (100%) correspondiente a la restitución total de la retención R de la cuenca.

### 3.8.6. Caudal mensual para el año promedio

La lámina de agua que corresponde al caudal mensual para el año promedio se calcula según la ecuación del balance hídrico a partir de los componentes descritos anteriormente.

$$CM_i = PE_i + G_i - A_i$$

Donde:

$$CM_i = \text{caudal del mes } i \text{ (mm/mes).}$$



$PE_i$  = precipitación efectiva del mes  $i$  (mm/mes).

$G_i$  = gasto de la retención en el mes  $i$  (mm/mes).

$A_i$  = abastecimiento de la retención en el mes  $i$  (mm/mes).

**Para el objetivo específico 2:**

### 3.8.7. Generación de caudales mensuales para períodos extendidos

Un método apropiado para la generación de descargas consiste en una combinación de un proceso *Markoviano de primer orden*.

$$Q_t = b_1 + b_2 Q_{t-1} + b_3 PE_t + S Z_t \sqrt{1 - R^2}$$

Donde:

$Q_t$  = caudal del mes  $t$ .

$Q_{t-1}$  = caudal del mes anterior ( $t-1$ ).

$PE_t$  = precipitación efectiva del mes  $t$ .

$S$  = error estándar del estimado.

$Z_t$  = variable aleatoria normal independiente (0,1) del mes  $t$ .

$R^2$  = coeficiente de determinación múltiple.

$b_1, b_2, b_3$  = coeficientes de regresión lineal múltiple.

$b_1$  = factor constante (caudal básico).



## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la investigación, así como su discusión, se presentan a continuación.

#### 4.1. DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA AREAL.

Para determinar la precipitación media areal se va a emplear información pluviométrica de las estaciones meteorológicas Huancané, Putina y Muñani, los mismos son de tipo climatológica, esta información es obtenida del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI Puno) para un periodo de 44 años (1973 al 2016)

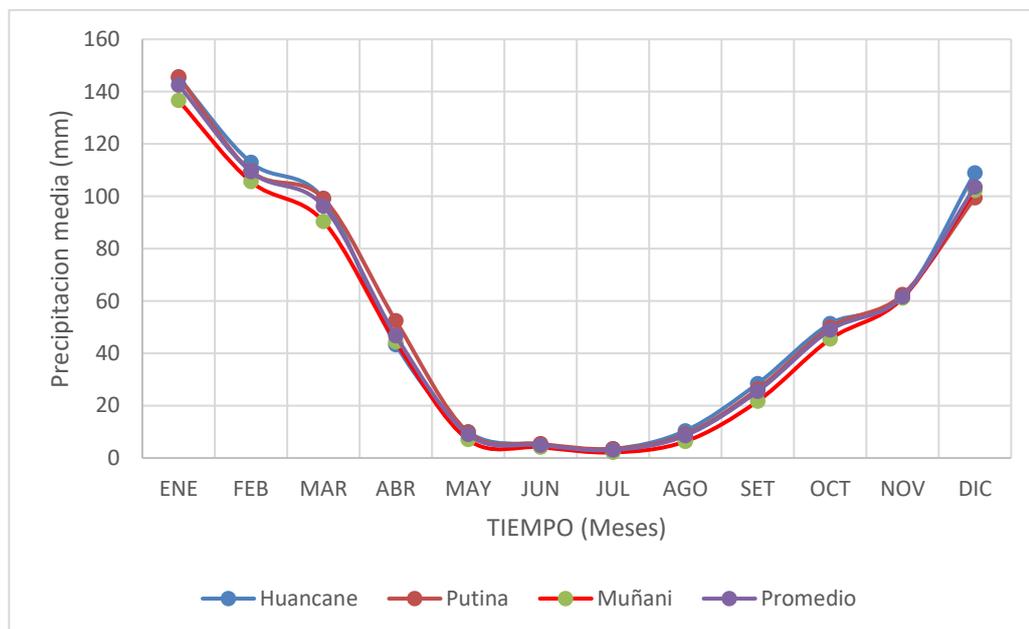
En la tabla A-1 del anexo, se presentan la información histórica de la precipitación total mensual de la estación Huancané, en ella se puede observar que en promedio la precipitación media varia de 3.50 a 145.30 mm, que corresponden a los meses de julio y enero, respectivamente.

En la tabla A-2 del anexo, se presentan la información histórica de la precipitación total mensual de la estación Putina, en ella se puede observar que en promedio la precipitación media varia de 3.50 a 145.70 mm, que corresponden a los meses de julio y enero, respectivamente.

En la tabla A-3 del anexo, se presentan la información histórica de la precipitación total mensual de la estación Muñani, en ella se observa que en promedio la precipitación media varia de 2.10 a 136.6 mm, que corresponden a los meses de julio y enero, respectivamente.

En la tabla 3 se presentan la precipitación media a real de la cuenca del río Huancané, considerando las estaciones Huancané, Putina y Muñani, en ella se puede observar que en promedio la precipitación media varía de 3.05 a 142.52 mm, que corresponden a los meses de julio y enero, respectivamente.

En la figura 5. Se muestra la variación de la precipitación mensual en la cuenca del río Huancané



**Figura 5.** Variación de la precipitación media mensual INEI

**Fuente:** El investigador

**Tabla 3.** Precipitación media a real mensual (mm) – Estación Huancané.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1973	121.8	94.5	107.8	81.5	7.0	1.1	5.4	10.7	58.9	34.1	36.0	61.9	620.7
1974	142.5	125.6	56.7	33.5	0.2	2.9	0.5	14.0	17.1	37.8	33.6	79.0	543.5
1975	101.2	131.9	85.1	17.9	11.4	4.5	0.0	0.2	10.7	43.0	34.4	158.7	599.1
1976	98.8	85.9	64.6	12.9	12.3	4.2	1.1	22.5	44.1	29.6	49.1	101.5	526.7
1977	66.0	152.6	109.0	10.6	4.3	0.0	0.7	1.1	48.1	39.4	96.2	90.5	618.4
1978	141.5	170.6	118.2	55.6	3.2	5.1	2.4	0.1	26.8	25.7	136.2	202.7	888.1
1979	201.9	73.9	67.6	106.0	5.9	0.0	1.4	5.8	9.1	72.7	41.3	112.7	698.3
1980	118.1	86.2	119.9	16.7	6.9	2.2	8.2	4.8	51.5	88.7	32.2	64.0	599.4
1981	252.6	94.8	112.9	77.8	6.3	1.9	0.0	15.9	31.0	86.8	45.1	115.3	840.4
1982	177.3	71.7	96.8	60.2	0.4	0.4	0.3	5.7	54.6	35.8	134.4	45.4	682.9
1983	98.7	70.9	38.0	50.7	10.5	1.0	1.9	1.4	20.1	28.6	29.2	79.3	430.3
1984	245.3	190.8	123.0	37.5	9.0	6.8	0.7	13.4	3.8	75.0	129.1	113.0	947.5
1985	141.4	108.4	97.4	120.1	16.7	10.3	0.0	2.7	59.7	33.2	150.7	184.8	925.4
1986	126.1	162.5	131.6	101.4	9.9	0.0	4.6	9.4	51.6	10.7	83.4	123.1	814.2
1987	168.0	62.2	64.1	39.7	8.6	6.2	23.8	7.9	3.4	54.0	90.9	41.5	570.3
1988	155.6	85.5	184.1	101.7	26.6	0.0	0.0	1.8	5.9	44.9	6.1	118.0	730.1
1989	151.4	129.7	110.2	61.5	0.6	8.2	0.4	12.3	25.8	28.4	47.5	71.2	647.1
1990	145.9	59.8	49.8	16.7	6.2	53.7	0.0	12.6	17.4	80.2	88.6	93.6	624.4
1991	139.1	109.1	137.4	43.9	11.8	42.7	3.6	0.5	19.1	23.7	64.7	124.4	720.0
1992	158.0	73.7	47.5	16.9	0.0	5.1	4.3	60.8	15.1	48.0	51.0	125.1	605.4
1993	152.9	57.1	90.1	63.4	11.4	0.7	4.8	15.7	22.7	59.6	93.6	124.1	696.0
1994	125.2	107.2	118.7	61.0	18.3	3.4	0.0	0.0	12.5	33.1	57.9	116.6	653.9
1995	131.0	153.1	108.4	9.4	0.6	0.0	1.4	0.4	7.4	14.3	55.1	84.3	565.3
1996	157.8	72.6	84.5	29.8	16.9	0.0	2.8	6.3	14.0	19.9	101.9	111.5	617.9
1997	189.5	101.6	200.8	72.8	7.6	0.0	0.4	19.8	31.0	39.1	92.6	48.0	803.4
1998	99.1	90.5	95.6	41.7	0.0	6.9	0.0	0.7	1.6	62.1	98.5	36.0	532.6
1999	92.2	58.4	146.4	44.6	20.9	0.2	0.9	0.6	42.2	50.0	39.5	67.7	563.5
2000	121.0	95.1	96.3	9.8	4.6	18.0	0.2	14.3	14.3	112.3	20.1	109.0	615.0
2001	194.8	128.5	177.7	26.6	27.6	3.2	6.5	9.4	18.8	74.6	55.8	100.7	824.2
2002	102.2	140.6	122.2	66.0	13.8	3.4	18.9	5.6	29.0	119.5	65.1	114.4	800.8
2003	200.9	112.1	123.6	52.2	3.0	9.1	1.0	10.3	25.3	74.0	43.0	106.3	760.8
2004	230.8	133.2	83.7	52.3	12.5	4.5	3.4	23.9	22.1	30.1	59.7	100.1	756.3
2005	90.5	171.7	75.1	23.6	1.9	0.0	0.7	3.5	17.0	64.9	70.1	79.2	598.2
2006	197.8	42.5	59.9	63.6	0.9	3.7	0.0	4.2	24.9	54.4	66.4	113.2	631.7
2007	112.8	54.5	135.4	65.4	15.3	0.7	0.7	0.2	51.3	14.0	55.3	77.7	583.5
2008	122.4	73.8	56.6	6.1	5.5	0.0	0.0	0.0	10.0	55.8	47.1	168.9	546.1
2009	87.1	98.8	48.5	14.8	2.8	0.0	3.3	0.0	16.7	19.8	71.5	91.8	455.1



2010	168.8	122.5	71.1	25.2	15.6	0.0	0.2	2.0	0.2	50.5	14.4	102.1	572.6
2011	81.6	155.0	81.4	32.1	4.3	0.0	5.6	9.3	51.8	36.4	23.1	112.4	592.9
2012	131.5	117.0	102.1	48.9	4.9	0.6	0.2	2.1	8.9	19.6	32.2	148.5	616.5
2013	158.4	172.9	66.2	21.6	25.0	4.4	6.3	9.6	4.0	81.2	43.5	124.8	717.8
2014	135.8	120.9	76.3	40.4	10.3	0.3	7.7	11.6	62.8	35.5	21.8	94.9	618.4
2015	149.7	95.2	67.7	66.8	10.0	1.1	0.8	20.6	45.9	49.8	56.9	131.5	696.2
2016	85.8	196.9	24.8	54.5	2.3	0.0	8.8	3.5	13.9	60.1	46.5	86.4	583.6
PROM	142.52	109.37	96.24	46.72	8.95	4.92	3.05	8.57	25.50	48.88	61.62	103.54	659.9

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.2. TEMPERATURA MEDIA MENSUAL EN LA CUENCA.

En la tabla 4, se presenta los valores de las temperaturas media promedio mensual de las estaciones Huancané, Putina y Muñani, los mismos se ubican dentro de la cuenca del río Huancané; la variación de la temperatura es de 5.5 °C para el mes de julio y de 9.8 °C para el mes de noviembre y diciembre.

**Tabla 4.** Temperatura media mensual (°C) – Cuenca Huancané.

ESTACION	ENE.	FEB	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	PROM
HUANCANE	9.3	9.2	8.9	8.0	6.3	5.0	4.6	5.8	7.6	8.8	9.4	9.4	7.7
PUTINA	10.0	10.1	9.7	9.1	7.2	5.6	5.6	6.8	8.6	9.8	10.3	10.3	8.6
MUÑANI	9.4	9.5	9.4	9.0	7.8	6.5	6.3	7.5	8.7	9.4	9.7	9.8	8.6
PROM.	9.6	9.6	9.3	8.7	7.1	5.7	5.5	6.7	8.3	9.3	9.8	9.8	8.3

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.

Los resultados del cálculo de la evapotranspiración potencial mediante el método de Hargreaves se presentan en la tabla 5; para ello se ha considerado la

ubicación geográfica de la estación meteorológica Huancané, Putina y Muñani.

La evapotranspiración potencial anual es de 1272.42 mm; obteniéndose un rango de 90.78 a 126.59 mm, que corresponden a los meses de junio y octubre, respectivamente.

**Tabla 5.** Evapotranspiración potencial (mm/mes)

Mes	Estación			Prom.
	Huancané	Putina	Muñani	
Ene.	106.12	91.39	104.52	100.68
Feb.	96.36	87.23	96.67	93.42
Mar	102.53	95.76	106.14	101.48
Abr	99.20	95.61	106.26	100.36
May	96.38	95.00	109.04	100.14
Jun	84.00	87.97	100.37	90.78
Jul	89.83	93.56	108.59	97.33
Ago	105.57	100.91	121.20	109.23
Sep	116.74	110.49	126.63	117.95
Oct	128.83	118.63	132.32	126.59
Nov	127.09	113.07	125.14	121.77
Dic	118.43	102.48	117.20	112.70
Total	1271.08	1192.10	1354.08	1272.42

**Fuente:** Elaboración propia

## COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO.

Los resultados de la estimación del coeficiente de escurrimiento según la fórmula de L. Turc, se presentan en la tabla 6, cuyos valores son de 0.28 y un déficit de escurrimiento de 424.6 mm/año.

**Tabla 6.** Coeficiente de escurrimiento – Método Turc.

PARAMETRO		VALOR
Precipitación total anual promedio (mm/año)	P	659.90
Temperatura media anual (°C)	T	8.30
Coeficiente de temperatura	L	536.10
Déficit de escurrimiento (mm/año)	D	424.60
Coeficiente de escurrimiento	C	0.28

**Fuente:** Elaboración propia.

Considerando las ecuaciones para determinar los coeficientes de escurrimiento y déficit de escurrimiento validado para la región de la sierra del sur de Perú, los resultados se presentan en la tabla 7, cuyos valores son de 0.28 y 424.6 mm/año, respectivamente.

**Tabla 7.** Coeficiente de escurrimiento – Método empírico

PARAMETRO		VALOR
Precipitación total anual promedio (mm/año)	P	659.90
ETP (mm/año) Hargreaves	EP	1272.42
Coeficiente de escurrimiento	C	0,28
DEFICIT DE ESCURRIMIENTO (mm/año)	D	424.6

**Fuente:** Elaboración propia.

Los valores de coeficiente de escurrimiento (C) calculados mediante el método de Turc y el método empírico para la sierra del Perú, varía de 0.391 a 0.221, respectivamente, mientras que los valores de déficit de escurrimiento (D), varía de 417.73 a 608.68 mm/año, respectivamente. Estos valores nos servirán de referencia,



para iniciar la calibración del modelo; sin embargo, el verdadero valor se encontrará luego de la calibración del modelo.

## **PRECIPITACIÓN EFECTIVA.**

Para estimar la precipitación efectiva el USBR (US Bureau of Reclamación) considera que existe tres curvas tipo de precipitación efectiva en función de la precipitación total. Estas curvas se muestran en la tabla 8.

La precipitación efectiva se calculó para el coeficiente de escurrimiento promedio, de tal forma que la relación entre precipitación efectiva y precipitación total resulte igual al coeficiente de esorrentía.

Para determinar la precipitación efectiva desde la lluvia real para cuenca del río Huancané se tiene que interpolar estos valores con una regresión polinomial, los coeficientes de regresión son útiles para interpolar adecuadamente los valores de precipitación efectiva.

Los coeficientes de regresión son importantes para interpolar adecuadamente los valores de precipitación efectiva. Los valores de estos coeficientes se obtienen de la correlación entre la precipitación y la precipitación efectiva correspondiente a cada curva., los mismos se presentan en la tabla 09

En las figuras 6 al 8, se muestran las curvas que relacionan la precipitación efectiva y la precipitación total, mediante ecuaciones polinomiales de quinto orden.

**Tabla 8.** Precipitación efectiva según el Bureau of Reclamación (USBR)

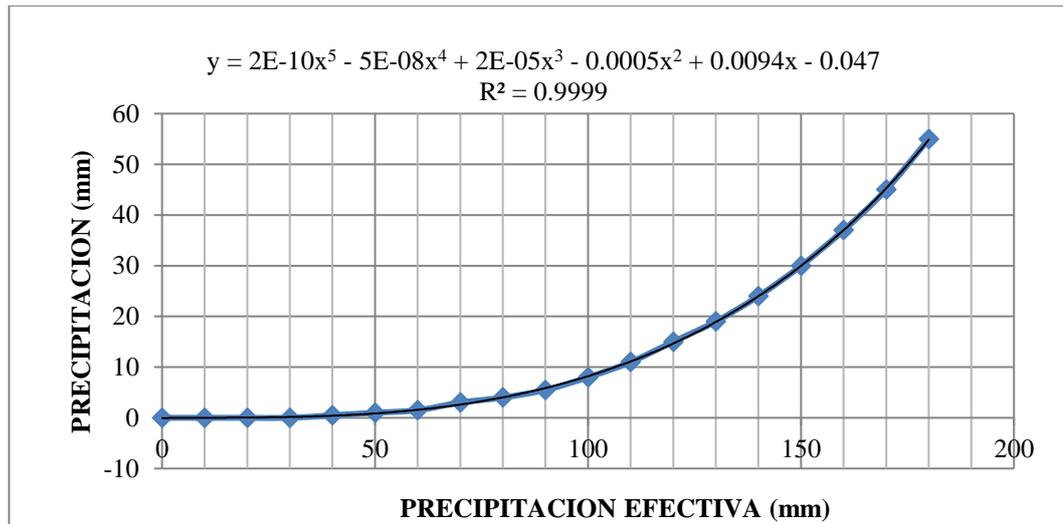
P	P EFECTIVA: PE (mm)		
	Mm	Curva I	Curva II
0	0	0	0
10	0	1	2
20	0	2	4
30	0	3	6
40	0.5	4	8
50	1	6	11
60	1.5	8	14
70	3	10	18
80	4	14	24
90	5.5	18	30
100	8	23	39
110	11	29	48
120	15	36	58
130	19	43	68
140	24	52	78
150	30	60	88
160	37	69	98
170	45	79	108
180	55	89	118

**Fuente:** USBR

**Tabla 9.** Coeficientes de regresión para las curvas de precipitación efectiva.

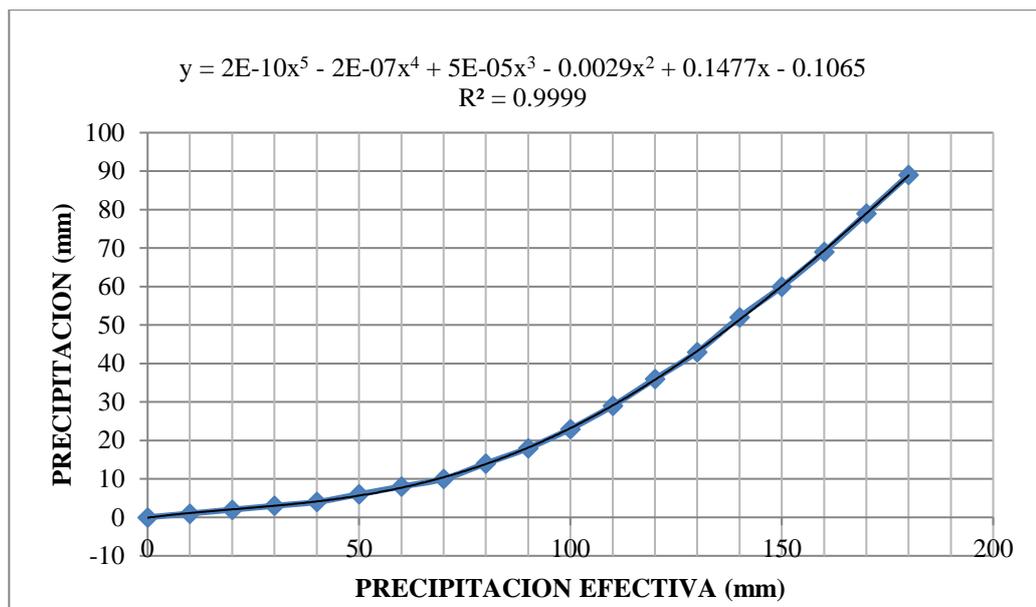
Coefficiente	CURVA I	CURVA II	CURVA III
Ao	-0.047	-0.106	-0.417
a1	0.009	0.147	0.379
a2	0	-0.002	-0.01
a3	0.00002	0.00005	0
a4	-0.00000005	-0.0000002	-9.00E-07
a5	2E-10	2E-10	1.00E-09

**Fuente:** Elaboración propia



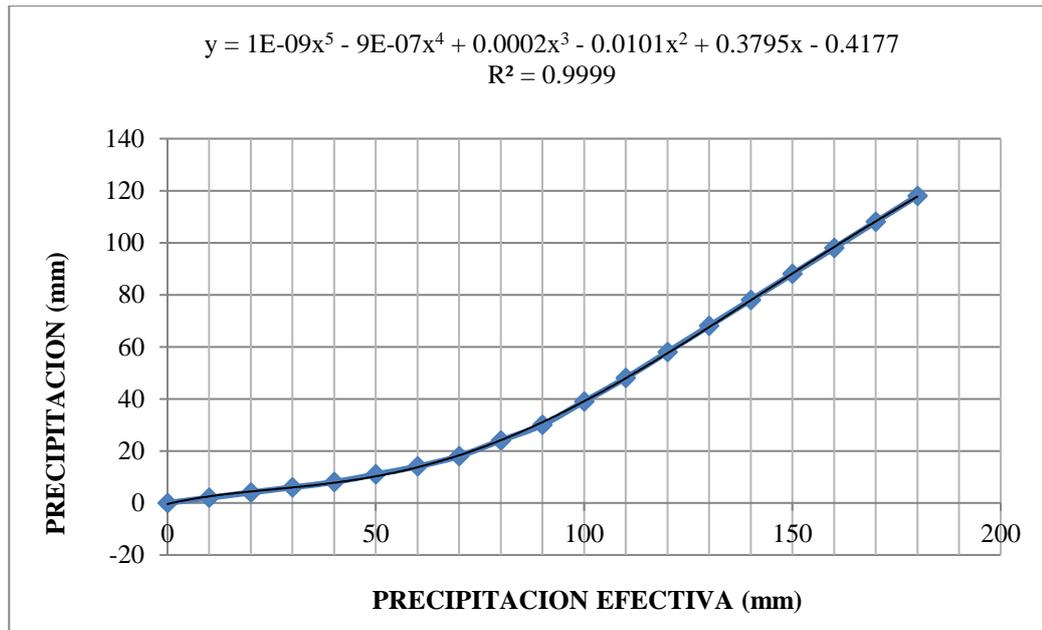
**Figura 6.** Ecuación polinómica de la precipitación efectiva de la curva I.

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 7.** Ecuación polinómica de la precipitación efectiva de la curva II

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 8.** Ecuación polinómica de la precipitación efectiva de la curva III

**Fuente:** Elaboración propia

Los Resultados de la estimación de la precipitación efectiva se presentan en la tabla 10.

**Tabla 10.** Precipitación efectiva mensual (mm)

PRECIPITACION MENSUAL					
	N°	P	Efectiva		
MES	días del mes	Total	PE II	PE III	PE
		mm/mes	mm/mes	mm/mes	mm/mes
1	2	3	4	5	6
Enero	30	142.5	36.0	115.0	59.3
Febrero	28	109.4	21.3	68.8	35.3
Marzo	31	96.2	16.3	51.9	26.8
Abril	30	46.7	4.7	11.6	6.7
Mayo	31	8.9	1.0	2.3	1.4
Junio	30	4.9	0.6	1.2	0.8
Julio	31	3.0	0.3	0.7	0.4
Agosto	31	8.6	1.0	2.2	1.3
Setiem.	30	25.5	2.5	5.6	3.4
Octubre	31	48.9	4.9	12.5	7.2
Noviem.	30	61.6	7.0	19.3	10.6
Diciem.	31	103.5	19.0	61.1	31.4
<b>AÑO</b>		<b>659.9</b>	<b>114.6</b>	<b>352.2</b>	<b>184.8</b>
Coeficientes		0.28	0.705	0.295	1.000

**Fuente:** Elaboración propia.

### RETENCIÓN DE LA CUENCA.

Suponiendo que en el año promedio existe un equilibrio entre el gasto y el abastecimiento de la reserva de la cuenca y admitiendo, además, que el caudal total sea igual a la precipitación efectiva anual; considerando que en la cuenca se encuentra lagunas que contribuyen a la retención de aproximadamente de 22.76 Km<sup>2</sup>. El gasto anual de la retención (R), es de 44 mm/año.



### **COEFICIENTE DE AGOTAMIENTO.**

Considerando que la zona en estudio se encuentra en una zona con vegetación escasa, poco desarrollada (Puna), cuencas con agotamiento rápido y mediana retención, a partir de las fórmulas empíricas propuesto en la metodología, se obtiene que el coeficiente de agotamiento tiene un valor de 0.0093.

### **RELACIÓN DE CAUDALES.**

Considerando el coeficiente de agotamiento y el número de los días del mes, la relación de caudales (bo), a partir de la formula empírica propuesto en el capítulo anterior, se obtiene un valor de 0.756

### **GASTO DE LA RETENCIÓN.**

Los resultados de la contribución mensual de la estación seca, estimados con las fórmulas empíricas correspondientes, se presenta en la tabla 11, se considera los meses húmedos como son: noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo.

**Tabla 11.** Gasto de la retención mensual (mm/mes).

<b>CONTRIBUCION DE LA RETENCION</b>			
<b>Gasto</b>		<b>Abastecimiento</b>	
<b>bi</b>	<b>Gi</b>	<b>ai</b>	<b>Ai</b>
	mm/mes		mm/mes
7	8	9	10
		0.550	24.2
		-0.070	-3.1
		-0.150	-6.6
0.756	12.51		
0.571	9.46		
0.431	7.14		
0.326	5.40		
0.246	4.08		
0.186	3.08		
0.141	2.33		
		0.140	6.2
		0.530	23.3
<b>2.657</b>	<b>44.0</b>	<b>1.000</b>	<b>44.0</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

### **GENERACIÓN DE CAUDALES MENSUALES PARA UN AÑO PROMEDIO.**

Los resultados de la generación de caudales mensuales para un año promedio se presentan en la tabla 12. En ella se observa una variación de 6.25 a 57.6 m<sup>3</sup>/s para los meses de setiembre y febrero respectivamente, obteniéndose un valor promedio anual de 21.6 m<sup>3</sup>/s. Los mismos que están en función de la precipitación efectiva mensual, gasto de la retención y abastecimiento mensual.

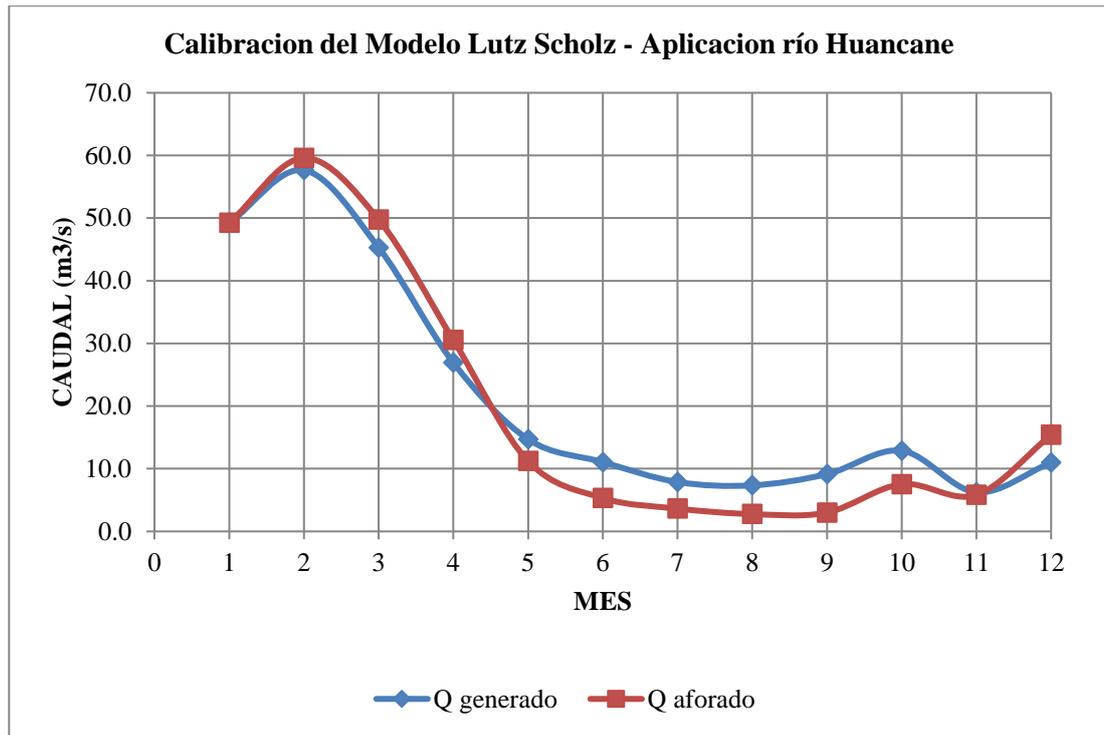


**Tabla 12.** Generación de caudales mensuales para el año promedio. (m<sup>3</sup>/s).

mes	Q generados	Q generados	Q aforados
	mm/mes	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s
Enero	35.15	49.24	49.23
Febrero	38.40	57.64	59.59
Marzo	33.42	45.31	49.76
Abril	19.22	26.92	30.55
Mayo	10.85	14.72	11.22
Junio	7.90	11.06	5.32
Julio	5.81	7.88	3.64
Agosto	5.42	7.35	2.76
Setiembre	6.52	9.14	3.01
Octubre	9.50	12.88	7.54
Noviembre	4.46	6.25	5.82
Diciembre	8.10	10.98	15.42
	promedio	21.62	20.32

**Fuente:** Elaboración propia

En la siguiente figura se muestra el comportamiento de los caudales medios mensuales del río Huancané aforados y generados.



**Figura 9.** Calibración de los caudales medios calculados y aforados.

**Fuente:** Elaboración propia

Al realizar la correlación entre los datos generados y los datos registrados, se obtiene un coeficiente de correlación de 0.975, esto nos indica que la calibración del modelo de generación de descargas medias para el río Huancané mediante del modelo Lutz Scholz es apropiado.

## **GENERACIÓN DE CAUDALES PARA PERIODOS EXTENDIDOS.**

### **Precipitación efectiva de la cuenca.**

Para la generación de caudales para periodos extendidos, primero se tiene que determinar la precipitación efectiva a partir de la precipitación a real para la cuenca del río Huancané. Los resultados se presentan en la tabla 13.



**Tabla 13.** Precipitación efectiva (mm) generada en la cuenca del río Huancané

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.
1973	44.4	26.5	34.9	18.9	2.7	5.3	3.3	1.6	8.1	0.8	1.2	9.3
1974	59.5	47.2	7.2	0.8	5.8	4.4	5.7	0.9	0.4	1.5	0.8	17.6
1975	30.7	51.7	21.0	0.3	1.4	3.7	5.9	5.8	1.6	2.7	0.9	71.9
1976	29.2	21.4	10.5	1.1	1.2	3.9	5.3	0.0	3.0	0.3	4.5	30.9
1977	11.1	67.2	35.7	1.6	3.8	5.9	5.6	5.3	4.2	1.8	27.5	24.1
1978	58.8	81.4	41.9	6.8	4.3	3.5	4.7	5.8	0.1	0.0	54.8	107.7
1979	107.1	15.0	11.9	33.8	3.2	5.9	5.1	3.2	2.0	14.3	2.3	38.2
1980	41.9	21.6	43.1	0.4	2.8	4.8	2.3	3.6	5.3	23.0	0.6	10.3
1981	150.9	26.7	38.3	17.0	3.0	4.9	5.9	0.6	0.4	21.9	3.3	39.9
1982	86.7	13.9	27.9	8.6	5.7	5.7	5.8	3.2	6.4	1.1	53.5	3.4
1983	29.1	13.5	1.5	5.0	1.7	5.4	4.9	5.1	0.1	0.2	0.2	17.8
1984	144.4	97.8	45.3	1.4	2.1	2.8	5.5	1.0	4.0	15.5	49.7	38.4
1985	58.7	35.3	28.3	43.2	0.4	1.7	5.9	4.5	8.4	0.7	65.8	92.8
1986	47.5	74.9	51.4	30.8	1.8	5.9	3.7	2.0	5.3	1.6	20.0	45.4
1987	79.3	9.4	10.3	1.9	2.2	3.0	0.0	2.4	4.2	6.2	24.4	2.3
1988	69.5	21.2	92.3	31.0	0.1	5.9	5.9	5.0	3.1	3.2	3.1	41.8
1989	66.2	50.0	36.5	9.2	5.6	2.3	5.7	1.2	0.0	0.2	4.0	13.6
1990	62.1	8.4	4.7	0.4	3.0	6.1	5.9	1.2	0.4	18.3	23.0	25.9
1991	57.0	35.8	55.7	2.9	1.3	2.6	4.1	5.6	0.2	0.0	10.5	46.3
1992	71.3	14.8	4.0	0.4	5.9	3.5	3.8	8.8	0.7	4.1	5.1	46.8
1993	67.4	7.4	23.8	10.0	1.4	5.5	3.6	0.6	0.0	8.3	25.9	46.1
1994	46.9	34.5	42.3	8.9	0.3	4.2	5.9	5.9	1.2	0.7	7.7	40.9
1995	51.0	67.5	35.3	2.0	5.6	5.9	5.2	5.7	2.6	0.8	6.6	20.5
1996	71.2	14.3	20.6	0.3	0.4	5.9	4.5	3.0	0.9	0.1	31.1	37.4
1997	96.8	30.9	106.2	14.4	2.5	5.9	5.7	0.1	0.4	1.8	25.4	4.2
1998	29.4	24.1	27.1	2.4	5.9	2.8	5.9	5.5	5.1	9.4	29.0	1.2
1999	25.1	7.9	62.5	3.1	0.1	5.8	5.4	5.6	2.5	4.8	1.9	11.9
2000	43.9	26.9	27.6	1.9	3.7	0.3	5.8	0.8	0.8	37.9	0.1	35.7
2001	101.1	49.2	87.0	0.1	0.1	4.3	2.9	2.0	0.2	15.3	6.9	30.3
2002	31.3	58.1	44.7	11.2	0.9	4.2	0.2	3.3	0.2	42.8	10.7	39.3
2003	106.2	37.8	45.7	5.5	4.4	2.0	5.4	1.7	0.0	15.0	2.7	33.9
2004	131.7	52.6	20.2	5.6	1.2	3.7	4.2	0.0	0.0	0.3	8.4	30.0
2005	24.1	82.2	15.5	0.0	4.9	5.9	5.5	4.1	0.4	10.6	13.1	17.7
2006	103.6	2.6	8.5	10.1	5.4	4.0	5.9	3.8	0.0	6.3	11.3	38.5
2007	38.3	6.4	54.2	10.9	0.6	5.5	5.5	5.8	5.2	0.9	6.7	16.9
2008	44.9	14.9	7.1	3.1	3.3	5.9	5.9	5.9	1.8	6.8	3.9	80.0
2009	22.1	29.2	4.3	0.7	4.5	5.9	4.2	5.9	0.4	0.1	13.7	24.9



2010	79.9	44.9	13.5	0.0	0.6	5.9	5.8	4.9	5.8	5.0	0.8	31.2
2011	19.0	69.0	18.9	0.6	3.8	5.9	3.2	2.0	5.4	1.2	0.0	38.0
2012	51.4	41.1	31.2	4.4	3.6	5.6	5.8	4.8	2.1	0.1	0.6	64.1
2013	71.7	83.2	11.2	0.0	0.0	3.8	3.0	1.9	3.9	18.8	2.8	46.6
2014	54.5	43.8	16.2	2.1	1.7	5.8	2.5	1.4	9.7	1.1	0.0	26.7
2015	65.0	26.9	11.9	11.5	1.8	5.3	5.5	0.1	3.5	4.7	7.3	51.4
2016	21.4	102.9	0.0	6.4	4.7	5.9	2.1	4.1	0.9	8.6	3.7	21.7

**Fuente:** Elaboración propia

### **Números aleatorios.**

En el presente trabajo se generó los números aleatorios normalmente distribuidos con media igual a cero y desviación estándar igual a 1. En la tabla 14 se presentan la información empleada.

### **Descargas medias mensuales generadas.**

Para determinar los parámetros B1, B2, B3, r y S, sobre la base de los resultados del modelo para el año promedio, mediante el cálculo de regresión con  $Q_t$  como valor dependiente y  $Q_{t-1}$  y  $PE_t$ , Luego de realizar la regresión lineal múltiple se obtuvo los siguientes resultados:

Coefficientes de la regresión lineal múltiple B1 = - 0.501

Coefficientes de la regresión lineal múltiple B2 = 0.5741

Coefficientes de la regresión lineal múltiple B3 = 0.4584

Error estándar de la regresión múltiple S = 4.0854

Coefficiente de correlación múltiple  $r^2 = 0.9172$

En la tabla 15 se presenta la serie de descargas media mensuales (mm) generadas para cuenca del río Huancané, en donde están en función de los coeficientes de la regresión lineal múltiple, error estándar de la regresión múltiple,

coeficiente de correlación múltiple, precipitación efectiva y caudal del mes anterior.

**Tabla 14.** Números aleatorios generados con distribución normal.

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.
1973	0.81	-1.10	0.95	-0.32	-0.18	-0.52	-0.83	0.97	0.32	1.45	-0.27	2.71
1974	0.29	0.88	-1.29	0.07	1.28	0.06	-1.15	-0.82	0.39	-0.66	-0.96	0.02
1975	-0.92	0.39	0.01	1.44	-2.21	0.06	-0.31	-0.81	-0.18	0.50	0.63	0.17
1976	-0.28	-0.79	-0.60	-0.15	-0.05	-0.65	0.19	-0.61	0.76	-0.40	-0.60	1.36
1977	-0.63	-0.83	-1.33	0.57	0.31	-0.39	-1.58	-0.33	0.10	-0.74	2.71	-0.10
1978	1.07	-0.26	1.42	-2.24	-0.01	-0.99	0.85	-2.25	1.26	1.06	1.19	-0.41
1979	0.02	1.71	0.90	0.12	0.32	1.17	0.39	-1.02	-0.08	1.26	0.20	-1.21
1980	0.73	-0.54	-1.28	-0.32	-0.98	-0.25	-1.06	-0.76	-2.46	-0.55	-0.60	0.12
1981	-2.16	0.07	-0.79	1.63	0.99	-2.15	0.37	-0.38	1.48	0.14	-1.19	-1.00
1982	-1.07	1.02	-0.89	-1.99	0.70	-0.91	-0.90	0.31	-1.77	-1.75	-0.41	0.61
1983	-0.37	-1.70	-0.89	0.94	0.76	-2.69	-0.92	0.70	0.44	0.18	-0.32	0.82
1984	-1.53	-0.24	0.18	-0.95	0.95	-0.63	1.09	0.64	-0.78	-0.48	-2.67	-0.37
1985	2.53	2.49	0.70	0.03	0.12	0.19	0.00	-0.39	1.64	1.80	-0.28	-0.16
1986	1.71	0.20	-0.53	-0.91	-0.29	0.23	-0.33	-0.57	0.01	-0.74	-0.89	-0.60
1987	-0.15	-1.78	-0.85	0.87	-0.41	1.98	-1.30	1.06	-0.24	-1.10	0.16	-0.46
1988	0.81	1.17	3.06	-0.09	1.52	0.75	-1.38	-1.92	1.45	-0.54	0.64	-0.16
1989	0.60	1.04	0.59	0.96	-0.13	-2.73	0.05	-0.67	-1.69	-0.31	-0.84	-1.02
1990	-0.15	0.21	0.29	-0.01	1.07	0.84	-0.08	-0.21	0.46	-0.26	-2.45	-0.19
1991	-0.31	-0.43	0.32	-0.18	0.23	-0.96	2.43	-0.54	0.29	1.50	-0.43	-0.20
1992	-1.59	-0.22	1.21	-0.36	0.28	-0.27	3.01	0.43	0.08	-1.13	-0.92	-1.33
1993	-0.31	1.25	-1.03	-0.40	0.17	0.97	-1.64	0.08	-0.50	-0.58	-1.83	-2.51
1994	0.04	0.19	0.87	0.26	0.36	0.76	1.38	1.78	0.92	1.66	2.46	-0.80
1995	0.75	2.24	-0.27	0.36	0.29	-0.38	0.58	0.72	-0.44	-0.27	-0.42	-0.30
1996	-1.37	-0.57	1.16	-1.93	-1.42	-0.58	-1.95	-2.85	-0.93	-0.78	-0.47	2.37
1997	-0.83	0.20	0.53	-1.11	-1.65	0.56	-0.02	0.73	-1.08	0.59	0.66	-0.50
1998	-0.62	-0.54	0.71	1.54	0.22	-1.54	1.63	0.22	-0.48	0.56	-2.40	-0.41
1999	-0.87	-0.82	1.03	-0.95	2.15	0.09	0.07	-0.59	0.11	-0.45	-0.41	0.67
2000	0.18	0.66	-0.67	0.92	-0.42	-0.11	1.11	1.58	-0.21	-1.38	-0.16	0.01
2001	-0.55	0.30	0.56	-1.58	-1.04	-0.68	1.00	0.34	-0.16	-0.08	0.04	-1.73
2002	-0.70	-0.94	-0.94	-0.23	-0.59	0.55	0.38	-0.65	-1.29	0.44	1.43	-0.54
2003	0.63	-0.51	-0.36	0.69	0.99	-0.67	0.19	1.28	0.95	-0.58	0.10	0.19
2004	-0.01	0.47	0.46	0.16	1.73	-0.08	0.11	-0.62	-0.12	0.83	-0.04	2.49
2005	1.11	-1.79	0.79	1.20	0.51	0.15	-0.77	-0.59	2.75	0.25	0.83	1.30
2006	0.89	-0.31	1.17	0.21	-1.52	-1.16	-0.24	-0.86	-0.44	-0.75	-1.83	0.48



2007	-0.63	-0.88	0.34	-0.91	1.21	-0.64	-1.12	0.51	-0.97	-1.25	0.37	-2.79
2008	-0.67	-1.01	1.51	2.24	-1.85	2.82	-0.05	1.10	1.19	-1.45	1.05	3.45
2009	-0.28	-1.58	-0.50	1.16	0.03	-0.08	1.75	0.39	0.03	1.00	-1.52	1.25
2010	-0.43	-0.90	-0.97	1.65	-1.29	-0.35	-0.85	-0.84	-0.08	-0.64	1.65	-1.53
2011	0.15	0.80	-0.06	0.23	-2.09	-1.79	-0.01	0.25	0.35	-1.28	0.35	1.45
2012	-0.22	1.14	-0.07	-0.52	-0.02	-1.68	-0.30	1.63	2.37	-0.31	1.25	-0.17
2013	-0.23	-0.22	0.70	-0.79	-1.83	1.15	0.11	-0.09	0.31	-0.93	0.06	-0.20
2014	-1.16	0.22	-0.15	-0.48	0.50	-0.03	3.24	1.74	0.19	-0.45	2.42	-0.37
2015	-0.01	-0.38	1.31	0.59	0.79	0.31	0.19	-0.60	-1.30	1.13	-0.51	0.49
2016	-0.24	-0.15	-0.20	-0.87	-0.37	0.32	-1.38	-1.86	-1.11	1.16	-1.11	-1.02

**Fuente:** Elaboración propia.

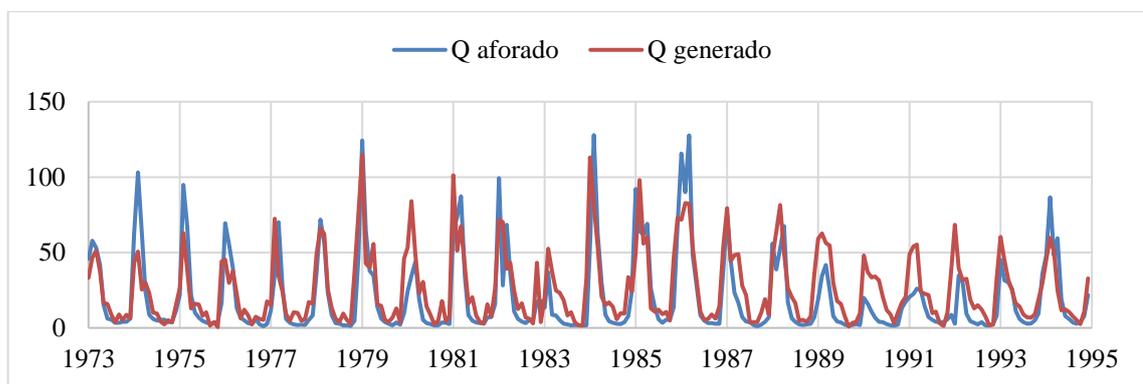
**Tabla 15.** Descargas medias mensuales generados (mm) – Cuenca Huancané.

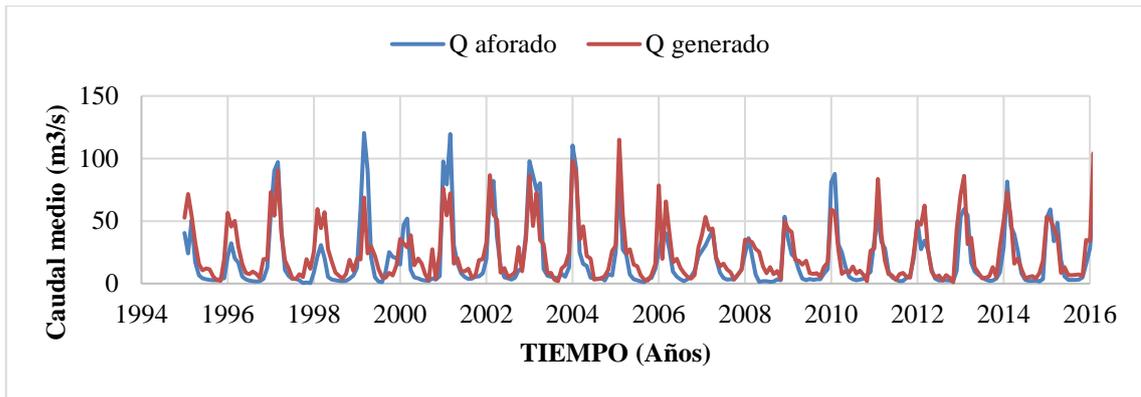
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.
1973	33.20	46.55	51.15	37.17	16.55	15.80	8.91	3.58	8.93	5.16	8.66	6.28
1974	43.18	50.54	25.39	30.05	23.19	10.25	9.58	4.10	2.42	5.16	3.55	15.00
1975	26.48	62.98	38.86	12.84	16.09	15.38	8.00	10.43	1.55	3.79	0.50	44.03
1976	45.31	29.97	37.63	22.54	6.31	12.07	8.40	2.37	7.52	-0.91	5.32	17.65
1977	14.99	72.34	34.62	24.09	9.32	4.63	10.35	9.99	4.60	5.79	17.26	16.00
1978	48.95	66.15	62.25	25.62	13.35	6.10	3.76	9.52	5.30	2.74	36.92	75.24
1979	114.8	42.76	39.97	55.66	15.79	14.63	5.03	4.12	6.75	12.95	3.84	45.87
1980	53.14	84.17	48.87	22.91	30.55	14.14	8.68	2.32	4.63	17.80	4.31	7.62
1981	101.1	51.25	67.39	40.56	16.20	20.43	8.19	3.75	3.08	15.77	7.39	26.27
1982	71.81	69.99	39.15	43.17	24.84	12.47	16.32	6.79	6.11	2.93	43.15	3.77
1983	20.41	52.61	37.46	24.76	23.34	18.37	8.30	10.45	3.53	1.80	1.69	33.30
1984	113.0	81.47	53.68	20.72	15.29	16.93	13.98	5.72	9.81	9.46	33.78	24.17
1985	50.07	97.98	55.96	60.27	12.84	10.80	12.00	9.17	10.59	4.93	46.00	72.85
1986	71.85	82.89	82.43	53.72	32.30	10.55	5.30	5.91	8.86	6.05	14.50	53.80
1987	79.32	44.20	48.30	49.02	28.00	21.82	3.70	3.85	3.91	9.91	19.11	8.68
1988	47.11	63.74	81.45	49.89	26.58	20.58	16.58	4.91	5.35	4.05	7.55	35.27
1989	59.04	62.67	56.30	54.55	29.78	17.88	15.95	7.68	0.84	3.41	3.87	9.68
1990	48.12	36.99	33.40	34.06	31.55	20.55	11.93	8.89	2.89	10.25	16.78	20.56
1991	48.77	53.91	55.31	23.90	22.66	21.85	9.73	10.79	2.94	1.31	10.14	38.98
1992	68.39	39.51	31.84	32.70	18.68	13.00	14.99	12.22	7.53	1.61	2.23	33.11
1993	60.39	45.04	31.90	24.79	16.41	14.10	8.88	6.94	6.72	9.04	18.82	29.40
1994	45.15	59.70	50.37	24.90	11.56	12.35	10.56	7.73	5.28	2.65	10.78	32.82
1995	52.67	71.57	54.31	33.09	15.42	10.54	12.15	11.42	5.78	-0.05	2.21	19.33
1996	56.58	45.52	50.07	29.82	15.94	8.66	7.46	9.53	7.84	4.35	19.44	19.56
1997	73.13	54.20	90.47	40.23	18.53	11.83	4.26	3.83	7.54	5.24	19.43	11.77
1998	25.77	59.64	44.19	57.01	27.40	17.32	8.89	6.28	4.08	7.90	19.07	9.99

1999	19.67	19.28	68.72	24.20	29.64	22.15	11.61	5.33	4.74	8.65	6.49	14.91
2000	35.62	32.02	29.01	38.66	14.60	20.00	15.87	7.28	2.71	27.47	3.83	25.13
2001	76.10	54.40	72.01	15.95	20.37	9.96	9.73	11.95	4.98	6.59	18.81	19.50
2002	32.47	86.79	55.37	51.08	8.91	12.36	5.35	6.87	8.89	29.11	9.83	35.29
2003	86.11	46.12	72.56	34.84	31.47	8.17	8.47	3.05	2.00	12.16	14.63	24.41
2004	98.51	88.66	35.22	45.71	22.21	20.05	3.09	3.87	-1.71	-0.46	11.15	26.08
2005	30.26	115.0	55.06	24.13	27.41	15.28	13.81	6.63	3.27	2.53	6.80	15.47
2006	78.44	19.76	65.77	40.18	16.87	19.88	12.58	8.44	5.58	3.95	6.81	28.62
2007	38.96	53.13	42.96	44.16	20.95	13.60	15.85	11.39	9.00	3.46	6.88	11.23
2008	35.23	34.95	32.98	27.69	25.47	13.74	8.41	13.27	7.55	9.98	3.70	49.95
2009	43.60	41.22	19.15	18.18	15.12	18.35	8.35	7.89	8.23	5.47	13.11	16.89
2010	59.24	57.20	27.14	7.75	9.80	8.72	13.67	7.92	10.27	6.98	2.03	26.17
2011	28.28	83.57	38.74	17.97	7.55	6.57	2.84	7.66	8.56	5.44	4.78	23.33
2012	48.95	47.18	62.48	26.33	9.57	5.02	6.48	2.46	6.79	4.78	1.09	43.56
2013	71.22	86.08	31.56	36.58	12.91	8.89	4.23	-0.08	5.64	13.23	5.21	28.99
2014	50.07	73.21	53.32	15.98	20.04	11.59	4.15	5.36	5.98	4.22	8.38	18.59
2015	53.49	51.25	44.11	37.30	8.48	13.19	6.73	-0.02	6.93	7.21	6.14	34.78
2016	34.12	104.1	25.39	28.33	20.20	10.24	7.65	6.36	-1.99	10.48	5.21	16.67

**Fuente:** Elaboración propia.

Las descargas medias mensuales generados varían de 5.50 a 59.50 m<sup>3</sup>/s, que corresponden a los meses de setiembre y febrero, respectivamente y la precipitación media total es de 295.7 m<sup>3</sup>/s. En la figura 10, se presenta los histogramas de los caudales medios aforados y los caudales medios generados de la cuenca del río Huancané.





**Figura 10.** Serie de tiempo de caudales aforados y generados, cuenca del río Huancané

**Fuente:** Elaboración propia

En la tabla B-1 del anexo, se presentan la serie histórica de los caudales medios mensuales aforados en la estación puente Huancané, pertenecientes al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, sede Puno.

Los resultados encontrados concuerdan con otros resultados en la cuenca del Titicaca (Traverso et al., 2019) y otras de la región Andina (Velasquez Mercado, 2020), siendo importante la comparación con otros métodos como lo refiere (Cruz & Romero, 2018), asimismo en lo posterior se puede adoptar otras técnicas como la regionalización (Gambini, 2015).



## V. CONCLUSIONES

Luego de culminar el trabajo de investigación, se llega a las siguientes conclusiones:

**PRIMERA:** La precipitación media a real anual de la cuenca del río Huancané; para el periodo de 1973 al 2016, es de 659.9 mm obtenidos mediante el método de promedio aritmético, considerando 03 estación meteorológicas.

**SEGUNDA:** Al realizar la correlación lineal entre los caudales generados mediante el modelo Lutz Scholz para un año promedio y los caudales aforados en el puente Huancané, se obtiene un coeficiente de correlación del 97.5 %.

**TERCERA:** El caudal medio total en la cuenca del río Huancané generado para el periodo 1973 al 2016, es 295.7 m<sup>3</sup>/s, superior en 20 % al caudal medio total aforado.

**CUARTA:** Con la presente investigación se puede demostrar que es posible determinar la oferta hídrica a través de la estimación de los caudales medios mensuales a partir de precipitación medio mensual utilizando modelos determinísticos – estocásticos.



## VI. RECOMENDACIONES

A partir del estudio realizado es necesario tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

**PRIMERA:** Motivar a los estudiantes de Ingeniería agrícola, la aplicación de modelos matemáticos, en el área de hidrología e hidráulica, que permitirá elevar el nivel de investigación dentro de la Ingeniería Agrícola.

**SEGUNDA:** Realizar estudios de determinación de caudales medios mensuales mediante otros modelos y realizar comparaciones con los resultados obtenidos en esta investigación.

**TERCERA:** Usar la metodología y el Modelo hidrológico de Lutz Scholz del presente trabajo para otras cuencas del Altiplano.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, M. (1992). *Análisis y Aplicación de Modelos Matemáticos para la Generación de Caudales en Cuencas de la Región*.
- Alfaro, R., & Gonzales, V. (2008). *Estadística y probabilidades para ingenieros* (1st ed.). UNA Puno.
- Allen, G., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO.
- Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie* (1ra. ed.). Limusa.
- Belizario, G. (2014). *Impactos del cambio climático en la agricultura de la cuenca Ramis, Puno-Perú* [Universidad Nacional del Altiplano].  
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/256>
- Belizario, G. (2015). Efectos del cambio climático en la agricultura de la cuenca Ramis, Puno-Perú. *Rev. Investig. Altoandin.*, 17(1), 47–52.  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18271/ria.2015.77>
- Belizario, G., Huaquisto, E., & Chirinos, T. (2013a). Efectos del cambio climático en la temperatura y precipitación - Capachica, Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 15(4), 15–24.
- Belizario, G., Huaquisto, E., & Chirinos, T. (2013b). Influencia del cambio climático en los elementos climáticos de la cuenca del río Coata-Puno. *Revista Investigaciones Altoandinas*, 15(1), 35–54.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5607224>



- Breña, A., & Jacobo, M. (2006). *Principios y fundamentos de la Hidrología Superficial*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Canaza, M., & Gamarra, E. (2017). *Alteración de los caudales del río Asmayacu por la presencia de los fenómenos del Niño y de la Niña en los últimos 30 años para la determinación de las probables zonas de inundación en la cuenca Asmayacu-Curahuasi (Tesis)*. Universidad Andina del Cusco, Perú.
- Chavarri, E. (2010). *Separatas Modelos matemáticos en hidrología*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Chereque, W. (1989). *Hidrología para estudiantes de ingeniería*. CONCYTEC.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (2000). *Hidrología Aplicada*. Mc Graw-Hill.
- Clark, R. (1973). *Mathematical Models in Hydrology*. FAO.
- Cruz Adrianzén, E. J., & Romero Callo, J. A. (2018). *Análisis comparativo de los modelos lluvia-escorrentía: gr2m, Temez y Lutz-Scholz aplicados en la subcuenca del río Callazas*.
- Díaz, J. (2017). *Determinación de la disponibilidad hídrica superficial mediante balance hídrico en la cuenca del río Cumbaza-San Martín (Tesis)*. Universidad Peruana Unión, Lima, Perú.
- Fattorelli, S., & Fernandez, P. (2011). *Diseño hidrológico* (2da. ed.). WASA - GN.
- Faustino, J. (2006). *Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas*. Universidad Nacional Agraria la Molina, Escuela de Post Grado.
- Gambini, J. I. M. (2015). Rainfall regionalization techniques to provide design values for



- infrastructure: Case of study in a binational basin of South America. *36th IAHR World Congress*.
- Gamez, W. (2010). *Texto básico de hidrología*. Managua.
- Gonzales, V. A. G., & Alejo, R. A. (2008). *Desarrollo de cuencas de alta montaña*. UNA Puno.
- Guevara, E. (1991). *Hidrología Una Introducción a la Ciencia*. EGN Comunicaciones.
- Guevara, E., & Cartaya, H. (2004). *Hidrología ambiental*. Universidad de Carabobo.
- Julcamoro, J. (2017). *Evaluación de la disponibilidad del recurso hídrico en la microcuenca del río Tuyo en el distrito de Catilluc, provincia de San Miguel, Cajamarca (Tesis)*. Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.
- Kuriqi, A., Ali, R., Pham, Q. B., Gambini, J. M., Gupta, V., Malik, A., Linh, N. T. T., Joshi, Y., Anh, D. T., & Dong, X. (2020). Seasonality shift and streamflow flow variability trends in central India. *Acta Geophysica*, 68(5), 1461–1475.
- Mejía, A. (2006). *Hidrología Aplicada*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Mendoza, R. (2012). *Generación de descargas mensuales en la microcuenca Pallcca utilizando el método de Lutz Scholz a 3075 msnm – María Parado de Bellido – Cangallo –Ayacucho (Tesis)*. Universidad Nacional San Cristobal de Huamanga, Ayacucho, Perú.
- Ministerio de Agricultura. (2010). *Estudio Hidrológico de las Cuencas Huancané y Suches*.
- Nanía, S. (2003). *Métodos de transformación lluvia-escorrentía y de propagación de*



- caudales. Apuntes de clase de hidrología superficial y subterránea.* Universidad de Granada.
- Pérez, G. (2015). *Manual de hidrología aplicada.*
- Pierola, J. (1993). *Tratamiento de datos hidrometeorológicos.*
- Ponce, V. (1989). *Engineering Hydrology – Principles and Practices.* Prentice Hall.
- Real-Rangel, R. A., Pedrozo-Acuña, A., Breña-Naranjo, J. A., & Alcocer-Yamanaka, V. H. (2020). A drought monitoring framework for data-scarce regions. *Journal of Hydroinformatics*. <https://doi.org/10.2166/hydro.2019.020>
- Sarango, D., Rozas, G., Salvador, B., Velásquez, T., Sullca, J., & Mansilla, J. (2012). Determinación del rendimiento hídrico en la cuenca alta del río Grande en Puno. *Revista de investigación de física. Instituto de Investigación de Física*, 15(2).
- Scholz, L. (1980). Generación de Caudales Mensuales en la Sierra Peruana. *Programa Nacional de Pequeñas y Medianas Irrigaciones - Plan Meris II.*
- Tarazona, N. (2005). *Generación de caudales medios mensuales en sub cuencas del río Santa, utilizando el método de Lutz Scholz (Tesis).* Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Tito, L. (2010). *Calibración del modelo Lutz Scholz en la sub cuenca del río Ayaviri (Tesis).* Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Traverso, K., Mamani, J. A., & Alfaro, R. (2019). Generation of monthly average flow rates from the hydrological characteristics in the Huancane river basin. *38th IAHR World Congress*, 4682–4691. <https://doi.org/10.3850/38WC092019-1617>



Vásquez, A., Mejía, A., Faustino, J., Terán, T., Vásquez, I., Díaz, J., Vásquez, C., Castro, A., Tapia, M., & Alcántara, J. (2016). *Manejo y gestión de cuencas hidrográficas*. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Vásquez, A., Vásquez, I., Vásquez, C., & Cañamero, M. (2017). *Fundamentos de la Ingeniería de riego*. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Velasquez Mercado, D. (2020). *Estudio hidrológico de la cuenca del río Pitumarca y su análisis comparativo del modelo precipitación–escurrimiento de Lutz Scholz y el modelo estocástico de Thomas-Fiering*.

Villón, M. (2020). *Hidrología general*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.



## ANEXOS

### Anexo 1. Precipitación total mensual (mm) – Estación Huancané.

<b>NOMBRE</b> HUANCANE													
<b>CUENCA</b>	: HUANCANE			<b>LATITUD</b>	15°12'05.4"				<b>REGION</b>	: PUNO			
<b>CODIGO</b>	110786			<b>LONGITUD</b>	69°45'12.8"				<b>PROV</b>	: HUANCANE			
<b>TIPO</b>	: CO			<b>ALTITUD</b>	4660 MSNM				<b>DIST</b>	: HUANCANE			
<b>AÑO</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	
1973	151.6	63.2	163.5	69.5	9.0	0.0	0.0	8.5	74.8	36.4	12.9	56.5	
1974	190.4	136.1	51.0	36.0	0.0	3.0	0.0	24.9	18.0	35.5	47.5	62.5	
1975	127.0	209.5	103.5	18.4	6.0	0.0	0.0	0.0	10.6	61.5	26.2	155.0	
1976	66.0	58.0	9.7	0.0	21.5	4.5	1.8	26.6	33.1	51.8	61.1	97.6	
1977	31.6	150.6	94.6	0.0	2.8	0.0	1.9	3.2	55.6	42.0	96.0	91.0	
1978	120.8	237.2	143.6	65.4	0.1	7.7	6.8	0.1	34.0	28.5	131.1	195.2	
1979	191.8	99.5	43.1	70.5	1.6	0.0	2.8	9.2	4.2	78.2	56.5	107.9	
1980	118.3	125.4	132.7	31.3	7.1	0.2	5.7	9.8	74.7	91.2	26.3	85.1	
1981	326.0	103.6	114.6	83.0	14.7	0.1	0.0	21.8	33.6	106.2	45.8	145.0	
1982	175.2	35.2	112.8	58.0	1.2	1.2	0.0	4.2	50.4	30.2	126.2	48.2	
1983	102.4	48.4	24.4	37.2	13.8	1.0	0.0	2.7	31.1	43.0	35.8	84.8	
1984	195.1	166.7	125.4	38.8	14.2	9.6	0.0	17.8	1.4	68.2	118.0	76.4	
1985	168.8	66.0	107.8	165.8	17.0	17.4	0.0	3.4	103.8	28.8	183.4	163.8	
1986	183.0	148.4	151.4	67.6	9.2	0.0	9.0	20.3	72.6	17.6	85.0	115.1	
1987	191.1	20.1	77.5	28.2	23.2	10.2	18.2	14.4	5.4	72.4	78.5	57.0	
1988	227.4	77.9	269.8	123.2	48.6	0.0	0.0	0.0	8.8	48.4	5.1	93.3	
1989	156.0	120.3	111.8	58.8	1.9	7.0	1.1	14.7	15.2	21.9	67.3	83.6	
1990	121.9	55.6	49.4	21.2	12.8	44.9	0.0	35.9	25.6	52.1	98.1	98.6	
1991	123.4	137.7	138.0	9.0	20.1	51.1	1.0	0.7	29.4	14.1	46.1	148.2	
1992	132.0	75.4	46.9	6.4	0.0	9.7	9.0	72.1	13.7	66.4	45.2	140.0	
1993	127.3	47.9	111.2	58.1	11.5	2.1	0.0	10.6	19.1	56.5	90.6	143.9	
1994	100.8	114.7	150.6	39.5	14.0	1.8	0.0	0.0	11.8	39.1	64.6	132.8	
1995	133.3	124.1	79.7	13.7	1.2	0.0	0.8	1.2	17.0	14.7	69.5	67.2	
1996	200.9	80.8	71.1	17.2	2.3	0.0	7.6	3.5	13.1	9.8	70.0	177.4	
1997	171.8	110.8	183.4	83.4	15.5	0.0	0.0	15.8	40.6	41.1	85.0	51.7	
1998	109.3	69.4	87.5	52.9	0.0	5.7	0.0	0.5	4.2	65.2	141.8	35.6	
1999	88.8	65.9	151.8	72.4	14.7	0.5	2.1	1.7	45.7	61.7	46.2	41.2	
2000	85.2	55.9	113.8	7.1	12.1	7.3	0.5	21.4	10.5	97.8	14.7	113.5	
2001	205.1	142.2	159.7	13.8	21.7	3.5	6.2	10.9	9.1	92.0	63.3	123.6	
2002	90.9	175.5	151.5	102.3	21.1	4.8	23.5	6.1	37.3	140.1	85.8	116.8	
2003	216.5	107.8	131.3	46.3	3.0	11.0	1.1	3.0	22.4	67.6	40.8	105.9	
2004	195.9	147.1	54.1	42.8	6.1	11.8	8.3	32.8	21.1	34.0	51.3	91.9	
2005	109.4	148.6	96.6	16.6	0.5	0.0	0.0	5.2	28.0	75.5	31.5	94.2	
2006	224.3	31.1	76.7	39.3	0.5	1.5	0.0	3.8	23.1	55.9	51.3	113.2	
2007	137.9	97.4	122.8	64.0	5.2	0.0	2.2	0.7	83.1	7.6	58.1	119.4	



2008	134.3	76.6	61.8	5.1	8.7	0.0	0.0	0.0	5.5	48.5	32.7	212.2
2009	80.1	113.3	42.9	9.3	0.5	0.0	3.2	0.0	12.6	13.1	58.8	100.0
2010	156.2	112.5	38.8	21.2	24.6	0.0	0.0	0.0	0.6	47.3	0.7	118.8
2011	68.8	151.3	109.9	16.0	10.5	0.0	5.6	1.4	31.7	33.4	22.5	118.5
2012	143.2	130.0	140.4	40.0	0.2	0.0	0.3	1.6	11.5	21.4	27.2	136.9
2013	147.9	216.6	31.4	13.7	19.2	7.4	12.1	12.1	2.5	89.6	44.4	155.7
2014	139.7	174.7	63.7	32.5	15.7	0.8	14.1	12.5	61.7	45.6	8.4	116.4
2015	128.8	102.0	45.0	57.8	5.1	2.0	2.4	18.8	31.3	40.6	64.0	119.4
2016	96.4	236.5	14.0	53.0	0.0	0.0	5.5	3.0	12.4	65.3	83.1	82.6
PROM	145.3	112.9	99.1	43.3	10.0	5.2	3.5	10.4	28.5	51.3	61.3	108.9

Fuente: SENAMHI PUNO

## Anexo 2. Descargas medias mensuales aforados (m<sup>3</sup>/s) – Cuenca Huancané

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1973	45.8	57.9	53.1	41.8	15.2	6.2	5.5	3.5	3.4	4.0	3.9	6.1
1974	62.7	103.1	62.8	24.4	8.7	5.9	4.9	5.4	5.4	3.9	4.0	11.3
1975	21.9	94.9	67.5	21.8	10.2	6.8	4.7	3.6	2.9	3.2	4.0	16.7
1976	69.6	55.4	39.6	13.2	6.8	5.1	3.1	2.6	5.8	2.4	1.2	2.7
1977	11.5	35.4	70.1	27.3	5.9	3.5	2.4	1.9	2.2	1.8	5.3	8.4
1978	36.7	71.9	56.2	23.2	8.6	3.3	2.8	1.8	1.7	1.3	4.6	46.4
1979	124.2	65.1	38.0	34.7	14.0	6.1	3.8	2.7	1.7	3.6	2.2	9.7
1980	24.1	34.5	43.7	18.8	5.3	3.2	2.5	1.6	1.7	3.6	3.5	2.5
1981	64.1	73.5	87.3	34.0	8.4	4.9	3.6	3.1	2.8	7.0	7.3	16.0
1982	99.2	28.1	68.4	36.4	11.1	6.0	4.2	3.1	5.2	5.1	17.3	18.0
1983	13.3	37.0	8.7	8.2	5.1	2.7	2.3	1.8	1.8	1.7	1.4	1.6
1984	54.7	127.9	62.4	30.0	8.7	4.6	3.4	2.7	2.5	3.8	7.9	24.6
1985	92.1	64.2	61.8	68.9	26.2	14.0	5.7	3.5	5.6	5.4	13.5	67.7
1986	115.7	90.0	127.7	48.5	28.3	8.3	4.8	3.2	3.2	2.8	2.8	37.4
1987	75.2	45.3	23.3	16.7	7.1	4.2	3.8	2.0	1.1	2.1	4.1	7.1
1988	56.0	38.8	52.8	67.6	16.9	6.3	4.0	2.4	1.9	2.4	2.8	7.0
1989	18.9	34.5	41.8	25.0	7.8	4.2	3.6	2.1	1.6	1.9	2.5	1.9
1990	20.0	16.2	10.9	6.7	4.1	3.8	2.5	1.6	1.4	2.1	13.0	17.4
1991	20.5	22.4	26.1	25.1	14.5	7.3	5.2	4.1	3.9	3.8	5.7	8.8
1992	47.2	34.8	30.3	9.4	4.5	3.4	2.4	3.7	1.6	1.7	2.5	8.0
1993	45.2	31.7	30.3	25.8	11.4	5.9	3.8	2.8	3.0	5.0	9.5	35.7
1994	48.1	86.6	48.0	59.5	19.0	7.9	5.9	3.7	2.9	3.8	7.8	21.9
1995	40.4	24.0	50.8	17.2	6.5	4.3	3.4	2.9	2.8	2.8	4.1	4.1
1996	21.5	32.4	20.4	16.7	5.7	3.4	2.4	1.9	1.7	1.9	3.7	12.6
1997	56.6	90.3	97.1	42.7	11.0	5.9	3.6	3.8	2.8	0.4	0.9	0.4
1998	9.1	21.9	30.8	20.4	5.3	3.1	2.7	2.2	1.9	2.1	3.9	6.5
1999	12.6	59.6	120.4	90.8	20.5	4.9	1.8	1.2	9.5	25.1	21.3	20.2
2000	15.3	47.1	52.0	10.9	5.1	4.3	3.0	2.4	2.1	4.3	3.2	5.9
2001	97.6	79.4	119.6	30.7	16.2	8.1	5.1	3.8	4.0	5.4	5.6	8.4
2002	19.6	73.1	82.1	36.9	14.1	4.9	4.3	3.2	4.6	10.7	12.2	40.0



---

2003	98.0	86.3	74.6	80.2	11.7	6.4	5.6	4.6	4.2	7.8	5.5	12.8
2004	110.5	92.2	24.9	15.6	14.3	4.7	3.9	3.4	4.5	2.6	7.4	6.4
2005	25.4	88.7	27.2	23.1	7.3	3.6	2.7	1.8	1.3	4.0	4.4	11.5
2006	78.9	37.1	40.2	27.1	9.7	5.5	3.4	2.0	3.4	5.6	10.1	21.9
2007	26.2	30.5	36.6	42.6	20.1	8.7	4.6	3.3	3.5	3.2	7.1	11.1
2008	23.7	36.3	21.8	7.3	1.4	1.8	2.0	1.4	1.6	3.6	2.7	53.5
2009	35.4	23.3	20.6	11.2	4.0	2.6	3.7	2.8	3.6	3.5	7.7	11.7
2010	81.0	87.7	31.5	25.0	13.6	5.4	3.5	2.6	3.2	3.7	7.1	9.2
2011	34.7	53.5	33.4	28.0	9.6	5.0	3.1	2.0	2.2	4.5	6.4	19.8
2012	49.8	27.5	34.3	26.7	11.0	4.1	2.5	2.8	2.6	2.4	2.2	10.2
2013	53.4	59.6	54.5	16.7	9.5	7.1	5.0	3.3	2.3	2.4	3.9	8.8
2014	29.2	81.6	46.0	39.5	25.9	8.2	2.9	2.2	2.3	2.5	1.7	3.7
2015	52.6	59.3	33.8	48.6	19.0	5.8	2.9	2.9	3.1	3.1	5.1	15.6
2016	28.2	61.5	26.5	13.5	4.7	3.0	3.0	2.5	2.3	2.7	3.3	7.0

---

**Fuente:** SENAMHI PUNO