

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y  
CIVIL**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS:**

**Modelo hidrológico para predecir caudales extremos bajo la  
influencia de la variabilidad climática en el sistema de riego  
Mollepunco, distrito de Llauta, Ayacucho**

Para optar el título profesional de:

**INGENIERA CIVIL**

PRESENTADO POR:

**Bach. Stefanny Yahaira PALACIOS REYMUDEZ**

ASESOR:

**Msc. Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO**

**AYACUCHO - PERÚ**

**2025**

## DEDICATORIA

Con todo mi amor, respeto y gratitud, dedico esta tesis a la entrañable memoria de mi querida madre, Jesusa Reymundez Hinostraza, y de mi amado hijo, Aaron Mauricio Gallo Palacios. Ellos partieron antes de que pudiera compartir este logro tan significativo, pero su presencia vive en mi corazón y alma, guiando mis pasos y fortaleciendo mi espíritu. A mi mamá, Jesusa, le debo ser quien soy hoy. Su ejemplo de fortaleza, amor incondicional y sacrificio iluminó mis días más oscuros. Sus enseñanzas y sabiduría fueron el faro en la incertidumbre, y su amor eterno sigue impulsándome a luchar por mis sueños y a no rendirme. Gracias, mamá, por ser mi inspiración y refugio, por enseñarme a ser valiente y a creer en mí. A mi hijo, Aaron Mauricio, mi pequeño ángel, cuya luz y alegría transformaron mi vida. Su risa, ternura y amor incondicional son recuerdos imborrables que me acompañan a diario. Aunque su partida dejó un vacío inmenso, su recuerdo es mi motor y esperanza. Cada esfuerzo, logro y paso que doy es para honrar su vida y el amor puro que me dio. Su ausencia duele, pero su amor me sostiene y me da la fuerza para seguir soñando y viviendo con propósito. Esta tesis es un homenaje sincero a ustedes, a su memoria y a todo lo que representaron en mi vida. Su legado enseñó el verdadero significado del amor, la fortaleza y la esperanza. Este logro no es solo mío; es también de ustedes, quienes me acompañan desde el cielo en cada instante. Con todo mi amor y gratitud, les entrego este trabajo, esperando que, donde quiera que estén, sientan el orgullo y el cariño con que lo comparto.

## AGRADECIMIENTOS

Mi más profundo agradecimiento a quienes colaboraron en la realización de mi tesis. La materialización de este trabajo no habría sido posible sin el soporte, la perseverancia y la colaboración de cada individuo involucrado. En primer lugar, mi gratitud se dirige a mi director de tesis, Jaime Bendezu, cuya valiosa orientación, paciencia y apoyo incondicional resultaron fundamentales a lo largo de este proceso. Su experticia y dedicación fueron decisivas para la superación de los desafíos inherentes, y su confianza representó una motivación constante, incluso en los momentos de mayor dificultad. A mi familia, pilar fundamental de amor y fortaleza, extiendo mi reconocimiento por su apoyo ininterrumpido, su comprensión y el respaldo emocional indispensable para la continuidad de esta labor. Sin su constante acompañamiento, la consecución de este logro habría sido inviable. Cada expresión de aliento y cada gesto de afecto constituyeron un impulso invaluable para la consecución de este objetivo. Asimismo, manifiesto mi agradecimiento a mis amigos y compañeros, quienes contribuyeron con sus conocimientos, tiempo y energía positiva, haciendo de este trayecto una experiencia más llevadera y enriquecedora. Finalmente, expreso mi reconocimiento a las instituciones y a todas las personas que proveyeron los recursos, la información y los espacios requeridos para la realización de esta investigación. Este logro es el resultado de un esfuerzo conjunto y la dedicación colectiva, y me considero afortunado de haber contado con su respaldo.

## RESUMEN

La variabilidad climática representa un factor determinante en la disponibilidad del recurso hídrico en zonas altoandinas. En este contexto, el presente estudio se desarrolló en la subcuenca Llauta, distrito de Llauta, Ayacucho, con el fin de predecir caudales extremos que podrían afectar al sistema de riego Mollepunco, que abastece aproximadamente 18 hectáreas de cultivo. El propósito principal fue desarrollar un modelo hidrológico que considere la influencia de variables climáticas como temperatura, humedad, radiación solar, velocidad del viento y demanda hídrica mensual. Para ello, se emplearon registros históricos de caudales medios mensuales del periodo 2011–2024, así como datos climáticos de la estación Huac-Huas. El modelo se construyó utilizando distribuciones de probabilidad (Gumbel, Log-Pearson III y Log-Normal), simulaciones Monte Carlo y escenarios de cambio climático definidos por condiciones atmosféricas y de demanda. Los resultados indicaron que la magnitud de los caudales máximos puede alcanzar hasta 6.57 m<sup>3</sup>/s bajo la distribución Log-Normal para un periodo de retorno de 100 años. En cuanto a la frecuencia de eventos extremos, se identificó que entre 2011 y 2024, solo dos años superaron el umbral de 4.44 m<sup>3</sup>/s. Asimismo, se observó que la persistencia de estos eventos varía en función del escenario climático considerado. Bajo un escenario de alta demanda hídrica, se evidenció un aumento notable en la frecuencia de ocurrencia. En conclusión, el modelo permite anticipar riesgos hidrológicos y representa una herramienta útil para la planificación y gestión del sistema de riego frente a escenarios de variabilidad climática.

**Palabras Clave:** Caudal extremo, Cambio climático, Hidrología, Modelo predictivo, Riego agrícola.

## ABSTRACT

Climate variability is a determining factor in the availability of water resources in high Andean areas. In this context, the present study was developed in the Llauta sub-basin, Llauta district, Ayacucho, in order to predict extreme flows that could affect the Mollepunco irrigation system, which supplies approximately 18 hectares of crops. The main purpose was to develop a hydrological model that considers the influence of climatic variables such as temperature, humidity, solar radiation, wind speed and monthly water demand. For this purpose, historical records of monthly mean flows for the period 2011-2024 were used, as well as climatic data from the Huac-Huas station. The model was built using probability distributions (Gumbel, Log-Pearson III and Log-Normal), Monte Carlo simulations and climate change scenarios defined by atmospheric and demand conditions. The results indicated that the magnitude of peak flows can reach up to 6.57 m<sup>3</sup>/s under the Log-Normal distribution for a return period of 100 years. Regarding the frequency of extreme events, it was identified that between 2011 and 2024, only two years exceeded the 4.44 m<sup>3</sup>/s threshold. It was also observed that the persistence of these events varies depending on the climate scenario considered. Under a scenario of high water demand, there was a notable increase in the frequency of occurrence. In conclusion, the model makes it possible to anticipate hydrological risks and represents a useful tool for planning and managing the irrigation system in the face of climate variability scenarios.

**Keywords:** Extreme flow, Climate change, Hydrology, Predictive model, Agricultural irrigation.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
RESUMEN .....	iv
ABSTRACT .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
INTRODUCCIÓN .....	xi
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.1. Descripción del problema.....	12
1.2. Delimitación del problema.....	14
1.2.1. Espacial (geográfica).....	14
1.2.2. Temática y unidad de análisis .....	14
1.3. Formulación del problema.....	14
1.3.1. Problema general.....	14
1.3.2. Problemas específicos .....	14
1.4. Justificación e importancia .....	15
1.4.1. Justificación .....	15
1.4.2. Importancia .....	15
1.5. Limitaciones de la investigación.....	16
1.6. Objetivos.....	16
1.6.1. Objetivo general .....	16
1.6.2. Objetivos específicos .....	16
II. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1. Antecedentes.....	17
2.1.1. Investigaciones internacionales.....	17
2.1.2. Investigaciones nacionales .....	19
2.2. Bases teóricas .....	21

2.2.1.	Recurso hídrico .....	21
2.2.2.	Clasificación del agua .....	22
2.2.3.	Ciclo hidrológico.....	23
2.2.4.	Clasificación Climática .....	28
2.2.5.	Eficiencias en el uso del agua de riego .....	32
2.2.6.	Modelos hidrológicos.....	33
2.2.7.	Técnicas de aprendizaje computacional.....	37
III.	MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN.....	39
3.1.	Enfoque .....	39
3.2.	Alcance.....	39
3.3.	Diseño de investigación .....	39
3.4.	Población y muestra .....	40
3.4.1.	Población .....	40
3.4.2.	Muestra.....	40
3.5.	Hipótesis.....	40
3.5.1.	Hipótesis general .....	40
3.5.2.	Hipótesis específicas.....	40
3.6.	Operacionalización de variables .....	41
3.7.	Técnicas e instrumentos .....	43
3.7.1.	Técnicas.....	43
3.7.2.	Instrumentos .....	43
3.8.	Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información.....	43
3.9.	Desarrollo de Trabajo de Tesis .....	44
3.9.1.	Ubicación Geográfica .....	44
3.9.2.	Área y Perímetro de la Cuenca .....	45
3.9.3.	Altura Media de la Cuenca (Hm) .....	46
3.9.4.	Tiempo de Concentración .....	47
3.9.5.	Forma de la Cuenca.....	49
3.9.6.	Climatología .....	54

3.9.7.	Análisis de las variables meteorológicas .....	56
3.9.8.	Análisis de consistencia de la información pluviométrica e hidrométrica 57	
3.9.9.	Caudales.....	61
3.9.10.	Caudal ecológico.....	63
3.9.11.	Hidrología del sistema de riego .....	64
3.9.12.	Demanda de agua.....	68
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	74
4.1.	Modelo Hidrológico .....	74
4.1.1.	Magnitud de caudales máximos .....	74
4.1.2.	Frecuencia de eventos extremos .....	82
4.1.3.	Persistencia de eventos extremos.....	86
	CONCLUSIONES .....	89
	RECOMENDACIONES .....	90
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	91
	ANEXOS .....	96

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Clasificación Climática .....	30
<b>Tabla 2</b> Clasificación por Subtipos de Humedad.....	30
<b>Tabla 3</b> Clasificación Térmica según la Evapotranspiración Potencial .....	31
<b>Tabla 4</b> Clasificación por Subtipos según Régimen Térmico.....	31
<b>Tabla 5</b> Cuadro de Operacionalización de variables .....	42
<b>Tabla 6</b> Área y perímetro .....	46
<b>Tabla 7</b> Altitud media .....	46
<b>Tabla 8</b> Áreas parciales .....	46
<b>Tabla 9</b> Tiempo de concentración (Tc).....	48
<b>Tabla 10</b> Parámetros Geomorfológicos – Sub Cuenca Llauta.....	53
<b>Tabla 11</b> Condiciones Climáticas – Sub Cuenca Llauta (Estación HUAC-HUAS, 3500 m s.n.m).....	56
<b>Tabla 12</b> Precipitación Anual por Estación – Sub Cuenca Llauta (1965–2010).....	57
<b>Tabla 13</b> Predicción de Precipitación por Estación (2011–2024).....	60
<b>Tabla 14</b> Descargas medias mensuales m <sup>3</sup> /s generadas sub cuenca Llauta (1965 – 2010).....	61
<b>Tabla 15</b> Descargas medias mensuales m <sup>3</sup> /s generadas sub cuenca Llauta (2011– 2024).....	63
<b>Tabla 16</b> Caudal ecológico por mes.....	64
<b>Tabla 17</b> Datos Climáticos – Áreas de Riego (Estación Huac-Huas) .....	65
<b>Tabla 18</b> Precipitación Total Mensual al 75% de Persistencia (mm) .....	66
<b>Tabla 19</b> Precipitación Efectiva Mensual (mm) .....	67
<b>Tabla 20</b> Demanda de Agua Mensual del Cultivo (Sector Mollepunco).....	70
<b>Tabla 21</b> Demanda de Agua del Cultivo: Sector Aylapampa .....	71
<b>Tabla 22</b> Demanda de Agua del Cultivo: Sector Ayahuíli .....	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Representación del ciclo hidrológico.....	24
<b>Figura 2</b>	Mecanismo de formación de la precipitación .....	25
<b>Figura 3</b>	Parámetros de la evapotranspiración de cultivo.....	26
<b>Figura 4</b>	Ciclo de escorrentía, formación de precipitación (lluvia). .....	28
<b>Figura 5</b>	Modelo de un sistema hidrológico .....	33
<b>Figura 6</b>	Modelación hidrológica.....	34
<b>Figura 7</b>	Relación de las redes neuronales.....	38
<b>Figura 8</b>	Distribución Del Área Según Altitud En La Sub-Cuenca Llauta.....	47
<b>Figura 9</b>	Delimitación de la subcuenca .....	54
<b>Figura 10</b>	Predicción de caudales Máximos ( $m^3/s$ ) .....	75
<b>Figura 11</b>	Predicción de Caudales Medios Anuales.....	77
<b>Figura 12</b>	Caudales Totales 2011–2029 .....	78
<b>Figura 13</b>	Curva de Excedencia.....	80
<b>Figura 14</b>	Comparación de Distribuciones de Frecuencia.....	82
<b>Figura 15</b>	Predicción de Frecuencia de Eventos Extremos (2025 – 2029).....	83
<b>Figura 16</b>	Histograma de caudales simulados .....	84
<b>Figura 17</b>	Caudales Históricos con Umbral de Evento Extremo.....	85
<b>Figura 18</b>	Persistencia de Eventos Extremos Integrando Clima y Demanda.....	86
<b>Figura 19</b>	Escenarios con Base en Radiación, ETo, Humedad y Demanda de Riego.....	88

## INTRODUCCIÓN

En las regiones altoandinas del Perú, el recurso hídrico cumple un rol esencial en el desarrollo de actividades agrícolas, especialmente en sistemas de riego que dependen directamente de la disponibilidad superficial de agua. La subcuenca Llauta, ubicada en el distrito de Llauta, provincia de Lucanas, región Ayacucho, no es ajena a esta realidad. En esta zona se encuentra el sistema de riego Mollepunco, el cual permite abastecer de agua a más de 18 hectáreas de cultivos que constituyen el sustento económico de las familias locales. Sin embargo, este sistema enfrenta una creciente amenaza debido a la variabilidad climática, que puede alterar la magnitud, frecuencia y persistencia de los caudales que alimentan el sistema. En este contexto, resulta fundamental contar con herramientas técnicas que permitan anticipar el comportamiento hidrológico en escenarios de cambio climático y creciente presión sobre los recursos. La modelación hidrológica, combinada con el análisis estadístico de datos históricos y variables climáticas, permite predecir eventos extremos como crecidas o disminuciones drásticas en el caudal, los cuales pueden comprometer la eficiencia del riego, la integridad de las infraestructuras hidráulicas y la seguridad alimentaria de la población local.

La presente investigación tiene como objetivo desarrollar un modelo hidrológico para predecir caudales extremos en el sistema de riego Mollepunco, considerando la influencia de la variabilidad climática. Para ello, se utilizó información histórica de caudales del periodo 2011–2024, así como datos climáticos provenientes de la estación Huac-Huas, que incluyen temperatura mínima y máxima, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar, insolación y evapotranspiración potencial (ET<sub>o</sub>). Asimismo, se consideró la demanda mensual de agua para el cultivo en el sector Mollepunco, a fin de representar con mayor precisión el contexto hídrico local.

El modelo se desarrolló empleando distribuciones estadísticas como Gumbel, Log-Pearson III y Log-Normal, y se aplicaron diferentes escenarios de cambio climático que permiten evaluar la magnitud y frecuencia de eventos extremos, así como su persistencia en el tiempo. Esta investigación no solo busca brindar un análisis técnico del comportamiento hidrológico de la subcuenca, sino también generar información útil para la planificación y gestión sostenible del recurso hídrico en beneficio del sistema de riego Mollepunco y las comunidades que dependen de él.

## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Descripción del problema

El agua resulta fundamental para la existencia en el planeta y es crucial para lograr un progreso sostenible. Contar con agua segura para el consumo y servicios de saneamiento constituye un derecho inherente a todas las personas y su importancia va más allá de la supervivencia humana; es determinante para el progreso social y económico, la seguridad alimentaria y el bienestar de los ecosistemas. Además, el agua es esencial para disminuir el impacto global de las enfermedades, favorecer la salud y la calidad de vida, y potenciar la productividad de las comunidades.

Actualmente, la crisis climática global ha incrementado la fluctuación del ciclo hidrológico, dificultando anticipar la disponibilidad de agua, disminuyendo su calidad y agravando su escasez. Esta situación representa una amenaza considerable para el crecimiento sustentable a nivel global. Las consecuencias del cambio climático perjudican de manera desigual a las comunidades con menos recursos y en situación de vulnerabilidad, intensificándose por elementos como el aumento demográfico, la migración desordenada, las transformaciones en el uso del territorio, el deterioro del suelo, la explotación rápida de acuíferos, el daño a los ecosistemas y la reducción de la diversidad biológica. Mientras algunas regiones enfrentan sequías extremas, otras sufren inundaciones y lluvias intensas cada vez más fuertes y recurrentes, lo que plantea un desafío importante para la administración de las fuentes de agua (ONU, 2019).

En el Perú, el 50% de los habitantes no cuenta con acceso continuo a agua segura en sus viviendas, y únicamente el 43% posee servicios de saneamiento administrados de manera segura. En los últimos treinta años, la captación de agua se ha incrementado al doble, mientras la demanda sigue aumentando, generando una mayor competencia entre sectores. La agricultura de regadío consume la mayor parte del agua, representando el 89% de las extracciones, seguida del uso doméstico con un 9% y la industria, minería y otros sectores con un 2.3% (Banco Mundial, 2023). El cambio climático disminuirá aún más la oferta de agua, poniendo en riesgo el avance económico, el progreso y la estabilidad del país. Las sequías, inundaciones y derrumbes vinculados a lluvias intensas, sumados a la contaminación hídrica y la carencia de acceso a servicios de agua y saneamiento confiables, agravan esta situación, le cuestan a Perú entre 8,400 millones y 13,400 millones de dólares anuales. Además, el Banco Mundial indica que una de cada tres escuelas no tiene instalaciones sanitarias

adecuadas y solo una de cada cinco tiene acceso a agua potable. Asimismo, uno de cada cuatro peruanos depende de la agricultura, basada en la lluvia y el riego, para sobrevivir y obtener medios económicos. El recurso hídrico también se emplea para producir más del 50% de la energía eléctrica que se consume en el Perú.

La Cordillera de los Andes separa geográficamente al territorio nacional en dos cuencas principales que dirigen sus aguas hacia los océanos Pacífico y Atlántico, además de una tercera vertiente que drena hacia el Lago Titicaca. La red hidrográfica del río Grande, ubicada en la vertiente del Pacífico, se nutre de las lluvias estacionales que caen en la zona alta de la cuenca, transporta agua de forma discontinua entre enero y abril, y da lugar a diversas quebradas relevantes. En este contexto, la cuenca del río Grande y su subcuenca, el río Llauta, de interés particular para este proyecto, presentan desafíos específicos debido a su variabilidad hidrológica. La cuenca del río Grande, que se extiende a lo largo de 153 km y abarca un ancho de 98 km, cubre una superficie de 10,722 km<sup>2</sup>, de los cuales 4,482 km<sup>2</sup> se encuentran por encima de los 2,500 metros sobre el nivel del mar y forman parte de la zona húmeda de la cuenca.

El sistema de riego Mollepunco en la localidad de Aylapampa se enfrenta a desafíos críticos en cuanto a la gestión de los recursos hídricos debido a la variabilidad climática y los caudales extremos. El desarrollo de un modelo hidrológico para predecir caudales extremos y evaluar la variabilidad climática en la demanda hídrica es esencial para asegurar una gestión sostenible del agua en esta región. Este modelo hidrológico permitirá anticipar y mitigar los efectos de los eventos climáticos extremos, como sequías e inundaciones, que afectan la disponibilidad de agua para el riego agrícola. La precisión en la predicción de caudales extremos es crucial para planificar y gestionar los recursos hídricos de manera eficiente, minimizando el riesgo de escasez de agua durante períodos secos y maximizando su aprovechamiento durante períodos de abundancia. Además, el modelo ayudará a evaluar cómo la variabilidad climática influye en la demanda hídrica del sistema de riego Mollepunco, proporcionando datos valiosos para la toma de decisiones informadas. Esto es especialmente importante en una región donde la agricultura de regadío es vital para la subsistencia y el desarrollo económico de la población local. Es por ello que el desarrollo de un modelo hidrológico para predecir caudales extremos y evaluar la variabilidad climática en la demanda hídrica del sistema de riego Mollepunco es una necesidad imperiosa para garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos. Este esfuerzo no solo contribuirá a la seguridad hídrica y el bienestar

de la población local, sino que también servirá como un ejemplo de cómo abordar los desafíos hidrológicos en otras regiones afectadas por la variabilidad climática.

## **1.2. Delimitación del problema**

### **1.2.1. Espacial (geográfica)**

La investigación se llevará a cabo en la localidad de Aylapampa, ubicada en el Distrito de Llauta, dentro de la Provincia de Lucanas, en el Departamento de Ayacucho, Perú. El área de estudio se centra específicamente en el Sistema de Riego Mollepunco.

### **1.2.2. Temática y unidad de análisis**

La temática central de esta investigación es el desarrollo de un modelo hidrológico para la predicción de caudales extremos en el sistema de riego Mollepunco, bajo la influencia de la variabilidad climática. La investigación se enfoca en cómo las variables climáticas, como la precipitación, temperatura, humedad relativa, evapotranspiración y velocidad del viento, afectan la frecuencia y magnitud de los caudales extremos en dicha área.

La unidad de análisis es el sistema de riego Mollepunco, ubicado en el distrito de Llauta, Ayacucho. Este sistema, que depende de fuentes de agua superficiales, se evalúa considerando la respuesta hidrológica a eventos climáticos extremos, utilizando series históricas de datos meteorológicos e hidrológicos para construir y calibrar un modelo predictivo que permita anticipar eventos críticos. La investigación aborda tanto los aspectos climáticos que afectan el caudal como la infraestructura hídrica asociada al sistema de riego.

## **1.3. Formulación del problema**

### **1.3.1. Problema general**

¿De qué manera se puede desarrollar un modelo hidrológico que permita predecir los caudales extremos en el sistema de riego Mollepunco, considerando la influencia de la variabilidad climática?

### **1.3.2. Problemas específicos**

- a. ¿De qué manera influye la variabilidad climática en la predicción de caudales extremos en el sistema de riego Mollepunco?
- b. ¿Cómo se puede desarrollar y calibrar un modelo hidrológico que permita predecir la magnitud de caudales máximos y la frecuencia de eventos extremos?
- c. ¿Cómo determinar la persistencia de eventos extremos utilizando el modelo hidrológico bajo diferentes escenarios de cambio climático para anticipar caudales futuros?

#### **1.4. Justificación e importancia**

##### **1.4.1. Justificación**

La predicción de caudales extremos en el sistema de riego Mollepunco es crucial debido a la alta variabilidad climática que afecta a la región, lo que incrementa la probabilidad de eventos extremos como inundaciones y sequías. El desarrollo de un modelo hidrológico que integra factores climáticos (precipitación, temperatura, humedad relativa, evapotranspiración y viento) permitirá anticipar estos eventos, mejorando la gestión y distribución del recurso hídrico en la zona. Este estudio contribuye a la planificación y mitigación de riesgos hídricos, ayudando a las comunidades locales a optimizar el uso del agua en periodos críticos y proteger la infraestructura agrícola. Además, el desarrollo de un modelo predictivo ofrece una herramienta útil para afrontar los efectos del cambio climático, proporcionando una base científica sólida para la toma de decisiones a nivel local y regional en el manejo de recursos hídricos. La investigación también aporta al conocimiento técnico sobre la aplicación de modelos hidrológicos en zonas de alta variabilidad climática, brindando una solución adaptable para contextos similares en otras regiones.

##### **1.4.2. Importancia**

La importancia de esta investigación radica en su capacidad para proporcionar un modelo hidrológico predictivo que permita anticipar caudales extremos en el sistema de riego Mollepunco. La predicción precisa de eventos extremos es fundamental para la gestión eficiente del agua, especialmente en regiones vulnerables a la variabilidad climática, como Ayacucho. Este modelo contribuirá directamente a la seguridad hídrica y agrícola, facilitando la toma de decisiones en la planificación del riego, prevención de inundaciones y manejo de sequías. Además, el estudio responde a la necesidad de adaptarse a los efectos del cambio climático, ya que permitirá prever escenarios futuros y reducir el impacto de los fenómenos meteorológicos extremos. Asimismo, esta

investigación ofrece una herramienta valiosa para las autoridades locales y agricultores, al mejorar su capacidad para gestionar los recursos hídricos de manera sostenible, asegurando la disponibilidad de agua para las actividades agrícolas y reduciendo riesgos asociados a la falta de predicción de caudales extremos.

### **1.5. Limitaciones de la investigación**

- La precisión del modelo depende en gran medida de la cantidad y calidad de los datos hidrológicos y climáticos disponibles. La falta de series temporales extensas o datos incompletos puede afectar los resultados.
- Los escenarios futuros de variabilidad climática utilizados en el modelo pueden estar sujetos a incertidumbre debido a la complejidad de los fenómenos climáticos y las limitaciones de los modelos de proyección climática global.
- El modelo hidrológico desarrollado puede estar limitado a las condiciones geográficas, geomorfológicas y climáticas específicas del sistema de riego Mollepunco, por lo que su uso en otras zonas podría requerir ajustes significativos.

### **1.6. Objetivos**

#### **1.6.1. Objetivo general**

Desarrollar un modelo hidrológico que permita predecir los caudales extremos en el sistema de riego Mollepunco, considerando la influencia de la variabilidad climática.

#### **1.6.2. Objetivos específicos**

- a. Evaluar la influencia de la variabilidad climática en la predicción de caudales extremos en el sistema de riego Mollepunco.
- b. Desarrollar y calibrar un modelo hidrológico para predecir la magnitud de caudales máximos y frecuencia de eventos extremos.
- c. Determinar la persistencia de eventos extremos utilizando el modelo hidrológico y aplicando diferentes escenarios de cambio climático para anticipar caudales futuros.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes

#### 2.1.1. Investigaciones internacionales

García (2022) en su tesis de maestría *“La variabilidad climática en la cuenca hidrográfica del río Chalpi Grande y su importancia para los sistemas de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Quito”*, tuvo como objetivo evaluar si el abastecimiento de agua cruda del río Chalpi Grande a la ciudad de Quito puede mantenerse a largo plazo y cómo el cambio climático puede influir en la variabilidad hidrometeorológica de la cuenca. La metodología incluyó el análisis de antecedentes históricos de información hidrológica y climática desde 1985 hasta 2015, junto con el análisis de escenarios planteados en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC. La zona analizada está ubicada en la provincia del Napo, Ecuador, y abarca las parroquias de Papallacta y Cuyuja. Los resultados mostraron que el 97.57% de la cuenca está cubierto por bosques y vegetación arbustiva. Se analizaron variables ambientales como temperatura, precipitación, humedad relativa y caudal del río, encontrando eventos extremos en distintos años. Según los escenarios RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5, a partir de 2055 el caudal del río Chalpi Grande será insuficiente para abastecer a Quito. Por lo tanto, EPMAPS deberá buscar nuevas fuentes de agua para satisfacer la demanda hídrica de la ciudad.

Madrigal (2023) en su investigación *“Generación de pronósticos retrospectivos de caudal para cuencas hidrográficas en Costa Rica por medio de la técnica de análisis de correlación canónica”*, tuvo como objetivo elaborar, analizar y comprobar predicciones hidrológicas históricas del caudal mensual en diversas temporadas climáticas del año en nueve cuencas hidrológicas de Costa Rica, durante el período 1991-2019, utilizando la técnica de análisis de correlación canónica (ACC). La el método utilizó la plataforma “Climate Predictability Tool” (CPT) para efectuar el Análisis de Correlación Canónica (ACC) entre la temperatura superficial del mar (TSM) y las secuencias de caudal. Se aplicaron predicciones históricas de TSM del Ensamble de Múltiples Modelos de América del Norte como variable predictora y se realizaron simulaciones de caudal como predictante. Los resultados incluyeron proyecciones históricas de caudal tanto deterministas como por categorías, debidamente verificadas mediante la técnica de validación cruzada. Los resultados mostraron una fuerte correlación canónica entre las variaciones de la TSM, influenciadas por modos de variabilidad oceánicos, y el comportamiento estacional de los caudales, permitiendo

generar pronósticos con habilidad predictiva significativa hasta tres meses antes. El trimestre de agosto a octubre (ASO) obtuvo los mejores resultados en términos de habilidad predictiva, destacándose los pronósticos categóricos como los más informativos para los usuarios.

Venegas (2023) en su tesis doctoral *“Evaluación de riesgos en la salud pública del estado de Aguascalientes ante la variabilidad climática a partir de indicadores de calidad de agua y suelo”*, tuvo como objetivo evaluar los riesgos en la salud pública del estado de Aguascalientes ante la variabilidad climática, enfocándose en la relación entre esta variabilidad y la incidencia de enfermedades diarreicas en la población. La metodología incluyó el análisis de datos climáticos del período 1970-2010, considerando la presencia y duración de olas de calor y su correlación con el índice ONI (El Niño y La Niña) y la variabilidad de las temperaturas extremas. También se analizaron los grupos etarios con mayor incidencia de enfermedades diarreicas y su relación con factores climáticos y socioculturales, así como índices de vulnerabilidad de los municipios. Los resultados mostraron tendencias crecientes en las temperaturas extremas y eventos de precipitación más intensos. Se identificaron relaciones directas entre los casos de enfermedades diarreicas agudas y variables como la temperatura máxima, mínima y la lluvia acumulada por semana. Las localidades de Asientos y El Llano mostraron los niveles de vulnerabilidad más elevados debido a su alta sensibilidad y baja capacidad de adaptación, junto con un aumento en las olas de calor y temperaturas extremas.

Sota (2022) en su investigación *“Proyecciones de eventos hidro-meteorológicos extremos en la cuenca del altiplano chileno, bajo el escenario de cambio climático SSP5-8.5”*, tuvo como objetivo examinar estimaciones futuras de fenómenos hidro-meteorológicos extremos (lluvias, temperaturas y aumentos de caudal) en la cuenca del río Loa, aguas arriba de la represa Lequena, considerando el escenario climático SSP5-8.5. La metodología empleada consistió en utilizar datos observados de precipitación y temperatura, realizar una ampliación estadística aplicando la técnica de ajuste de sesgo multivariado (MBCn) al modelo de circulación general Inm-cm5-0, y aplicar el modelo hidrológico GR6J calibrado con series históricas para proyectar caudales futuros. Los resultados mostraron un incremento del 16% en la magnitud de las precipitaciones máximas diarias y un aumento de 1°C en la temperatura durante tormentas, estimando que crecidas de 100 años de periodo de retorno ocurrirán con mayor frecuencia hacia 2060, recomendando medidas para incrementar resiliencia y adaptación territorial.

Aguirre (2024) en su investigación “*Variabilidad del caudal del río Bermejo en la Alta Cuenca*”, tuvo como objetivo analizar la variabilidad interanual del caudal del río Bermejo en la Alta Cuenca, así como los mecanismos dinámicos atmosféricos que la modulan. Se empleó una metodología combinada que incluyó análisis estadísticos (test de Pettitt y Mann-Kendall para puntos de quiebre y tendencias), análisis espectral con Transformada Rápida de Fourier, correlaciones de Pearson para evaluar relaciones con índices climáticos, composiciones de variables atmosféricas y cálculo de flujos de actividad de ondas de Takaya-Nakamura. Además, se implementó un modelo de machine learning utilizando árboles de decisión para predecir eventos de caudales altos y bajos. Como resultado, se determinó la influencia de ENOS, IOD y PDO en el caudal, y se logró un modelo predictivo con precisión superior al azar (0.45 frente a 0.37).

### **2.1.2. Investigaciones nacionales**

Sinche (2024) en su investigación “*Las redes neuronales en la predicción de caudales de las cuencas hidrográficas de la región Junín*”, tuvo como finalidad identificar los resultados obtenidos por las redes neuronales en la estimación de caudales en las cuencas hidrográficas de la región Junín durante el año 2024. La metodología utilizada se basó en el enfoque científico, de carácter básico, con un nivel explicativo y un diseño no experimental. La población considerada fueron las cuencas hidrográficas de Junín, y la muestra seleccionada fue la cuenca del río Mantaro, aplicando técnicas de análisis de datos hidrológicos mediante modelos de redes neuronales multicapa, competitiva y recurrente (LSTM). Los resultados mostraron que las redes neuronales aplicadas, en especial la red competitiva, lograron predicciones con precisión razonable respecto a los valores reales, presentando diferencias entre  $-0.6 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ , con una media de  $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$  y desviación estándar de  $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , demostrando su efectividad como herramienta de predicción.

Neciosup y Simon (2024) en su investigación “*Modelamiento hidrológico para medir el impacto del cambio climático de la cuenca del río Pachitea - Huánuco*”, tuvieron como objetivo analizar cómo el cambio climático impactaría en los caudales de la cuenca estudiada. Para ello, se implementó una modelación hidrológica usando el programa SWAT, considerando el escenario climático futuro CMIP 6 - SSP 585 para el periodo 2035-2065. La metodología consistió en calibrar y validar los datos con SWAT-CUP, obteniéndose un PBIAS de 5.8 tras 250 iteraciones, clasificándolo como “Muy bueno” para los años 2001 a 2016. Los hallazgos indicaron que, al aplicar el escenario climático

proyectado, los meses de junio, agosto y septiembre mostrarían mayor variación del parámetro delta, reflejando cambios mensuales significativos. Además, se determinó que la precipitación podría incrementarse en un 119.44% respecto al presente, con una variación de 753.7 mm, evidenciando un notable aumento hídrico.

Hurtado (2022) en su investigación *“Simulación del impacto de la variabilidad climática sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca del lago Chinchaycocha – Junín”*, tuvo como propósito analizar la simulación del efecto de la variabilidad del clima sobre la dinámica hidrológica de la cuenca del lago Chinchaycocha – Junín, a través de la implementación de un modelo determinista. La metodología utilizada fue descriptiva y no experimental, con un enfoque longitudinal, basada en la supervisión, recopilación de información, evaluaciones estadísticas y la interpretación de variaciones a través del tiempo. Se empleó el modelo hidrológico SWAT+ para simular el comportamiento hidrológico entre 1981 y 2018, calibrado con valores de  $R^2$  de 0,59 y p-value de 1,284e-05, y validado con PBIAS de 18,5 y p-value de 0,0501. Los resultados mostraron que el el valor más alto de caudal anual fue de 16,200 m<sup>3</sup>/año en 2017, mientras que el más bajo alcanzó los 1,610 m<sup>3</sup>/año en 1981. La relación entre la precipitación y el caudal simulado presentó un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0,81, en tanto que las temperaturas evidenciaron una correlación inversa con el caudal. Finalmente, se proyectó el comportamiento hídrico al año 2028, estimando un caudal máximo de 2,354 m<sup>3</sup>/mes en enero de 2021 y un mínimo de 278 m<sup>3</sup>/mes en agosto de 2019.

Jiménez (2021) en su investigación *“Simulación a escala diaria con fines de evaluación de la variabilidad hidrológica en la cuenca del río Tambo”*, tuvo como objetivo simular la hidrología diaria en la cuenca del río Tambo, en el sur del Perú, para evaluar la disponibilidad hídrica y su variabilidad climática e hidrológica a lo largo de cuatro décadas. La metodología empleó el modelo hidrológico SWAT, el cual emplea información sobre clases de suelo, cobertura del terreno, modelo digital de elevación y registros climáticos. Este modelo fue ajustado y verificado mediante los indicadores estadísticos Nash, PBIAS, RSR y  $R^2$ , alcanzando calificaciones de “buenos” y “aceptables” en escala diaria, y “excelentes” y “buenos” en escala mensual. Se realizaron simulaciones de caudales en 55 subcuencas, seleccionando tres de ellas (alta, media y baja) para un análisis detallado de la disponibilidad hídrica. Los resultados mostraron que la zona alta presenta mayores valores de precipitación, evapotranspiración, flujo base y escorrentía superficial, que disminuyen hacia las zonas más bajas. La variabilidad climática mostró un aumento de las temperaturas a lo largo

de las décadas, mientras que la variabilidad de los caudales evidenció una disminución en la época de estiaje post embalse Pasto Grande.

Pomasongo (2021), en su investigación *“Uso de softwares para el análisis de caudales pluviales aplicados a procesos hidrológicos: una revisión de la literatura científica de los últimos 10 años”*, tuvo como objetivo explorar las tendencias recientes en el desarrollo de software para el análisis de caudales pluviales en procesos hidrológicos, enfocándose en sus avances, aplicabilidad y diversidad en la ingeniería civil. La metodología empleó la búsqueda de artículos en bases de datos digitales, filtrados mediante el método PRISMA y aplicando criterios de inclusión y exclusión específicos. Se seleccionaron 28 artículos indexados en fuentes como Scindirect, Doaj, MDPI, Redalyc, y Academia, además de dos tesis doctorales de repositorios universitarios internacionales. Los resultados mostraron una amplia variedad de artículos provenientes de 20 países, aplicados en diversos escenarios climáticos. El 80% de los artículos seleccionados fueron publicados en los últimos cinco años, reflejando la actualidad del tema. El modelo HEC-HMS fue el software más utilizado, con un 83.33% de participación, destacándose por su precisión y adaptabilidad en la simulación de eventos hídricos como escorrentías e inundaciones.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Recurso hídrico**

La administración del recurso hídrico en Perú ha estado enfocada tradicionalmente en el sector agrícola, considerado como el rubro económico más relevante para el progreso nacional. Además, ha incorporado gradualmente el fortalecimiento de la protección de los derechos relacionados con este recurso esencial, especialmente en los últimos años. Perú se posiciona como uno de los países con mayor abundancia de recursos hídricos naturales, siendo los glaciares su principal fuente de potencial hídrico. Estos glaciares sirven como reservas esenciales para diversos usos y actúan como estanques naturales que pueden funcionar como depósitos reguladores (Autoridad Nacional del Agua, 2013). Muchos de estos estanques están en operación y contienen reservas de agua reguladas de forma natural. Además, el Plan Nacional de Recursos Hídricos del Perú calculó los recursos hídricos naturales, considerando la precipitación no evaporada que fluye por los canales como recursos superficiales, se infiltra en acuíferos y forma recursos subterráneos, o se almacena en lagos, estanques y embalses artificiales. En consecuencia, se confirma que Perú posee un significativo

potencial en recursos hídricos naturales, los cuales son manejados racionalmente y preservados por la autoridad competente (Autoridad Nacional del Agua, 2013).

## **2.2.2. Clasificación del agua**

### **2.2.2.1. Clasificación del agua según su uso**

Según la Autoridad Nacional del Agua (2013), el uso del agua se clasifica basándose en la prioridad de su concesión y ejercicio, de la siguiente manera:

- **Uso primario:** Este uso implica el consumo continuo y directo del agua en sus fuentes naturales y canales públicos, satisfaciendo necesidades humanas básicas como la preparación de alimentos, uso directo, higiene personal, y la realización de ritos culturales y religiosos.
- **Uso de la población:** Este uso se refiere a la obtención de agua tratada de una fuente o red pública para cubrir necesidades humanas esenciales, como la preparación de alimentos y prácticas de higiene personal. Se realiza a través de los derechos de uso del recurso, otorgados por la entidad competente.
- **Uso productivo:** Este uso se da en los procesos de producción e incluye la agricultura, ganadería, acuicultura y pesca, generación de energía, industria, medicina, minería, recreación, turismo y transporte.

### **2.2.2.2. Clasificación del agua según su origen**

Según el Ministerio de Transición Ecológica (MITECO) (2000), el agua se clasifica según su origen de la siguiente manera:

- **Agua superficial:** Incluye todas las aguas estancadas o corrientes en la superficie terrestre (Ministerio de Transición Ecológica, 2000). Estas aguas provienen generalmente de la lluvia en las cuencas hidrográficas y se clasifican en:
  - ❖ **Aguas lóaticas o corrientes:** Masas de agua que fluyen en una dirección, como arroyos, ríos y manantiales, con intercambio entre la tierra, el agua y el oxígeno.

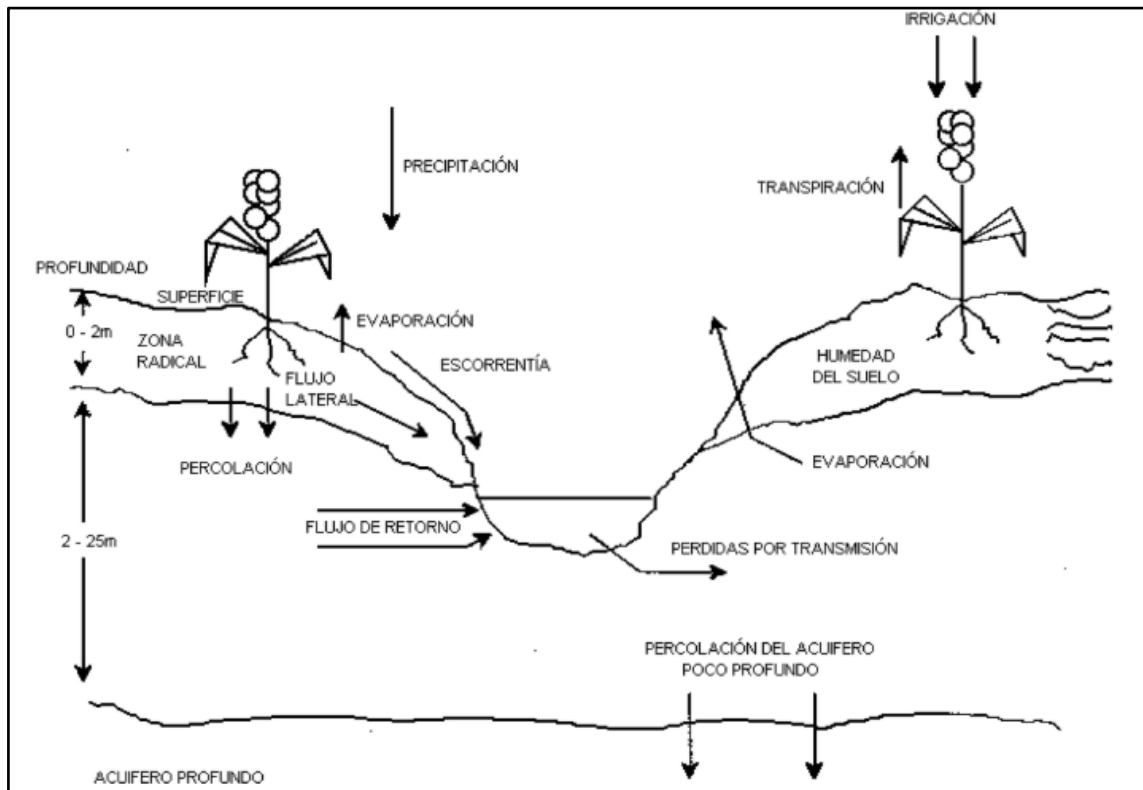
- ❖ **Aguas lénticas:** Aguas continentales quietas o estancadas, como lagos, estanques y pantanos, que tienen tres zonas bien diferenciadas: la zona litoral, la zona limnética y la zona profunda.
  
- **Agua subterránea:** También denominada agua subterránea, es aquella que se filtra a través de las zonas saturadas e insaturadas del subsuelo, ocupando los espacios entre los granos del material geológico. Su distribución depende de las propiedades fisicoquímicas e hidráulicas del terreno y las formaciones rocosas, así como de la litología, la disposición estratigráfica y la estructura geológica. El movimiento del agua subterránea puede abarcar amplias regiones, funcionando como un conducto de descarga hacia el océano u otros sistemas regionales, y puede cambiar a salida del subsistema por evapotranspiración (Ministerio de Transición Ecológica, 2000).

### **2.2.3. Ciclo hidrológico**

El ciclo hidrológico es un mecanismo formado por diversas fases hidrológicas que se relacionan entre sí y con otros sistemas cercanos, como las capas altas de la atmósfera y las formaciones geológicas profundas. Este proceso afecta la distribución del agua y provoca transformaciones en las propiedades físicas, químicas y biológicas del sistema a medida que el recurso se desplaza en distintas direcciones, lo que resulta en alteraciones (Chow et al., 1998).

El movimiento del agua en el planeta puede quedar retenido en cuerpos como lagos, ríos, océanos, la atmósfera, la superficie terrestre, glaciares y reservorios subterráneos. En la atmósfera, el agua se moviliza de un sitio a otro mediante procesos como evaporación, condensación, lluvia, deposición, escorrentía, filtración, sublimación, transpiración, deshielo y circulación subterránea. Los océanos constituyen la fuente principal del vapor de agua debido a la evaporación. De la cantidad evaporada, aproximadamente el 91% retorna a los océanos a través de las precipitaciones, mientras que el resto se dirige hacia las masas continentales, donde las condiciones climáticas inducen la lluvia. El desajuste entre los niveles de evaporación y precipitación en los continentes y los mares se equilibra mediante el escurrimiento superficial y el flujo de agua hacia los océanos (Julio, 2011).

**Figura 1**  
*Representación del ciclo hidrológico*



*Nota.* Tomado de (Chow et al., 1998).

### 2.2.3.1. Componentes del ciclo hidrológico

#### A. Cuenca hidrográfica

Gavilán (2019) señala que una cuenca corresponde a una zona geográfica definida por una línea divisoria de aguas. Su extensión está conformada por sistemas de ríos y quebradas que conforman distintos tipos de drenaje, recibiendo aportes de afluentes y evacuando el caudal en un punto de salida. Asimismo, se resalta que una cuenca representa un entorno natural destinado a la recolección y acumulación de aguas superficiales (ver Figura 2). Según Ferrer y Torrero (2015), en tiempos recientes se ha observado una distribución irregular del recurso hídrico sobre la superficie terrestre, acompañada por un incremento constante de la población.

#### B. Precipitación

Las precipitaciones son acumulaciones de humedad que caen sobre la superficie terrestre y marítima, resultantes de los cambios de estado de la materia. Estas

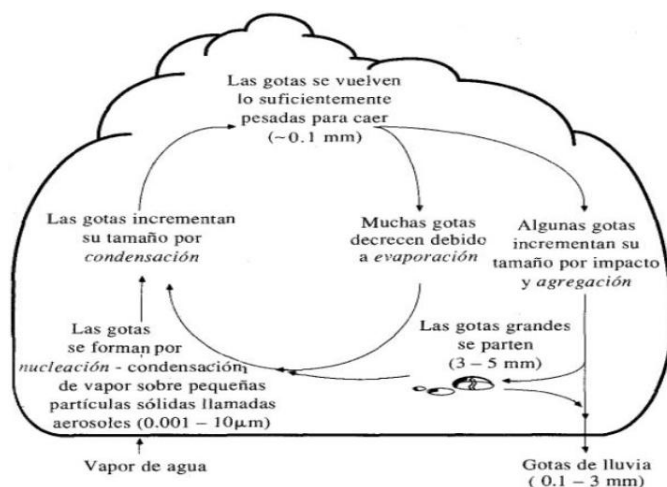
pueden presentarse en estado líquido (como lloviznas y lluvias) y sólido (como nieve y granizo), además de precipitaciones no visibles directamente como el rocío y la escarcha blanca. La precipitación representa la fuente principal del sistema hidrológico y el elemento más determinante para su regulación en una región. Entender cómo varía y se distribuye la precipitación en el tiempo y el espacio es clave para analizar fenómenos como la variabilidad de la humedad superficial, el aumento del volumen de cuerpos de agua y el caudal en los ríos (Aparicio, 1989).

Además, según Musy (2001), existen diferentes tipos de precipitación:

- ❖ **Precipitación convectiva:** Ocurre por el rápido ascenso de masas de aire en la atmósfera, asociadas con nubes cúmulos y cumulonimbus. Estas precipitaciones suelen ser tempestuosas, de corta duración, con fuerte intensidad y limitada extensión espacial.
- ❖ **Precipitación orográfica:** Relacionada con la presencia de una barrera de terreno. Su característica depende de la altitud, pendiente y orientación, así como del trayecto que recorre la masa de aire caliente desde su origen hasta su descarga.
- ❖ **Precipitación frontal o ciclónica:** Asociada con las superficies de contacto entre masas de aire de diferentes temperaturas, el gradiente térmico vertical, la humedad y varios índices de desplazamiento (frentes). Los frentes fríos generan lluvias breves e intensas, mientras que los frentes cálidos producen lluvias prolongadas, pero menos intensas.

**Figura 2**

*Mecanismo de formación de la precipitación*

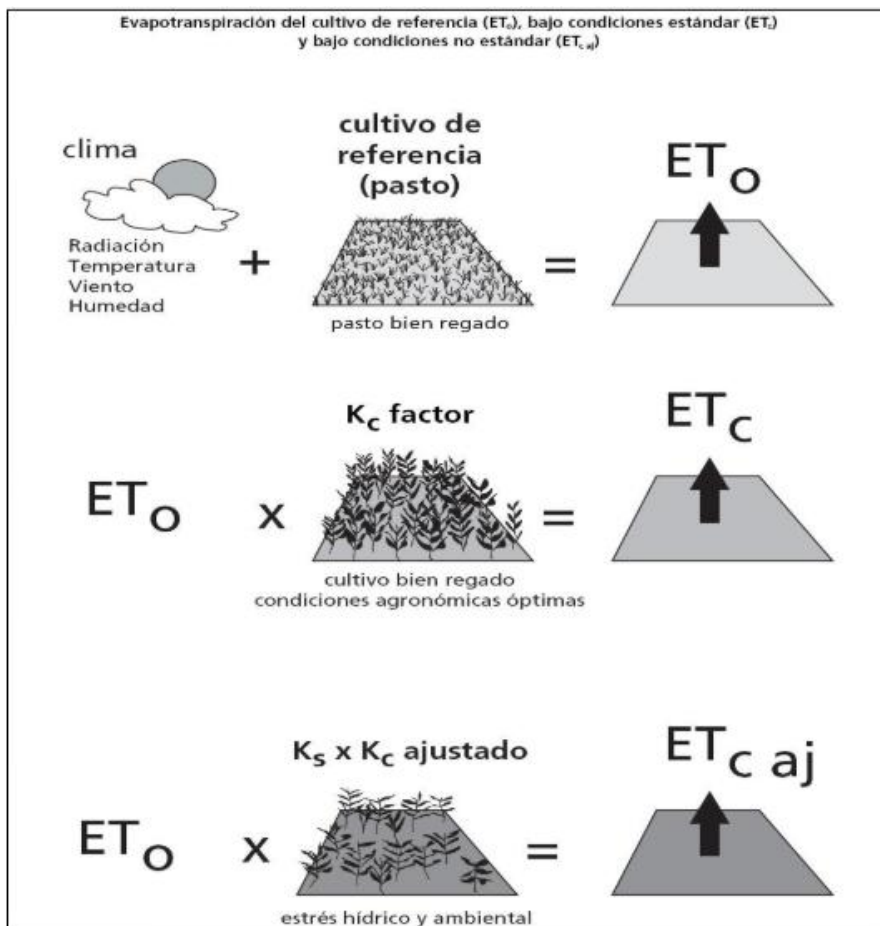


*Nota.* Tomado de (Chow et al., 1998).

### C. Evapotranspiración

La evapotranspiración es el proceso mediante el cual se pierde agua a través de la transpiración de las plantas y la evaporación constante del agua presente en la superficie terrestre. Este fenómeno implica el cambio físico del agua de estado líquido a gaseoso bajo condiciones naturales, lo que exige la disponibilidad de agua para las plantas y una considerable cantidad de energía para llevarse a cabo (Del Carmen, 2001). La evaporación necesita grandes cantidades de energía (calorías), mientras que la transpiración, que es la evaporación a través de las hojas, depende del proceso fisiológico de las plantas que absorben y transportan agua y nutrientes (Julio, 2011).

**Figura 3**  
*Parámetros de la evapotranspiración de cultivo*



*Nota.* Tomado de (Chow et al., 1998).

#### **D. Infiltración**

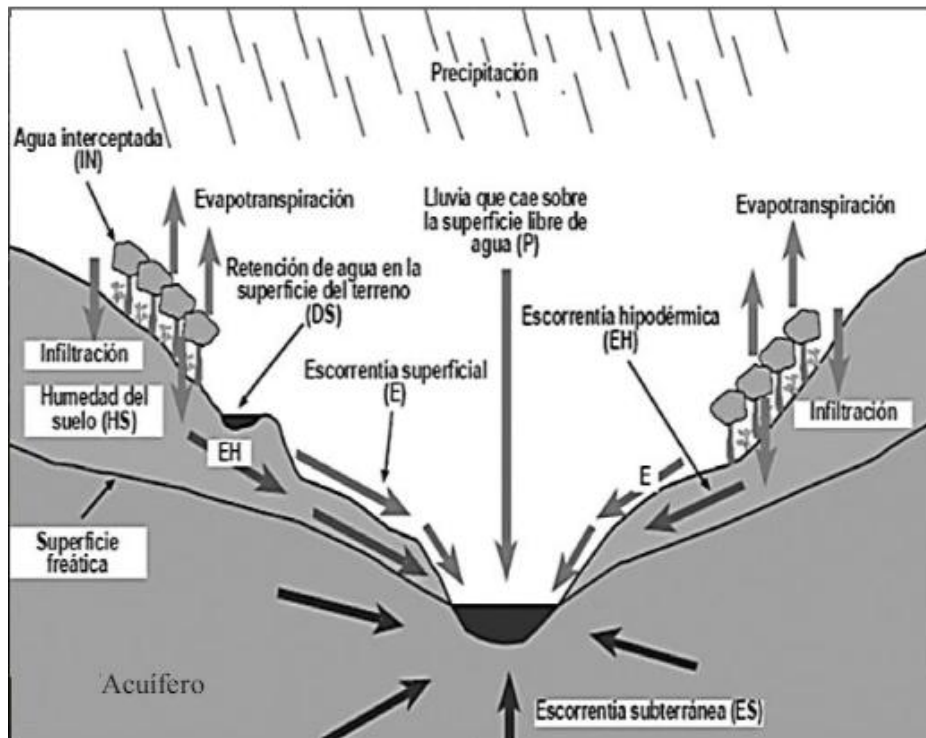
La infiltración ocurre cuando el agua en la superficie se filtra a través del suelo y penetra en profundidad. La cantidad de agua infiltrada depende de la permeabilidad del suelo, la inclinación del terreno y la vegetación presente. Una porción del agua que se filtra vuelve a la atmósfera mediante evaporación o por la transpiración de las plantas, mientras que otra parte se acumula en los acuíferos, donde puede estar detenida o en movimiento (Vásquez, 1997).

#### **E. Escorrentía**

La escorrentía se refiere a las diversas formas en que el agua fluye por la superficie del terreno. En climas áridos y desérticos, el drenaje superficial es el principal medio de erosión y transporte geológico (Vásquez, 1997). Aparicio (2001) explica que la escorrentía se desarrolla dentro del ciclo hidrológico y depende de la distribución espacial del agua de lluvia según las características del medio. Gavilán (2019) afirman que el ciclo hidrológico no tiene principio ni fin, pudiendo comenzar en cualquier punto. Aparicio menciona que la escorrentía se forma a partir de la precipitación efectiva, que se convierte en escorrentía superficial tras ser interceptada, infiltrada y evaporada. Linsley et al. (1992) destacan que la escorrentía es el flujo más importante en un cauce fluvial y está regulada por la variación y distribución de las precipitaciones. Gavilán (2019) añade que la escorrentía no infiltrada se convierte en escorrentía directa, alimentando ríos, lagunas, quebradas y recargando acuíferos. Díaz et al. (2016) señalan que conocer el comportamiento de la escorrentía a través de registros históricos permite evaluar la disponibilidad del recurso hídrico para una buena planificación. Bach y Mas (2004) muestran que, durante un aguacero, parte del agua es interceptada por la vegetación y se evapora, otra parte se infiltra en el suelo y genera escorrentías hipodérmicas y subterráneas, recargando acuíferos. Si la capacidad de infiltración del suelo es excedida, se genera escorrentía superficial libre.

**Figura 4**

*Ciclo de escorrentía, formación de precipitación (lluvia).*



Nota. Tomado de (Bach y Mas, 2004).

#### **F. Flujo lateral**

El flujo lateral es el movimiento del agua bajo la superficie del suelo, pero por encima del nivel del acuífero, alimentando canales de drenaje, arroyos y ríos. El agua subterránea adyacente se calcula junto con la percolación del perfil del suelo, utilizando un modelo de acumulación variable que aplica la ecuación de conservación de masa al perfil completo del suelo (Proaño et al., 2006).

#### **2.2.4. Clasificación Climática**

Para categorizar el clima, se utiliza la fórmula de Thornthwaite, la cual toma en cuenta la temperatura y la precipitación como variables meteorológicas principales. Estas permiten calcular la Evapotranspiración Potencial (ETP) y efectuar el Balance Hídrico, lo que facilita la identificación de períodos de exceso o escasez de agua, aspectos fundamentales para definir las condiciones climáticas de una zona.

El sistema de clasificación climática de Thornthwaite se expresa mediante una secuencia de cuatro letras acompañadas de subíndices. Las dos primeras letras, en

mayúscula, representan el “Índice de humedad” y la “Eficiencia térmica” del área. Las tercera y cuarta letras, en minúscula, indican la “Distribución estacional de la humedad” y la “Concentración del calor durante el verano”, respectivamente (Thornthwaite, 1948).

- ❖ **Índice de humedad:** El Índice de Humedad propuesto por Thornthwaite se determina mediante la siguiente expresión matemática:

$$I_h = I_E - 0.6I_D$$

Siendo:

$I_E$  = Índice de exceso, que se calcula por la siguiente expresión:

$$I_E = \frac{E}{ETP} \times 100$$

$I_D$  = Índice de déficit, que se calcula por la siguiente expresión:

$$I_D = \frac{D}{ETP} \times 100$$

- ❖ **Evaluación de la eficiencia térmica:** Según Thornthwaite (1948), la ETP actúa como un indicador de la eficiencia térmica. La suma de las ETP mensuales promedio se utiliza para evaluar la eficiencia térmica del clima estudiado.
- ❖ **Análisis de la variabilidad estacional de la humedad:** Es fundamental reconocer la existencia de intervalos secos dentro de climas húmedos y, de forma contraria, lapsos húmedos en regiones con clima árido.
- ❖ **Cálculo de la concentración térmica durante el verano:** Se obtiene sumando la Evapotranspiración Potencial (ETP) correspondiente a los meses de verano y comparándola con la ETP total anual. El resultado se expresa como un porcentaje, lo que permite evaluar la concentración térmica estacional en una determinada región.

$$C_v = \frac{ETP_{verano}}{ETP_{anual}} \times 100$$

Los criterios para distinguir los diferentes tipos de regímenes hídricos se fundamentan en los valores obtenidos del índice hídrico, representados por letras mayúsculas sin tilde. La tabla 1 muestra la clasificación climática según el Índice Hídrico.

**Tabla 1**  
*Clasificación Climática*

PROVINCIAS DE HUMEDAD		
Clasificación según Índice Hídrico		
TIPO	Índice de Pluvial	CLIMA
A	> a 100	Super húmedo
B4	80 a 100	Muy húmedo
B3	60 a 80	Húmedo
B2	40 a 60	Moderadamente húmedo
B1	20 a 40	Ligeramente húmedo
C2	0 a 20	Semi-húmedo
C1	(-20) a 0	Semi-seco
D	(-40 a -20)	Seco
E	(-60 a -40)	Arido

*Nota.* Tomado de (Thorntwaite, 1948).

Estas áreas de humedad se ordenan en función del comportamiento anual de las lluvias, teniendo en cuenta la escasez o el exceso de agua. Los subtipos de humedad se representan mediante letras minúsculas sin acento, y su significado se explica en la tabla 2.

**Tabla 2**  
*Clasificación por Subtipos de Humedad*

SubClasificación de Humedad según Índice de Exceso e Índice de Déficit		
SUB-TIPO	Índice de Exceso (%)	CLIMA SECO (por exceso de agua)
w'2	> 20	Exceso grande en invierno
s'2	> 20	Exceso grande en verano
w'	10 a 20	Exceso moderado en invierno
s'	10 a 20	Exceso moderado en verano
d	0 a 10	Poco o ningún exceso
SUB-TIPO	Índice de Deficit (%)	CLIMA HUMEDO (por falta de agua)
w2	> 33.3	Déficit grande en invierno
s2	> 33.3	Déficit grande en verano
w	16.7 a 33.3	Déficit moderado en invierno
s	16.7 a 33.3	Déficit moderado en verano
r	0 a 16.7	Déficit pequeño o ninguno

*Nota.* Tomado de (Thorntwaite, 1948).

En el sistema de clasificación térmica que se basa en la evapotranspiración potencial, esta se interpreta como una variable que depende de la temperatura promedio solar, y no como un indicador hidrológico. Para distinguir las distintas categorías térmicas, se utilizan letras mayúsculas con tilde. La tabla 3 presenta cómo se distribuyen estas clasificaciones térmicas según los valores de evapotranspiración.

**Tabla 3**

*Clasificación Térmica según la Evapotranspiración Potencial*

PROVINCIAS TERMICAS		
Provincias Térmicas según Índice de Evapotranspiración Potencial		
TIPO	Eto (cm)	CLIMA
A'	> a 114.0	Cálido
B'4	99.7 a 114.0	Semicálido
B'3	85.5 a 99.7	Templado cálido
B'2	71.2 a 85.5	Templado frío
B'1	57.0 a 71.2	Semi frío
C'2	42.7 a 57.0	Frío moderado
C'1	28.5 a 42.7	Frío acentuado
D'	14.2 a 28.5	De tundra
E'	< a 14.2	Helado

*Nota.* Tomado de (Thorntwaite, 1948).

Estas clases climáticas se dividen en subcategorías según el comportamiento térmico a lo largo del año, considerando el porcentaje de acumulación de calor durante los doce meses, con énfasis en la estación de verano (consultar tabla 4).

**Tabla 4**

*Clasificación por Subtipos según Régimen Térmico*

SubClasificación de Provincias Térmicas	
SUB-TIPO	Concentración Estival (Base % Eto del Verano)
d'	> 88.0
c'1	76.3 a 88.0
c'2	68.0 a 76.3
b'1	61.6 a 68.0
b'2	56.3 a 61.6
b'3	51.9 a 56.3
b'4	48.0 a 51.9
a'	< a 48.0

*Nota.* Tomado de (Thorntwaite, 1948).

## **2.2.5. Eficiencias en el uso del agua de riego**

### **2.2.5.1. Eficiencia de conducción**

La eficiencia de conducción se refiere a la capacidad del sistema de transporte de agua (canales, tuberías o acequias) para llevar el volumen captado en la fuente hasta las parcelas de riego. Expresa el porcentaje de agua que llega efectivamente a destino en relación con el volumen extraído, considerando pérdidas por infiltración, evaporación o derrames. Los valores de eficiencia varían según el tipo de infraestructura: mientras los canales sin revestir pueden perder hasta un 40 % del agua, los canales revestidos o entubados alcanzan valores superiores al 85 %. Este indicador es fundamental porque determina la cantidad de agua realmente disponible para los agricultores. (Bonet Pérez et al. (2019)).

### **2.2.5.2. Eficiencia de aplicación**

La eficiencia de aplicación mide el grado en que el agua que llega a la parcela es aprovechada por el cultivo, es decir, la fracción que se almacena en la zona radicular frente al volumen total aplicado. Las pérdidas en esta etapa se deben a escorrentía superficial, percolación profunda y evaporación directa. Su valor depende de la tecnología empleada: el riego por goteo puede alcanzar entre 85 % y 95 %, mientras que el riego por gravedad rara vez supera el 60 %. Este indicador refleja la calidad de la práctica de riego y la uniformidad de aplicación sobre el terreno. (FAO. (2000)).

### **2.2.5.3. Eficiencia global en el sistema de riego**

La eficiencia global del sistema de riego integra todas las fases de manejo del agua, desde la captación hasta la aplicación en el cultivo. Se calcula como el producto de la eficiencia de conducción y la eficiencia de aplicación, lo que representa la proporción de agua captada en la fuente que finalmente queda disponible en la zona radicular. Este valor resume el desempeño integral del sistema y sirve para evaluar su sostenibilidad, planificar mejoras y determinar de forma realista la demanda de agua de los cultivos. (FAO-SAFR(2002)).

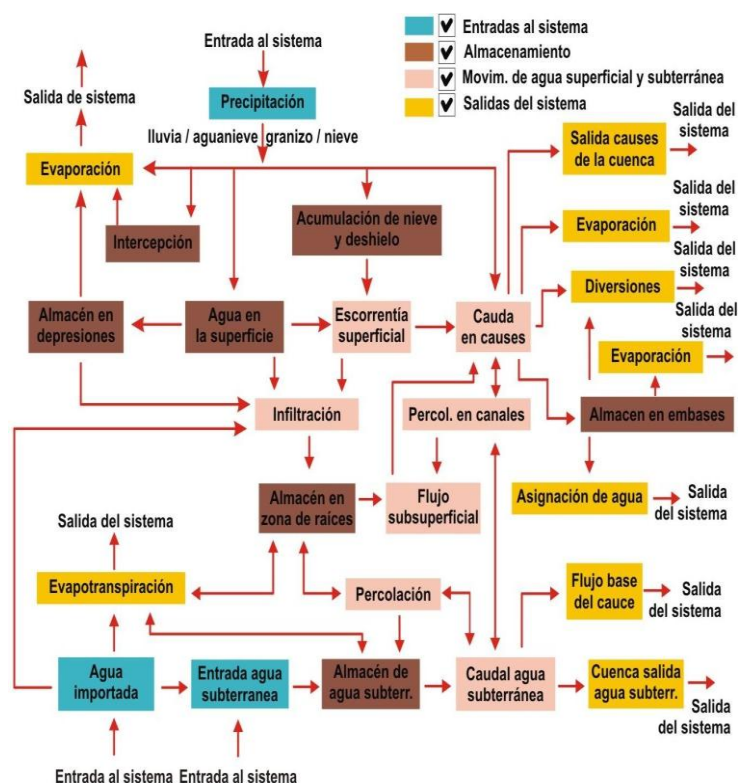
## 2.2.6. Modelos hidrológicos

Oropeza (1990) define los modelos hidrológicos como representaciones simplificadas de sistemas hidrológicos reales, empleadas para estudiar las relaciones causa-efecto dentro de una cuenca a través del análisis de datos de entrada y salida. Estas herramientas permiten simular y anticipar el comportamiento de los procesos físicos que ocurren en el interior de la cuenca.

Un modelo puede ser una representación tangible o intangible de una entidad, fenómeno o concepto, que permite deducir, con ciertas limitaciones, el comportamiento de su contraparte natural. La preferencia por utilizar modelos en lugar de estudiar directamente los entes naturales se debe a que manejar un modelo suele ser más económico, conveniente y rápido (Palacios, 2005).

Por lo tanto, los modelos hidrológicos son esencialmente abstracciones de los sistemas hidrológicos auténticos, es decir, son una forma simplificada de la realidad. A través de ellos, es posible analizar las dinámicas de causa y efecto en una cuenca utilizando datos de entrada y salida, lo que ayuda a comprender mejor los procesos hidrológicos físicos que ocurren dentro de la cuenca.

**Figura 5**  
*Modelo de un sistema hidrológico*



*Nota.* Tomado de Baldeon (2016)

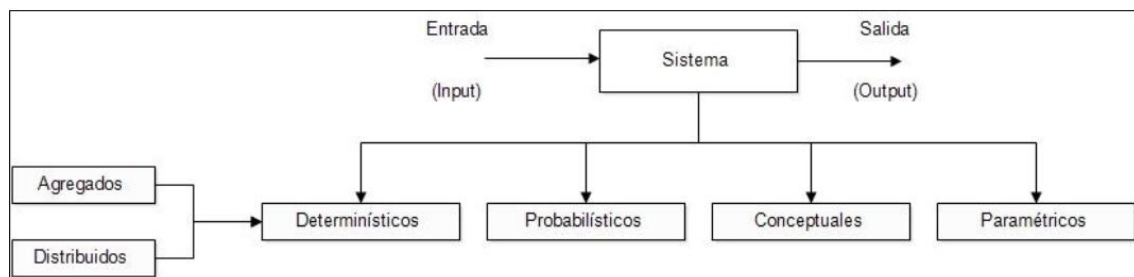
### 2.2.6.1. Modelos matemáticos hidrológicos

Los modelos hidrológicos constituyen simplificaciones de los sistemas hidrológicos auténticos y sirven para analizar las dinámicas de causa y efecto dentro de una cuenca mediante el uso de datos de entrada y salida. También facilitan la simulación y la proyección del comportamiento de los procesos físicos que ocurren en la cuenca (Baldeon, 2016).

### 2.2.6.2. Clasificación de los modelos hidrológicos

De acuerdo con Ponce (1989), la modelación hidrológica se clasifica en cuatro tipos: modelo determinístico, modelo conceptual, modelo probabilístico y modelo paramétrico (Ver Figura 6).

**Figura 6**  
*Modelación hidrológica*



*Nota.* Tomado de (Aybar, 2016)

#### A. Modelo determinístico

El modelo determinista define relaciones cuantitativas precisas entre las variables de entrada y salida, aplicando una ecuación empírica para generar una respuesta ante una condición específica. Este enfoque no incorpora elementos de azar; por tanto, una misma entrada generará invariablemente el mismo resultado. Los modelos hidrológicos de tipo determinista se clasifican en modelos agregados y modelos distribuidos, diferenciándose en la cantidad de elementos de análisis en los que se divide el área de interés. Los modelos agregados tratan a las cuencas y subcuencas como unidades integradas de estudio, evaluando su comportamiento de forma global sin detallar los procesos internos espaciales en su interior. En contraste, los modelos distribuidos utilizan

mecanismos de menor escala definidos con mayor detalle, sin representar componentes hidrológicos específicos. Estos conceptos no se excluyen entre sí, dado que los modelos concentrados se centran en componentes específicos dentro de un modelo distribuido de mayor escala (Olaya, 2004).

#### **B. Modelo probabilístico**

El modelo probabilístico es opuesto al modelo determinístico. Este modelo se basa en principios de casualidad o probabilidad, utilizando conjuntos de datos obtenidos de muestras aleatorias. Es un modelo matemático que emplea probabilidades y se compone de un conjunto de supuestos sobre la generación de ciertos patrones de datos que se asemejan a un conjunto de datos más grande (Sánchez, 2010).

#### **C. Modelo conceptual**

El modelo conceptual representa sistemas físicos mediante representaciones analíticas que simulan series complejas basadas en algunos parámetros conceptuales clave. Su función es ser un esquema intelectual interdisciplinario. Este modelo, al usarse extensivamente en investigaciones hidrológicas, puede generar confusión en el objetivo planteado y dificultades al asumir elementos deterministas (Mondino, 2014).

#### **D. Modelos paramétricos**

Los modelos paramétricos representan las formas más básicas de modelación, al utilizar un conjunto limitado de parámetros para describir el comportamiento del sistema. Su fortaleza radica en los parámetros empíricos basados en resultados. Generalmente, se basan en una expresión algebraica que incorpora uno o varios parámetros definidos a partir del análisis de información recopilada y otros métodos empíricos. La aplicación de este modelo está limitada por el nivel de datos utilizados con el fin de establecer los valores de los parámetros (Sánchez, 2010).

### 2.2.6.3. Objetivos de un modelo hidrológico

La finalidad de los modelos hidrológicos es identificar con precisión y eficacia los elementos del ciclo hidrológico dentro de una cuenca y prever las variaciones y la intensidad del agua, especialmente en eventos de baja frecuencia. Estos modelos son esenciales para evaluar, simular y anticipar los impactos de inundaciones, y son cruciales para abordar cuestiones prácticas relacionadas con el inventario y gestión de recursos hídricos en una cuenca, región o país (Oropeza, 1999).

- **Estructura del Modelo y Propósito de la Modelación:** Este criterio se enfoca en las partes del modelo implicadas y su grado de abstracción, distinguiendo entre procesos individuales, modelos de componentes, modelos integrados y modelos globales (Oropeza, 1999).
- **Influencia del Tiempo en el Modelo:** Bajo este enfoque, los modelos se clasifican en dinámicos o estocásticos. Los modelos estocásticos, que utilizan ecuaciones empíricas y de regresión, no dependen del tiempo, mientras que los modelos dinámicos se basan en ecuaciones diferenciales con el tiempo como variable independiente, subdividiéndose en continuos y por eventos (Oropeza, 1999).
- **Valor Cognitivo del Modelo:** Este aspecto divide los modelos en dos tipos: los basados físicamente, que se fundamentan en leyes físicas conocidas y describibles por ecuaciones físico-matemáticas, y los modelos conceptuales, que simplifican el comportamiento del fenómeno mediante funciones físicas y empíricas para describir sus subprocesos (Oropeza, 1999).
- **Naturaleza de los Resultados Obtenidos:** Los resultados pueden ser determinísticos o estocásticos. Los determinísticos asumen que los procesos se pueden definir físicamente sin un componente de azar, basándose en datos de eventos históricos, mientras que los estocásticos consideran que el flujo en cualquier momento es el resultado de flujos anteriores más un componente aleatorio (Oropeza, 1999).

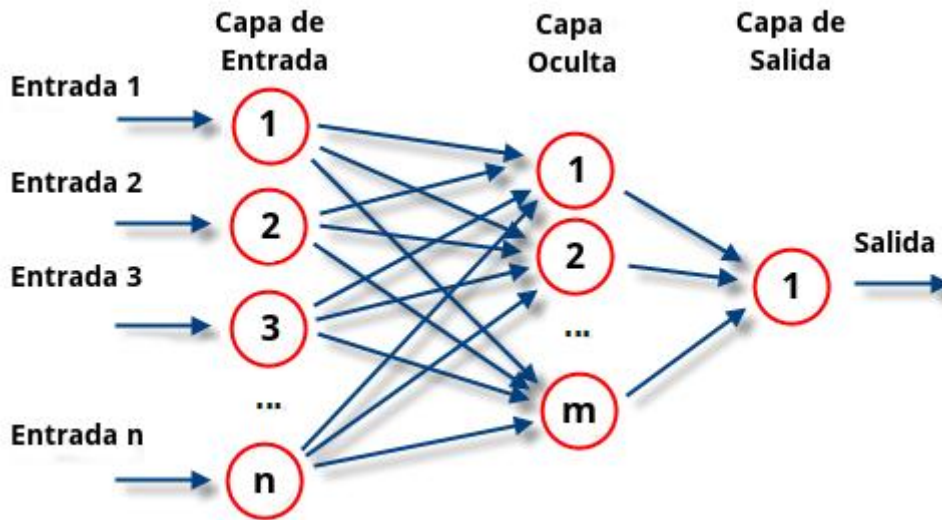
### **2.2.7. Técnicas de aprendizaje computacional**

El aprendizaje automático fue creado originalmente para diseñar métodos que permitieran a los procesadores adquirir conocimientos por sí mismos. En la actualidad, integra múltiples enfoques estadísticos orientados a la regresión y distribución de datos, y se emplea en una amplia variedad de áreas como la ecología, química, finanzas, ingeniería ambiental, entre otras, incluyendo también aplicaciones en diagnósticos médicos y en la identificación de fraudes con tarjetas bancarias. Las condiciones subyacentes son complejas y la representación exacta de las relaciones no siempre es conocida (Espino, 2017).

#### **2.2.7.1. Redes neuronales**

Las redes neuronales son mecanismos de aprendizaje inspirados en la estructura y operación del cerebro humano. Estos modelos permiten representar y replicar relaciones no lineales entre variables de entrada y salida. Su principal característica es la capacidad de procesar información en tiempo real, facilitando la codificación y análisis de modelos en sistemas complejos (Martínez, 2014). Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) se aplican de forma extendida en la elaboración de pronósticos en tiempo real dentro de sectores como la industria, la minería y diversas áreas adicionales (Martín y De Paz, 2007). Debido a su precisión, efectividad y capacidad para modelar relaciones no lineales, las RNA se emplean actualmente en codificación, validación de modelos y en una variedad de aplicaciones innovadoras (Jain et al., 1996). Una RNA consta de capas de entrada, varias capas ocultas y una capa de salida, cada una con varias neuronas. Las variables de entrada pasan a través de estas capas para producir datos de salida.

**Figura 7**  
*Relación de las redes neuronales*



*Nota.* Tomado de (Martínez, 2014).

#### **2.2.7.2. Software R**

R es un software de código abierto para la computación estadística. Utiliza colecciones de funciones que se ejecutan mediante comandos en una interfaz, facilitando el proceso de modelado. El lenguaje R ofrece una amplia gama de características estadísticas, como modelado lineal y no lineal, clasificación y agrupamiento. Además, maneja datos, automatiza procesos y realiza gráficos (Espino, 2017).

### **III. MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Enfoque**

Esta investigación pertenece al enfoque cuantitativo. Según Hernández et al. (2014), una investigación de enfoque cuantitativo, utiliza datos numéricos y métodos estadísticos para realizar un análisis. La elección de este enfoque radica que se trata del desarrollo de un modelo hidrológico, el cual implica el uso de datos numéricos y métodos estadísticos para predecir caudales extremos bajo la influencia de la variabilidad climática. Este enfoque se basa en la recopilación y análisis de datos cuantitativos, utilizando herramientas matemáticas y computacionales para generar resultados que pueden ser medidos y comparados objetivamente.

#### **3.2. Alcance**

Esta investigación pertenece al tipo de alcance explicativo. Según Hernández y Mendoza (2018), una investigación de alcance explicativo tiene como objetivo principal identificar las causas y efectos de los fenómenos estudiados, proporcionando una comprensión profunda de las relaciones causales. El objetivo es no solo describir y analizar la situación actual de la variabilidad climática, sino también desarrollar un modelo hidrológico que explique las relaciones causales entre estas variables y permita predecir caudales extremos. El enfoque explicativo busca comprender las causas y efectos dentro del sistema estudiado.

#### **3.3. Diseño de investigación**

Esta investigación pertenece al tipo de diseño no experimental. En un diseño no experimental, los investigadores observan y analizan las variables tal como ocurren naturalmente, sin manipularlas directamente (Espinoza, 2014). En este caso, el estudio se basa en la recopilación y análisis de datos existentes, como registros hidrológicos y climáticos, para desarrollar y validar un modelo hidrológico. No se realizan intervenciones ni modificaciones en las condiciones del sistema de riego de Mollepunco, sino que se trabaja con datos históricos y actuales para entender y predecir los caudales extremos y la variabilidad climática. Esto permite comprender las relaciones y efectos sin alterar el entorno natural.

### **3.4. Población y muestra**

#### **3.4.1. Población**

La población de esta investigación incluye todas las cuencas hidrográficas y sistemas de riego que podrían estar sujetos a variabilidad climática y cambios en los caudales extremos, específicamente dentro de la región de Ayacucho y, más ampliamente, en contextos similares en otras regiones.

#### **3.4.2. Muestra**

La muestra de esta investigación es el Sistema de Riego Mollepunco en la localidad de Aylapampa, Distrito de Llauta, Provincia de Lucanas, Departamento de Ayacucho. Este sistema específico se selecciona para desarrollar y validar el modelo hidrológico, enfocándose en su capacidad para predecir caudales extremos bajo la influencia de la variabilidad climática.

### **3.5. Hipótesis**

#### **3.5.1. Hipótesis general**

Si se desarrolla un modelo hidrológico que considere la influencia de la variabilidad climática, entonces se podrán predecir de manera precisa los caudales extremos en el sistema de riego Mollepunco.

#### **3.5.2. Hipótesis específicas**

- a. Si se evalúa la influencia de la variabilidad climática, entonces se podrá identificar un patrón significativo que afecta la predicción de caudales extremos en el sistema de riego Mollepunco.
- b. Si se desarrolla y calibra un modelo hidrológico, entonces se podrá predecir con precisión la magnitud de los caudales máximos y la frecuencia de eventos extremos en el sistema de riego Mollepunco.
- c. Si se aplica el modelo hidrológico bajo diferentes escenarios de cambio climático, entonces se podrá determinar la persistencia de eventos extremos y anticipar con mayor certeza los caudales futuros en el sistema de riego Mollepunco.

### 3.6. Operacionalización de variables

#### a) Variable Independiente: Variabilidad climática

##### Indicadores:

- Precipitación media mensual
- Temperatura máxima mensual
- Temperatura mínima mensual
- Humedad relativa media mensual
- Evapotranspiración potencial mensual
- Velocidad media del viento

#### b) Variable Dependiente: Predicción de caudales extremos

##### Indicadores:

- Número de eventos extremos predichos
- Caudales máximos predichos
- Error cuadrático medio (MSE)
- Coeficiente de determinación ( $R^2$ )
- Probabilidad de que el caudal exceda cierto valor

**Tabla 5**

*Cuadro de Operacionalización de variables*

VARIABLES	DEFINICION CONCEPTUAL	TIPO	NATURALEZA	MEDICIÓN	DIMENSIÓN	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA
<b>Variabilidad climática</b>	Son las fluctuaciones en los patrones climáticos promedio, como temperatura y precipitación, que ocurren a lo largo del tiempo debido a factores naturales y antropogénicos, afectando sistemas ecológicos, agrícolas y recursos hídricos en diferentes regiones.	<b>Independiente</b>	<b>Cuantitativa</b>	<b>Razón</b>	Precipitación	<b>Precipitación media mensual</b>	<b>(mm)</b>
					Temperatura	<b>Temperatura máxima mensual</b>	<b>(°C)</b>
						<b>Temperatura mínima mensual</b>	<b>(°C)</b>
					Humedad relativa	<b>Humedad relativa media mensual</b>	<b>(%)</b>
					Evapotranspiración	<b>Evapotranspiración potencial mensual</b>	<b>(mm/mes)</b>
Viento	<b>Velocidad media del viento</b>	<b>(m/s)</b>					
<b>Predicción de caudales extremos</b>	Es el proceso de estimar los valores máximos de caudales en un río o sistema hídrico, considerando factores climáticos e hidrológicos. Esto permite anticipar eventos críticos como inundaciones, aplicando modelos estadísticos y datos históricos.	<b>Dependiente</b>	<b>Cuantitativa</b>	<b>Razón</b>	Frecuencia de eventos extremos	<b>Número de eventos extremos predichos</b>	<b>N°</b>
					Magnitud de los caudales máximos	<b>Caudales máximos predichos</b>	<b>N°</b>
					Error en la predicción	<b>Error cuadrático medio (MSE)</b>	<b>(m³/s)²</b>
						<b>Coefficiente de determinación (R²)</b>	<b>(0 y 1)</b>
Persistencia de los Caudales Extremos	<b>Probabilidad de que el caudal exceda cierto valor</b>	<b>(%)</b>					

*Nota.* Elaboración propia

### 3.7. Técnicas e instrumentos

#### 3.7.1. Técnicas

##### A. Revisión de Datos Secundarios

- **Datos Hidrológicos:** Registros históricos de caudales, niveles de agua y escorrentía del Sistema de Riego Mollepunco.
- **Datos Climáticos:** Información sobre temperatura, precipitación, humedad relativa y eventos extremos obtenidos de estaciones meteorológicas locales y bases de datos climatológicas.

##### B. Análisis de Datos Históricos y Archivos

- Revisión y análisis de datos históricos y archivos, como registros de caudales, informes climáticos antiguos, y estudios previos realizados en la región.

#### 3.7.2. Instrumentos

- Software estadístico como R, MATLAB.
- Fichas de registros históricos
- Software de modelado Python

### 3.8. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información

##### A. Análisis Descriptivo:

**Función:** Describir y resumir las características principales de los datos hidrológicos y climáticos.

**Instrumentos:** Pandas, NumPy, R

##### B. Análisis de Correlación:

**Función:** Evaluar la relación entre variables hidrológicas y climáticas.

**Instrumentos:** SciPy, R

### **C. Regresión Lineal y No Lineal:**

**Función:** Modelar la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes.

**Instrumentos:** Scikit-learn, R, MATLAB.

### **D. Análisis de Series Temporales:**

**Función:** Analizar datos secuenciales en el tiempo para identificar tendencias, patrones estacionales y ciclos.

**Instrumentos:** Python (statsmodels, pandas).

### **E. Análisis de Componentes Principales (PCA):**

**Función:** Reducir la dimensionalidad de los datos y detectar patrones subyacentes en los datos climáticos e hidrológicos.

**Instrumentos:** Scikit-learn, R, MATLAB.

### **F. Análisis de Tendencias:**

**Función:** Detectar tendencias a largo plazo en los datos precipitación, temperatura, humedad relativa, evapotranspiración y vientos.

**Instrumentos:** R, Python (Statsmodels).

### **G. Métodos de Evaluación de Modelos:**

**Función:** Evaluar la precisión y fiabilidad de los modelos hidrológicos mediante métricas como el Error cuadrático medio (MSE) y el Coeficiente de determinación ( $R^2$ ).

**Instrumentos:** Python, R, MATLAB.

## **3.9. Desarrollo de Trabajo de Tesis**

### **3.9.1. Ubicación Geográfica**

El Sistema de Riego Mollepunco se localiza en el distrito de Llauta, perteneciente a la provincia de Lucanas, en el departamento de Ayacucho, Perú. Este sistema forma parte de un proyecto orientado a mejorar el acceso al agua para riego en las

comunidades de Mollepunco, Panchalla y Aylapampa-Ayahuii, situadas en la zona de Aylapampa., donde se desarrollan actividades agrícolas de subsistencia y comercio local. El acceso a la zona se realiza mediante trochas carrozables y caminos rurales que conectan a las comunidades con el mercado distrital. El relieve es predominantemente montañoso con pendientes medias a altas, lo que condiciona la distribución de las áreas agrícolas y la necesidad de infraestructura de riego para garantizar la producción.

### Figura 8

#### Ubicación del distrito de Llauta:



- **Este:** 508630.00 m E
- **Norte:** 8425330.00 m S
- **Altitud:** aproximadamente 2,863 m s. n. m.

#### 3.9.2. Área y Perímetro de la Cuenca

La determinación del área y perímetro de la subcuenca se llevó a cabo mediante el uso de una Carta Topográfica con escala 1:25,000. Los resultados obtenidos están expresados en kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>) para el área y en kilómetros (km) para el perímetro. En la tabla 6, se presentan estos valores correspondientes a la subcuenca de Llauta.

**Tabla 6***Área y perímetro*

<b>SUB-CUENCA</b>	<b>AREA (km<sup>2</sup>)</b>	<b>PERÍMETRO (km)</b>
<b>LLAUTA</b>	256.58	106.6

Nota. Elaboración Propia

**3.9.3. Altura Media de la Cuenca (Hm)**

La altitud media de la cuenca se obtiene como el valor promedio ponderado de las altitudes, derivado de la curva hipsométrica. El valor obtenido para la altitud media de la subcuenca Llauta es de 3500 metros sobre el nivel del mar (msnm). Este dato se muestra en la tabla 7, el cual fue empleado para desarrollar la curva hipsométrica.

**Tabla 7***Altitud media*

<b>SUB-CUENCA</b>	<b>ALTURA PROMEDIO (msnm)</b>
<b>LLAUTA</b>	3500

Nota. Elaboración Propia

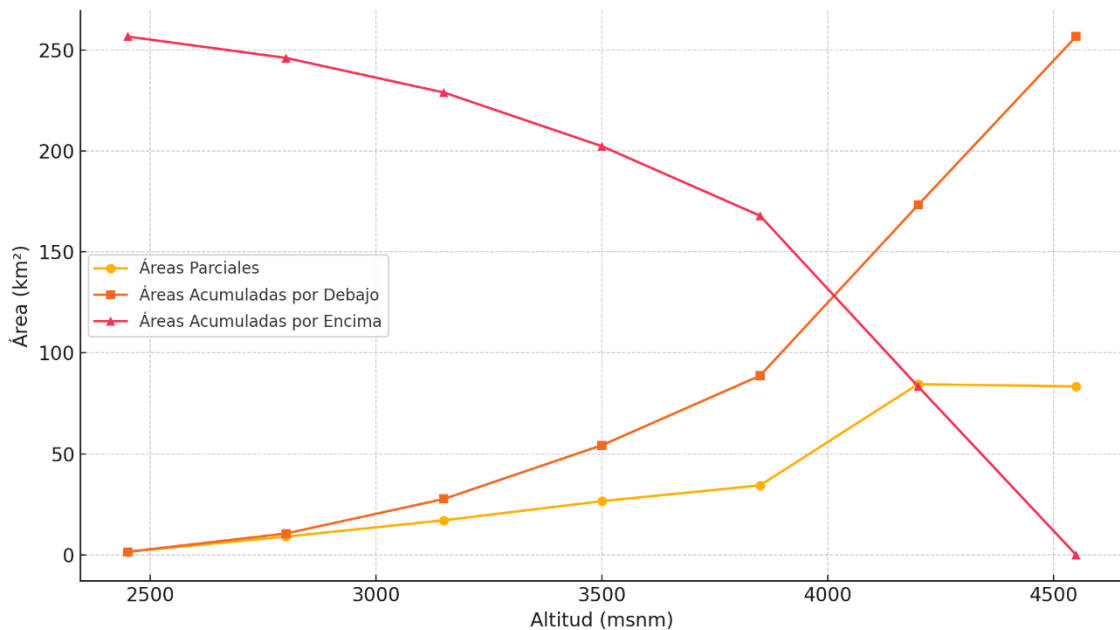
**Tabla 8***Áreas parciales*

<b>ALTITUD (msnm)</b>	<b>ÁREAS PARCIALES Km<sup>2</sup></b>	<b>(%)</b>	<b>ÁREAS ACUMULADAS POR DEBAJO Km<sup>2</sup></b>	<b>(%)</b>	<b>ÁREAS ACUMULADAS POR ENCIMA Km<sup>2</sup></b>	<b>(%)</b>
<b>2450</b>	1.521	0.59	1.521	0.6	256.583	100
<b>2800</b>	9.036	3.52	10.557	4.11	246.026	95.9
<b>3150</b>	17.126	6.67	27.683	10.8	228.9	89.2
<b>3500</b>	26.6	10.37	54.283	21.2	202.3	78.8
<b>3850</b>	34.4	13.41	88.683	34.6	167.9	65.4
<b>4200</b>	84.5	32.93	173.183	67.5	83.4	32.5
<b>4550</b>	83.4	32.5	256.583	100	0	0
<b>TOTAL</b>	256.583	100				

Nota. Elaboración Propia

**Figura 9**

*Distribución Del Área Según Altitud En La Sub-Cuenca Llauta*



Nota. Elaboración Propia

- a) **Áreas Parciales:** Se observa que, a mayor altitud, especialmente en los rangos de 4200 y 4550 msnm, las áreas parciales son mayores, superando los 80 km<sup>2</sup>. Esto indica que una gran parte del territorio de la sub-cuenca se ubica en zonas de alta altitud.
- b) **Áreas Acumuladas por Debajo:** Esta curva muestra un crecimiento progresivo. A medida que aumenta la altitud, se acumula más superficie debajo de ese nivel. Por ejemplo, a 3850 msnm ya se ha acumulado cerca del 35% del área total.
- c) **Áreas Acumuladas por Encima:** Esta curva decrece, como es lógico, dado que muestra cuánto queda por encima de cada nivel altitudinal. A 4200 msnm solo queda aproximadamente un 32.5% del total de la superficie.

La sub-cuenca Llauta presenta una mayor concentración de superficie en altitudes elevadas (más del 65% del área está por encima de los 3850 msnm).

#### **3.9.4. Tiempo de Concentración**

El cálculo del tiempo de concentración se lleva a cabo empleando tres fórmulas distintas: la fórmula de Témez (recomendada en la normativa), la fórmula de California

y la de Kirpisch. A continuación, se presentan las expresiones matemáticas correspondientes:

$$TÉMEZ: T_c = 0.3 * \left( \frac{L(km)}{J^{0.25}} \right)^{0.76}$$

$$CALIFORNIA: T_c = 0.952 * \left( \frac{L(km)}{H(m)} \right)^{0.385}$$

$$KIRPISCH: T_c = 0.066 * \left( \frac{L(km)}{J^{0.5}} \right)^{0.77}$$

El tiempo de concentración (Tc) representa el tiempo que tarda una gota de agua en recorrer desde el punto más alejado de una cuenca hidrográfica hasta el punto de salida de esta. Este parámetro es clave en el diseño hidráulico, ya que influye en el cálculo de caudales de avenida, en la respuesta de la cuenca ante lluvias intensas y en la modelación de escorrentías.

Para el cálculo del Tc en la Subcuenca Llauta, se emplearon distintas fórmulas empíricas, utilizando los siguientes datos:

- **Longitud del cauce principal:** 3,159 m
- **Altitud máxima (Cota sup.):** 4,550 m
- **Altitud mínima (Cota inf.):** 2,450 m
- **Pendiente media del cauce (S):** 0.07 m/m

Con estos datos, se aplicaron diferentes métodos de estimación y se obtuvieron los siguientes valores de tiempo de concentración (Tc):

**Tabla 9**

*Tiempo de concentración (Tc)*

<b>Método</b>	<b>Tc (horas)</b>
<b>Kirpich (1940)</b>	2.11
<b>Hathaway</b>	1.41
<b>Bransby-Williams</b>	7.59
<b>US Corps of Engineers</b>	6.93
<b>Promedio general</b>	4.51

Nota. Elaboración Propia

El valor promedio del tiempo de concentración para la subcuenca Llauta es 4.51 horas.

### **3.9.5. Forma de la Cuenca**

La forma que presenta una cuenca hidrográfica es un aspecto clave, ya que incide directamente en el tiempo de concentración, entendido como el periodo que toma el agua en recorrer desde los puntos más alejados hasta el punto de salida tras una lluvia. En otras palabras, es el tiempo requerido para que toda el agua generada en la cuenca contribuya al flujo de salida.

Para caracterizar la forma de una cuenca, se utilizan distintos índices que permiten compararla con figuras geométricas conocidas. Entre ellos, el coeficiente de compacidad la asemeja a un círculo, mientras que el factor de forma lo hace con un rectángulo.

#### **3.9.5.1. Factor de Forma (Kf)**

Este parámetro se define como la relación entre el ancho medio y la longitud principal de la cuenca. La longitud principal se mide desde la salida de la cuenca hasta el punto más distante aguas arriba a lo largo del cauce principal. Por su parte, el ancho medio se obtiene dividiendo el área total de la cuenca entre dicha longitud.

La fórmula matemática utilizada es:

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

Donde:

- $K_f$ : Factor de forma (adimensional)
- $A$ : Área total de la cuenca (en km<sup>2</sup>)
- $L$ : Longitud del cauce principal o recorrido máximo (en km)

En el caso de la Sub Cuenca Llauta, el valor determinado para el factor de forma es 0.110, lo cual indica una forma alargada y una menor susceptibilidad a inundaciones repentinas.

### 3.9.5.2. Coeficiente de Compacidad

El coeficiente de compacidad ( $K_c$ ), también denominado índice de Gravelius, es un parámetro adimensional que compara el perímetro real de una cuenca con el perímetro de un círculo que tendría la misma superficie. Esta relación permite describir la forma geométrica de la cuenca y está estrechamente vinculada con el tiempo de concentración del sistema hidrológico.

La fórmula utilizada es la siguiente:

$$K_c = \frac{0.28 \cdot P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

- $K_c$ : Coeficiente de compacidad (adimensional)
- $P$ : Perímetro de la cuenca (en kilómetros)
- $A$ : Área de la cuenca (en kilómetros cuadrados)

Un valor de  $K_c$  cercano a 1 indica que la cuenca tiene una forma casi circular, lo que implica una respuesta hidrológica más rápida y concentrada frente a precipitaciones. Estas cuencas suelen generar crecidas súbitas debido a la simultaneidad en el aporte de escorrentía. En cambio, un  $K_c$  elevado refleja una cuenca más alargada o irregular, lo cual favorece una respuesta más lenta del sistema, ya que el agua necesita más tiempo para concentrarse en la salida. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el comportamiento hidrológico también está influido por otros factores, como el relieve, la vegetación y la densidad de drenaje, que pueden ser incluso más determinantes que la forma geométrica en sí.

En el caso de la Sub Cuenca Llauta, el coeficiente de compacidad calculado es 1.877, lo que indica que su forma se aleja bastante de una figura circular. Por lo tanto,

se espera que tenga una respuesta de escorrentía más atenuada y retardada frente a eventos de lluvia.

### 3.9.5.3. Pendiente del Cauce Principal

La pendiente del cauce principal se refiere al valor promedio de inclinación del canal por donde fluye el agua en su recorrido principal. Esta pendiente es fundamental porque determina la velocidad con la que el agua de lluvia, tras escurrir por la superficie de la microcuenca, llega hasta la desembocadura o punto de salida del sistema. La pendiente influye significativamente en los valores de descarga del río, ya que, a mayor inclinación, mayor será la velocidad del flujo y más pronunciadas serán las crecidas representadas en los hidrogramas. Por lo tanto, cuencas con pendientes más empinadas tienden a responder con mayor rapidez a eventos de precipitación, generando avenidas más intensas.

Para calcular este valor, se utiliza comúnmente el perfil longitudinal del cauce, aplicando la siguiente fórmula:

$$S = \frac{H}{L}$$

Donde:

- $S$ : Pendiente del cauce principal (adimensional, expresada como porcentaje)
- $H$ : Diferencia de altitud entre el punto más alto y el punto más bajo del cauce (en km)
- $L$ : Longitud total del cauce (en km)

En este caso, se determinó que la pendiente del cauce principal de la Sub Cuenca Llauta es 4.34%, lo cual es inferior a la pendiente promedio de toda la cuenca. Este valor indica que, si bien el flujo sigue una trayectoria descendente definida, la inclinación no es tan elevada como para generar escorrentías extremadamente veloces, lo que podría ayudar a atenuar la intensidad de las avenidas.

#### 3.9.5.4. Longitud de Máximo Recorrido

Este parámetro representa la distancia más larga que puede recorrer una partícula de agua desde el punto más alto de la cuenca ubicado sobre la línea divisoria de aguas hasta el punto más bajo del sistema de drenaje, conocido como el punto emisor o salida. Esta trayectoria máxima es un elemento clave en los análisis hidrológicos, ya que se relaciona directamente con el tiempo de concentración de la cuenca. Este tiempo, a su vez, está influenciado por la geometría del terreno, la pendiente del cauce y la cobertura vegetal existente en la zona.

En el caso de la Sub Cuenca Llauta, la longitud de máximo recorrido ha sido estimada en 31.59 kilómetros.

#### 3.9.5.5. Densidad de Drenaje (Dd)

La densidad de drenaje es un indicador clave para evaluar el grado de desarrollo del sistema de drenaje dentro de una microcuenca. Este parámetro permite identificar cómo responde la cuenca frente a las precipitaciones y se calcula a través de la relación entre la longitud total de los cauces (permanentes o temporales) y la superficie total de la cuenca.

La fórmula utilizada es:

$$D_d = \frac{L}{A}$$

Donde:

- $D_d$ : Densidad de drenaje (en km/km<sup>2</sup>)
  - $L$ : Longitud total de la red de drenaje (km)
  - $A$ : Área total de la cuenca (km<sup>2</sup>)
- 
- a) Un valor alto de Dd indica una red de drenaje muy desarrollada, generalmente presente en zonas con suelos impermeables, escasa vegetación y topografía montañosa, lo cual propicia una escorrentía rápida y concentrada.
  - b) Por el contrario, valores bajos de Dd suelen asociarse con suelos altamente permeables, vegetación abundante y relieves suaves, lo que permite una infiltración mayor y una escorrentía más tardía.

En el caso específico de la Sub Cuenca Llauta, se ha determinado una densidad de drenaje de 0.123 km/km<sup>2</sup>, lo que sugiere un sistema de drenaje poco denso.

**Tabla 10**

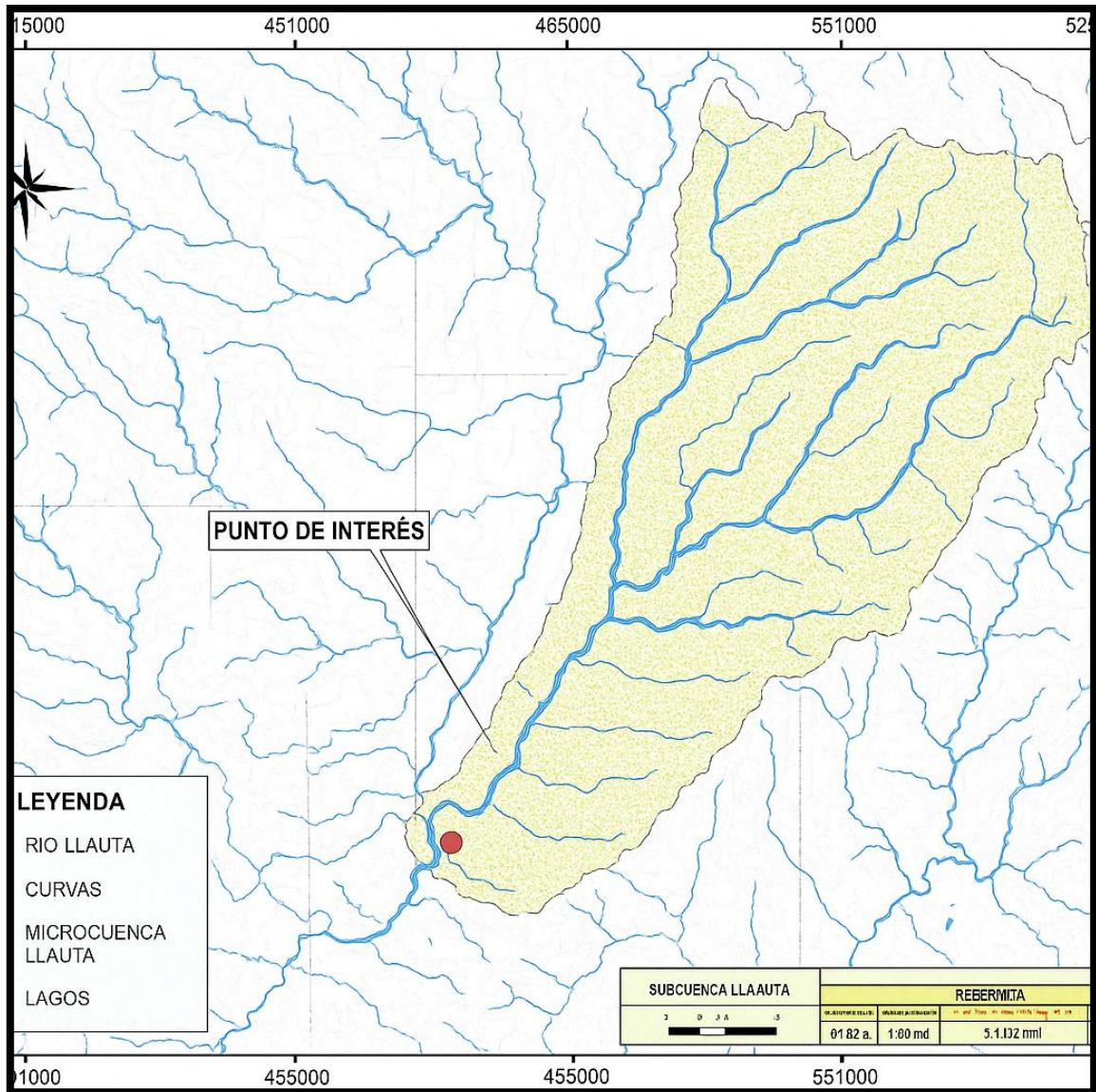
*Parámetros Geomorfológicos – Sub Cuenca Llauta*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Área de la cuenca</b>	256.583 km <sup>2</sup>
<b>Perímetro</b>	106.600 km
<b>Índice de compacidad</b>	1.877
<b>Factor de forma</b>	0.11
<b>Largo del rectángulo equivalente</b>	48.398 km
<b>Ancho del rectángulo equivalente</b>	5.301 km
<b>Índice de pendiente</b>	1.12
<b>Pendiente de la cuenca (Criterios de rectángulos)</b>	4.34%
<b>Pendiente de la cuenca (Criterio de Alvord)</b>	14.92%
<b>Pendiente del cauce principal (media)</b>	6.65%
<b>Pendiente del cauce principal (Criterio de Teylor)</b>	14.38%
<b>Altura media</b>	3500.00 msnm
<b>Elevación media</b>	3500.00 msnm
<b>Altura promedio</b>	3500.00 msnm
<b>Orden de corrientes</b>	3
<b>Densidad de corriente</b>	0.0117 Nc/km <sup>2</sup>
<b>Densidad de drenaje</b>	0.123 km/km <sup>2</sup>
<b>Longitud del río principal</b>	31.59 km
<b>Cota superior</b>	4550 msnm
<b>Cota inferior</b>	2450 msnm

*Nota.* Información tomada del informe técnico realizada por la Municipalidad Distrital de Llauta (2019).

**Figura 10**

*Delimitación de la subcuenca*



*Nota.* Figura tomada del informe técnico realizada por la Municipalidad Distrital de Llauta (2019).

### **3.9.6. Climatología**

El clima de la zona es de tipo templado frío de altura, caracterizado por temperaturas medias anuales entre 8 y 12 °C, con mínimas nocturnas que pueden descender por debajo de 0 °C en los meses de junio a agosto. La precipitación media anual es de 600–900 mm, concentrada en la estación lluviosa entre diciembre y marzo, mientras que la estación seca (abril–noviembre) presenta una marcada escasez de lluvias.

La radiación solar es elevada debido a la altitud, lo que favorece el crecimiento de cultivos andinos de ciclo corto, aunque también incrementa la evapotranspiración potencial. Estos factores climáticos condicionan fuertemente la disponibilidad de agua para riego y justifican la implementación de prácticas de manejo eficiente del recurso.

**a) Matorral Desértico Montano Bajo Subtropical (md-MBS)**

De acuerdo con el diagrama Bioclimático de Holdridge, esta zona presenta una biotemperatura media anual que varía entre 12°C y 17°C. La precipitación anual oscila entre 125 y 250 mm, mientras que la evapotranspiración potencial es de 4 a 8 veces mayor que la precipitación. Esta zona corresponde a una provincia de humedad árida.

**b) Estepa Montano Subtropical (e-MS)**

En esta zona, la biotemperatura media anual se encuentra entre 6°C y 12°C, y el volumen de precipitaciones anuales varía entre 250 y 500 mm. La evapotranspiración potencial es de 1 a 2 veces el valor de la precipitación, lo que la ubica en una provincia de humedad subhúmeda.

**c) Páramo Húmedo Subalpino Subtropical (ph-SaS)**

Esta zona se caracteriza por biotemperaturas anuales entre 3°C y 6°C, con precipitaciones que oscilan entre 250 y 500 mm. La relación entre la evapotranspiración y la precipitación se encuentra entre 0.5 y 1, situándola dentro de una provincia de humedad húmeda.

**d) Páramo Muy Húmedo Subalpino Subtropical (pmh-SaS)**

También con temperaturas medias anuales entre 3°C y 6°C, esta zona presenta mayores precipitaciones, entre 500 y 1000 mm. La evapotranspiración potencial equivale a entre 0.25 y 0.5 veces el valor de la precipitación, lo cual la clasifica en una provincia de humedad perhúmeda.

**e) Tundra Muy Húmeda Alpino Subtropical (tmh-AS)**

En esta última zona de vida, las temperaturas medias anuales son aún más bajas, entre 1.5°C y 3°C, mientras que las precipitaciones anuales varían entre 250 y 500 mm. La evapotranspiración potencial está entre 0.25 y 0.5 veces el valor de la precipitación, lo que también corresponde a una provincia de humedad perhúmeda.

### 3.9.7. Análisis de las variables meteorológicas

La tabla 11 resume las condiciones climáticas promedio mensuales de la Sub Cuenca Llauta a 3500 m de altitud. Los datos incluyen temperaturas mínimas y máximas, humedad relativa, velocidad del viento, horas de insolación diaria, radiación solar y la evapotranspiración potencial mensual (ETo), que representa la demanda hídrica de los cultivos o la pérdida de agua del suelo y vegetación.

**Tabla 11**

*Condiciones Climáticas – Sub Cuenca Llauta (Estación HUAC-HUAS, 3500 m s.n.m)*

Mes	Temp Mín (°C)	Temp Máx (°C)	Humedad (%)	Viento (m/s)	Insolación (h)	Radiación (MJ/m <sup>2</sup> /día)	ETo (mm/mes)
Enero	7.2	16.7	85	2.5	5.4	18.7	98.2
Febrero	7.3	15.7	86	2.5	5.8	19.2	86.6
Marzo	7.4	15.8	87	2.5	5.2	17.3	86.52
Abril	7.3	17.1	83	2.6	6.4	17.4	85.61
Mayo	7	19.1	75	2.7	7.1	16.5	92.23
Junio	7.1	19.3	75	2.7	7.5	15.9	85.61
Julio	6.7	19.2	68	2.9	7.3	16.1	96.59
Agosto	7.1	19.6	69	2.7	6.8	17.1	103.09
Septiembre	7.3	19.8	69	2.8	6.5	18.6	110.49
Octubre	6.7	19.4	71	2.7	6.8	20.3	120.13
Noviembre	7	19.1	73	2.8	7	21.1	118.45
Diciembre	6.8	17.5	80	2.5	6	19.7	107.28
Promedio	7.1	18.2	77	2.6	6.5	18.2	1190.78

*Nota.* Información tomada del informe técnico realizada por la Municipalidad Distrital de Llauta (2019).

- a) **Temperatura:** La media anual oscila entre 7.1 °C (mínima) y 18.2 °C (máxima), mostrando un clima frío típico de zonas altoandinas.
- b) **Humedad relativa:** Promedia 77 %, lo que indica una atmósfera moderadamente húmeda.
- c) **Viento:** Su velocidad media mensual es de 2.6 m/s, estable a lo largo del año.
- d) **Insolación:** Se registran en promedio 6.5 horas de sol diario, con un valor ligeramente mayor en los meses secos (mayo-agosto).
- e) **Radiación solar:** La radiación media es de 18.2 MJ/m<sup>2</sup>/día, clave para procesos de fotosíntesis y cálculo de ETo.

- f) **Evapotranspiración (ET<sub>o</sub>):** El promedio anual acumulado es de 1190.78 mm, siendo más alta en los meses secos y soleados como octubre y noviembre, lo que indica mayor requerimiento hídrico en esos periodos.

### 3.9.8. *Análisis de consistencia de la información pluviométrica e hidrométrica*

Se llevará a cabo un análisis de consistencia de datos correspondientes a las estaciones Córdova, Llauta y Huac-Huac. Estas estaciones serán empleadas como base para verificar la coherencia de la información registrada. Una vez completado este análisis, se procederá a extender y complementar los registros para las demás estaciones involucradas en el estudio.

**Tabla 12**

*Precipitación Anual por Estación – Sub Cuenca Llauta (1965–2010)*

<b>Año</b>	<b>Córdova</b>	<b>Llauta</b>	<b>Huac-Huas</b>	<b>Promedio</b>
1965	111.5	233.7	535	293.4
1966	403.9	229.9	527.6	387.1
1967	1329.1	349.1	759.2	812.5
1968	114.8	28.4	136.1	93.1
1969	123.4	104.6	284.2	170.7
1970	400.4	182.1	434.7	339.1
1971	317.6	90.2	256.2	221.3
1972	532.7	306.8	677	505.5
1973	304.4	161.8	395.3	287.2
1974	412.7	228.2	524.3	388.4
1975	290.2	270.7	606.9	389.3
1976	388.2	291.3	646.9	442.1
1977	604.9	248.4	563.6	472.3
1978	118.4	89.6	255	154.3
1979	353.9	125.3	324.4	267.9
1980	157.6	113.9	302.3	191.3
1981	1034.3	337.1	735.9	702.4
1982	435.6	255.6	577.5	422.9
1983	252.9	290.5	645.3	396.2
1984	961	344.9	889.4	731.8
1985	270.2	441.6	381.1	364.3
1986	646.2	433.3	565.9	548.4
1987	256.4	127.8	209.6	197.9
1988	630.4	240.5	728.9	533.3
1989	271.8	170.5	122.8	188.4
1990	215.8	261.9	348.2	275.3

1991	413.7	39.7	83.8	179.1
1992	528.4	298.9	606.1	477.8
1993	495.9	235.4	597.6	443
1994	412.8	210.9	593.7	405.8
1995	265.2	219.3	301.6	262
1996	497.3	213.9	680.7	464
1997	641.4	344.3	680.7	555.5
1998	692.6	283.7	837.8	604.7
1999	696.6	288.9	1026.5	670.7
2000	669.6	219	955.8	614.8
2001	269.3	127.7	444	280.3
2002	273.9	155.4	576.1	335.1
2003	281.7	143.4	453.5	292.9
2004	538.7	323.3	882.1	581.4
2005	195.4	172.6	260.7	209.6
2006	513.5	390.6	1173	692.4
2007	425.8	311.2	633.2	456.7
2008	413.7	123.9	414.4	317.3
2009	423.3	233.7	530.1	395.7
2010	413.7	123.9	414.4	317.3

*Nota.* Información tomada del informe técnico realizada por la Municipalidad Distrital de Llauta (2019).

Para estimar los valores futuros de precipitación anual en las estaciones Córdova, Llauta y Huac-Huas para el periodo 2011–2024, se empleó un modelo de pronóstico llamado Suavizado Exponencial Holt-Winters (sin componente estacional), por las siguientes razones: El modelo de Holt-Winters de doble suavizado exponencial es una técnica estadística utilizada para series temporales que presentan tendencias, pero sin estacionalidad marcada. Este modelo trabaja ajustando la serie histórica a dos componentes principales:

- **Nivel:** el valor promedio de la serie.
  - **Tendencia:** el cambio sistemático del nivel a lo largo del tiempo.
1. Utilizado el siguiente código se tomó la serie histórica de precipitación anual de cada estación desde 1965 hasta 2010, con 46 datos por estación.
  2. Para cada estación, se ajustó un modelo Holt-Winters:
    - Detecta el comportamiento de los datos pasados.
    - Proyecta los valores futuros manteniendo la tendencia observada.
  3. Se pronosticaron 14 valores anuales adicionales (2011–2024) de forma individual para:

- CORDOVA
- LLAUTA
- HUAC HUAS

4. Finalmente, se calculó el promedio anual entre las tres estaciones y su correspondiente acumulado año tras año.

```
import numpy as np
import pandas as pd
from statsmodels.tsa.holtwinters import ExponentialSmoothing

# Crear DataFrames individuales para cada estación
years = list(range(1965, 2011))
future_years = list(range(2011, 2025))

df_cordova = pd.Series([
    111.5, 403.9, 1329.1, 114.8, 123.4, 400.4, 317.6, 532.7, 304.4,
    412.7, 290.2, 388.2, 604.9, 118.4, 353.9, 157.6,
    1034.3, 435.6, 252.9, 961.0, 270.2, 646.2, 256.4, 630.4, 271.8,
    215.8, 413.7, 528.4, 495.9, 412.8, 265.2, 497.3,
    641.4, 692.6, 696.6, 669.6, 269.3, 273.9, 281.7, 538.7, 195.4,
    513.5, 425.8, 413.7, 423.3, 413.7
], index=years)

df_llauta = pd.Series([
    233.7, 229.9, 349.1, 28.4, 104.6, 182.1, 90.2, 306.8, 161.8,
    228.2, 270.7, 291.3, 248.4, 89.6, 125.3, 113.9,
    337.1, 255.6, 290.5, 344.9, 441.6, 433.3, 127.8, 240.5, 170.5,
    261.9, 39.7, 298.9, 235.4, 210.9, 219.3, 213.9,
    344.3, 283.7, 288.9, 219.0, 127.7, 155.4, 143.4, 323.3, 172.6,
    390.6, 311.2, 123.9, 233.7, 123.9
], index=years)

df_huac = pd.Series([
    535.0, 527.6, 759.2, 136.1, 284.2, 434.7, 256.2, 677.0, 395.3,
    524.3, 606.9, 646.9, 563.6, 255.0, 324.4, 302.3,
    735.9, 577.5, 645.3, 889.4, 381.1, 565.9, 209.6, 728.9, 122.8,
    348.2, 83.8, 606.1, 597.6, 593.7, 301.6, 680.7,
    680.7, 837.8, 1026.5, 955.8, 444.0, 576.1, 453.5, 882.1, 260.7,
    1173.0, 633.2, 414.4, 530.1, 414.4
], index=years)

# Aplicar Exponential Smoothing (Holt-Winters sin estacionalidad)
model_cordova = ExponentialSmoothing(df_cordova, trend='add',
seasonal=None).fit()
model_llauta = ExponentialSmoothing(df_llauta, trend='add',
seasonal=None).fit()
model_huac = ExponentialSmoothing(df_huac, trend='add',
seasonal=None).fit()

# Predecir 2011-2024
pred_cordova = model_cordova.forecast(14).round(1)
pred_llauta = model_llauta.forecast(14).round(1)
```

```

pred_huac = model_huac.forecast(14).round(1)

# Crear DataFrame con resultados
df_result = pd.DataFrame({
    "Año": future_years,
    "CORDOVA (mm)": pred_cordova.values,
    "LLAUTA (mm)": pred_llauta.values,
    "HUAC HUAS (mm)": pred_huac.values
})
df_result["Promedio Anual (mm)"] = df_result[["CORDOVA (mm)",
"LLAUTA (mm)", "HUAC HUAS (mm)"]].mean(axis=1).round(1)
df_result["Acumulado (mm)"] = df_result["Promedio Anual
(mm)"].cumsum().round(1)

# Mostrar la tabla al usuario
import ace_tools as tools;
tools.display_dataframe_to_user(name="Predicción Realista (2011-
2024)", dataframe=df_result)

```

El modelo muestra una evolución moderadamente creciente en los valores predichos, lo que concuerda con los patrones históricos observados (Ver tabla 13).

**Tabla 13**  
*Predicción de Precipitación por Estación (2011–2024)*

<b>Año</b>	<b>CÓRDOVA (mm)</b>	<b>LLAUTA (mm)</b>	<b>HUAC HUAS (mm)</b>	<b>Promedio Anual (mm)</b>	<b>Acumulado (mm)</b>
<b>2011</b>	446.7	226.3	638.7	437.2	437.2
<b>2012</b>	446	226.5	643.5	438.7	875.9
<b>2013</b>	445.4	226.8	648.4	440.2	1316.1
<b>2014</b>	444.7	227	653.3	441.7	1757.8
<b>2015</b>	444.1	227.2	658.1	443.1	2200.9
<b>2016</b>	443.4	227.5	663	444.6	2645.5
<b>2017</b>	442.8	227.7	667.9	446.1	3091.6
<b>2018</b>	442.1	227.9	672.7	447.6	3539.2
<b>2019</b>	441.5	228.1	677.6	449.1	3988.3
<b>2020</b>	440.8	228.4	682.5	450.6	4438.9
<b>2021</b>	440.2	228.6	687.3	452	4890.9
<b>2022</b>	439.5	228.8	692.2	453.5	5344.4
<b>2023</b>	438.9	229.1	697.1	455	5799.4
<b>2024</b>	438.2	229.3	701.9	456.5	6255.9

*Nota.* Elaboración Propia

### 3.9.9. Caudales

Para estimar los caudales en la microcuenca analizada, se utilizó el Modelo de Lutz Scholz. Este modelo permitió generar los valores mensuales de caudal a partir de parámetros hidrológicos representativos de la zona.

**Tabla 14**

*Descargas medias mensuales m<sup>3</sup>/s generadas sub cuenca Llauta (1965 – 2010)*

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1965	3.652	21.973	9.547	3.594	1.319	0.785	0.613	0.569	0.581	0.55	0.562	0.521
1966	4.652	10.557	8.958	2.821	1.133	0.735	0.6	0.566	0.58	2.187	1.005	0.761
1967	1.273	50.635	22.665	11.624	3.354	1.336	0.753	0.606	0.591	0.552	0.562	0.521
1968	0.964	0.942	0.678	0.58	0.555	0.579	0.561	0.556	0.577	0.549	0.562	0.52
1969	0.5	1.314	10.38	3.205	1.22	0.759	0.611	0.569	0.581	0.55	0.562	0.545
1970	25.345	8.544	3.153	1.25	0.724	0.625	0.572	0.559	0.578	0.549	0.562	0.655
1971	0.581	1.121	2.828	2.455	1.03	0.707	0.593	0.564	0.579	0.549	0.562	0.811
1972	12.51	12.62	23.212	6.678	2.1	0.997	0.667	0.583	0.585	0.551	0.562	1.016
1973	3.55	6.087	5.956	2.156	0.954	0.687	0.588	0.563	0.579	0.549	0.562	0.64
1974	4.683	10.566	8.961	3.1	1.204	0.755	0.605	0.699	0.616	0.559	0.564	1.31
1975	1.877	11.312	21.902	6.424	2.447	1.091	0.691	0.59	0.586	0.551	0.562	2.037
1976	12.615	24.058	11.966	3.897	1.395	0.806	0.618	0.571	0.581	0.55	0.562	0.714
1977	0.588	23.656	17.178	5.092	1.698	0.888	0.639	0.576	0.583	0.644	1.086	0.982
1978	2.73	1.442	3.232	1.371	0.755	0.633	0.574	0.559	0.578	0.549	0.562	0.52
1979	0.875	1.07	11.602	3.536	1.304	0.781	0.612	0.569	0.581	0.692	0.6	0.674
1980	3.627	2.079	3.438	1.338	0.747	0.631	0.626	0.573	0.582	0.764	0.62	0.607
1981	4.718	8.624	16.541	5.787	1.874	0.936	0.651	0.896	0.669	0.572	1.284	7.301
1982	7.389	24.632	9.826	3.135	1.202	0.754	0.605	0.567	0.649	1.133	0.816	0.605
1983	4.07	7.018	25.33	8.04	2.445	1.09	0.69	0.586	0.638	0.586	0.586	1.918
1984	18.156	36.47	20.045	5.986	1.925	0.95	0.655	0.584	0.741	2.979	1.768	1.768
1985	0.875	18.865	9.681	3.658	1.423	0.814	0.62	0.571	0.55	0.64	0.64	4.432
1986	13.193	40.975	19.294	5.756	1.963	0.96	0.657	0.838	0.654	0.58	0.904	3.78
1987	5.79	2.931	1.825	0.89	0.633	0.6	0.566	0.557	0.578	0.558	0.564	0.93
1988	4.976	7.628	7.151	2.864	1.213	0.757	0.606	0.567	0.58	0.55	0.562	2.06
1989	2.886	27.615	26.915	7.815	2.388	1.428	0.776	0.612	0.592	0.586	0.572	0.523
1990	5.478	2.002	1.61	0.832	0.67	0.61	0.569	0.558	0.578	0.549	1.634	4.017
1991	23.215	8.902	4.521	2.778	1.796	0.915	0.646	0.578	0.583	0.718	0.607	0.532
1992	0.64	0.799	0.668	0.596	0.56	0.581	0.563	0.558	0.579	0.553	0.569	0.557
1993	4.495	9.559	19.978	7.177	2.227	1.031	0.675	0.586	0.585	0.551	0.61	0.73
1994	3.925	12.914	7.19	3.171	1.211	0.756	0.606	0.567	0.58	0.55	0.562	0.735
1995	5.942	2.542	6.681	2.204	0.966	0.69	0.589	0.566	0.579	0.549	2.115	1.921
1996	2.644	20.73	8.908	2.838	1.127	0.734	0.6	0.566	0.58	0.549	0.562	0.844
1997	4.517	3.207	3.326	1.297	0.736	0.628	0.573	1.415	1.291	0.73	0.614	5.185
1998	56.008	27.722	13.116	4.147	1.459	0.823	0.623	0.572	0.582	0.55	0.562	3.237
1999	2.355	46.706	15.769	5.666	1.844	0.928	0.649	0.579	0.594	0.872	0.649	2.123

<b>2000</b>	10.797	12.433	6.715	2.544	1.061	0.716	0.595	0.565	0.58	0.628	0.583	2.692
<b>2001</b>	7.67	14.901	14.972	4.841	1.635	0.871	0.635	0.575	0.593	0.553	0.618	0.54
<b>2002</b>	1.141	8.964	7.933	3.387	1.299	0.78	0.612	0.569	0.581	0.594	1.047	0.667
<b>2003</b>	1.201	3.72	2.364	1.125	0.693	0.616	0.57	0.558	0.578	0.565	0.566	1.277
<b>2004</b>	0.974	4.943	3.591	1.412	0.765	0.636	1.131	0.705	0.618	0.559	0.575	1.795
<b>2005</b>	2.257	3.174	2.36	1.04	0.671	0.61	0.569	0.558	0.578	0.549	0.562	2.352
<b>2006</b>	4.62	24.622	18.549	5.67	1.845	0.928	0.649	0.579	0.596	0.554	1.098	0.765
<b>2007</b>	0.743	1.005	5.417	1.964	0.93	0.68	0.586	0.562	0.579	0.549	0.584	0.659
<b>2008</b>	22.553	41.648	14.508	4.54	1.558	0.85	0.63	0.601	0.605	0.556	0.567	1.118
<b>2009</b>	7.986	15.516	13.621	4.904	1.65	0.875	0.636	0.602	0.59	0.723	0.886	0.66
<b>2010</b>	1.803	3.152	2.449	1.157	0.709	0.625	0.578	0.57	0.587	0.569	0.599	0.731

*Nota.* Información tomada del informe técnico realizada por la Municipalidad Distrital de Llauta (2019).

Se utilizó como base los datos reales de caudales mensuales del periodo 1965–2010, los cuales fueron transcritos de registros confiables. Estos datos representaron el comportamiento reciente más cercano al periodo de predicción.

Se utilizó una técnica estadística basada en la distribución normal (gaussiana) para generar valores predichos, considerando:

- Media y desviación estándar como parámetros para cada mes.
- Una restricción de valor mínimo de 0.3 m<sup>3</sup>/s, para evitar resultados no realistas como caudales nulos o negativos.

De este modo, se generaron 12 valores mensuales por cada año entre 2011 y 2024.

```
import pandas as pd
import numpy as np

# Datos reales 1965-2010 (usados como base para el modelo)
recent_years = [
    ...
]

columns = ["Año", "Ene", "Feb", "Mar", "Abr", "May", "Jun", "Jul",
           "Ago", "Sep", "Oct", "Nov", "Dic"]
df_recent = pd.DataFrame(recent_years, columns=columns)

# Calcular media y desviación estándar mensual
monthly_means = df_recent[columns[1:]].mean()
monthly_stds = df_recent[columns[1:]].std()

# Generar valores predichos para 2011-2024
np.random.seed(0) # Reproducibilidad
min_value = 0.3 # Valor mínimo aceptado
```

```

predicted_years = list(range(2011, 2025))
predicted_data = []

for year in predicted_years:
    monthly_values = np.random.normal(loc=monthly_means,
scale=monthly_stds)
    monthly_values = np.round(np.clip(monthly_values, min_value,
None), 3)
    predicted_data.append([year] + list(monthly_values))

# Crear DataFrame final
df_predicted = pd.DataFrame(predicted_data, columns=columns)

```

Se obtuvo una tabla con 168 valores predichos (14 años x 12 meses) que reflejan una evolución realista y coherente con el patrón de comportamiento histórico reciente (Ver tabla 15).

**Tabla 15**

*Descargas medias mensuales m3/s generadas sub cuenca Llauta (2011– 2024)*

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2011	13.07	16.206	14.327	3.596	1.577	0.665	0.486	0.618	0.58	0.541	0.613	1.067
2012	2.718	0.3	4.557	0.3	1.469	0.545	0.474	0.59	0.581	0.659	0.433	1.216
2013	4.831	0.3	11.844	2.686	1.537	0.851	1.024	0.647	0.586	0.564	0.946	1.447
2014	9.392	0.3	8.424	1.634	1.307	0.735	0.813	0.602	0.601	0.552	0.508	0.812
2015	4.981	16.999	22.686	2.926	0.727	0.703	0.582	0.609	0.57	0.58	0.744	1.195
2016	0.3	17.915	4.305	6.085	1.677	0.69	0.544	0.534	0.585	0.562	0.632	1.15
2017	8.979	16.623	3.804	0.335	1.815	0.66	0.55	0.565	0.566	0.552	0.607	1.426
2018	9.784	12.213	14.396	3.635	1.168	0.767	0.628	0.571	0.587	0.517	0.77	0.464
2019	10.745	8.983	8.886	3.921	1.477	0.549	0.625	0.627	0.568	0.598	0.3	0.447
2020	5.354	0.3	2.422	0.3	1.949	0.768	0.755	0.578	0.586	0.491	0.648	0.602
2021	10.359	17.002	9.891	4.562	1.667	0.718	0.595	0.602	0.577	0.551	0.687	1.09
2022	8.512	14.643	5.432	2.981	1.423	0.685	0.576	0.564	0.572	0.548	0.579	0.763
2023	3.174	6.829	6.213	1.774	0.988	0.638	0.555	0.546	0.567	0.546	0.562	0.583
2024	7.771	12.902	10.614	3.794	1.558	0.742	0.612	0.589	0.584	0.553	0.598	0.97

Nota. Elaboración Propia

### 3.9.10. Caudal ecológico

Para estimar el caudal ecológico se aplica la metodología propuesta por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), conforme a lo establecido en la Resolución Jefatural N.º 154-2016-ANA. El caudal ecológico referencial se define como aquel valor de caudal con un 95% de persistencia, es decir, el caudal que se mantiene o supera durante el 95% del tiempo en una serie histórica de datos. Este se determina a partir de curvas de

duración de caudales, elaboradas para cada mes utilizando un registro histórico de datos mensuales con al menos 20 años de información.

Para el cálculo del caudal ecológico se aplican los siguientes pasos:

- **Organizar los datos:** Se ordenan los caudales medios mensuales de cada mes en columnas separadas.
- **Asignar un orden (m):** A cada valor se le asigna un número de orden, desde 1 hasta N, siendo N el número total de registros disponibles.
- **Calcular la probabilidad (p):** Para cada dato se calcula el porcentaje de probabilidad mediante la fórmula:

$$p = \frac{m}{N} \times 100$$

- **Ordenar los caudales:** Los valores de caudal se ordenan de mayor a menor en cada columna mensual.
- **Localizar el valor para p = 95%:** Se identifica el valor de caudal correspondiente a ese nivel de persistencia. Si no hay un dato exacto para el 95%, se realiza una interpolación lineal entre los valores más cercanos.

**Tabla 16**

*Caudal ecológico por mes*

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>95%</b>	0.141	0.316	0.348	0.155	0.081	0.065	0.059	0.056	0.058	0.055	0.056	0.064

*Nota.* Información tomada del informe técnico realizada por la Municipalidad Distrital de Llauta (2019).

### **3.9.11. Hidrología del sistema de riego**

El sistema de riego de la cuenca de Mollepunco se abastece principalmente de manantiales y cursos de agua estacionales, con captaciones mediante bocatomas rústicas que derivan el caudal hacia los canales principales.

La infraestructura actual se compone de:

- **Canales de conducción:** En su mayoría de tierra compactada, con tramos menores revestidos en concreto.
- **Reservorios:** Pequeños depósitos comunales para regulación, de capacidad aproximada de X a Y m<sup>3</sup>.
- **Parcelas:** Regadas en su mayoría por riego por gravedad, aunque en algunas zonas los productores han implementado sistemas presurizados por goteo y aspersión, de forma parcial y con recursos propios.

El manejo del riego es comunal, organizado mediante turnos rotativos (conocidos como “roles de agua”), administrados por las juntas de usuarios locales. Las pérdidas por infiltración en los canales y la aplicación desigual en parcelas generan una **eficiencia global estimada en 55 %**, valor adoptado en los cálculos de demanda hídrica.

### 3.9.11.1. Evapotranspiración potencia

A partir de los resultados obtenidos en el informe técnico de la Municipalidad Distrital de Llauta, se determinaron los caudales de diseño correspondientes para las obras de riego planificadas, siendo los siguientes:

- Para el sector de riego Mollepunco, el caudal de diseño a la salida es de 31.94 l/s.
- Para el sector de riego Panchalla, el caudal de diseño a la salida es de 31.62 l/s.
- Para el sector de riego Aylapampa, el caudal de diseño a la salida es de 51.70 l/s.
- Para el sector de riego Ayahuili, el caudal de diseño a la salida es de 14.54 l/s.

Para determinar la evapotranspiración potencial se aplicó el método de Penman-Monteith, utilizando como base los registros de radiación solar, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento proporcionados por la estación Huac Huas, ubicada cerca del área de las zonas de riego.

**Tabla 17**

*Datos Climáticos – Áreas de Riego (Estación Huac-Huas)*

Mes	Temp Mín (°C)	Temp Máx (°C)	Humedad (%)	Viento (m/s)	Insolación (horas)	Radiación (MJ/m <sup>2</sup> /día)	ETo (mm/mes)
<b>Enero</b>	7.2	16.7	85	2.5	5.4	18.7	92.76
<b>Febrero</b>	7.3	15.7	86	2.5	5.8	19.2	81.46
<b>Marzo</b>	7.4	15.8	87	2.5	5.2	17.3	81.45
<b>Abril</b>	7.3	17.1	83	2.6	6.4	17.4	81.31
<b>Mayo</b>	7	19.1	75	2.7	7.1	16.5	93.22
<b>Junio</b>	7.1	19.3	75	2.7	7.5	15.9	82.91
<b>Julio</b>	6.7	19.2	68	2.9	7.3	16.1	94.42
<b>Agosto</b>	7.1	19.6	69	2.7	6.8	17.1	100.28
<b>Septiembre</b>	7.3	19.8	69	2.8	6.5	18.6	107.25
<b>Octubre</b>	6.7	19.4	71	2.7	6.8	20.3	115.84
<b>Noviembre</b>	7	19.1	73	2.8	7	21.1	113.83
<b>Diciembre</b>	6.8	17.5	80	2.5	6	19.7	102.03

<b>Promedio</b>	7.1	18.2	77	2.6	6.5	18.2	1142.77
-----------------	-----	------	----	-----	-----	------	---------

*Nota.* Información tomada del informe técnico realizada por la Municipalidad Distrital de Llauta (2019).

Esta tabla se presenta los valores promedio mensuales de las principales variables meteorológicas registradas en la estación Huac-Huas, la cual se encuentra en condiciones geográficas similares a las áreas de riego del proyecto.

Los datos incluyen:

- **Temperatura mínima y máxima (°C):** claves para el desarrollo de cultivos y el cálculo de evapotranspiración.
- **Humedad relativa (%):** influye directamente en el requerimiento hídrico de las plantas.
- **Velocidad del viento (m/s):** afecta la tasa de evapotranspiración al facilitar la pérdida de agua.
- **Insolación (horas/día) y Radiación solar (MJ/m<sup>2</sup>/día):** determinan la cantidad de energía disponible para el proceso de evapotranspiración.
- **Evapotranspiración potencial (ET<sub>o</sub> en mm/mes):** calculada mediante el método de Penman-Monteith, el cual representa la demanda hídrica del ambiente en condiciones estándar.

### 3.9.11.2. Precipitación al 75% de persistencia

Uno de los indicadores más relevantes es la precipitación al 75% de persistencia, que representa el valor de precipitación que se iguala o supera en el 75% del tiempo. Es decir, es un valor confiable que refleja una ocurrencia frecuente, y por ello es útil para la planificación hídrica y agrícola.

Los resultados de la precipitación mensual al 75% de probabilidad se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 18**

*Precipitación Total Mensual al 75% de Persistencia (mm)*

<b>Sector de Riego</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>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
<b>Mollepunco</b>	11.5	12.4	21.7	0.3	0	0	0	0	0	0	0	1.6
<b>Panchalla</b>	11.5	12.4	21.7	0.3	0	0	0	0	0	0	0	1.6
<b>Aylapampa</b>	11.5	12.4	21.7	0.3	0	0	0	0	0	0	0	1.6
<b>Ayahulli</b>	11.5	12.4	21.7	0.3	0	0	0	0	0	0	0	1.6

*Nota.* Información tomada del informe técnico realizada por la Municipalidad Distrital de Llauta (2019).

### **3.9.11.3. Precipitación Efectiva**

La precipitación efectiva representa la fracción de la lluvia total que realmente está disponible para ser aprovechada por los cultivos, después de descontar las pérdidas por escorrentía, evaporación e infiltración profunda. En este estudio, se utilizó un enfoque empírico propuesto por el USDA Soil Conservation Service, que permite estimar de forma aproximada esta fracción efectiva, considerando el comportamiento de la lluvia en función de su magnitud mensual.

**Tabla 19**

*Precipitación Efectiva Mensual (mm)*

<b>Sector de Riego</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>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
<b>Sectores de Riego</b>	34.4	57.4	31.7	8.9	0	0	0	0	0.8	0.1	1.3	18.1

*Nota.* Información tomada del informe técnico realizada por la Municipalidad Distrital de Llauta (2019).

- La mayor precipitación efectiva ocurre entre enero y marzo, coincidiendo con el periodo de lluvias intensas.
- Entre mayo y agosto, los valores son prácticamente nulos, evidenciando la necesidad de riego suplementario.

### 3.9.12. Demanda de agua

Para el cálculo de la demanda de agua en el sector Mollepunco, se adoptó una eficiencia de riego del 55%, valor que representa la eficiencia global del sistema y no únicamente la eficiencia teórica del riego por goteo. De acuerdo con la FAO (Irrigation and Drainage Paper 56) y el Manual de Riego del MIDAGRI (2018), la eficiencia global del riego considera la relación entre el volumen de agua efectivamente utilizado por el cultivo y el volumen total captado en la fuente, e incluye las pérdidas en todas las etapas del sistema:

$$E_{Global} = E_{conducción} \times E_{distribución} \times E_{aplicación} \times U$$

donde:

- $E_{conducción}$  corresponde a la eficiencia en canales principales o tuberías de conducción,
- $E_{distribución}$  a la eficiencia en canales secundarios o redes de distribución,
- $E_{aplicación}$  a la eficiencia en la parcela, y
- $U$  es la uniformidad en la aplicación, indicador de qué tan homogéneo es el riego en toda la superficie cultivada.

Se consideró la eficiencia global del sistema de riego, que incluye tanto la eficiencia de conducción como la de aplicación. En la zona de estudio, si bien algunos productores han implementado sistemas de riego tecnificado por goteo en ciertas parcelas, la mayor parte del riego aún se realiza mediante canales no revestidos y prácticas tradicionales, lo que genera pérdidas considerables.

En condiciones óptimas, el riego por goteo puede alcanzar eficiencias de 90-95% únicamente en la etapa de aplicación, siempre que exista un diseño hidráulico profesional, mantenimiento constante y operación adecuada. Sin embargo, en el proyecto se identificaron deficiencias técnicas y operativas en la captación, conducción y distribución, tales como canales sin revestimiento, tuberías con fugas, variabilidad de presiones y manejo manual de compuertas. Estas condiciones reducen la eficiencia de conducción y distribución a 65-75%, lo que al combinarse con la eficiencia de aplicación explica por qué la eficiencia global real del sistema se sitúa en torno al 50-60%.

- El 45% restante del agua se pierde principalmente por:
- Evaporación en reservorios y canales abiertos, agravada en épocas de alta temperatura.
- Infiltración excesiva en tramos de conducción y distribución con suelos de alta permeabilidad.

- Fugas en tuberías y conexiones instaladas con materiales de distinta antigüedad y calidad.
- Desuniformidad en la aplicación, donde la variación de presiones en goteros y la falta de mantenimiento provocan diferencias en la lámina de riego aplicada.

Por ello, el valor del 55% es un reflejo directo de la condición real del sistema, sustentado en observaciones de campo y literatura técnica. Su adopción permite calcular la demanda mensual de agua para los cultivos de los sectores Mollepunco, Panchalla y Aylapampa, considerando una superficie total de 18 hectáreas, la precipitación efectiva y la variabilidad climática local. Además, este enfoque orienta la planificación de mejoras para aumentar progresivamente la eficiencia y uniformidad del riego en fases posteriores del proyecto.

Con esta eficiencia global (55%), se calculó la demanda mensual de agua de los cultivos en los sectores Mollepunco, Panchalla y Aylapampa, considerando una superficie de riego de 18 hectáreas, las condiciones climáticas locales y la precipitación efectiva. Este cálculo permite estimar con mayor precisión el volumen requerido para cubrir las necesidades hídricas de los cultivos durante todo el año agrícola.

**Tabla 20**

*Demanda de Agua Mensual del Cultivo (Sector Mollepunco)*

Mes	Días	ETP (mm/mes)	Kc Promedio	ETA (mm)	Área (ha)	Precip. Efectiva (mm)	Demanda Neta de Agua (mm/ha/mes)	Horas de Riego	Eficiencia (%)	Módulo de Riego (L/s/ha)	Demanda Agua (m³)	Demanda Agua (L/s)
<b>Enero</b>	31	92.76	0.9	83.48	18	6.19	77.3	10	55%	1.26	25,297.55	22.67
<b>Febrero</b>	28	81.46	0.9	73.31	18	7.03	66.28	10	55%	1.2	21,691.57	21.52
<b>Marzo</b>	31	81.45	0.9	73.31	18	15.85	57.45	10	55%	0.94	18,802.15	16.85
<b>Abril</b>	30	81.31	0.9	73.18	18	0.31	72.87	10	55%	1.23	23,846.74	22.08
<b>Mayo</b>	31	89.22	0.9	80.3	18	0	80.3	10	55%	1.31	26,279.35	23.55
<b>Junio</b>	30	82.91	0.9	74.62	18	0	74.62	10	55%	1.26	24,420.76	22.61
<b>Julio</b>	31	94.42	0.9	84.98	18	0	84.98	10	55%	1.38	27,810.98	24.92
<b>Agosto</b>	31	100.28	0.9	90.25	18	0	90.25	10	55%	1.47	29,537.02	26.47
<b>Septiembre</b>	30	107.25	0.9	96.53	18	0	96.53	10	55%	1.63	31,590.00	25.99
<b>Octubre</b>	31	115.84	0.7	81.09	18	0	81.09	10	55%	1.32	26,537.89	23.78
<b>Noviembre</b>	30	113.83	0.7	79.68	18	0	79.68	10	55%	1.34	26,077.42	24.15
<b>Diciembre</b>	31	102.03	0.7	71.42	18	1.49	69.93	10	55%	1.14	22,887.00	20.51
<b>TOTAL</b>											304,778.43	29.25

*Nota.* Información tomada del informe técnico realizada por la Municipalidad Distrital de Llauta (2019).

**Tabla 21**

*Demanda de Agua del Cultivo: Sector Aylapampa*

Mes	Días	ETP (mm/mes)	Kc Promedio	ETA (mm)	Área (ha)	Precip. Efectiva (mm)	Demanda Neta de Agua (mm/ha/mes)	Horas de Riego	Eficiencia (%)	Módulo de Riego (L/s/ha)	Demanda Agua (m <sup>3</sup> )	Demanda Agua (L/s)
<b>Enero</b>	31	92.76	0.9	83.48	25	6.19	77.3	10	55%	1.26	35,135.49	31.48
<b>Febrero</b>	28	81.46	0.9	73.31	25	7.03	66.28	10	55%	1.2	30,127.19	29.89
<b>Marzo</b>	31	81.45	0.9	73.31	25	15.85	57.45	10	55%	0.94	26,114.10	23.4
<b>Abril</b>	30	81.31	0.9	73.18	25	0.31	72.87	10	55%	1.23	33,120.47	30.67
<b>Mayo</b>	31	89.22	0.9	80.3	25	0	80.3	10	55%	1.31	36,499.09	32.71
<b>Junio</b>	30	82.91	0.9	74.62	25	0	74.62	10	55%	1.26	33,917.73	31.41
<b>Julio</b>	31	94.42	0.9	84.98	25	0	84.98	10	55%	1.38	38,626.36	34.61
<b>Agosto</b>	31	100.28	0.9	90.25	25	0	90.25	10	55%	1.47	41,023.64	36.76
<b>Septiembre</b>	30	107.25	0.9	96.53	25	0	96.53	10	55%	1.63	43,875.00	40.63
<b>Octubre</b>	31	115.84	0.7	81.09	25	0	81.09	10	55%	1.32	36,858.18	33.03
<b>Noviembre</b>	30	113.83	0.7	79.68	25	0	79.68	10	55%	1.34	36,218.64	33.54
<b>Diciembre</b>	31	102.03	0.7	71.42	25	1.49	69.93	10	55%	1.14	31,787.49	28.48
<b>TOTAL</b>											423,303.38	40.63

*Nota.* Información tomada del informe técnico realizada por la Municipalidad Distrital de Llauta (2019).

**Tabla 22**

*Demanda de Agua del Cultivo: Sector Ayahuíli*

Mes	Días	ETP (mm/mes)	Kc Promedio	ETA (mm)	Área (ha)	Precip. Efectiva (mm)	Demanda Neta de Agua (mm/ha/mes)	Horas de Riego	Eficiencia (%)	Módulo de Riego (L/s/ha)	Demanda Agua (m³)	Demanda Agua (L/s)
<b>Enero</b>	31	92.76	0.9	83.48	9	6.19	77.3	10	55%	1.26	12,648.78	11.33
<b>Febrero</b>	28	81.46	0.9	73.31	9	7.03	66.28	10	55%	1.2	10,845.79	10.76
<b>Marzo</b>	31	81.45	0.9	73.31	9	15.85	57.45	10	55%	0.94	9,401.08	8.42
<b>Abril</b>	30	81.31	0.9	73.18	9	0.31	72.87	10	55%	1.23	11,923.37	11.04
<b>Mayo</b>	31	89.22	0.9	80.3	9	0	80.3	10	55%	1.31	13,139.67	11.77
<b>Junio</b>	30	82.91	0.9	74.62	9	0	74.62	10	55%	1.26	12,210.38	11.31
<b>Julio</b>	31	94.42	0.9	84.98	9	0	84.98	10	55%	1.38	13,905.49	12.46
<b>Agosto</b>	31	100.28	0.9	90.25	9	0	90.25	10	55%	1.47	14,768.51	13.23
<b>Septiembre</b>	30	107.25	0.9	96.53	9	0	96.53	10	55%	1.63	15,795.00	14.63
<b>Octubre</b>	31	115.84	0.7	81.09	9	0	81.09	10	55%	1.32	13,268.95	11.89
<b>Noviembre</b>	30	113.83	0.7	79.68	9	0	79.68	10	55%	1.34	13,038.71	12.07
<b>Diciembre</b>	31	102.03	0.7	71.42	9	1.49	69.93	10	55%	1.14	11,443.50	10.25
<b>TOTAL</b>											152,389.22	14.63

*Nota.* Información tomada del informe técnico realizada por la Municipalidad Distrital de Llauta (2019).

### **Sector Mollepunco**

- La mayor demanda hídrica se concentra entre julio y septiembre, coincidiendo con la etapa de mayor evapotranspiración y escasa precipitación efectiva.
- El área de riego es de 18 ha, con una eficiencia global del 55 %.
- El sistema debe estar diseñado para un caudal de 29.25 L/s, con un volumen anual de 304,778.43 m<sup>3</sup>.
- Se requiere un volumen de reserva de 1,053 m<sup>3</sup> para cubrir déficits temporales.

### **Sector Aylapampa**

- La mayor demanda ocurre en septiembre (40.63 L/s) y la menor en marzo (23.40 L/s), reflejando la influencia de la evapotranspiración y la precipitación efectiva.
- El caudal de diseño del sistema es de 40.63 L/s, El volumen de reserva estimado es de 1,462.50 m<sup>3</sup>.

### **Sector Ayahuíli**

- La demanda total de agua para el sector de Ayahuíli durante el año es de 152,389.22 m<sup>3</sup>.
- Se requiere un caudal de diseño de 14.63 L/s, con un volumen de reserva estimado de 526.5 m<sup>3</sup>/s.
- El mes con mayor requerimiento hídrico es septiembre (14.63 L/s) y el menor es marzo (8.42 L/s).

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Modelo Hidrológico

El presente apartado desarrolla la construcción y aplicación de un modelo hidrológico orientado a la estimación, análisis y proyección de caudales extremos en la subcuenca Llauta, considerando la información hidrometeorológica disponible y el contexto climático del área de estudio. El modelo tiene como base la distribución de Gumbel, ampliamente utilizada en hidrología para representar eventos máximos, y ha sido calibrado utilizando datos históricos de caudales anuales registrados entre los años 2011 y 2024 (Ver Anexos N°2, N°3 y N°4).

Para fortalecer la precisión del modelo y permitir proyecciones más realistas, se han incorporado además variables climáticas se han incorporado además variables climáticas provenientes de la estación Huac-Huas (temperatura, humedad, radiación solar y evapotranspiración potencial – ETo), junto con datos de demanda de agua de los sectores de riego Mollepunco, Aylapampa y Ayahuíli. De este modo, el modelo integra tanto la dinámica climática como las condiciones reales de demanda hídrica en las tres zonas de estudio. Estas variables han sido consideradas en la formulación de diversos escenarios de cambio climático, los cuales permiten evaluar la persistencia y frecuencia futura de eventos hidrológicos extremos durante el periodo 2025–2029. El enfoque metodológico integra simulación Monte Carlo, análisis de probabilidades de excedencia y ajuste de parámetros estadísticos bajo condiciones cambiantes, lo que permite anticipar riesgos hidrológicos ante posibles variaciones en el comportamiento del clima y la demanda hídrica. De este modo, el modelo hidrológico desarrollado no solo busca representar los patrones históricos del régimen de caudales, sino también anticipar comportamientos futuros y sustentar decisiones estratégicas en la gestión del recurso hídrico.

#### 4.1.1. Magnitud de caudales máximos

En esta sección se determina la magnitud de los caudales máximos anuales mediante la aplicación de modelos estadísticos de frecuencia, con el objetivo de estimar el comportamiento de eventos hidrológicos extremos en la subcuenca Llauta. Se utiliza la distribución de Gumbel como herramienta principal para el ajuste de los datos históricos, permitiendo calcular caudales asociados a distintos periodos de retorno. Este análisis resulta fundamental para el dimensionamiento de infraestructuras hidráulicas,

la planificación del riego y la prevención de riesgos ante posibles inundaciones o excesos de escorrentía.

Además, permite contrastar los caudales extremos proyectados con la demanda de riego de cada sector. Considerando una eficiencia global del 55 %, el requerimiento máximo de los sistemas (29.25 L/s en Mollepunco, 40.63 L/s en Aylapampa y 14.63 L/s en Ayahuíli) es ampliamente cubierto por los caudales proyectados, lo que sugiere seguridad hídrica en condiciones normales. No obstante, eventos de alta magnitud podrían superar la capacidad de conducción si no se mejora la eficiencia del sistema.

La Figura 10 presenta los resultados del modelo hidrológico desarrollado para la Subcuenca Llauta, mostrando la estimación de caudales máximos en función de distintos periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50 y 100 años). Para ello, se utilizaron tres distribuciones de probabilidad comúnmente aplicadas en hidrología: Gumbel, Log-Pearson III y Log-Normal. Los valores predichos reflejan el comportamiento esperado de caudales extremos, los cuales tienden a incrementarse conforme aumenta el periodo de retorno. Esto indica que eventos más intensos, aunque menos frecuentes, representarían mayores volúmenes de escorrentía.

### Figura 8

#### *Predicción de caudales Máximos (m<sup>3</sup>/s)*

```
>> modelo_hidrologico2025_2029
--- Parámetros Físicos de la Cuenca ---
Área de la Cuenca: 256.58 km2
Pendiente Media del Cauce: 4.34 %
Tiempo de Concentración Promedio: 4.51 horas
Densidad de Drenaje: 0.123 km/km2
Coeficiente de Compacidad: 1.877
```

#### Predicción de Caudales Máximos (m<sup>3</sup>/s)

Periodo Retorno	Gumbel	Log-Pearson III	Log-Normal
2	2.79	2.78	2.78
5	3.60	2.87	3.79
10	4.13	2.93	4.46
25	4.81	3.02	5.31
50	5.31	3.08	5.94
100	5.81	3.15	6.57

>>

*Nota.* Elaboración Propia

Se observa que la distribución Log-Normal genera los valores más elevados en todos los escenarios, mientras que Gumbel y Log-Pearson III presentan estimaciones ligeramente más conservadoras. La predicción de caudales máximos presentada en la Figura 10 puede considerarse favorable desde el punto de vista de seguridad y dimensionamiento del Sistema de Riego Mollepunco, pero también representa ciertos retos técnicos que deben evaluarse cuidadosamente.

- Para un periodo de retorno de 100 años, los caudales máximos proyectados varían entre 5.81 m<sup>3</sup>/s (Gumbel) y 6.57 m<sup>3</sup>/s (Log-Normal). Estos valores no son extremadamente elevados, lo que sugiere que el sistema de captación y conducción de agua, si es bien diseñado, podrá operar de forma segura y eficiente sin riesgo inmediato de desbordamientos o daños estructurales.
- Las diferencias entre las distribuciones son consistentes, lo que sugiere estabilidad en el modelo aplicado. Esto refuerza la confianza en los resultados obtenidos y permite planificar escenarios de diseño con base científica y técnica.
- La distribución Log-Normal predice los valores más altos, lo que puede representar un riesgo de sobrecarga del sistema si no se toma como base de diseño. Si se ignoran estos valores extremos, ante eventos muy poco frecuentes pero intensos (como los de 100 años), se podría comprometer el funcionamiento del sistema de riego y provocar afectaciones a las zonas de cultivo.
- Considerando que el caudal ecológico base en la cuenca es de aproximadamente 1.242 m<sup>3</sup>/s (según el modelo de Lutz Scholz), un evento con caudales de 6 m<sup>3</sup>/s o más podría generar un impacto significativo en estructuras de captación y canales no reforzados, especialmente durante la época de lluvias.

La Figura 11 representa la evolución de los caudales medios anuales en la Subcuenca Llauta desde el año 2011 hasta 2028, incluyendo tanto datos históricos (2011–2024) como predicciones generadas mediante un modelo de regresión lineal para el periodo 2025–2028.

La figura muestra fluctuaciones significativas de un año a otro. Por ejemplo:

- En 2011, el caudal medio alcanzó los 4.45 m<sup>3</sup>/s, mientras que al siguiente año (2012) disminuyó drásticamente a 1.15 m<sup>3</sup>/s.

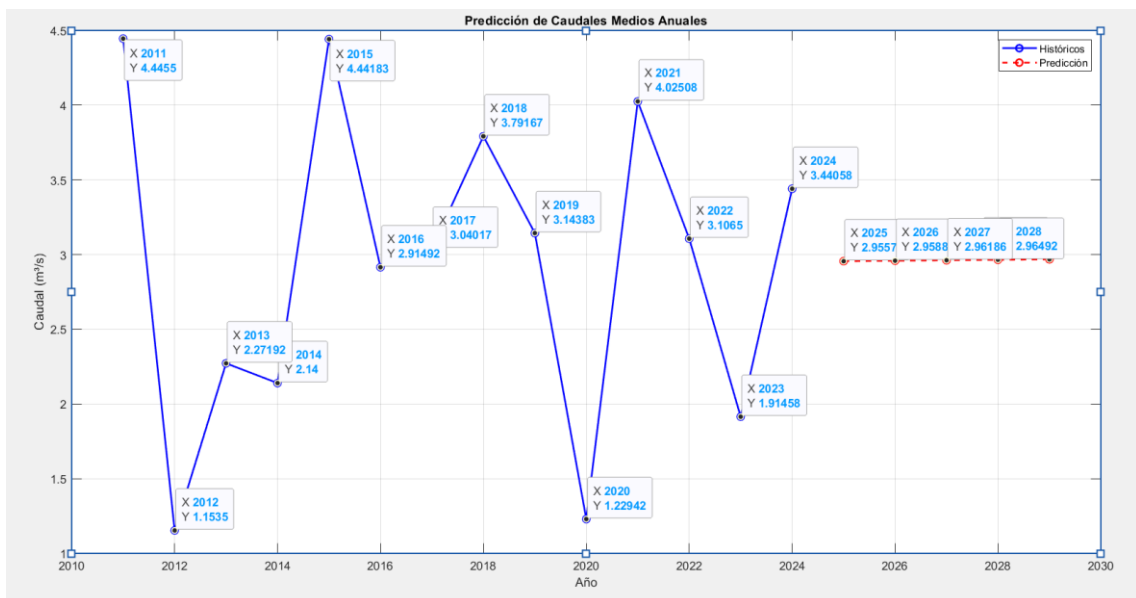
- Eventos similares se repiten entre 2015–2016 y 2020–2021, lo que refleja una fuerte influencia de las condiciones climáticas sobre el régimen hidrológico.

Por otro lado:

- Se identifican años de mayor disponibilidad hídrica como 2015 (4.44 m<sup>3</sup>/s) y 2021 (4.03 m<sup>3</sup>/s), probablemente asociados a precipitaciones intensas o concentradas.
- Años como 2020 (1.22 m<sup>3</sup>/s) y 2012 (1.15 m<sup>3</sup>/s) evidencian periodos de estrés hídrico.

**Figura 9**

*Predicción de Caudales Medios Anuales*



*Nota.* Elaboración Propia

La línea roja discontinua que representa la predicción muestra una tendencia relativamente estable, con caudales proyectados entre 2.95 y 2.96 m<sup>3</sup>/s. Esta estimación sugiere que, bajo condiciones climáticas y de uso del suelo similares a las actuales, no se esperan alteraciones drásticas en la magnitud de los caudales promedio en los próximos cinco años.

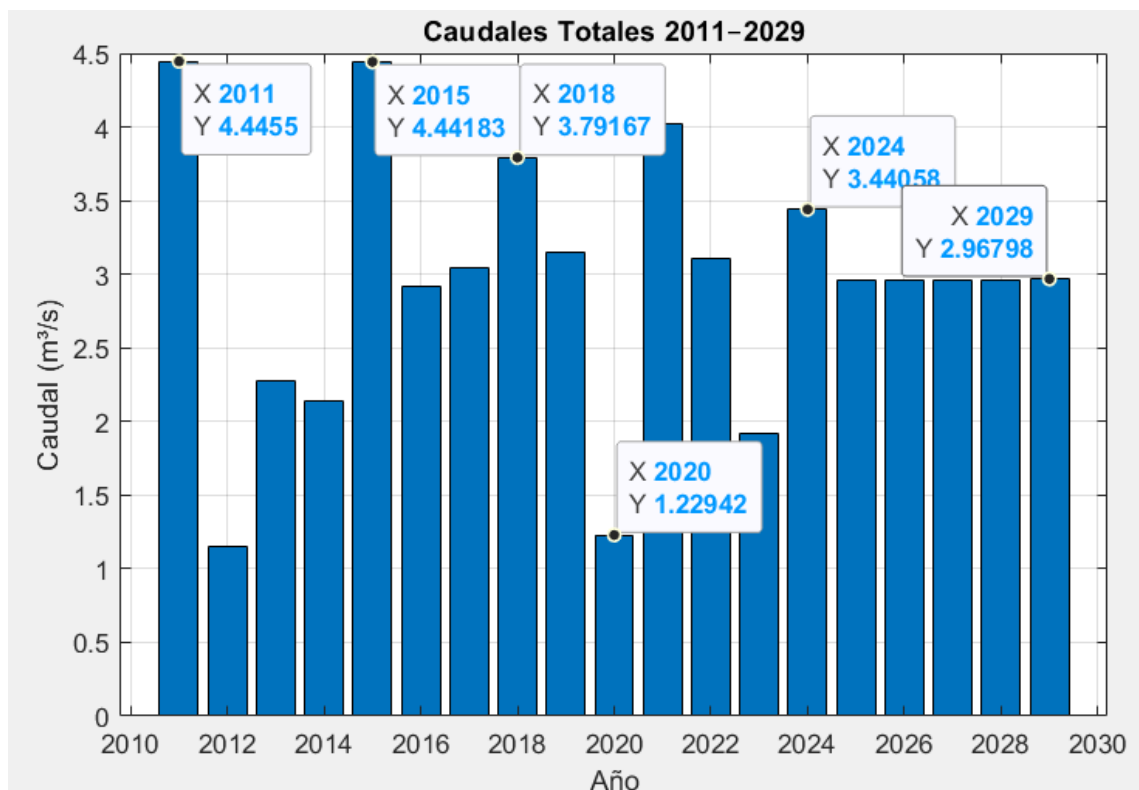
La Figura 12 muestra la evolución de los caudales totales medios anuales generados en la Subcuenca Llauta durante el periodo 2011–2029. Se incluyen tanto los

valores observados (2011–2024) como los caudales proyectados hasta el año 2029, en función de la modelación hidrológica desarrollada en este estudio.

- Se identifican picos importantes en los años 2011 (4.45 m<sup>3</sup>/s), 2015 (4.44 m<sup>3</sup>/s) y 2018 (3.79 m<sup>3</sup>/s). Estos valores indican años con mayor disponibilidad de agua, posiblemente asociados a precipitaciones concentradas o eventos climáticos intensos como El Niño.
- El valor más bajo se presenta en 2020 (1.22 m<sup>3</sup>/s), un año que representa un posible evento de sequía o baja recarga hídrica en la microcuenca. Este tipo de caída en los caudales puede comprometer la disponibilidad para el riego, especialmente en sistemas dependientes de caudales superficiales.

**Figura 10**

*Caudales Totales 2011-2029 (m<sup>3</sup>/s)*



*Nota.* Elaboración Propia

Al comparar estos valores con la demanda de agua del sistema de riego Mollepunco, que requiere aproximadamente 0.03 m<sup>3</sup>/s, se concluye que los caudales proyectados son suficientes para satisfacer dicha demanda, incluso en años con menor disponibilidad relativa.

La curva de excedencia mostrada en la Figura 13 representa gráficamente la probabilidad de que un caudal determinado en la subcuenca Llauta sea igualado o superado durante un año cualquiera. Es una herramienta clave en el análisis de frecuencias en hidrología, usada para evaluar el comportamiento extremo del caudal a lo largo del tiempo y estimar eventos de riesgo como inundaciones o déficits hídricos.

- El eje horizontal indica el periodo de retorno (años), es decir, el intervalo esperado entre eventos de caudales iguales o superiores.
- El eje vertical muestra los valores de caudales ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) asociados a dichos periodos de retorno.

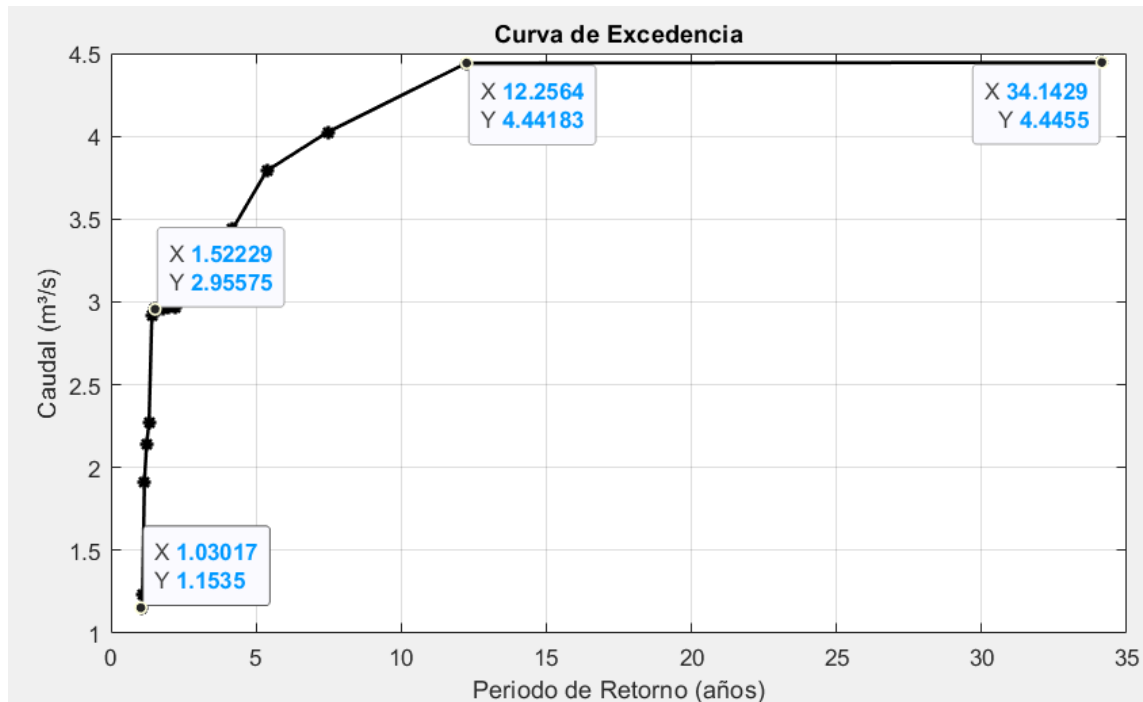
Se observa que:

- Para un periodo de retorno de 1.03 años, el caudal excedente es de  $1.15 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Para un TR de 1.52 años, el caudal aumenta a  $2.96 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- A partir de un TR de 12.25 años, el caudal alcanza los  $4.44 \text{ m}^3/\text{s}$ , y se mantiene constante hasta el valor máximo observado.

Estos puntos revelan la frecuencia de ocurrencia de diferentes magnitudes de caudales: los caudales menores ocurren con alta frecuencia, mientras que los caudales extremos se presentan con baja probabilidad, pero tienen un impacto significativo en la gestión de recursos hídricos.

**Figura 11**

*Curva de Excedencia*



*Nota.* Elaboración Propia

Para el sistema de riego de Mollepunco, esta curva permite:

- **Evaluar la seguridad hídrica:** Ver si el caudal excedente en años comunes supera la demanda del sistema (que es de aproximadamente 0.03 m³/s).
- **Planificar eventos críticos:** Prepararse para eventos extremos (TR ≥ 10 años), especialmente en infraestructura hidráulica como canales, bocatomas y reservorios.
- **Establecer límites operativos:** Determinar los umbrales de caudales a los que se debe activar mecanismos de protección o almacenamiento.

La Figura 14 presenta la comparación entre tres distribuciones estadísticas comúnmente utilizadas en hidrología para estimar caudales máximos esperados asociados a distintos periodos de retorno (TR).

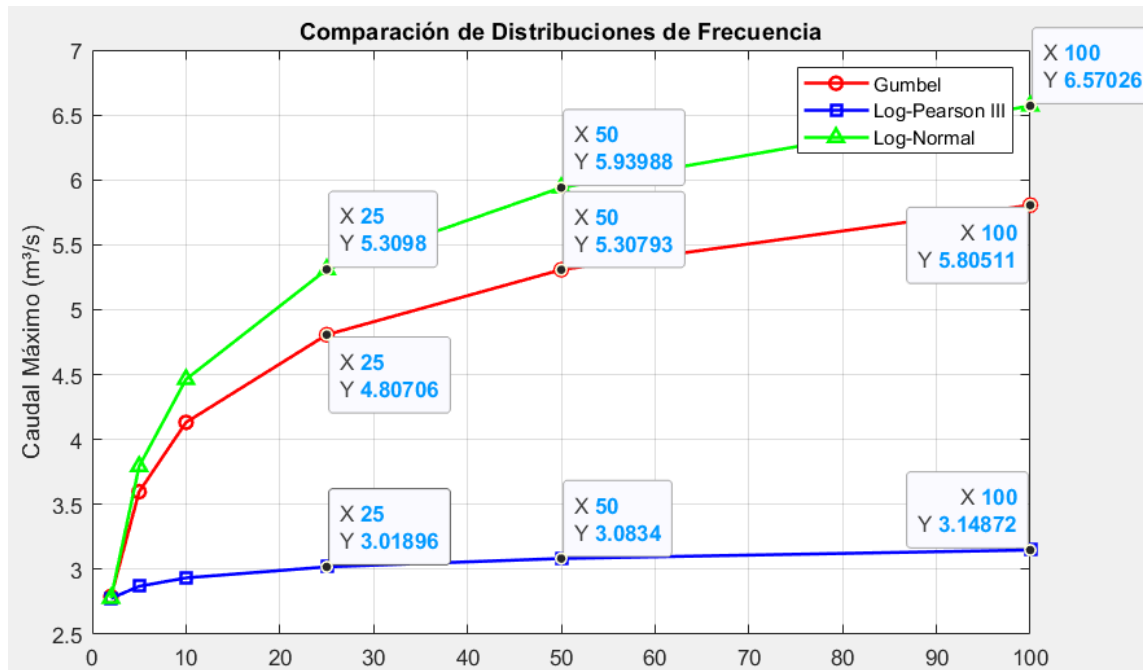
- **Distribución Gumbel (línea roja):**
  - ❖ Representa valores intermedios.

- ❖ Se usa para analizar eventos extremos, especialmente caudales máximos.
  - ❖ En un TR de 100 años predice un caudal de 5.81 m<sup>3</sup>/s.
- **Distribución Log-Pearson III (línea azul):**
    - ❖ Predice los caudales más conservadores.
    - ❖ Ideal para situaciones donde se desea minimizar el riesgo por sobreestimación.
    - ❖ En TR = 100 años estima solo 3.15 m<sup>3</sup>/s, el valor más bajo de los tres métodos.
- **Distribución Log-Normal (línea verde):**
    - ❖ Muestra los valores más altos para todos los TR, con 6.57 m<sup>3</sup>/s en TR de 100 años.
    - ❖ Esto la convierte en una opción más precatoria, útil en obras donde la seguridad es prioritaria.

Cada punto en las curvas muestra los caudales correspondientes a TR = 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

**Figura 12**

*Comparación de Distribuciones de Frecuencia*



Nota. Elaboración Propia

#### **4.1.2. Frecuencia de eventos extremos**

En esta sección se analiza la frecuencia con la que pueden ocurrir eventos hidrológicos extremos en la subcuenca Llauta, tales como caudales máximos que podrían afectar la infraestructura del sistema de riego. Para ello, se aplican modelos de distribución estadística (Gumbel, Log-Pearson III y Log-Normal) sobre los registros históricos de caudales, permitiendo estimar los caudales asociados a diferentes periodos de retorno.

La figura 15 muestra la probabilidad anual de ocurrencia de eventos hidrológicos extremos en la subcuenca Llauta para el periodo 2025 - 2029, utilizando como umbral el percentil 90 (P90), equivalente a un caudal de 4.44 m³/s. Este valor representa el nivel a partir del cual un evento se considera extremo dentro del comportamiento hidrológico registrado.

## Figura 13

### Predicción de Frecuencia de Eventos Extremos (2025 – 2029)

Umbral de Evento Extremo (P90): 4.44 m<sup>3</sup>/s

--- Predicción de Frecuencia de Eventos Extremos ---

Año | Probabilidad de Evento Extremo

2025 | 10.30 %

2026 | 9.50 %

2027 | 8.70 %

2028 | 9.20 %

2029 | 8.70 %

Nota. Elaboración Propia

### ¿Es bueno o malo?

**Evaluación:** Moderadamente desfavorable

- No es óptimo que casi 1 de cada 10 años se presenten caudales por encima del umbral de evento extremo.
- Si bien no se trata de una amenaza constante, esta frecuencia incrementa la probabilidad de saturación, rebose o daño en infraestructuras de captación, conducción o distribución del sistema de riego.

### ¿Por qué?

- Porque el sistema de riego Mollepunco opera con módulos de riego específicos y caudales calculados bajo escenarios de demanda estable. Eventos que exceden los 4.44 m<sup>3</sup>/s pueden provocar turbidez excesiva, erosión, rotura de canales, sobrepresión en tuberías o anegamiento de cultivos.
- Además, durante eventos extremos, se dificulta la operación manual de compuertas, limpieza de bocatomas o mantenimiento de reservorios.

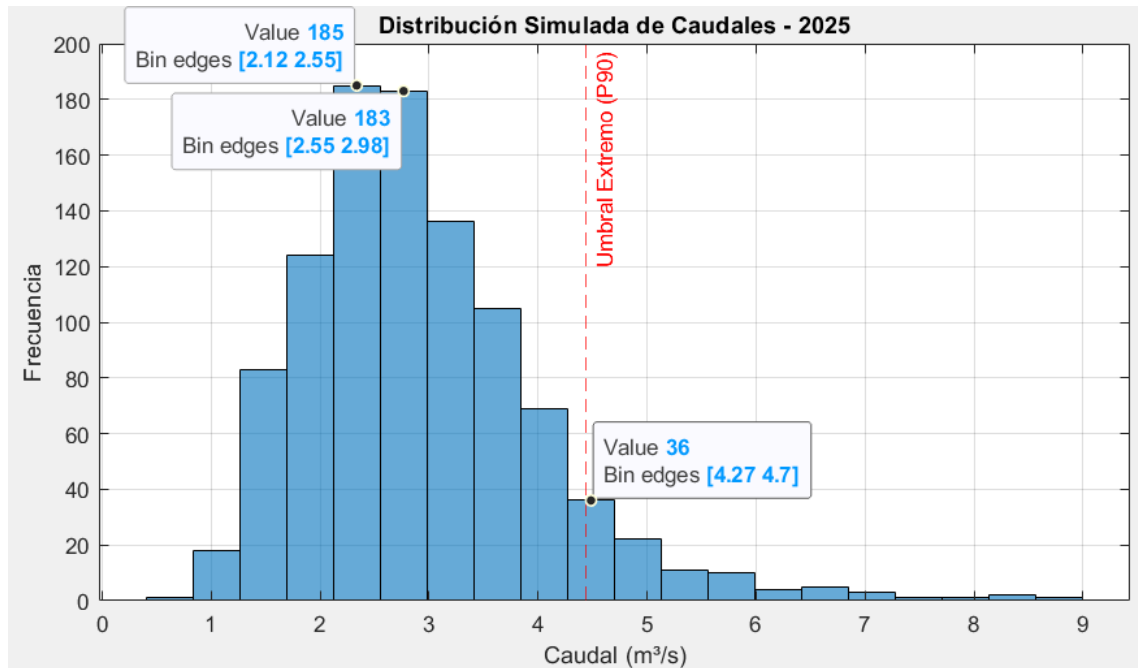
Aunque los valores no indican una amenaza extrema, sí justifican una planificación preventiva, sobre todo en años secos donde un evento extremo podría coincidir con una baja capacidad de regulación del sistema.

La Figura 16 presenta el histograma de caudales simulados para el año 2025, resultado de la aplicación del modelo hidrológico bajo condiciones históricas y

parámetros climáticos actuales. El eje X muestra los rangos de caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) y el eje Y indica la frecuencia de ocurrencia simulada dentro de cada intervalo.

**Figura 14**

*Histograma de caudales simulados*



*Nota.* Elaboración Propia

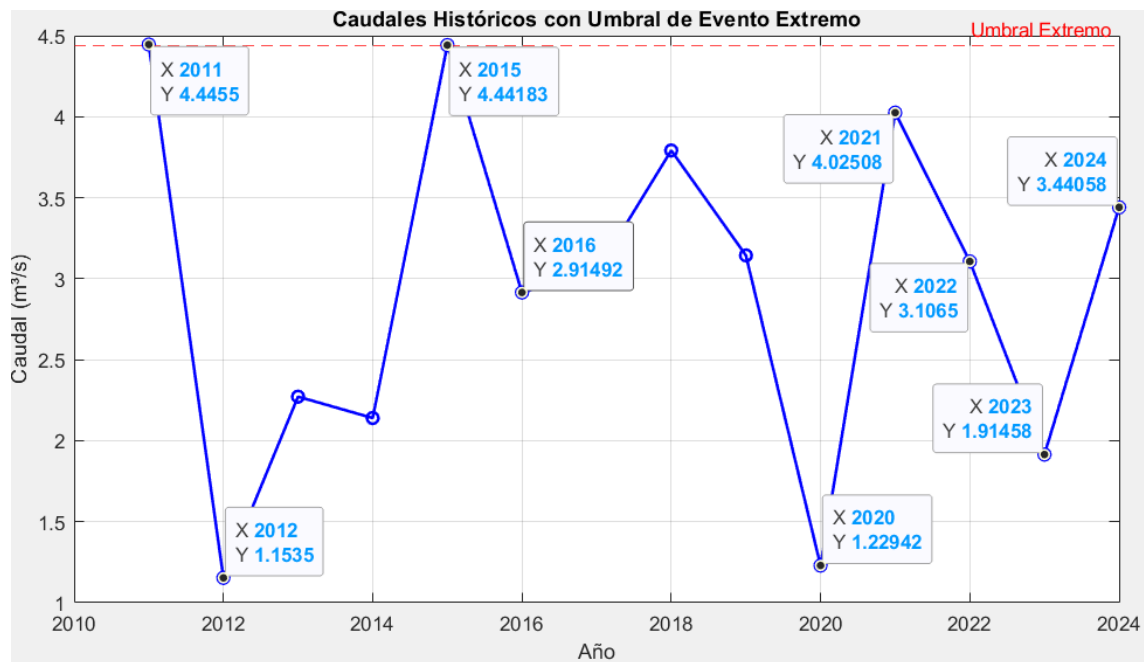
De a figura 16 se infiere lo siguiente:

- La distribución tiene forma asimétrica hacia la derecha, lo que indica una mayor ocurrencia de caudales bajos (entre 2.0 y 3.5  $\text{m}^3/\text{s}$ ), con valores extremos aislados que superan los 5.0  $\text{m}^3/\text{s}$ .
- El umbral de evento extremo (P90) está marcado con una línea punteada roja en 4.44  $\text{m}^3/\text{s}$ , sirviendo como referencia para evaluar la severidad del comportamiento hidrológico.
- El rango con mayor frecuencia se encuentra entre 2.12 y 2.98  $\text{m}^3/\text{s}$ , acumulando más de 350 simulaciones en total (185 + 183), lo que indica que el régimen medio se concentra en caudales moderados.
- Solo un pequeño número de simulaciones (36 ocurrencias) se ubican por encima del umbral P90, lo que representa aproximadamente un 3.6 % de probabilidad anual de eventos extremos, inferior al 10.3 % de la predicción general para ese año.

La Figura 17 muestra los caudales históricos anuales registrados entre 2011 y 2024 en la Sub Cuenca Llauta, comparados con el umbral de evento extremo (P90) establecido en 4.44 m<sup>3</sup>/s, indicado por la línea roja punteada en el gráfico.

**Figura 15**

*Caudales Históricos con Umbral de Evento Extremo (m<sup>3</sup>/s)*



*Nota.* Elaboración Propia

De la figura 17 se infiere lo siguiente:

- Solo dos años (2011 y 2015) superan el umbral de evento extremo, con caudales máximos de 4.4455 y 4.4418 m<sup>3</sup>/s, lo que representa aproximadamente un 14.3 % de los años del periodo analizado.
- En el resto de años, los caudales se encuentran por debajo del umbral, con valores mínimos en 2012 (1.1535 m<sup>3</sup>/s) y 2020 (1.2294 m<sup>3</sup>/s), evidenciando periodos de baja disponibilidad hídrica.
- La variabilidad interanual es elevada, reflejando alternancia entre años húmedos y años secos, lo que puede afectar la planificación del riego si no se implementan estrategias de almacenamiento y distribución eficiente.
- Eventos extremos puntuales (como en 2011 y 2015) podrían representar riesgos de sobrecarga hidráulica, erosión de estructuras o pérdidas de agua si no se cuenta con sistemas de regulación adecuados.

- La fuerte caída en caudales observada en años como 2020 podría provocar déficits críticos de agua para el riego, afectando directamente la productividad agrícola.

#### 4.1.3. Persistencia de eventos extremos

En esta sección se analiza la persistencia de eventos extremos en la sub cuenca Llauta, entendida como la frecuencia sostenida con la que ocurren caudales que superan un umbral crítico (P90) en el tiempo. Esta evaluación se realiza a partir de los resultados del modelo hidrológico y permite identificar tendencias y patrones recurrentes de riesgo hídrico. La persistencia de estos eventos es clave para anticipar impactos sobre la infraestructura de riego, particularmente en el sector Mollepunco, donde la variabilidad del caudal puede comprometer la eficiencia del sistema y la seguridad de las zonas agrícolas. Además, se incorporan escenarios de cambio climático para explorar cómo podrían evolucionar dichos eventos en el mediano plazo, fortaleciendo la planificación adaptativa y la toma de decisiones preventivas.

La Figura 18 muestra una evaluación prospectiva de la persistencia de eventos extremos considerando tres escenarios distintos que integran tanto variables climáticas como la demanda hídrica del cultivo en el sector de riego Mollepunco. Esta integración permite entender con mayor profundidad cómo podrían evolucionar los caudales críticos ante condiciones externas cambiantes, como el clima y la presión sobre el recurso hídrico.

#### Figura 16

##### *Persistencia de Eventos Extremos Integrando Clima y Demanda*

```

--- Persistencia de Eventos Extremos Integrando Clima y Demanda ---
Año | E1: Radiación/Temp alta (+12%) | E2: Alta demanda (+15% media, +10% desv) | E3: Humedad alta/Viento (+0% media, -10% desv)
2025 | 13.50 % | 17.10 % | 6.80 %
2026 | 15.70 % | 16.90 % | 7.60 %
2027 | 13.30 % | 15.30 % | 7.60 %
2028 | 10.80 % | 18.10 % | 7.50 %
2029 | 11.80 % | 16.40 % | 6.70 %

Datos utilizados: Temperatura promedio 7.1-18.2 °C, Humedad 77%, Radiación 18.2 MJ/m²/día
Demanda de riego promedio mensual: 29.25 L/s/ha

```

*Nota.* Elaboración Propia

- Escenario E1 (Radiación/Temperatura alta) representa condiciones más cálidas y radiantes, que pueden intensificar la evapotranspiración. Como se observa,

este escenario incrementa progresivamente la persistencia de eventos extremos desde 13.5% en 2025 hasta 15.7% en 2026, siendo un indicativo de mayor estrés hídrico si no se adapta el manejo de agua.

- Escenario E2 (Alta demanda de agua) simula una presión creciente sobre el recurso debido a un aumento del 15% en la demanda promedio mensual. Esta condición es crítica para el sistema de riego Mollepunco, ya que eleva la probabilidad de eventos extremos por encima del 16% de forma sostenida, lo cual podría generar déficits significativos en la distribución de agua si no se toman medidas de eficiencia.
- Escenario E3 (Humedad alta y viento moderado), por el contrario, presenta una menor persistencia de eventos extremos (entre 6.7% y 7.6%), lo que sugiere condiciones más estables para el sistema de riego. Este escenario podría representar un año relativamente favorable, siempre que no se presenten otros factores de estrés.

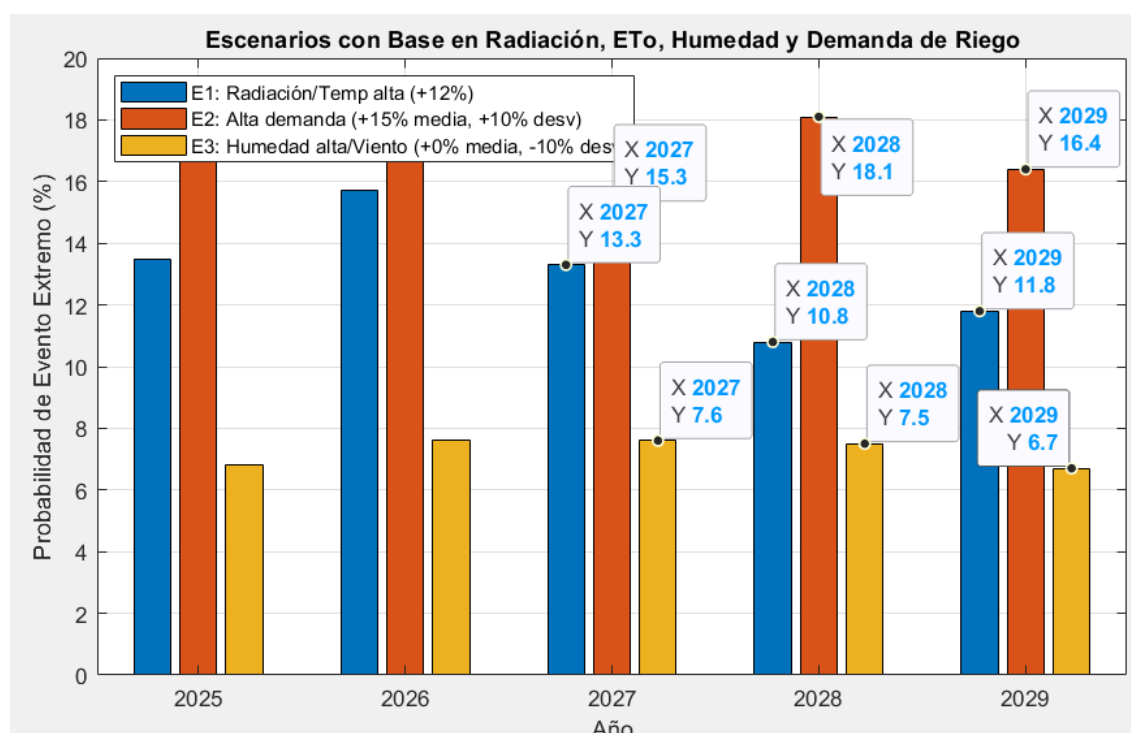
La Figura 19 presenta un análisis comparativo de la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos en el periodo 2025–2029 bajo tres diferentes escenarios climáticos e hídricos, integrando variables críticas como radiación, temperatura, evapotranspiración (ETo), humedad y demanda de riego. Este análisis es clave para anticipar posibles afectaciones en el sistema de riego Mollepunco, considerando la alta variabilidad climática.

- Escenario E1 (Radiación y temperatura altas, +12%): representa condiciones climáticas cálidas e intensas en radiación, lo que incrementa significativamente la evapotranspiración. Las probabilidades de eventos extremos oscilan entre 10.8% y 15.3%, mostrando un riesgo constante de estrés hídrico moderado, especialmente crítico en años como 2026 y 2027.
- Escenario E2 (Alta demanda hídrica, +15% promedio): es el más crítico, ya que simula un incremento en la presión de riego debido a necesidades mayores del cultivo. Este escenario proyecta valores de hasta 18.1% en 2028, lo cual podría desestabilizar la programación y distribución del agua en el sistema, sobre todo si no se optimiza la eficiencia o se diversifican las fuentes hídricas.

- Escenario E3 (Humedad alta y viento reducido): representa un contexto más favorable para el sistema, con probabilidades por debajo del 8%, debido a que la menor evaporación y mayor humedad reducen la presión sobre el recurso. Este escenario indica bajo riesgo de eventos extremos, pero depende de condiciones atmosféricas que no siempre son sostenibles.

**Figura 17**

*Escenarios con Base en Radiación, ETo, Humedad y Demanda de Riego*



*Nota.* Elaboración Propia

La figura 19 evidencia que el sistema de riego Mollepunco puede enfrentar serios desafíos si se mantienen o agravan las condiciones de alta demanda o estrés climático. En consecuencia, es recomendable implementar medidas de adaptación climática y gestión de la demanda, como la mejora de infraestructura de riego, monitoreo climático en tiempo real, o estrategias de riego deficitario que permitan sostener la producción agrícola incluso ante escenarios adversos.

## CONCLUSIONES

El modelo hidrológico desarrollado cumplió con predecir caudales extremos en el sistema de riego Mollepunco, integrando variables climáticas (temperatura, radiación solar, humedad, viento y ETo) e hidrológicas mediante distribuciones Gumbel, Log-Pearson III y Log-Normal. Se comprobó su capacidad predictiva al estimar caudales máximos de hasta 6.57 m<sup>3</sup>/s para un TR de 100 años y frecuencias de eventos extremos del 10.3% para 2025, consolidándose como herramienta técnica para la planificación hídrica y la prevención de riesgos en escenarios climáticos variables.

Se determinó que la variabilidad climática, representada por factores como temperatura, radiación solar, humedad y velocidad del viento, influye directamente en los niveles de caudal. Por ejemplo, se identificó que años con menor ETo y mayor humedad relativa presentaron caudales más elevados. Esta relación evidencia que cambios en las condiciones atmosféricas pueden afectar significativamente la disponibilidad de agua en el sistema, haciendo necesaria su incorporación en los modelos de predicción.

El modelo calibrado con registros históricos del periodo 2011–2024 permitió obtener estimaciones confiables de caudales máximos para diferentes periodos de retorno. Las distribuciones aplicadas mostraron coherencia entre sí, y la distribución Log-Normal arrojó los valores más altos, con 6.57 m<sup>3</sup>/s para un TR de 100 años. En cuanto a la frecuencia de eventos extremos, se estimó una probabilidad general de hasta 10.3 % para el año 2025. Esto confirma que el modelo es efectivo para prever caudales que puedan comprometer la operación del sistema.

Los escenarios de cambio climático aplicados demostraron que la persistencia de eventos extremos varía ampliamente. Bajo alta demanda hídrica (+15%), la probabilidad superó el 18% en 2028, generando riesgo de déficits, mientras que escenarios con mayor humedad y menor viento redujeron esta probabilidad a menos del 8%. Este resultado evidencia la importancia de planificar considerando múltiples escenarios futuros para garantizar la seguridad hídrica de Mollepunco.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda que las autoridades locales y operadores del sistema de riego Mollepunco utilicen herramientas de modelación hidrológica que consideren la variabilidad climática, como la radiación solar, la ETo y la humedad relativa, para anticipar años de baja o alta disponibilidad hídrica y planificar acciones preventivas.

Debido a la posibilidad de ocurrencia de caudales extremos en ciertos años, es recomendable evaluar el diseño actual de las estructuras del sistema (como canales, bocatomas y desarenadores) y, de ser necesario, realizar mejoras que aseguren su resistencia y funcionalidad frente a condiciones hidrológicas críticas.

Se sugiere implementar o reforzar estaciones de monitoreo hidrometeorológico en la zona de estudio, con el fin de obtener datos actualizados que permitan alimentar y validar modelos hidrológicos de predicción de caudales, mejorando así la toma de decisiones.

En función de los escenarios de alta demanda hídrica y disponibilidad variable del recurso, se recomienda incentivar prácticas de riego tecnificado y uso racional del agua en el sector agrícola, como una medida complementaria para asegurar la sostenibilidad del sistema frente al cambio climático.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, J. (2024). Variabilidad del caudal del río Bermejo en la Alta Cuenca. Unlp.edu.ar. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/167322>
- Aparicio, F. (1989). Fundamentos de Hidrología de Superficie, México, Editorial Limusa.
- Aparicio, M. F. J. (2001). Fundamentos de la Hidrología de Superficie. México: Limusa.
- Autoridad Nacional del Agua. (2013). Plan Nacional de Recursos Hídricos. <https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/plannacionalrecursoshidricos2013.pdf>
- Aybar, C. (2016). Modelamiento de la escorrentía en cuencas de montaña: Caso de Estudio Río Vilcanota. (Tesis pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú. Recuperado de <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/5936>.
- Bach, J. y Mas, J. (2008). Los recursos hídricos en el sistema cuenca: Disponibilidad y calidad. Documenta universitaria, 88-122.
- Baldeon, L. (2016). Modelamiento hidrológico de la sub cuenca del Río Achamayo. *Uncp.edu.pe*. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/4588>
- Banco Mundial. (2023). *Perú puede responder a las crecientes amenazas del cambio climático, la contaminación y la creciente demanda de agua*. World Bank; Banco Mundial. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2023/07/06/per-puede-responder-a-las-crecientes-amenazas-del-cambio-clim-tico-la-contaminaci-n-y-la-creciente-demanda-de-agua>
- Bonet Pérez, C., Moreno Guerra, H., Guerrero Posada, P., Vidal González, R., Rodríguez Correa, D., Fernández, E., Mola Fines, B., & Puente Borrero, F. R. (2019). Eficiencia de conducción de sistemas de riego en empresas arroceras. *Ingeniería Agrícola*, 9(4), e02.
- Chow, V., David, M., y Larry, M. (1998). Hidrología aplicada. McGraw-Hill, 573p
- Del Carmen, R. (2001). Modelación de la evapotranspiración con métodos de balance de agua

- Díaz, E., Rodríguez, A., Dölling, O., Bertoni, J. C., & y Smrekar, M. (2016). Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Argentina. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(1), 125-133.
- Espino, C. (2017). Análisis predictivo: técnicas y modelos utilizados y aplicaciones del mismo - herramientas Open Source que permiten su uso. (Tesis pregrado). Universitat Oberta de Catalunya, España.
- Espinoza, C. (2014). Metodología de Investigación Tecnológica Pensando en Sistemas. *Uncp.edu.pe*. urn: isbn:978-612-00-1667-1. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/1148>
- Ferrer Alessi, V., y Torrero, M. P. (2015). Manejo integrado de cuencas hídricas: cuenca del río Gualjaina, Chubut, Argentina. *Boletín Mexicano de Derecho Comparado*, 2015(143), 615–643. <https://doi.org/10.22201/IIJ.24484873E.2015.143.4941>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2000). *Handbook on Pressurized Irrigation Techniques* (Land and Water Digital Media Series No. 12). FAO.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO-SAFR). (2002). *Irrigation Manual Module 1: Irrigation Development: a Multifaceted Process*. FAO
- García, A. (2022). La variabilidad climática en la cuenca hidrográfica del río Chalpi Grande y su importancia para los sistemas de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Quito. *Uasb.edu.ec*. <http://hdl.handle.net/10644/9074>
- Gavilán, S. A. (2019). Modelado del balance hídrico a partir de datos satelitales y meteorológicos para el análisis de los flujos superficiales del ciclo hidrológico [Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata]. Repositorio Institucional. <https://doi.org/10.35537/10915/74374>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., Baptista Lucio, M. (2014). Metodología de la investigación (6° ed.). México: McGraw Hill Interamericana Editores S.A. de C.V.

- Hernández-Sampieri, R. y Mendoza, C (2018). Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta, Ciudad de México, México: Editorial McGraw Hill Education, Año de edición: 2018, ISBN: 978-1-4562-6096-5, 714 p.
- Jiménez, A. (2021). Simulación a escala diaria con fines de evaluación de la variabilidad hidrológica en la cuenca del río Tambo. *Lamolina.edu.pe*.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12996/5312>
- Julio, J. (2011). Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico. Lima, Perú: Zaniel I. Novoa Goicochea.  
[https://www.gwp.org/globalassets/global/gwpsam\\_files/publicaciones/varios/ciclo\\_hidrologico.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwpsam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrologico.pdf)
- Linsley, R., Kohler, M., y Paulhus, J. (1992). Evaporation and transpiration. Hydrology for Engineers. New York, McGrawHill.
- Madrigal, C. (2023). Generación de pronósticos retrospectivos de caudal para cuencas hidrográficas en Costa Rica por medio de la técnica de análisis de correlación canónica. *Ucr.ac.cr*. <https://hdl.handle.net/10669/90890>
- Martín, Q., y De Paz, Y. (2007). Aplicación de las Redes Neuronales Artificiales a la regresión, La muralla S.A, 52p.
- Martínez, M. (2014). Metodología basada en redes neuronales para interpretación de la resistividad del suelo en zonas urbanas, Ingeniería Energética, 1:59-69.
- Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2000). Aguas Superficiales. España. MITECO. [https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-lasaguas/aguas-superficiales/Categorias\\_y\\_tipos\\_de\\_masas\\_de\\_agua.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-lasaguas/aguas-superficiales/Categorias_y_tipos_de_masas_de_agua.aspx)
- Mondino, G. (2014). Modelos conceptuales y mentales: Elementos para repensar la enseñanza y el aprendizaje. *Enfoques*, XXVI (1), 57-78.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=259/25933773004>
- Municipalidad Distrital de Llauta (2019). Proyecto Mejoramiento del Servicio de Agua en los Sistemas de Riego Mollepunco, Panchalla, Aylapampa-Ayahui de la localidad de Aylapampa del distrito de Llauta-provincia de Lucanas-departamento de

- Ayacucho, código único de inversión N° 2451600: Expediente para obtener la acreditación hídrica. Ana.gob.pe. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/5020>
- Musy, A. (2001). Cours "Hydrologie Générale". Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. IATE/HYDRAM. Laboratoire d'Hydrologie et Aménagement. Capítulo 1, 2, 3, 4 y 5.
- Neciosup, D., y Simon, D. (2024). Modelamiento hidrológico para medir el impacto del cambio climático de la cuenca del río Pachitea - Huánuco. Upc.edu.pe. <http://hdl.handle.net/10757/675247>
- Olaya, V. (2004). Hidrología computacional y modelos digitales del terreno-teoría, práctica y filosofía de una nueva forma de análisis hidrológico.
- ONU (2019). *Cambio climático y agua Informe de políticas de ONU-Agua | Red de Seguridad Alimentaria y Nutrición*. Fsnnetwork.org. <https://www.fsnnetwork.org/es/resource/climate-change-and-water-un-water-policy-brief>
- Oropeza M., J. (1999). Modelos matemáticos y su aplicación al manejo de cuencas hidrográficas. Memorias del IX Congreso Nacional de Irrigación. Culiacán, Sinaloa.
- Palacios V. (2005). Demanda evapotranspirativa Colegio de PostGraduados, Montecillo México
- Pomasongo, D. (2021). Uso de softwares para el análisis de caudales pluviales aplicados a procesos hidrológicos: una revisión de la literatura científica de los últimos 10 años. Upn.edu.pe. <https://hdl.handle.net/11537/27698>
- Sánchez, S. (2010). Caracterización Morfométrica y Simulación del Balance de la Cuenca "Tres Valles SLP". (Tesis de posgrado). Colegio de Postgraduados, México. <http://www.biblio.colpos.mx:8080/jspul/handle/10521/160>.
- Sinche, Marlíny. (2024). Las redes neuronales en la predicción de caudales de las cuencas hidrográficas de la región Junín. Upla.edu.pe. <https://hdl.handle.net/20.500.12848/8541>

- Sota, J. (2022). Proyecciones de eventos hidro-meteorológicos extremos en la cuenca del altiplano chileno, bajo el escenario de cambio climático SSP5-8.5. Uchile.cl. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/184808>
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94.
- Vásquez, A. (1997). Manejo de Cuencas Alto andinas. Escuela superior de Administración de Aguas, Charles Sutton, 293p.
- Venegas, M. (2023). Evaluación de riesgos en la salud pública del estado de Aguascalientes ante la variabilidad climática a partir de indicadores de calidad de agua y suelo. *Dgse.uaa.mx*. <http://hdl.handle.net/11317/2856>

## ANEXOS

### a) Matriz de consistencia

<b>MODELO HIDROLÓGICO PARA PREDECIR CAUDALES EXTREMOS BAJO LA INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN EL SISTEMA DE RIEGO MOLLEPUNCO, DISTRITO DE LLAUTA, AYACUCHO</b>								
<b>PROBLEMA</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>HIPÓTESIS</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>POBLACIÓN Y MUESTRA</b>	
<b>Problema General</b>	<b>Objetivo General</b>	<b>Hipótesis General</b>	VI: Variabilidad climática	Precipitación	Precipitación media mensual	Esta investigación pertenece al enfoque cuantitativo.  Esta investigación pertenece al tipo de alcance explicativo.  Esta investigación pertenece al tipo de diseño no experimental.	La población de esta investigación incluye todas las cuencas hidrográficas y sistemas de riego que podrían estar sujetos a variabilidad climática y cambios en los caudales extremos, específicamente dentro de la región de Ayacucho y, más ampliamente, en contextos similares en otras regiones.  La muestra de esta investigación es el Sistema de Riego Mollepunco en la localidad de Aylapampa, Distrito de Llauta, Provincia de Lucanas, Departamento de Ayacucho. Este sistema específico	
¿De qué manera se puede desarrollar un modelo hidrológico que permita predecir los caudales extremos en el sistema de riego Mollepunco, considerando la influencia de la variabilidad climática?	Desarrollar un modelo hidrológico que permita predecir los caudales extremos en el sistema de riego Mollepunco, considerando la influencia de la variabilidad climática.	Si se desarrolla un modelo hidrológico que considere la influencia de la variabilidad climática, entonces se podrán predecir de manera precisa los caudales extremos en el sistema de riego Mollepunco.		Temperatura	Temperatura máxima mensual Temperatura mínima mensual			
<b>Problema específico</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>Hipótesis específico</b>		VD: Predicción de caudales extremos	Humedad relativa			Humedad relativa media mensual
¿De qué manera influye la variabilidad climática en la predicción de caudales extremos en el sistema de riego Mollepunco?	Evaluar la influencia de la variabilidad climática en la predicción de caudales extremos en el sistema de riego Mollepunco.	Si se evalúa la influencia de la variabilidad climática, entonces se podrá identificar un patrón significativo que afecta la predicción de caudales extremos en el sistema de riego Mollepunco.			Evapotranspiración			Evapotranspiración potencial mensual
¿Cómo se puede desarrollar y calibrar un modelo hidrológico que permita predecir la magnitud de caudales máximos y la frecuencia de eventos extremos?	Desarrollar y calibrar un modelo hidrológico para predecir la magnitud de caudales máximos y frecuencia de eventos extremos.	Si se desarrolla y calibra un modelo hidrológico, entonces se podrá predecir con precisión la magnitud de los caudales máximos y la frecuencia de eventos extremos en el sistema de riego Mollepunco.	Viento		Velocidad media del viento			
				Frecuencia de eventos extremos	Número de eventos extremos predichos			
				Magnitud de los caudales máximos	Caudales máximos predichos			

<p>¿Cómo determinar la persistencia de eventos extremos utilizando el modelo hidrológico bajo diferentes escenarios de cambio climático para anticipar caudales futuros?</p>	<p>Determinar la persistencia de eventos extremos utilizando el modelo hidrológico y aplicando diferentes escenarios de cambio climático para anticipar caudales futuros.</p>	<p>Si se aplica el modelo hidrológico bajo diferentes escenarios de cambio climático, entonces se podrá determinar la persistencia de eventos extremos y anticipar con mayor certeza los caudales futuros en el sistema de riego Mollepunco.</p>	<p>Error en la predicción</p> <p>Persistencia de los Caudales Extremos</p>	<p>Error cuadrático medio (MSE) Coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>)</p> <p>Probabilidad de que el caudal exceda cierto valor</p>	<p>se selecciona para desarrollar y validar el modelo hidrológico, enfocándose en su capacidad para predecir caudales extremos y evaluar la variabilidad climática en la demanda hídrica.</p>
--	---	--	--	---	---

Nota. Elaboración propia

## ANEXO N°2: MODELO HIDROLOGICO DE CAUDALES MÁXIMOS

```
%% Modelo Hidrológico con Predicción de Caudales Máximos para 2025-2029
% Incluye: Gumbel, Log-Pearson III, Log-Normal y predicción lineal 5
años

% Datos físicos de la cuenca
area_km2 = 256.58;
pendiente_media = 4.34;
tiempo_concentracion_horas = 4.51;
densidad_drenaje = 0.123;
coef_compacidad = 1.877;

fprintf('--- Parámetros Físicos de la Cuenca ---\n');
fprintf('Área de la Cuenca: %.2f km²\n', area_km2);
fprintf('Pendiente Media del Cauce: %.2f %%\n', pendiente_media);
fprintf('Tiempo de Concentración Promedio: %.2f horas\n',
tiempo_concentracion_horas);
fprintf('Densidad de Drenaje: %.3f km/km²\n', densidad_drenaje);
fprintf('Coeficiente de Compacidad: %.3f\n\n', coef_compacidad);

%% Datos históricos promedio anual (2011-2024)
años = 2011:2024;
caudales_anuales = [4.4455, 1.1535, 2.271917, 2.14, 4.441833, 2.914917,
3.040167, 3.791667, 3.143833, 1.229417, 4.025083, 3.1065, 1.914583,
3.440583];

%% Predicción lineal para 2025-2029
p = polyfit(años, caudales_anuales, 1);
años_futuros = 2025:2029;
predicciones = polyval(p, años_futuros);

% Combinar históricos y predicción
caudales_total = [caudales_anuales, predicciones];
N = length(caudales_total);
sorted_Q = sort(caudales_total, 'descend');

%% Probabilidad de excedencia (Gringorten)
for i = 1:N
    p_exc(i) = (i - 0.44) / (N + 0.12);
end
T = 1 ./ p_exc;

%% Distribución Gumbel
media = mean(caudales_total);
desv = std(caudales_total);
a_gumbel = desv * sqrt(6) / pi;
u_gumbel = media - 0.5772 * a_gumbel;
TR = [2, 5, 10, 25, 50, 100];
y_TR = -log(-log(1 - 1 ./ TR));
Q_gumbel = u_gumbel + a_gumbel * y_TR;

%% Distribución Log-Pearson III
log_Q = log10(caudales_total);
mean_logQ = mean(log_Q);
std_logQ = std(log_Q);
```

```

skew_logQ = skewness(log_Q);
K = @ (T) ( (log10(log(T ./ (T - 1))) * skew_logQ) / 6 + ...
            ((log10(T ./ (T - 1))) .^ 2 - 1) * skew_logQ^2 / 36 );
Q_LP3 = 10.^(mean_logQ + K(TR) * std_logQ);

%% Distribución Log-Normal
mean_ln = mean(log_Q);
std_ln = std(log_Q);
Q_LN = 10.^(mean_ln + std_ln * norminv(1 - 1 ./ TR));

%% Resultados
fprintf('\nPredicción de Caudales Máximos (m³/s)\n');
fprintf('Periodo Retorno | Gumbel | Log-Pearson III | Log-Normal\n');
for i = 1:length(TR)
    fprintf('%16d | %6.2f | %16.2f | %11.2f\n', TR(i), Q_gumbel(i),
    Q_LP3(i), Q_LN(i));
end

% --- Figura 1: Predicción de Caudales Medios Anuales ---
figure;
plot(anios, caudales_anuales, 'bo-', anios_futuros, predicciones, 'ro--',
'LineWidth', 1.5);
title('Predicción de Caudales Medios Anuales');
xlabel('Año'); ylabel('Caudal (m³/s)');
legend('Históricos', 'Predicción');
grid on;
saveas(gcf, 'Figura1_Caudales_Medios_Prediccion.png');

% --- Figura 2: Caudales Totales 2011-2029 ---
figure;
bar([anios anios_futuros], [caudales_anuales predicciones]);
title('Caudales Totales 2011-2029');
xlabel('Año'); ylabel('Caudal (m³/s)');
grid on;
saveas(gcf, 'Figura2_Caudales_Totales.png');

% --- Figura 3: Curva de Excedencia ---
figure;
plot(T, sorted_Q, 'k*-', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Periodo de Retorno (años)');
ylabel('Caudal (m³/s)');
title('Curva de Excedencia');
grid on;
saveas(gcf, 'Figura3_Curva_Excedencia.png');

% --- Figura 4: Comparación de Distribuciones de Frecuencia ---
figure;
plot(TR, Q_gumbel, 'r-o', TR, Q_LP3, 'b-s', TR, Q_LN, 'g-^', 'LineWidth',
1.5);
xlabel('Periodo de Retorno (años)');
ylabel('Caudal Máximo (m³/s)');
legend('Gumbel', 'Log-Pearson III', 'Log-Normal');
title('Comparación de Distribuciones de Frecuencia');
grid on;
saveas(gcf, 'Figura4_Distribuciones_Frecuencia.png');

```

### ANEXO N°3: MODELO HIDROLOGICO DE EVENTOS EXTREMOS

```
%% Predicción de Frecuencia de Eventos Extremos (2025-2029)
% Usando simulación Monte Carlo y distribución Gumbel

clc; clear;

% --- Datos históricos (2011-2024) ---
años_hist = 2011:2024;
caudales_hist = [4.4455, 1.1535, 2.271917, 2.14, 4.441833, 2.914917,
3.040167, 3.791667, 3.143833, 1.229417, 4.025083, 3.1065, 1.914583,
3.440583];
N = length(caudales_hist);

% --- Parámetros Gumbel ---
media = mean(caudales_hist);
desv = std(caudales_hist);
a = desv * sqrt(6) / pi;
u = media - 0.5772 * a;

% --- Umbral de evento extremo ---
umbral_extremo = prctile(caudales_hist, 90); % percentil 90
fprintf('Umbral de Evento Extremo (P90): %.2f m³/s\n', umbral_extremo);

% --- Simulación para 2025-2029 ---
años_pred = 2025:2029;
n_pred = length(años_pred);
n_sim = 1000; % simulaciones por año
prob_extremo = zeros(1, n_pred);

% Simulación Monte Carlo
for i = 1:n_pred
    eventos = 0;
    for j = 1:n_sim
        U = rand();
        Y = -log(-log(U));
        Q_sim = u + a * Y;
        if Q_sim > umbral_extremo
            eventos = eventos + 1;
        end
    end
    prob_extremo(i) = eventos / n_sim;
end

%% Resultados
fprintf('\n--- Predicción de Frecuencia de Eventos Extremos ---\n');
fprintf('Año | Probabilidad de Evento Extremo\n');
for i = 1:n_pred
    fprintf('%4d | %.2f %%\n', años_pred(i), prob_extremo(i)*100);
end

%% Figura 1: Histograma de caudales simulados (ejemplo para 2025)
figure;
sim_2025 = u + a * (-log(-log(rand(1, n_sim))));
histogram(sim_2025, 20);
hold on;
xline(umbral_extremo, 'r--', 'Umbral Extremo (P90)');
```

```

title('Distribución Simulada de Caudales - 2025');
xlabel('Caudal (m³/s)');
ylabel('Frecuencia');
grid on;

%% Figura 2: Probabilidad de Evento Extremo por Año
figure;
bar(anios_pred, prob_extremo*100, 'FaceColor', [0.8 0.3 0.3]);
title('Probabilidad de Evento Extremo (2025-2029)');
xlabel('Año');
ylabel('Probabilidad (%)');
grid on;

%% Figura 3: Comparación con Datos Históricos
figure;
plot(anios_hist, caudales_hist, 'b-o', 'LineWidth', 1.5); hold on;
yline(umbral_extremo, 'r--', 'Umbral Extremo');
title('Caudales Históricos con Umbral de Evento Extremo');
xlabel('Año'); ylabel('Caudal (m³/s)');
grid on;

```

## ANEXO N°3: MODELO HIDROLOGICO DE PERSISTENCIA DE EVENTOS EXTREMOS

```
%% Persistencia de Eventos Extremos con Datos Climáticos y Demanda de Agua
% Basado en: Estación Huac-Huas y Sector Mollepunco (2019)

clc; clear;

% --- Datos históricos (2011-2024) ---
caudales_hist = [4.4455, 1.1535, 2.271917, 2.14, 4.441833, 2.914917,
3.040167, 3.791667, 3.143833, 1.229417, 4.025083, 3.1065, 1.914583,
3.440583];
N = length(caudales_hist);

% --- Parámetros base (Gumbel) ---
media = mean(caudales_hist);
desv = std(caudales_hist);
a = desv * sqrt(6) / pi;
u = media - 0.5772 * a;

% --- Datos reales utilizados para modificar escenarios ---
TempMin = 7.1;
TempMax = 18.2;
Humedad = 77;
Viento = 2.6;
Insolacion = 6.5;
Radiacion = 18.2;
EToTotal = 1142.77;
DemandaLps = 29.25;

% --- Escenarios contruidos desde datos reales ---
% E1: Radiación y Temperatura alta -> mayor ETo => aumenta media caudal
% E2: Alta demanda mensual de agua -> sube media y desviación por estrés hídrico
% E3: Alta humedad relativa + vientos constantes => menor media

escenarios = {
    'E1: Radiación/Temp alta (+12%)', 1.12*media, desv;
    'E2: Alta demanda (+15% media, +10% desv)', 1.15*media, 1.10*desv;
    'E3: Humedad alta/Viento (+0% media, -10% desv)', media, 0.90*desv;
};

% --- Umbral de evento extremo ---
umbral_extremo = prctile(caudales_hist, 90);

% --- Simulación 2025-2029 ---
anios_fut = 2025:2029;
n_sim = 1000;
persistencia = zeros(size(escenarios,1), length(anios_fut));

for e = 1:size(escenarios,1)
    mu = escenarios{e,2};
    sigma = escenarios{e,3};
    a_e = sigma * sqrt(6) / pi;
```

```

u_e = mu - 0.5772 * a_e;

for t = 1:length(anios_fut)
    eventos = 0;
    for i = 1:n_sim
        U = rand();
        Y = -log(-log(U));
        Q = u_e + a_e * Y;
        if Q > umbral_extremo
            eventos = eventos + 1;
        end
    end
    persistencia(e, t) = eventos / n_sim;
end
end

% --- Resultados en consola ---
fprintf('\n--- Persistencia de Eventos Extremos Integrando Clima y
Demanda ---\n');
fprintf('Año | %-30s | %-30s | %-30s\n', escenarios{1,1},
escenarios{2,1}, escenarios{3,1});
for t = 1:length(anios_fut)
    fprintf('%4d | %6.2f %% | %6.2f %%
| %6.2f %%\n', ...
        anios_fut(t), ...
        persistencia(1,t)*100, ...
        persistencia(2,t)*100, ...
        persistencia(3,t)*100);
end

% --- Gráfico comparativo de escenarios ---
figure;
bar(anios_fut, persistencia'*100, 'grouped');
legend(escenarios{:,1}, 'Location', 'northwest');
xlabel('Año'); ylabel('Probabilidad de Evento Extremo (%)');
title('Escenarios con Base en Radiación, ETo, Humedad y Demanda de
Riego');
grid on;

% --- Notas finales ---
fprintf('\nDatos utilizados: Temperatura promedio %.1f-%.1f °C, Humedad
%.0f%%, Radiación %.1f MJ/m²/día\n', ...
    TempMin, TempMax, Humedad, Radiacion);
fprintf('Demanda de riego promedio mensual: %.2f L/s/ha\n', DemandaLps);

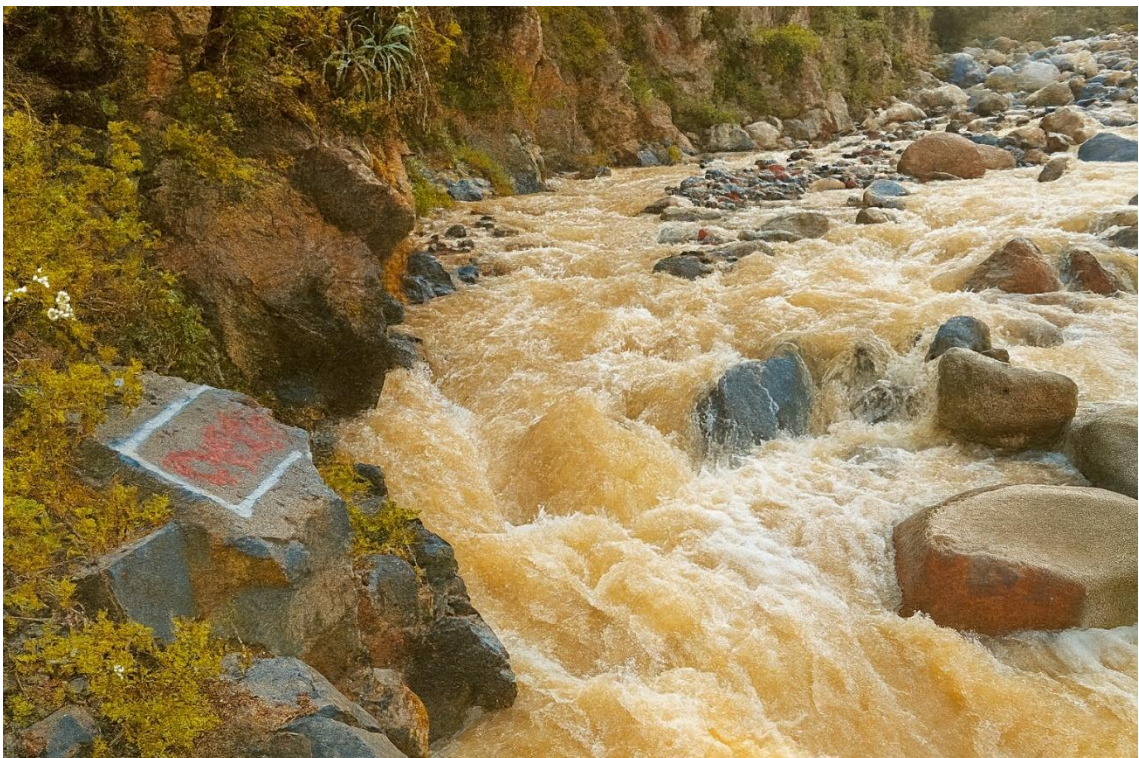
```

**ANEXO N°4: PANEL FOTOGRÁFICO**  
**PANEL FOTOGRÁFICO - SECTOR MOLLEPUNCO**



**Cauce con piedras y tubería de conducción**

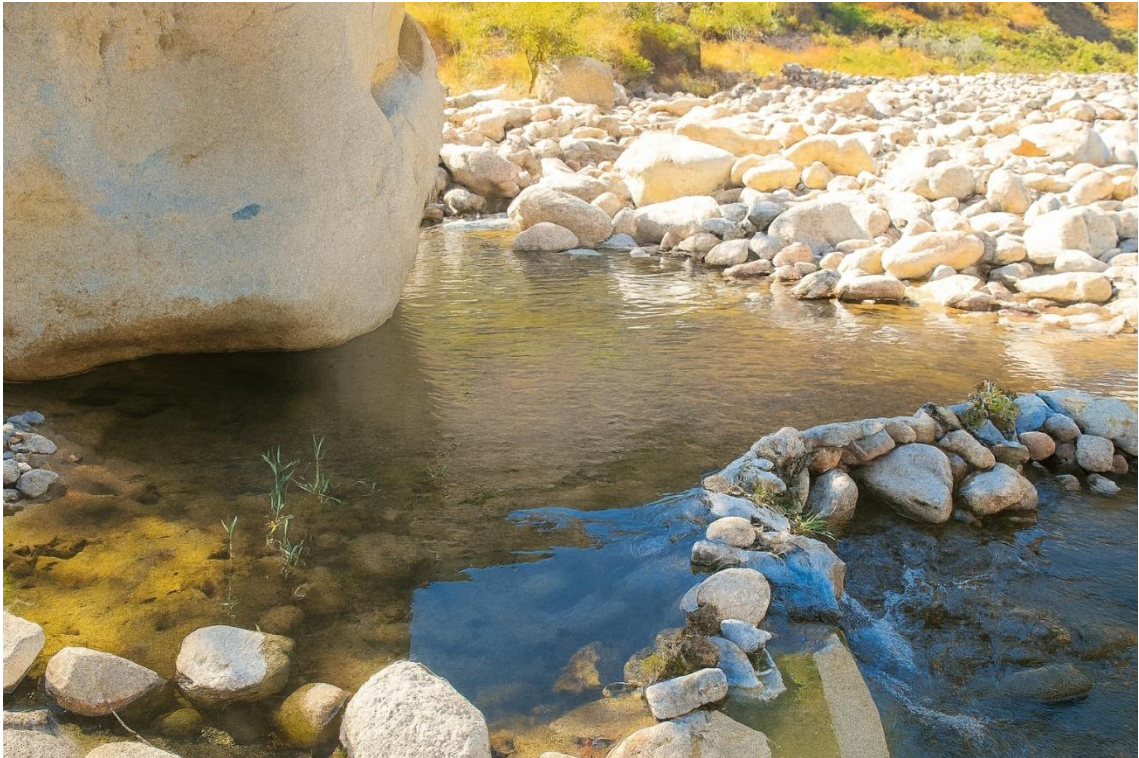
**Fuente: Imagen propia**



**Cauce del río con arrastre de sedimentos y un flujo turbulento**

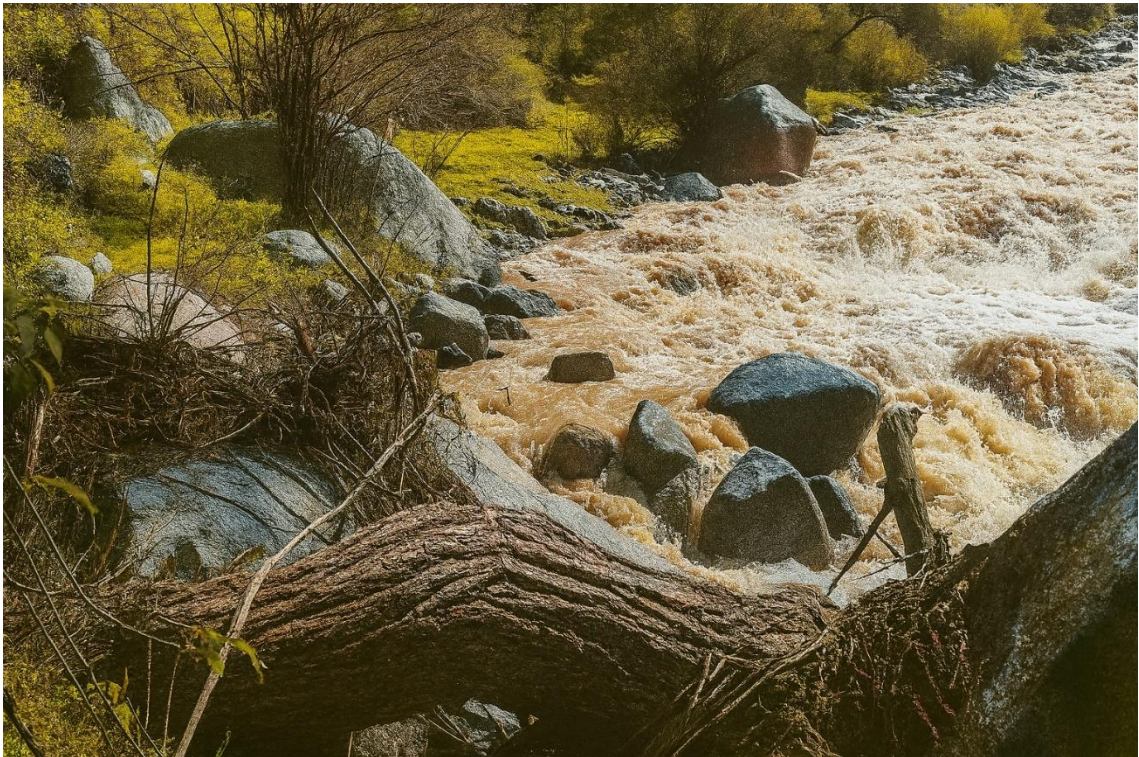
**Fuente propia: Imagen propia**

## SECTOR MOLLEPUNCO



**Vista del área donde un enorme bloque que crea un remanso que favorece el crecimiento de vegetación incipiente.**

**Fuente: Imagen propia**



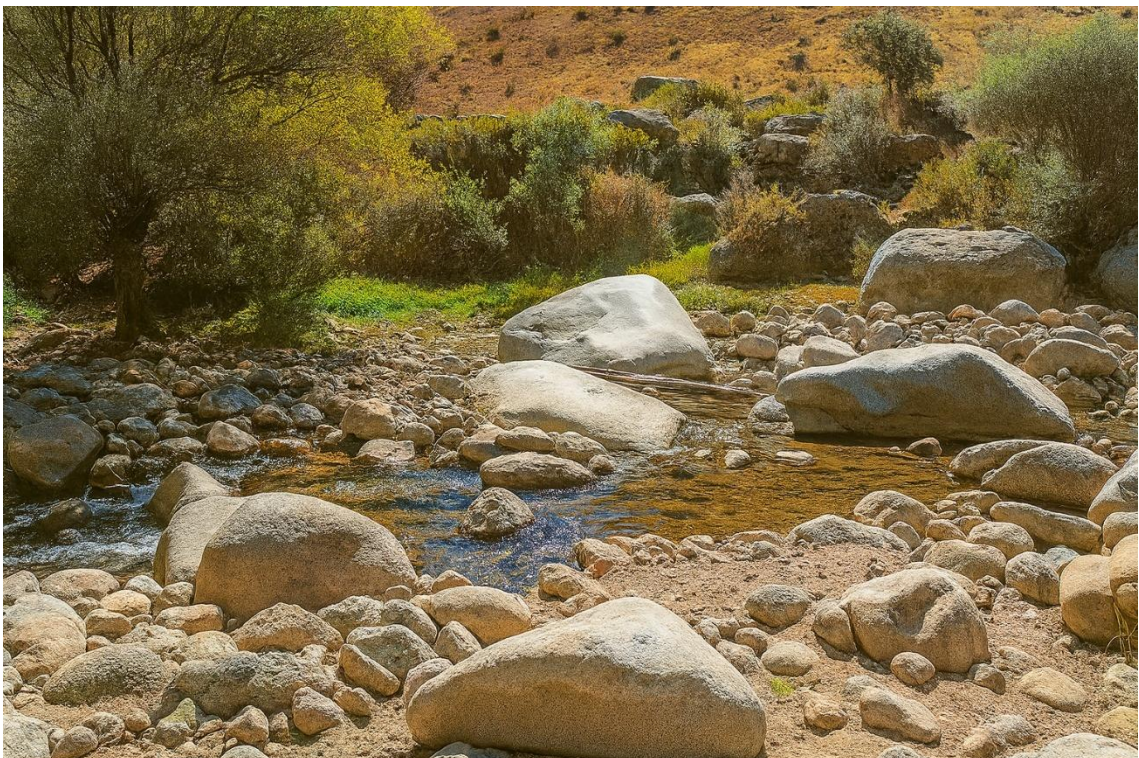
**El río tiene un caudal repleto de sedimentos entre las rocas y la vegetación.**

**Fuente: Imagen propia**



**Paisaje con su vegetación amarilla y ocre que contrasta con las rocas graníticas, al fondo se puede ver el cauce espumoso del río.**

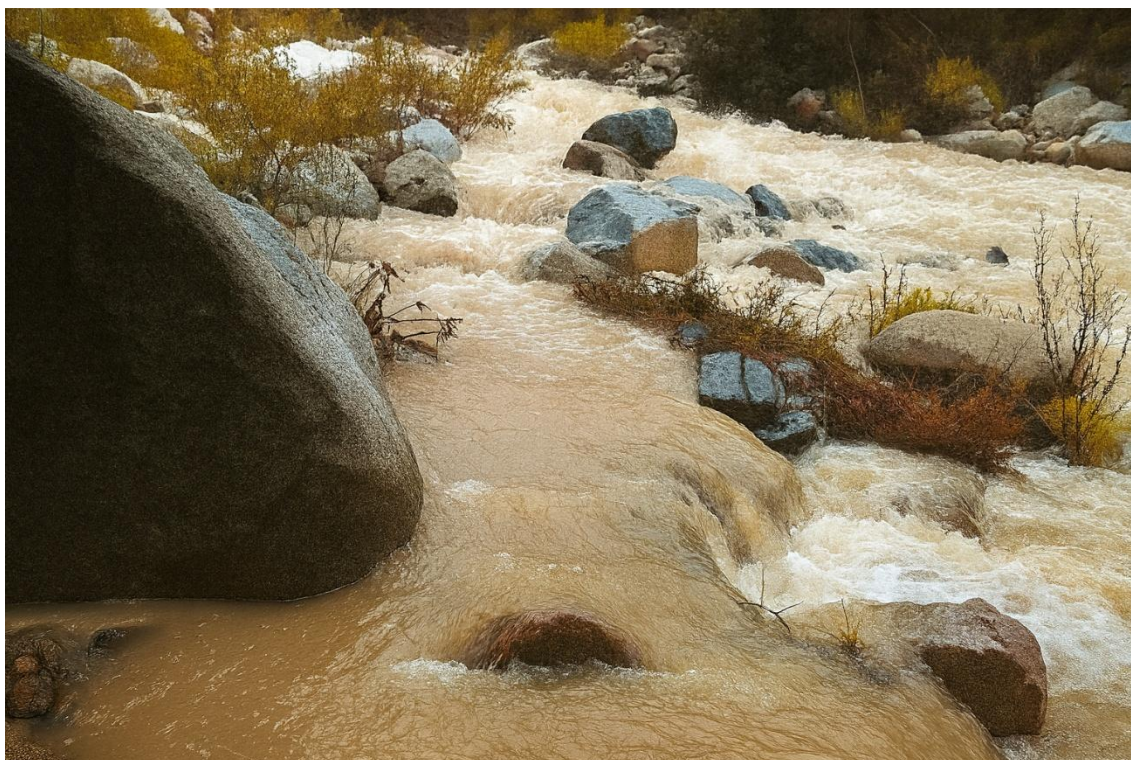
**Fuente: Imagen propia**



**Se observa un río tranquilo que se desliza entre piedras con vegetación en los márgenes del cauce.**

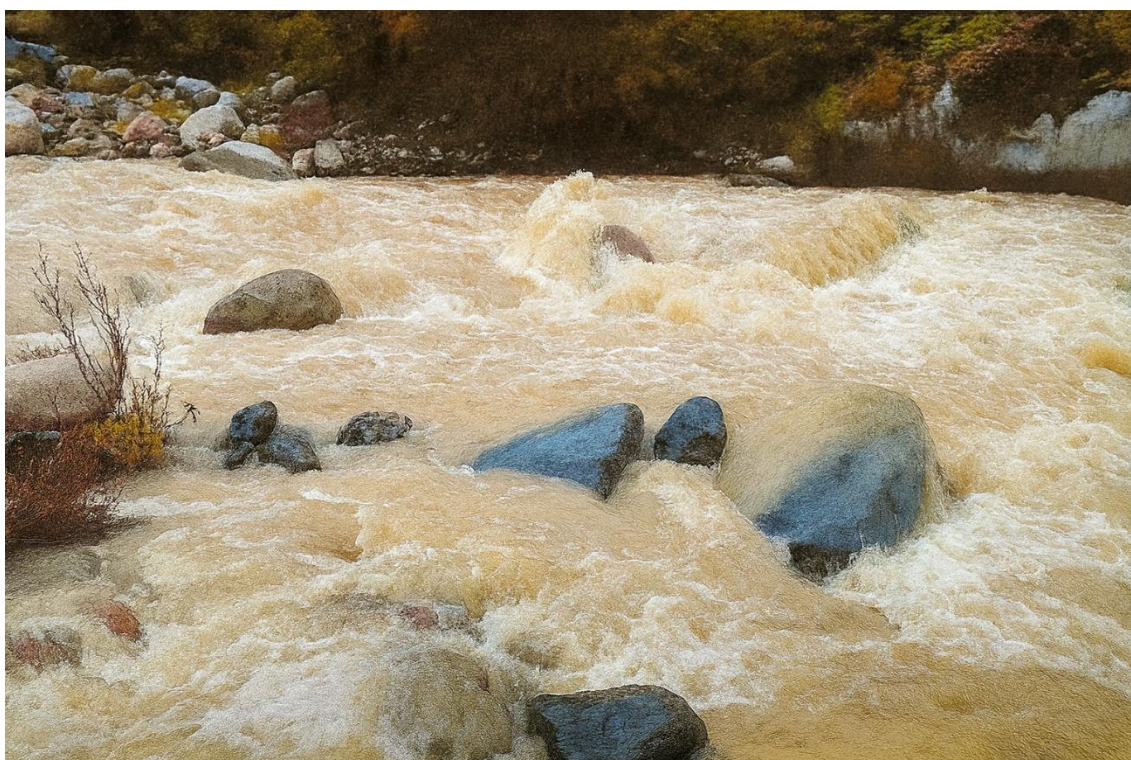
**Fuente: Imagen propia**

## SECTOR AYLAPAMPA



**Corriente del río cargada de sedimentos que circunda rocas graníticas, subrayando la interrelación entre la resistencia y la erosión del paisaje**

**Fuente: Imagen propia**



**Río en creciente con aguas veloces y turbias que desgastan y dan forma a las rocas del lecho.**

**Fuente: Imagen propia**



**Interacción entre el río y los bloques que evidencian erosión, sedimentos, vegetación joven y marcas de investigación sobre la roca.**

**Fuente: Imagen propia**



**Borde del río con una diferencia entre su cauce turbio y la vegetación ribereña; un arroyo diáfano que cruza una capa de hierba.**

**Fuente: Imagen propia**



UNSCH

FACULTAD DE  
**INGENIERÍA**  
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 028-2025-FIMGC

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA CIVIL**

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga de la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **RESOLUCIÓN DECANAL N° 202-2025-FIMGC-D**, a los **quince días del mes de agosto de 2025**, siendo las **10:00 a.m.**, reunidos en el **Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil**, bajo la presidencia del **MSc. Ing. José Ernesto Estrada Cárdenas**, y los miembros: **Ing. Edward LEON PALACIOS**, **Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANI** y **Ing. Jaime Leonardo BENDEZU PRADO**, actuando como secretario docente el **MSc. Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNÁNDEZ**, para proceder a la sustentación de tesis para optar el **Título Profesional de Ingeniera Civil**, del bachiller:

**STEFANNY YAHAIRA PALACIOS REYMUÑEZ**

Quien presentó la tesis denominada:

**Modelo hidrológico para predecir caudales extremos bajo la influencia de la variabilidad climática en el sistema de riego Mollepunco, distrito de Llauta, Ayacucho**

Los señores miembros del jurado, luego de expuesta la tesis y absueltas las preguntas, deliberaron y declararon:

**Aprobado con dieciséis (16)**

Siendo las **11:30 a.m.** del día **15 de agosto de 2025**, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad con lo actuado, los miembros del jurado firman al pie del presente.

MSc. Ing. José Ernesto Estrada Cárdenas  
Presidente

Ing. Edward LEON PALACIOS  
Miembro

Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANI  
Miembro

Ing. Jaime Leonardo BENDEZU PRADO  
Miembro - Asesor

MSc. Saul Walter RETAMOZO FERNÁNDEZ  
Secretario docente de la FIMGC



## CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### CONSTANCIA N° 017-2025-FIMGC/ASIH

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado con el software Turnitin, de la Escuelas Profesional de **Ingeniería Civil** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la **Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU**, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga y **Resolución Decanal N° 697-2024-FIMGC-UNSCH-D**, dejo constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

**Apellidos y Nombres** : Stefanny Yahaira PALACIOS REYMUÑEZ  
**Escuela Profesional** : INGENIERÍA CIVIL  
**Título de la Tesis** : Modelo hidrológico para predecir caudales extremos bajo la influencia de la variabilidad climática en el sistema de riego Mollepunco, distrito de Llauta, Ayacucho  
**Evaluación de la Originalidad** : 11 % Índice de Similitud  
**Identificador de la entrega** : 2756034166

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

En señal de conformidad y verificación se firma la presente constancia

Ayacucho, 19 de setiembre del 2025



UNIVERSIDAD NACIONAL DE  
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA  
Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil

Mg. Ing. Alex Sander IRCAÑAÚPA HUAMANI  
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado  
Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil

# Modelo hidrológico para predecir caudales extremos bajo la influencia de la variabilidad climática en el sistema de riego Mollepunco, distrito de Llauta, Ayacucho

*por* Stefanny Yahaira PALACIOS REYMUNDEZ

---

**Fecha de entrega:** 19-sept-2025 03:30p. m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2756034166

**Nombre del archivo:** Te\_Stefanny\_Yahaira\_Palacios\_Reymundez.pdf (6.38M)

**Total de palabras:** 26744

**Total de caracteres:** 143881

# Modelo hidrológico para predecir caudales extremos bajo la influencia de la variabilidad climática en el sistema de riego Mollepunco, distrito de Llauta, Ayacucho

## INFORME DE ORIGINALIDAD

11%

INDICE DE SIMILITUD

10%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	3%
2	repositorio.ucss.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
4	vsip.info Fuente de Internet	1%
5	livrosdeamor.com.br Fuente de Internet	<1%
6	www.bancomundial.org Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.uasb.edu.ec Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.upla.edu.pe Fuente de Internet	<1%

---

9	RUTH KARIME SEDANO CRUZ. "Influencia de la variabilidad climática en la modelación estadística de extremos hidrológicos en el Valle Alto del río Cauca, Colombia.", Universitat Politecnica de Valencia, 2017 Publicación	<1 %
10	bdigital.dgse.uaa.mx:8080 Fuente de Internet	<1 %
11	www.repositorio.usac.edu.gt Fuente de Internet	<1 %
12	repositorio.ana.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
13	www.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
14	www.kerwa.ucr.ac.cr Fuente de Internet	<1 %
15	www.dspace.espol.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
16	L Y APE CONTRATISTAS GENERALES E.I.R.L. "Informe de Gestión Ambiental del Proyecto Creación del Servicio de Agua para Riego Mediante el Represamiento de la Laguna Challhua para el Sector Pampas de Caypan-IGA0016363", R.D.G. N° 150-2016-MINAGRI-DVDIAR-DGAAA, 2022 Publicación	<1 %

---

---

17

doczz.net

Fuente de Internet

<1 %

---

18

Submitted to uncedu

Trabajo del estudiante

<1 %

---

19

repositorio.uchile.cl

Fuente de Internet

<1 %

---

---

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

< 30 words

Excluir bibliografía

Activo