

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

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

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

**Desarrollo de un modelo computacional mediante simulación de
escenarios hídricos para evaluar la eficiencia del sistema de agua
potable Ccahuanamarca, distrito de Colta, provincia de Paucar
del Sarasara, Ayacucho.**

Para optar el título profesional de:

INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

Bach. Ronal Santos ANCCARE MALDONADO

ASESOR:

Msc. Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO

AYACUCHO - PERÚ

2026

DEDICATORIA

A mis padres, por su apoyo incondicional y formación en cada etapa de mi vida.

A mis hijos, que son mi motivación para seguir adelante.

A mi hermana, por su constante apoyo y ser mi ejemplo a seguir.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

AYACUCHO, OCTUBRE DEL 2025

Bach. ANCCARE MALDONADO, Ronal Santos

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por todo lo que me ha regalado en la vida, por permitirme continuar con salud y ser la luz de mi camino.

A mis padres por ser los principales impulsores de mis sueños, por la confianza y expectativas que depositan en mí todos los días.

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, docentes e ingenieros, por todas las enseñanzas impartidas en mi formación académica.

Al Mgtr. Ing. Jaime Leonardo Bendezú Prado, por su tiempo compartido durante las asesorías, proporcionándome las herramientas necesarias para la elaboración de este proyecto.

A familiares y amigos involucrados directa e indirectamente en el desarrollo de este proyecto.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

AYACUCHO, OCTUBRE DEL 2025

Bach. ANCCARE MALDONADO, Ronal Santos

RESUMEN

El acceso al agua potable es esencial para el bienestar y el progreso de las comunidades. Sin embargo, en la localidad de Ccahuanamarca, en Ayacucho, la escasez de agua y los problemas de eficiencia en su sistema de distribución representan desafíos considerables. En respuesta a esta situación, esta tesis tiene como propósito principal la creación de un modelo computacional mediante la simulación de escenarios hídricos para evaluar la eficiencia del sistema de agua potable en la región. Los objetivos específicos son: evaluar la disponibilidad y calidad del recurso hídrico, desarrollar el modelo de simulación y, finalmente, aplicar el modelo para analizar la eficiencia actual del sistema. Para ello, se diseñaron varios experimentos y simulaciones basados en datos hidrológicos de la Autoridad Nacional del Agua, los cuales contemplan escenarios como sequías y lluvias intensas. Estos escenarios permitieron recrear y evaluar las condiciones reales de disponibilidad y demanda de agua en distintos meses y periodos. Entre los resultados obtenidos, se encontró que, en los meses de baja disponibilidad, como junio y julio, el caudal es prácticamente nulo ($0 \text{ m}^3/\text{s}$), lo que subraya la necesidad de sistemas de almacenamiento y gestión más eficientes para superar la estacionalidad en la oferta hídrica. Asimismo, el análisis de la calidad del agua reveló parámetros dentro de los límites adecuados para el consumo humano, pero la eficiencia de distribución sigue siendo un área crítica para mejorar. En conclusión, el modelo computacional desarrollado facilita la identificación de áreas críticas en el sistema de agua potable y permite la planificación de estrategias de mejora. Esta herramienta es esencial para el diseño de políticas de gestión del agua sostenibles, asegurando un suministro continuo y eficiente para la comunidad.

Palabras Claves: Calidad del agua, Eficiencia, Escenarios hídricos, Modelo computacional, Simulación.

ABSTRACT

Access to drinking water is fundamental for the well-being and development of communities. However, in the town of Ccahuanamarca, Ayacucho, water scarcity and efficiency problems in its distribution system represent considerable challenges. In response to this situation, the general objective of this thesis is to develop a computational model by simulating water scenarios to evaluate the efficiency of the drinking water system in the region. The specific objectives are: to evaluate the availability and quality of the water resource, to develop the simulation model and, finally, to apply the model to analyze the current efficiency of the system. For this purpose, several experiments and simulations were designed based on hydrological data from the National Water Authority, which contemplate scenarios such as droughts and intense rains. These scenarios made it possible to recreate and evaluate the real conditions of water availability and demand in different months and periods. Among the results obtained, it was found that in months of low availability, such as June and July, the flow rate is practically zero ($0 \text{ m}^3/\text{s}$), which underlines the need for more efficient storage and management systems to overcome seasonality in the water supply. Likewise, the water quality analysis revealed parameters within adequate limits for human consumption, but distribution efficiency remains a critical area for improvement. In conclusion, the computational model developed facilitates the identification of critical areas in the drinking water system and allows the planning of improvement strategies. This tool is essential for the design of sustainable water management policies, ensuring a continuous and efficient supply for the community.

Keywords: Water quality, Efficiency, Water scenarios, Computational model, Simulation.

INTRODUCCIÓN

El derecho a acceder a agua potable de calidad es fundamental y crucial para el desarrollo y la salud de las comunidades, especialmente en áreas rurales donde la disponibilidad del recurso es limitada y está sujeta a variaciones estacionales. En la localidad de Ccahuanamarca, Ayacucho, la escasez y variabilidad del agua representan desafíos que afectan tanto a la calidad de vida de la población como a la sostenibilidad de su sistema de abastecimiento.

Diversos estudios e investigaciones en el campo de la gestión hídrica han abordado el uso de modelos computacionales para proyectar escenarios de disponibilidad de agua y para optimizar los sistemas de distribución en contextos rurales. Las simulaciones hidrológicas, que integran datos climáticos y geográficos, han demostrado ser herramientas efectivas para anticipar la demanda, optimizar el almacenamiento y asegurar un abastecimiento continuo, incluso en regiones afectadas por el cambio climático. Sin embargo, estos enfoques requieren ser adaptados a las características específicas de cada región para ser realmente efectivos.

En Ccahuanamarca, el problema radica en la eficiencia limitada de su sistema de agua potable, el cual enfrenta desafíos tanto en la captación y almacenamiento del recurso, como en su distribución durante los meses de menor disponibilidad. Para abordar esta problemática, se ha adoptado un enfoque basado en la simulación de escenarios hídricos mediante un modelo computacional, que permitirá evaluar distintas condiciones climáticas (como sequías y periodos de lluvias intensas) y su impacto en el sistema de suministro de agua potable en la comunidad.

El presente documento está estructurado en cuatro capítulos. El primer capítulo presenta el planteamiento del problema, los objetivos y la justificación del estudio. El segundo capítulo desarrolla el marco teórico necesario para comprender la dinámica de los recursos hídricos y los modelos de simulación. En el tercer capítulo se describe la metodología adoptada, incluyendo la recopilación de datos y el diseño del modelo computacional. Finalmente, el cuarto capítulo expone los resultados del modelo y las recomendaciones para optimizar la efectividad del sistema de abastecimiento de agua potable en Ccahuanamarca.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
INTRODUCCIÓN	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
GLOSARIO	xiii
ACRÓNIMOS	xiv
SÍMBOLOS	xv
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
1.1. Descripción del problema.....	16
1.2. Delimitación del problema	17
1.2.1. Espacial (geográfica)	17
1.2.2. Temática y unidad de análisis	17
1.3. Formulación del problema.....	18
1.3.1. Problema general.....	18
1.3.2. Problemas específicos	18
1.4. Justificación e importancia	18
1.4.1. Justificación	18
1.4.2. Importancia	19
1.5. Limitaciones de la investigación	20
1.6. Objetivos	20
1.6.1. Objetivo general	20
1.6.2. Objetivos específicos	20
II. MARCO TEÓRICO.....	21

2.1.	Antecedentes	21
2.1.1.	Investigaciones internacionales.....	21
2.1.2.	Investigaciones nacionales	22
2.2.	Bases teóricas	23
2.2.1.	Uso de recursos hídricos de agua potable	23
2.2.2.	Ciclo Hidrológico	29
2.2.3.	Enfoques en torno a la gestión del agua	31
2.2.4.	Cuencas Hidrográficas	32
2.2.5.	Manejo integrado de cuencas hidrográficas	33
2.2.6.	Gestión de recursos hídricos en cuencas hidrográficas.....	33
2.2.7.	Cambio Climático	42
2.2.8.	Variables asociadas a fallas.....	45
2.2.9.	Modelos computacionales derivadas en Programación.....	47
2.3.	Marco Conceptual	51
III.	MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN.....	54
3.1.	Enfoque	54
3.2.	Alcance	54
3.3.	Diseño de investigación	54
3.4.	Población y muestra.....	55
3.4.1.	Población	55
3.4.2.	Muestra.....	56
3.5.	Hipótesis	56
3.5.1.	Hipótesis general	56
3.5.2.	Hipótesis específicas	56
3.6.	Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional.....	57
3.7.	Técnicas e instrumentos	59
3.7.1.	Técnicas	59
3.7.2.	Instrumentos	59

3.8.	Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información	59
3.9.	Desarrollo de Trabajo de Tesis	60
3.9.1.	Evaluación Hidrológica.....	60
3.9.2.	Oferta Hídrica.....	71
3.9.3.	Usos y Demandas de Agua.....	76
3.9.4.	Balance Hídrico.....	79
3.9.5.	Descripción del Plan de Aprovechamiento e Ingeniería del Proyecto	81
3.10.	Validación del modelo computacional.....	82
3.10.1.	Enfoque de validación	82
3.10.2.	Criterios de validación	83
3.10.3.	Validación cuantitativa.....	83
3.10.4.	Indicador de error	83
3.10.5.	Conclusión de validación	83
IV.	RESULTADOS.....	84
4.1.	Proyección de Disponibilidad de Agua	84
4.2.	Escenario hídrico de lluvias extensas.....	88
4.3.	Escenario hídrico al 75% de permanencia	91
4.4.	Contrastación de Hipótesis	93
4.4.1.	Hipótesis general	93
4.4.2.	Criterio de contrastación	94
4.4.3.	Evidencia cuantitativa	94
	CONCLUSIONES	96
	RECOMENDACIONES	97
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
	ANEXOS	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipo de Clase de corriente	36
Tabla 2 Tipo de Clase de escurrimiento.....	37
Tabla 3 Cuadro de Operacionalización de variables	58
Tabla 4 Ubicación Geográfica	61
Tabla 5 Ubicación Hidrográfica	62
Tabla 6 Rutas de Acceso y Tiempos Estimados hacia Ccahuanamarca desde Ayacucho	63
Tabla 7 Calidad de agua	63
Tabla 8 Superficie y contorno de la Quebrada Ccahuanamarca	64
Tabla 9 Determinación de la altitud promedio de la Quebrada Ccahuanamarca	64
Tabla 10 Tiempo de concentración de la Quebrada Ccahuanamarca	66
Tabla 11 Determinación de la densidad de drenaje de la Quebrada Ccahuanamarca	67
Tabla 12 Parámetro y Valor de la densidad de drenaje de la Quebrada Ccahuanamarca	67
Tabla 13 Determinación de la densidad de drenaje de la Quebrada Ccahuanamarca	68
Tabla 14 Parámetro y Valor de la densidad de drenaje de la Quebrada Ccahuanamarca	68
Tabla 15 Localización de las estaciones climatológicas empleadas.....	72
Tabla 16 Elevación y la precipitación anual promedio de las estaciones.....	72
Tabla 17 Coeficiente de transmisión de la Quebrada	73
Tabla 18 Promedios mensuales de caudal de descarga en la Quebrada Ccahuanamarca	73
Tabla 19 Flujos ecológicos estimados para la Quebrada Ccahuanamarca	74
Tabla 20 Fórmula de regresión aplicada a la Quebrada Ccahuanamarca.....	74
Tabla 21 Flujo con un 75% de persistencia en la Quebrada Ccahuanamarca.....	75
Tabla 22 Estimación de la disponibilidad de agua en la Quebrada Ccahuanamarca... ..	75
Tabla 23 Flujo registrado en la captación utilizando el método de volumen	76
Tabla 24 Estimación de los caudales de oferta mensuales para la captación Colta	76
Tabla 25 Usos y Demandas de Agua.....	77
Tabla 26 Información general de la región de Ccahuanamarca	77
Tabla 27 Flujo medio diario de la zona favorecida	78
Tabla 28 Flujo medio diario de la región beneficiada	78
Tabla 29 Requerimiento de agua para la captación de Colta	79
Tabla 30 Balance Hídrico	79

Tabla 31 Equilibrio de agua en la Quebrada Ccahuanamarca	80
Tabla 32 Captación.....	81
Tabla 33 Localización del Reservorio.....	82
Tabla 34 Medidas y Capacidad del Reservorio	82
Tabla 35 Proyección de la disponibilidad de agua mensual	85
Tabla 36 Datos del escenario de Lluvias Extensas	90
Tabla 37 Datos de escenario de 75% de probabilidad de permanencia.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Perímetro y longitud de una cuenca	35
Figura 2 Asignación en el Orden de corrientes	36
Figura 3 Variación de una cuenca	39
Figura 4 Grupo de escenarios IE-EE	44
Figura 5 Sistema de drenaje de la unidad hidrográfica de Ccahuanamarca	67
Figura 6 Caudal medio mensual de la Quebrada Ccahuanamarca en m ³ /s	86

GLOSARIO

Escurrimiento de agua subterránea	:	Flujo de agua que se filtra desde cuerpos de agua superficiales, como ríos y lagos, hacia el océano, manteniendo niveles de agua subterránea.
Evaporación	:	Proceso mediante el cual el agua cambia de líquido a vapor, contribuyendo al ciclo hidrológico.
Infiltración	:	Movimiento del agua hacia el subsuelo, alimentando los acuíferos.
Evapotranspiración	:	Combinación de evaporación y transpiración, proceso por el cual el agua regresa a la atmósfera.

ACRÓNIMOS

ANA : Autoridad Nacional del Agua

GIRH : Gestión Integral de los Recursos Hídricos

SÍMBOLOS

Q	: Caudal de agua en metros cúbicos por segundo (m^3/s)
msnm	: Metros sobre el nivel del mar
P	: Precipitación (mm) - Cantidad de lluvia o nieve caída en una zona y tiempo específicos.
ET	: Evapotranspiración (mm) - Pérdida de agua en el suelo debida a la evaporación y transpiración de las plantas.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

A nivel global, el acceso al agua potable, así como a servicios de saneamiento e higiene, constituye una necesidad básica para la salud y el bienestar humano. No obstante, se estima que miles de millones seguirán sin estos servicios esenciales en 2030, a menos que los avances actuales se multipliquen por cuatro. El rápido crecimiento poblacional, la urbanización y las crecientes demandas hídricas en sectores como la agricultura, industria y energía son factores clave que han elevado notablemente la demanda de agua. En este momento, aproximadamente la mitad del mundo enfrenta serias carencias de agua durante al menos un mes cada año; esta situación podría agravarse debido al cambio climático y al incremento de las temperaturas globales (Moran, 2022). Para asegurar el acceso universal a agua potable segura y asequible para 2030 es crucial invertir en infraestructura sanitaria, así como proteger y restaurar los ecosistemas relacionados con el recurso hídrico. Asimismo, resulta vital fomentar educación sobre prácticas higiénicas. Desde 2015 hasta ahora ha aumentado del 69% al 73% la proporción mundial con acceso a servicios seguros de abastecimiento de agua; sin embargo, en 2022 aún había alrededor de 2200 millones personas sin dicha gestión adecuada del suministro acuático. (UN-Water, 2024).

A nivel nacional en Perú, 3.3 millones de personas carecen de acceso a una red pública de agua potable, mientras que 6.4 millones no tienen conexiones de alcantarillado. El acceso a agua potable y servicios de saneamiento es fundamental para la salud pública, especialmente en zonas rurales, donde se estima que dos de cada diez niños menores de cinco años sufren desnutrición, y la mitad de los niños entre seis y treinta y seis meses padecen anemia. Se ha demostrado que el suministro de agua potable reduce la incidencia de diarrea, lo cual, a su vez, disminuye el riesgo de desnutrición crónica en la infancia. La gestión sostenible del agua no solo favorece la producción agrícola y energética, sino que también impulsa el crecimiento económico y protege los ecosistemas acuáticos, ayudando a mitigar el cambio climático. (SUNASS, 2022).

A nivel local, la región de Ayacucho enfrenta desafíos considerables en cuanto a la gestión y acceso a los recursos hídricos, que se ven impactados por la variabilidad climática que afecta el suministro de agua para uso humano y agrícola. Aunque ha

habido una ligera mejora en la cobertura de agua potable, alcanzando un 91.94% en 2021, problemas críticos persisten como el porcentaje de agua no facturada, que representó un 28.60% ese mismo año. La infraestructura inadecuada y la falta de inversiones sostenibles han empeorado esta situación, afectando particularmente a las comunidades rurales que dependen tanto del recurso hídrico superficial como subterráneo. Además, la calidad del agua frecuentemente no cumple con los estándares requeridos para su consumo seguro; muchas áreas rurales carecen también de sistemas sanitarios adecuados lo cual incrementa el riesgo asociado a enfermedades transmitidas por este medio. En el distrito de Colta es esencial mejorar tanto la captación como distribución del agua para satisfacer las necesidades básicas de la población y fomentar así un desarrollo sostenible dentro de esta región. (SUNASS, 2023).

Para resolver estos desafíos, se creará un modelo computacional que simule diferentes escenarios relacionados con el agua, con la finalidad de analizar la eficacia del sistema de abastecimiento de agua potable en Ccahuanamarca. Este enfoque facilitará la identificación de zonas problemáticas y optimizará la administración del recurso hídrico, mejorando su distribución para asegurar un suministro seguro y constante a los habitantes, además de fomentar un desarrollo sostenible en el área.

1.2. Delimitación del problema

1.2.1. Espacial (geográfica)

La delimitación geográfica del problema se enfoca en el distrito de Colta, ubicado en la provincia de Paucar del Sarasara, dentro de la región de Ayacucho, Perú. Esta zona ha sido elegida como objeto de estudio por sus condiciones climáticas diversas y los retos particulares que presenta respecto a la gestión y disponibilidad de recursos hídricos.

1.2.2. Temática y unidad de análisis

Temática: La investigación se centra en la valoración y mejora de la eficacia de los sistemas de abastecimiento de agua potable, a través del diseño de un modelo informático que recree diferentes escenarios relacionados con el recurso hídrico.

Unidad de análisis: La unidad de análisis comprende el sistema de agua potable de la localidad de Ccahuanamarca en el distrito de Colta.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Cómo crear un modelo computacional a través de la simulación de escenarios hídricos que facilite la evaluación de la eficacia del sistema de agua potable en Ccahuanamarca, ubicado en el distrito de Colta, provincia de Paucar del Sarasara, Ayacucho?

1.3.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es la disponibilidad y calidad del recurso hídrico en el sistema de agua potable de Ccahuanamarca?
- ¿Cómo se puede desarrollar un modelo de simulación computacional que permita recrear diferentes escenarios hídricos para el sistema de agua potable de Ccahuanamarca?
- ¿Cómo se puede simular el modelo desarrollado para medir la eficiencia actual del sistema de agua potable de Ccahuanamarca?

1.4. Justificación e importancia

1.4.1. Justificación

La presente investigación se fundamenta en la necesidad apremiante de optimizar la gestión y eficacia del sistema de abastecimiento de agua potable en Ccahuanamarca, que forma parte del distrito de Colta, provincia de Paucar del Sarasara, Ayacucho. Esta área enfrenta retos significativos debido a las fluctuaciones climáticas y a una escasa disponibilidad de recursos hídricos, lo que repercute negativamente en la salud y el bienestar de sus habitantes. En este momento, el sistema hídrico en Ccahuanamarca presenta deficiencias tanto en la captación como en la distribución del agua. Asimismo, la ausencia de una administración adecuada y falta inversiones sostenibles han empeorado esta situación, afectando particularmente a las

comunidades rurales que dependen tanto de fuentes superficiales como subterráneas para su suministro acuático.

El desarrollo de un modelo computacional a través de la simulación de escenarios hídricos permitirá evaluar con precisión la eficacia del sistema de abastecimiento de agua potable. Este modelo será capaz de identificar zonas críticas, optimizar tanto la captación como la distribución del agua y mejorar la calidad del recurso hídrico. Además, las simulaciones proporcionarán una herramienta valiosa para planificar y tomar decisiones fundamentadas en datos confiables. De este modo, se contribuirá a mitigar el estrés hídrico, asegurar un suministro seguro y continuo para la comunidad y fomentar la sostenibilidad del recurso hídrico en esta región. Esta estrategia integral es esencial para abordar los desafíos actuales y futuros relacionados con la gestión del agua en Ccahuanamarca.

1.4.2. *Importancia*

La importancia de este estudio radica en su capacidad para ofrecer soluciones prácticas y sostenibles a los desafíos relacionados con la gestión del agua en Ccahuanamarca. A través del desarrollo y la implementación de un modelo computacional, será posible simular distintos escenarios hídricos, lo que facilitará una planificación más efectiva y decisiones fundamentadas en datos precisos. Los resultados obtenidos no solo beneficiarán a la comunidad local de Ccahuanamarca, sino que también podrían servir como referencia útil para otras áreas enfrentando problemas similares. Este aspecto es esencial, dado que tanto la disponibilidad como la calidad del agua son factores clave para el bienestar público, el crecimiento económico y la sostenibilidad ambiental.

Además, esta investigación contribuirá a la conservación y recuperación de los ecosistemas vinculados al agua, promoviendo la biodiversidad y la resiliencia frente al cambio climático. El uso de un modelo de simulación hídricamente eficiente no solo optimizará el uso de los recursos disponibles, sino que también permitirá identificar y mitigar los riesgos asociados con la escasez de agua y eventos climáticos extremos. De esta manera, se fomentará una gestión integral y adaptativa del recurso hídrico, alineada con los fines de desarrollo sostenible y la agenda ambiental global.

1.5. Limitaciones de la investigación

La investigación presenta las siguientes limitaciones que deben ser tenidas en cuenta:

- - La efectividad y precisión del modelo computacional dependen en gran medida de la calidad y cantidad de los datos disponibles. La información relacionada con el clima, los recursos hídricos y la infraestructura podría estar incompleta o tener deficiencias, lo cual puede afectar la precisión de las simulaciones.
- - En Ayacucho se observa una considerable variabilidad climática, lo que introduce un grado significativo de incertidumbre a las proyecciones e inferencias sobre el agua. Las alteraciones en los patrones de precipitación y temperatura, agravadas por el cambio climático, pueden impactar la disponibilidad hídrica y complicar así la planificación a largo plazo.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo computacional a través de la simulación de escenarios hídricos con el fin de analizar la eficacia del sistema de agua potable en Ccahuanamarca, ubicado en el distrito de Colta, dentro de la provincia Paucar del Sarasara, Ayacucho.

1.6.2. Objetivos específicos

- - Analizar la accesibilidad y el estado del recurso hídrico en el sistema de suministro de agua potable de Ccahuanamarca.
- - Crear un modelo informático que facilite la recreación de diversos escenarios hídricos para el sistema de agua potable en Ccahuanamarca.
- - Ejecutar simulaciones con el modelo creado para evaluar la eficiencia actual del sistema de abastecimiento de agua potable en Ccahuanamarca.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Investigaciones internacionales

López y Muñoz (2022) en su tesis *“Modelo de simulación de alto nivel de abstracción para el análisis de escenarios del agua en Chile”*, Se buscó identificar los posibles escenarios hídricos en Chile mediante la elaboración de un modelo computacional que resalte aspectos clave del uso del agua y sea accesible al público general. La metodología incluyó la conceptualización de cómo interactúan el agua y las personas en una región específica, con base en conocimientos científicos presentados de manera comprensible para quienes no son especialistas. Se utilizó Vensim PLE para desarrollar un modelo computacional capaz de realizar proyecciones y simulaciones sobre futuros escenarios relacionados con el agua. Los resultados indicaron que dicho modelo es sólido y sensible a cambios en los datos ingresados, lo cual permite estimar diversos escenarios hídricos subrayando así la relevancia del comportamiento humano en el consumo y manejo del recurso hídrico.

Cazar y Deidán (2023), en su investigación titulada "Modelización del comportamiento de la red de distribución de agua potable en el sector Cebollar 3.2 Centro mediante un modelo hidráulico para evaluar la vulnerabilidad operativa del sistema", se propusieron simular el funcionamiento de la red de distribución de agua potable en dicho sector a través de un modelo hidráulico, con el objetivo principal de analizar la vulnerabilidad operativa del sistema. La metodología utilizada incluyó la recopilación de datos proporcionados por ETAPA EP., así como el desarrollo y calibración del modelo hidráulico utilizando software especializado, apoyándose además en mediciones obtenidas directamente en campo. Los resultados mostraron que, tras ser calibrado y validado, el modelo hidráulico es capaz de simular con precisión las operaciones del sistema y evaluar diversas situaciones operativas, lo cual facilita una mejor toma de decisiones para optimizar tanto la gestión como operación de la red hídrica.

Pozo (2024), en su investigación titulada “Evaluación de la disponibilidad hídrica en la Cuenca Alta del Río Guayllabamba ante el impacto de escenarios de cambio climático: Proyección de futuras condiciones de disponibilidad de agua fundamentadas

en eventos climáticos extremos registrados previamente”, se propuso analizar la futura disponibilidad de agua en dicha cuenca aplicando el modelo hidrológico GR4J a nivel diario, basado en eventos climáticos extremos documentados anteriormente. La metodología incluyó la recopilación y procesamiento de datos hidrometeorológicos, así como el uso del software RStudio para calibrar y validar dicho modelo. Los hallazgos revelaron que el modelo GR4J puede simular con precisión los caudales dentro de la cuenca al considerar distintos escenarios relacionados con el cambio climático. Se destacó que las precipitaciones ejercen una influencia considerable sobre los caudales observados, lo que convierte al modelo en una herramienta útil para prever la disponibilidad hídrica bajo diversas condiciones climáticas futuras.

2.1.2. Investigaciones nacionales

Ramírez (2024), en su investigación doctoral titulada “Modelo predictivo basado en redes neuronales artificiales para pronosticar el consumo de agua potable en la ciudad de Iquitos”, propuso la creación de un modelo que utiliza redes neuronales artificiales con el objetivo de estimar con precisión el uso del agua potable. La metodología empleada incluyó el diseño de una herramienta dirigida a las empresas encargadas del saneamiento, buscando así optimizar la gestión del suministro hídrico. Se identificaron como variables predictivas tanto la temperatura máxima y mínima como las precipitaciones y la población total de Iquitos; mientras que se buscó predecir específicamente el consumo de agua. El modelo aplicado fue un perceptrón multicapa, diseñado con 4 neuronas en su capa inicial, 2 capas ocultas compuestas por 10 neuronas cada una, y una única neurona al final, utilizando el algoritmo backpropagation para llevar a cabo su entrenamiento. Los resultados alcanzados mostraron un margen de error inferior al 5%, siendo validados mediante métricas tales como coeficiente de regresión (r), coeficiente determinante (R^2) y Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE), lo cual demuestra una notable efectividad y rendimiento positivo sobre diversos conjuntos de datos.

Avalos et al. (2021), en su estudio titulado “Control de presiones y reducción de pérdidas en el sistema de distribución de agua potable del Sector VI - Augusto B. Leguía de Tacna”, se propusieron gestionar las pérdidas y las presiones del agua potable en esta área específica de Tacna. Para ello, llevaron a cabo la identificación del índice correspondiente a dichas pérdidas y evaluaron la funcionalidad tanto de las válvulas

reductoras como del conjunto general del sistema hídrico. La metodología utilizada fue descriptiva con un enfoque basado en campo, combinando técnicas cuantitativas y cualitativas. Se realizaron observaciones directas junto con cálculos matemáticos utilizando herramientas adecuadas para medición. Los hallazgos revelaron que es esencial medir inicialmente el índice de pérdida para optimizar la eficiencia operativa; sobre esta base, se debe implementar un plan estratégico orientado hacia la disminución efectiva estas pérdidas mediante evaluaciones hidráulicas, control adecuado de presión u otras acciones operacionales pertinentes.

Vicencio (2021), en su tesis titulada “Modelo de gestión hídrica para el suministro de agua a la población en Lima y evaluación de escenarios”, se propuso desarrollar un modelo para la gestión del agua en Lima, utilizando el programa WEAP para modelar el sistema hidráulico correspondiente a las cuencas del Chillón, Rímac, Lurín y la zona influenciada por Alto Mantaro. La metodología implementada incluyó una evaluación del balance hídrico durante los años 1965-2018 junto con proyecciones hacia futuros escenarios. Los resultados mostraron que en 2018 los embalses alcanzaban un nivel regulador de 250,6 hm³ respecto a un volumen útil total de 361,4 hm³; este último incluía también un volumen reservado de 110,8 hm³. A lo largo del periodo analizado (1965-2018), se registró un déficit medio del 9%. En relación con los escenarios proyectados: se estimó un déficit del 6% bajo condiciones tendenciales sin nuevos proyectos; solo el 0,3% con nuevas iniciativas; mientras que ante un crecimiento elevado sin proyectos podría llegar al 12%, y al considerar proyectos sería aproximadamente del 1%.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. *Uso de recursos hídricos de agua potable*

El agua potable constituye un recurso fundamental para la existencia y es el más relevante de los recursos naturales en nuestro país. Se encuentra en el centro de las estructuras económicas, ambientales y productivas que sustentan el desarrollo social. En este contexto, los recursos hídricos son considerados cruciales para el progreso de la sociedad. La correcta disponibilidad y gestión del agua son esenciales para sectores como la agricultura, la industria, la salud pública y el bienestar general, subrayando su relevancia en todos los ámbitos del desarrollo humano sostenible. (UNESCO, 2003).

2.2.1.1. Agua Potable

El agua destinada al consumo humano abarca aquella utilizada para beber, cocinar, lavar y bañarse, así como la de las piscinas. Debe ser adecuada para el uso personal y cumplir con normas de calidad que aseguran que no representa riesgos significativos para la salud a lo largo de su vida útil. Esto incluye tanto el agua embotellada como el hielo. El agua potable se somete a tratamientos y procesos de purificación que eliminan impurezas, microorganismos y contaminantes, garantizando así su seguridad para el consumo humano (Gómez, 2008).

- **Sistema de Abastecimiento de Agua Potable:** Se define como un sistema de infraestructuras y componentes que proporciona respaldo administrativo y operativo para satisfacer las necesidades humanas, abarcando desde la recolección y almacenamiento hasta la entrega del agua en los hogares. Su propósito fundamental es garantizar una disponibilidad constante de agua potable de calidad, asegurando su accesibilidad. Este sistema abarca la captación, el tratamiento, el almacenamiento y la distribución del agua destinada al consumo humano, cumpliendo con rigurosos estándares destinados a salvaguardar la salud pública. (Ricardos, 2018).
- **Calidad de Agua Potable:** La evaluación de la calidad del agua potable se realiza al comparar los resultados de análisis físicos, químicos y microbiológicos con las normas establecidas a nivel nacional e internacional durante su almacenamiento o distribución. Es fundamental que el monitoreo de estos parámetros asegure que no representen riesgos relevantes para la salud humana a lo largo de su vida útil (OMS, 2006).
- **Monitoreo de Calidad de Agua Potable:** El control de la calidad del agua consiste en examinar y analizar los parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua conforme a las regulaciones nacionales. Este procedimiento garantiza que el agua proporcionada cumpla con los estándares óptimos de calidad para el consumo humano (MINSA, 2011).
- **Muestreo de Agua Potable:** El muestreo de agua potable es un proceso normativo destinado a obtener una muestra que sea representativa del total. Este

procedimiento implica la recolección cuidadosa de una muestra particular en un lugar y momento específicos, reflejando las características físicas, químicas o microbiológicas presentes en ese instante y ubicación (Macarlupú, 2023).

- **Ciclo Hídrico:** El ciclo del agua es el proceso natural mediante el cual se mueve el agua en la Tierra. Este incluye la evaporación de cuerpos acuáticos como ríos, lagos y océanos, que al condensarse forman nubes, las cuales luego precipitan en forma de lluvia o nieve. Tal proceso resulta esencial para preservar el equilibrio hídrico global, ya que redistribuye y renueva los recursos hídricos en los ecosistemas terrestres, regula las condiciones climáticas y apoya a la vida. (Torres, 2019).
- **Población Rural:** La población rural está compuesta por individuos que residen en zonas distantes de las ciudades y áreas urbanas. El acceso al agua potable en estas regiones se ve impedido por factores como la geografía y la carencia de infraestructura adecuada. Es fundamental implementar soluciones sostenibles y adaptadas para garantizar el suministro de agua segura a estas comunidades (Aparicio, 2023)
- **Método Volumétrico:** El método volumétrico se utiliza para medir el caudal de agua, determinando la cantidad de agua que se desplaza a través de una tubería o fuente durante un período específico. Esta técnica es crucial para evaluar el rendimiento y la eficiencia de los sistemas hidráulicos, proporcionando datos fundamentales para la administración sostenible del recurso hídrico (Aparicio, 2023)
- **Caudal:** El caudal se refiere al volumen de agua que fluye en un periodo de tiempo determinado, el cual se expresa comúnmente en litros por segundo o metros cúbicos por hora. Esta medida es fundamental para evaluar el flujo de agua dentro de los sistemas hidráulicos, y su adecuada medición y control son cruciales para una gestión eficiente y sostenible del recurso hídrico. (Aparicio, 2023).

2.2.1.2. Componentes de un Sistema de Agua Potable

Según Agüero (1997), Los componentes esenciales de un sistema de suministro de agua potable en zonas rurales inician con la cámara de captación. La selección del recurso hídrico es crucial y constituye el primer paso en la implementación del sistema. Esta estructura se sitúa donde emerge el agua, permitiendo su recolección y posterior transporte a través de tuberías hacia un tanque almacenamiento. Es esencial que esta infraestructura sea diseñada y dimensionada adecuadamente, teniendo en cuenta factores como la topografía, las características del suelo y el tipo de manantial para asegurar que no se afecten negativamente ni la calidad, ni la temperatura o caudal del agua.

Las fuentes de agua se clasifican en tres tipos principales:

- **Agua de lluvia:** Se incorpora a embalses y ríos a través de escorrentías, dando lugar a manantiales tanto superficiales como subterráneos.
- **Agua superficial:** Proviene de cuerpos de agua naturales o excavaciones, que se generan a partir del escurrimiento de las lluvias.
- **Agua subterránea:** La entrada de agua pluvial en la zona saturada del suelo resulta en su recuperación a través de fuentes, pozos y galerías filtrantes.

A. Línea de Conducción

El Reglamento Nacional de Edificaciones identifica dos métodos para transportar el agua en un sistema de agua potable:

- **Por gravedad:** Utiliza la carga estática para transportar el agua desde la captación hasta el reservorio. Es fundamental optimizar la energía accesible y emplear el diámetro de tubería más reducido que asegure presiones dentro de los límites del material. La instalación de tuberías se adapta al contorno del terreno, lo que puede hacer necesario incluir dispositivos como cámaras para romper presión, válvulas de aire o válvulas de desagüe.
- **Por bombeo:** Se utiliza en situaciones donde se requiere un impulso adicional para alcanzar la carga dinámica necesaria para el desplazamiento del agua, particularmente en fuentes que no cuentan con suficiente elevación. Esto implica

la necesidad de contar con un sistema de bombeo especializado capaz de proporcionar la energía requerida.

B. Reservorio

Lozano (2018) resalta la relevancia de un reservorio en un sistema de agua potable para asegurar una prestación constante y eficaz. Cuando el caudal de la fuente es inferior al consumo máximo por hora, se hace necesario contar con un reservorio para almacenamiento. La construcción de dicho reservorio resulta ser más económica que Usar tuberías de mayor tamaño en ciertas situaciones. Los diferentes tipos de tanques incluyen:

- **Reservorios de cabecera:** Abastecen a la población de manera directa y se nutren de la captación o PTAP. Pueden recibir apoyo o ser elevados.
- **Reservorios flotantes:** Funcionan como reguladores de presión entrada y salida de agua a través de la misma tubería.
- **Estaciones de bombeo:** Se emplean sistemas de bombeo para el traslado del agua, los cuales incluyen elementos tales como rejillas, tuberías de presión, bombas, cámaras de succión y servicios complementarios.

C. Red de Distribución

La red de distribución de agua, tal como señala Lozano (2018), está compuesta por una serie de tuberías, válvulas, grifos y otros componentes ubicados en las calles, comenzando desde el lugar donde ingresa al pueblo. Es esencial que su diseño considere la ubicación del reservorio para garantizar un suministro suficiente tanto en términos de cantidad como de presión a todos los puntos dentro de la red. Los diferentes tipos de redes incluyen:

- **Sistema abierto o ramificado:** El sistema cuenta con una línea principal de la cual surgen múltiples ramificaciones, lo que resulta beneficioso en regiones de complicado acceso o donde la población se encuentra dispuesta de forma lineal.

- **Sistema cerrado o enmallado:** Se distingue por la existencia de conexiones interrelacionadas que proporcionan una mayor flexibilidad y redundancia.

D. Desinfección del Sistema de Agua

La desinfección asegura que el agua y las instalaciones se mantengan en condiciones limpias y seguras es fundamental. Se emplean desinfectantes como hipoclorito de calcio, cloro gasificado y HTH; entre estos, el hipoclorito de calcio destaca por su elevada concentración de cloro. Es esencial conocer el volumen del sistema para calcular adecuadamente la cantidad necesaria de desinfectante. El control de la contaminación microbiológica tiene como objetivo erradicar microorganismos nocivos y evitar su reintroducción, buscando un equilibrio entre la eliminación efectiva de patógenos y la minimización de subproductos generados durante el proceso de desinfección.

2.2.1.3. Sostenibilidad de un Sistema de Agua Potable

El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS) establece los criterios que determinan la sostenibilidad de un sistema de abastecimiento de agua potable:

- **Sistema sostenible:** Este sistema asegura que los elementos estructurales se mantengan en condiciones óptimas, lo cual permite un suministro adecuado de agua en términos de calidad, cantidad y continuidad. Además, cuenta con una planificación efectiva para la gestión y el mantenimiento de sus instalaciones. (MVCS, 2018).
- **Sistema medianamente sostenible:** Este sistema presenta signos de deterioro en sus estructuras, A continuación, se presentan los problemas que impactan la continuidad, volumen y calidad del agua proporcionada. Estas dificultades son resultado de insuficiencias en la operación y mantenimiento, generadas por una gestión inapropiada y la ausencia de una planificación adecuada para resolver estas deficiencias (MVCS, 2018).
- **Sistema no sostenible:** Estos sistemas presentan importantes carencias en cuanto a la calidad y continuidad del servicio, lo que conlleva una disminución

de la cobertura y una reducción del personal encargado de su gestión. Sin embargo, esta situación puede ser revertida mediante inversiones destinadas a rehabilitar la infraestructura y optimizar las operaciones y el mantenimiento, así como llevando a cabo una reestructuración de las directrices pertinentes. (MVCS, 2018).

- **Sistema colapsado:** Los sistemas se encuentran completamente desatendidos, sin la capacidad de ofrecer el servicio adecuado. En tales situaciones, es esencial desarrollar un nuevo proyecto que satisfaga la demanda de agua potable, ya que no hay una opción factible para su restauración. (MVCS, 2018).

2.2.2. Ciclo Hidrológico

El ciclo del agua describe el movimiento incesante del agua en nuestro planeta, que transita desde la atmósfera hacia el suelo y regresa a la atmósfera. Este proceso incluye varias fases: la evaporación del agua de superficies como océanos, suelos y cuerpos acuáticos; la formación de nubes por medio de condensación; las precipitaciones; la acumulación de agua sobre la superficie terrestre; su desplazamiento superficial; y finalmente, otra vez su evaporación. Este ciclo representa un sistema continuo e interminable que depende fundamentalmente de dos factores: la energía solar, que provoca la evaporación, y la gravedad terrestre, que permite el descenso del agua. a través de las precipitaciones y su flujo sobre la superficie (Baldeon, 2016).

Es relevante destacar que la velocidad del agua fluctúa en cada fase del ciclo y es difícil de prever, tanto en términos temporales como espaciales. Además, a lo largo de este ciclo, las características del agua pueden experimentar alteraciones. Según Chow y colaboradores (1988), este complejo proceso enfatiza la interacción y la dinámica de los sistemas naturales en nuestro planeta.

A continuación, se detallan las etapas del ciclo hidrológico:

- A. Evaporación:** El proceso por el cual el agua se convierte en vapor desde la superficie de los océanos y la tierra, junto con la transpiración de organismos vivos como las plantas, es conocido colectivamente como evapotranspiración. Esta terminología surge debido a la dificultad para diferenciar entre el volumen de agua que se evapora y aquel que es liberado mediante transpiración. Aproximadamente un 10% del total del agua que asciende hacia la atmósfera

proviene de las plantas y otros seres vivos. Además, existe también el fenómeno denominado sublimación, aunque su contribución es mucho menor y ocurre principalmente en superficies heladas como las de los glaciares. Este proceso tiene relevancia dentro del ciclo del agua, pero su impacto cuantitativo sigue siendo limitado. (Vásquez, 2000).

B. Precipitación: La atmósfera libera agua a través de la condensación, lo que se manifiesta en diversas formas como lluvia y rocío, o mediante el proceso de sublimación inversa, dando lugar a nieve y escarcha. Estas precipitaciones se depositan en el suelo o en la superficie terrestre según las condiciones específicas. En el caso de la lluvia, la nieve y el granizo (este último se forma cuando las gotas de lluvia se congelan mientras caen), es la gravedad la que provoca su descenso hacia la tierra. En contraste, el rocío y la escarcha se generan directamente sobre las superficies debido a cambios en su estado físico. (Vásquez, 2000).

C. Infiltración: Sucede cuando el agua que cae al suelo se filtra a través de sus poros y se convierte en agua subterránea. La cantidad de agua infiltrada, comparada con la que fluye sobre la superficie (escorrentía), está determinada por diversos factores como la permeabilidad del suelo, la pendiente del terreno —que puede restringir dicha infiltración— y la presencia de vegetación. Parte del agua que ha penetrado regresa a la atmósfera mediante evaporación o, más notablemente, a través de la transpiración vegetal; las plantas absorben esta agua utilizando raíces extensas y profundas. Además, una proporción del agua subterránea se acumula en acuíferos, capas que contienen tanto agua estancada como en movimiento. En determinadas circunstancias, el agua subterránea puede aflorar a la superficie donde los acuíferos emergen debido a características topográficas específicas. favorables (Vásquez, 2000).

D. Escorrentía: Este concepto se refiere a las diversas formas en que el agua líquida se desplaza cuesta abajo sobre la superficie de la Tierra. En regiones con climas mayormente áridos, como es común en áreas desérticas, la escorrentía juega un papel crucial como agente geológico, siendo fundamental para los procesos de erosión y transporte de sedimentos (Vásquez, 2000).

2.2.3. Enfoques en torno a la gestión del agua

La administración de los recursos hídricos puede ser analizada desde diferentes ángulos, que se clasifican en dos enfoques principales con fines analíticos: el enfoque administrativo (extractivo) y el enfoque integral. La primera toma en cuenta aspectos políticos, institucionales, financieros, estructurales y técnico-operativos. En contraste, el segundo propone una perspectiva multidimensional e integradora que vincula los factores sociales, económicos y ambientales en la gestión del agua; también destaca su conexión sistémica con el bienestar social y ambiental tanto presente como futuro.

El término “crisis del agua” ha sido utilizado por diversas organizaciones para evidenciar las problemáticas hídricas a nivel global durante varios años. Este planteamiento ha promovido un modelo de gestión extractiva y tecnocéntrica enfocado principalmente en la escasez de agua y la construcción de infraestructuras necesarias para satisfacer la creciente demanda de servicios relacionados con el potable. Aunque este método ha logrado mejorar ciertos indicadores sobre acceso y suministro, no ha conseguido reducir los niveles de exclusión social vinculados al recurso hídrico. (Vicencio, 2021).

La ineficacia de este enfoque para abordar los problemas sociales y el deterioro de los recursos hídricos ha llevado a una reevaluación del problema, sugiriendo que su raíz va más allá de la simple escasez de fuentes de agua. En 2007, en su informe titulado “El agua, una responsabilidad compartida”, la ONU presenta la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH) como un método inclusivo y sistémico para enfrentar las dificultades relacionadas con el agua. Este modelo promueve una gestión sostenible de la demanda e incluye a los usuarios como parte activa en la solución. Por lo tanto, se aconseja a los países adaptar su enfoque tradicional sobre el suministro de agua hacia uno que considere su gestión solicitada como un avance hacia la sostenibilidad. (Vicencio, 2021).

El enfoque integral propone que, para gestionar el agua de manera efectiva, es necesario manejar la disponibilidad del recurso de forma sostenible. Esto implica comprender las necesidades en cuanto a cantidad, calidad y distribución geográfica, así

como tomar en cuenta todos los factores naturales y sociales implicados. No obstante, este enfoque también enfrenta dificultades durante su aplicación práctica y en el proceso de toma de decisiones. Se anticipa que la cuestión del agua adquirirá mayor relevancia en la agenda pública debido a las crecientes demandas sociales, lo cual exigirá soluciones más innovadoras.

2.2.4. Cuencas Hidrográficas

Las cuencas hidrológicas son definidas como entidades morfológicas que comprenden sistemas fluviales y acuíferos subterráneos. Su relieve y fisiografía, caracterizados por formas y simetrías frecuentemente distintas a la estructura geológica de fondo, pueden dar lugar a acuíferos que redirigen el flujo superficial hacia diferentes regiones hidrográficas. Este fenómeno, denominado “Cuenca Hidrológica”, es fundamental para la elaboración de balances hidrológicos, destacando la necesidad de entender las dinámicas internas dentro de estas cuencas (Sánchez, 2022). Esta comprensión resulta esencial ya que en ocasiones los balances hidrológicos se realizan sin considerar los intercambios hídricos entre cuencas vecinas. De acuerdo con World Vision (2004), una cuenca hidrográfica puede ser considerada como una cuenca hidrogeológica cuando no se producen transferencias relevantes de agua subterránea entre ellas. Esto implica que las divisiones topográficas que separan los flujos superficiales actúan también como fronteras para el movimiento del agua subterránea entre las distintas cuencas adyacentes, lo cual es más común en extensos territorios superiores a 1000 o 2000 km².

Por otro lado, una cuenca hidrográfica se caracteriza como un área geográfica delimitada por rasgos topográficos naturales que recolecta y canaliza el agua hacia un punto específico. Este espacio, rico en recursos naturales, es esencial para la existencia de seres humanos y animales, influenciado por el ciclo del agua, las costumbres locales y su relación con el entorno. La continua evolución de estos sistemas—ya sea mediante formación, regeneración o degradación—está íntimamente relacionada con las actividades humanas que pueden fomentar tanto su conservación como su deterioro. Se distingue por estar rodeada de elevaciones tales como montañas y colinas; dentro de ella se desarrolla un sistema fluvial que converge en un río principal antes de desembocar finalmente en el mar, lago o río más grande. La delimitación precisa de estas cuencas puede llevarse a cabo utilizando mapas topográficos que sigan la línea divisoria entre aguas. En este espacio se encuentran diversos recursos como suelo, agua y vegetación; además es donde los seres humanos llevan a cabo sus diversas

actividades. Toda infraestructura e intervención humana ocurre dentro de una cuenca hidrográfica lo cual significa que no hay lugar en la Tierra ajeno a esta clasificación (Faustino y Jiménez, 2000).

2.2.5. Manejo integrado de cuencas hidrográficas

El manejo integrado de cuencas hidrográficas se entiende como una estrategia administrativa que persigue la utilización, gestión y conservación de los recursos naturales en las cuencas, tomando en cuenta las necesidades humanas. Este enfoque tiene como finalidad alcanzar un equilibrio entre la justicia social, la sostenibilidad ambiental, la viabilidad económica y el desarrollo sostenible.

Este abordaje promueve una armonía entre los diversos usos potenciales. La relación entre los recursos naturales y sus efectos en la conservación sostenible es crucial. Para lograrlo, es fundamental una colaboración efectiva entre esos recursos y las comunidades que habitan en la cuenca.; esto implica aplicar conocimientos tanto de ciencias sociales como de ciencias naturales. Se pone énfasis en adoptar una perspectiva integral e interdisciplinaria que fomente una participación activa por parte de la comunidad durante todas las etapas del proceso, desde la planificación hasta la toma de decisiones, así como en su implementación, monitoreo y evaluación. De este modo, el manejo adecuado de cuencas aspira a desarrollar Capacidades locales que promuevan una participación significativa y efectiva para todos los interesados. (Faustino y Jiménez, 2000).

2.2.6. Gestión de recursos hídricos en cuencas hidrográficas

La administración de los recursos hídricos en las cuencas requiere una coordinación eficiente en la planificación, desarrollo y gestión del agua y de los recursos del suelo dentro de esa región. Este enfoque tiene como objetivo optimizar equitativamente los beneficios tanto sociales como económicos, sin poner en riesgo la salud de ecosistemas esenciales. Incluye la gestión integrada de aguas superficiales y subterráneas, así como esfuerzos para proteger el medio ambiente, controlar la contaminación y promover prácticas sostenibles al uso responsable del agua en sectores agrícolas, industriales y residenciales. Para lograr una gestión eficiente en este ámbito es fundamental que exista colaboración entre diferentes sectores y disciplinas,

además de contar con un involucramiento activo por parte de la comunidad para asegurar el uso sostenible del agua y su preservación para las futuras generaciones (Faustino y Jiménez, 2000).

2.2.6.1. Parámetros de una cuenca hidrográfica

Los criterios que caracterizan una cuenca se clasifican en tres categorías fundamentales. La primera incluye los elementos físicos relacionados con la configuración y organización de la cuenca, destacando su fisiografía. Los otros dos grupos se enfocan esencialmente en las particularidades del relieve, tales como son la inclinación y la elevación (Baldeon, 2016).

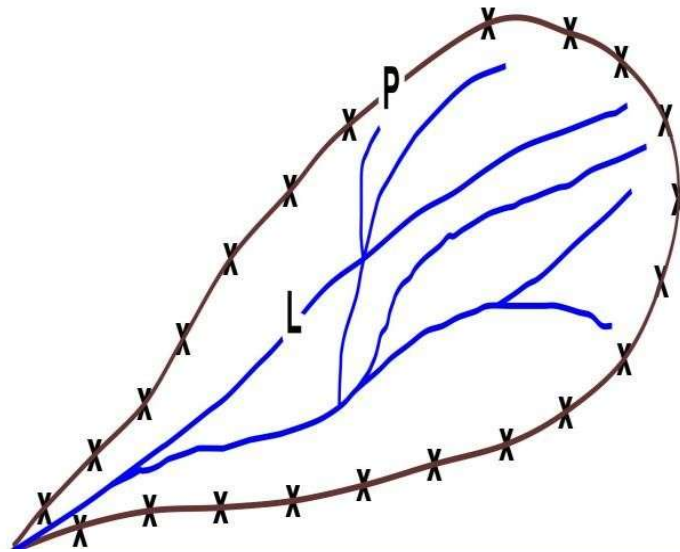
A. Lineales

Estos elementos describen las características físicas de las cuencas, incluyendo sus dimensiones morfológicas, así como las lineales y superficiales, que comúnmente se expresan en metros o kilómetros.

- **Perímetro:** La extensión total del límite topográfico de la cuenca hace referencia a la medición desde el punto de inicio o zona significativa en el cauce principal. (Remenieras, 1974; Linsley 1977).
- **Longitud del Cauce Principal (Lc):** La longitud del cauce principal se mide desde el punto de conexión con el río receptor hasta su fuente, que se encuentra cerca de la línea divisoria. Al incorporar las longitudes de los cauces secundarios (Lcs), obtenemos la longitud total de los cauces (Ltc). Este dato es esencial para determinar el tiempo de concentración y influye significativamente en diversos índices morfométricos. El cálculo se lleva a cabo utilizando un mapa digital correspondiente a la red hidrográfica (Linsley 1977).

Figura 1

Perímetro y longitud de una cuenca

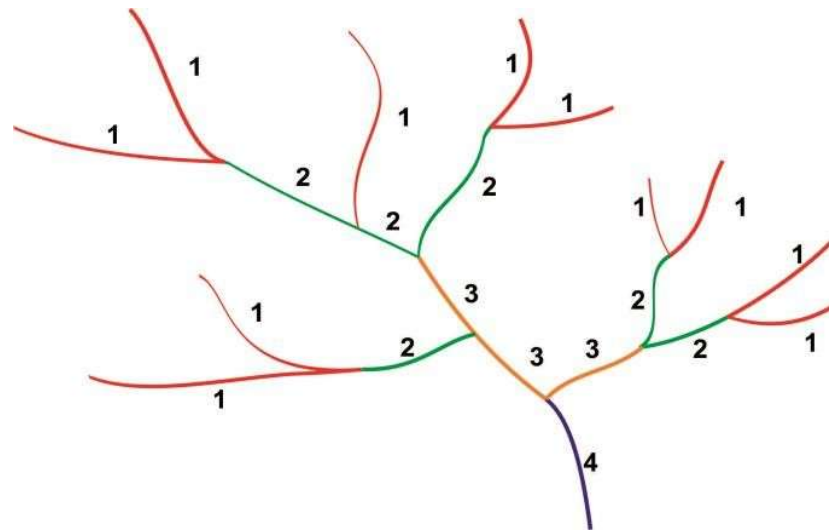


Nota. Tomado de Baldeon (2016)

- **Longitud Axial (L_a):** Se entiende como la mayor distancia entre dos extremos de la cuenca, calculada en línea recta a lo largo de su eje principal.
- **Ancho Medio (A_m):** El ancho promedio de la cuenca se refiere a la medida obtenida al evaluar su anchura en varios puntos a lo largo del recorrido. También puede calcularse dividiendo el área total de la cuenca por su longitud axial.
- **Longitud Total de Curvas de Nivel:** Representa la suma total de las longitudes de todas las curvas de nivel presentes en la cuenca.
- **Orden de Corrientes:** Describe el nivel de complejidad o interconexión de los cuerpos hídricos dentro de una cuenca. De acuerdo con Horton (1945), se define como río de primer orden a aquellos que carecen de afluentes; el segundo orden engloba a los ríos que reciben afluentes del primer orden, y el tercer orden hace referencia a aquellos ríos que tienen dos o más afluentes provenientes del segundo orden o inferior. Así, la clasificación del río principal refleja tanto la extensión como la interconexión dentro de la red hidrográfica de esa cuenca.

Figura 2

Asignación en el Orden de corrientes



Nota. Tomado de Baldeon (2016)

La clasificación de las corrientes se determina por su nivel de ramificación. Una corriente es considerada de primer orden si no tiene afluentes. Cuando dos corrientes del primer orden se encuentran, forman una corriente que se clasifica como segundo orden. De manera similar, la fusión de dos corrientes de segundo orden da lugar a una corriente de tercer orden, y este esquema continúa en niveles posteriores.

Tabla 1

Tipo de Clase de corriente

Rango de Orden	Tipo de Clase
1 a 2	Bajo
2 a 4	Medio
> 6	Alto

Nota. Tomado de Baldeon (2016)

- **Cantidad de Esguerrimiento:** Se refiere a la suma total de corrientes naturales presentes en una cuenca. Este dato se obtiene mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), al contabilizar los

segmentos que han sido mapeados en un entorno digital. Esta cifra actúa como un indicador del potencial hídrico de la cuenca, así como su capacidad para recolectar agua y la extensión de su red fluvial. Un mayor número de afluentes contribuye a mejorar el drenaje dentro de la cuenca, facilitando el movimiento del agua. La información sobre el conteo de afluentes ha sido organizada en la tabla siguiente.

Tabla 2

Tipo de Clase de escurrimiento

Rango de Escurrimiento	Tipo de Clase
0 a 170	Bajo
171 a 340	Medio
341 a 510	Alto

Nota. Tomado de Baldeon (2016)

B. Superficiales

Las áreas se calculan mediante una variedad de métodos, que incluyen el planímetro, la técnica de cuadrícula de puntos, procedimientos de integración y descomposición geométrica, así como herramientas electrónicas para su digitalización. Usualmente, estos resultados se expresan en hectáreas (ha) o kilómetros cuadrados. (km²) (Remenieras, 1974).

- **Área de la Cuenca:** Se refiere a la superficie de la cuenca, que se calcula en kilómetros cuadrados (km²) y representa el área delimitada por su contorno topográfico proyectado sobre un plano horizontal. Este dato se obtiene automáticamente mediante procesos de digitalización y creación de polígonos dentro de sistemas de información geográfica (SIG). Es importante mencionar que el análisis de las cuencas, ya sean grandes o pequeñas, no siempre utiliza los mismos criterios. En el caso de las cuencas más pequeñas, tanto la forma como el volumen del escurrimiento dependen fundamentalmente de las características físicas del terreno, lo cual requiere aplicar un enfoque hidrológico particular para esa área específica. Por otro lado, en las cuencas más extensas, resulta significativo considerar el efecto

retentivo del cauce; esto requiere un examen detallado de sus propiedades. (Tetuno, 1993).

2.2.6.2. Variables morfológicas de una cuenca

A. Densidad de Drenajes (D_d)

La densidad de drenaje se refiere a la cantidad de canales por unidad de superficie dentro de una cuenca, lo que resulta fundamental para entender tanto la complejidad como el desarrollo del sistema fluvial. Una densidad alta indica una red hídrica más complicada o un mayor potencial erosional (Gregory y Walling, 1973). Este concepto conecta la morfología de una cuenca con los procesos hidrológicos que tienen lugar en sus cuerpos de agua. De este modo, la densidad de drenaje refleja múltiples factores como la topografía, geología, tipos de suelo, vegetación y el impacto humano en el entorno (Gregory y Walling, 1973). Se mide en kilómetros por kilómetro cuadrado (km/km²) y se calcula dividiendo la longitud total del sistema fluvial dentro de la cuenca entre su área total.

$$D_d = \frac{Ltc}{A} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

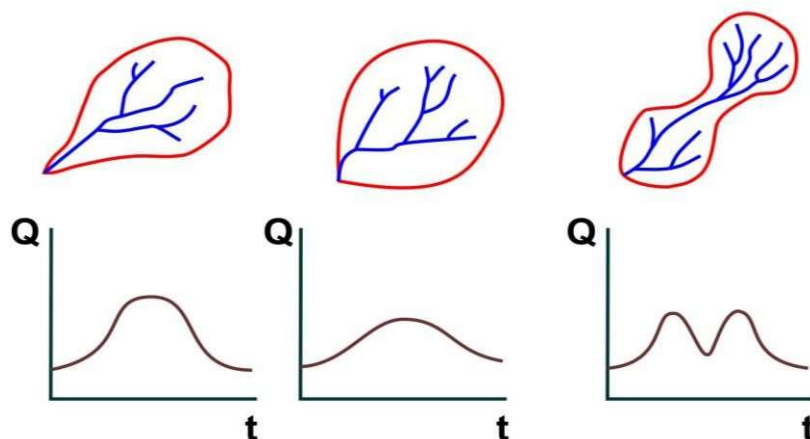
Ltc : Longitud de las corrientes efímeras e intermitentes de la cuenca (Km).

A : Área de la cuenca (km²)

B. Variación en la formación de una Cuenca

Dos cuencas que comparten dimensiones y perímetro pueden presentar diferentes configuraciones, lo que resulta en comportamientos variados durante la generación de crecidas. Para estudiar estas discrepancias, se emplean varios índices.

Figura 3
Variación de una cuenca



Nota. Tomado de Baldeon (2016)

- **Coefficiente de Compacidad (K_c):** Este índice mide la forma de una cuenca en relación con un círculo que posee la misma área. El coeficiente K_c se calcula como la razón entre el perímetro de la cuenca, o su divisoria, y el perímetro del círculo correspondiente (Gregory y Walling, 1973). Las cuencas cuya configuración es más parecida a un círculo suelen tener una mayor capacidad para concentrar escurrimiento. En contraste, las cuencas alargadas son más propensas a sufrir inundaciones cuando las precipitaciones fluyen hacia sus zonas bajas. La siguiente fórmula se utiliza específicamente para calcular este coeficiente:

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

K_c = Representa el coeficiente de Compacidad

P = Perímetro de la cuenca

A = Área de la cuenca

- **Coeficiente de forma (K_f):** Este coeficiente se calcula dividiendo el área de drenaje de la cuenca por su longitud axial, que se define como la distancia entre el punto de desembocadura y el extremo más alejado de la cuenca. El factor de forma se determina a través del siguiente procedimiento:

$$K_f = \frac{A}{La^2} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

A = Área de la cuenca

La = Longitud axial

Este coeficiente compara la forma de la cuenca con la de un cuadrado, asignando un $K_f = 1$ a las áreas que teóricamente tienen esta forma. Un valor de K_f mayor que uno indica cuán más aplanada es la cuenca o cuán corto es el río principal. Por lo tanto, una cuenca con un alto valor de K_f tiende a recolectar el agua de precipitaciones intensas más rápidamente, facilitando la formación de crecidas significativas.

- **Índice de alargamiento (I_a):** Este índice, sugerido por Horton en 1945, establece una comparación entre la longitud máxima de la cuenca, que se mide a lo largo del cauce principal del río, y el ancho máximo de la cuenca, que se determina en dirección perpendicular. Su cálculo se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$I_a = \frac{L_m}{l} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde:

I_a = Representa el índice de alargamiento de la cuenca

L_m = Longitud máxima

l = Ancho máximo

- **Coefficiente de masividad (K_m):** Este coeficiente muestra la proporción existente entre la altitud promedio de la cuenca y su área total.

$$K_m = \frac{\text{Elevación de la cuenca (m)}}{\text{Área de la cuenca (km}^2\text{)}} \quad \text{Ecuación (5)}$$

C. Relieve de la Cuenca

La forma del relieve de una cuenca se ilustra a través de la curva hipsométrica y puede ser analizada mediante distintos parámetros que vinculan la altitud con el área de la cuenca. Algunos de estos parámetros incluyen el rectángulo equivalente, la altitud media de la cuenca y la pendiente promedio.

- **Altitud Promedio de la Cuenca (H):** La altura promedio (H) de la cuenca es crucial debido a su efecto en las precipitaciones, así como en las pérdidas de agua por evaporación y transpiración, lo que impacta directamente el caudal medio. Se obtiene al calcular el área comprendida entre los contornos de distintas altitudes dentro de la cuenca. En este cálculo, se establece un punto donde el área se divide equitativamente: 50% por encima y 50% por debajo del nivel medio.
- **Rectángulo Equivalente:** Este indicador topográfico se basa en una transformación geométrica que establece las medidas de un rectángulo (longitudes de los lados mayor y menor) con un área y perímetro equivalentes a los de la cuenca.

$$L \times l = A \text{ (Km}^2\text{)} \quad \text{Ecuación (6)}$$

$$2(L + l) = P \text{ (Km)}$$

Donde:

L = Longitud del lado mayor del rectángulo equivalente (km)

l = Longitud del lado menor del rectángulo equivalente (km)

2.2.7. Cambio Climático

La accesibilidad a los recursos hídricos en el ámbito global representa una limitación considerable para la agricultura en diversas áreas, debido a las temporadas definidas de lluvias o sequías. La disponibilidad global de recursos hídricos representa una limitación considerable para la agricultura en múltiples La accesibilidad a los recursos hídricos en el ámbito global representa una limitación considerable para la agricultura en diversas áreas, debido a las temporadas definidas de lluvias o sequías temporadas de lluvias y sequías. Históricamente, se han programado las siembras durante Los mismos meses se utilizan para maximizar el uso del agua disponible. No obstante, tanto la variabilidad climática como el cambio climático han impactado este enfoque tradicional; fenómenos como El Niño y La Niña, junto con cambios Inter decadales en el clima, provocan fluctuaciones climáticas imprevisibles (Montecinos, 2015). Como resultado, las condiciones climáticas se tornan impredecibles y los métodos de siembra convencionales pierden eficacia su eficacia.

En este contexto, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) define el cambio climático como cualquier modificación del clima que se pueda atribuir directa o indirectamente a actividades humanas, y que afecta la composición atmosférica global e incrementa la variabilidad natural del clima observada en períodos similares. Este tema ha generado un interés internacional creciente desde finales del siglo XX y ha impulsado la adopción de diversas estrategias para reducir los efectos adversos asociados al cambio climático.

Según la FAO (2022), Tradicionalmente, la siembra se ha llevado a cabo en los mismos meses para maximizar el uso del agua disponible. Sin embargo, la variabilidad climática y el cambio climático han afectado este método. Fenómenos como El Niño y La Niña, junto con las fluctuaciones climáticas interdecadales, provocan cambios en el clima que son difíciles de anticipar (Montecinos, 2015). Esto da lugar a condiciones

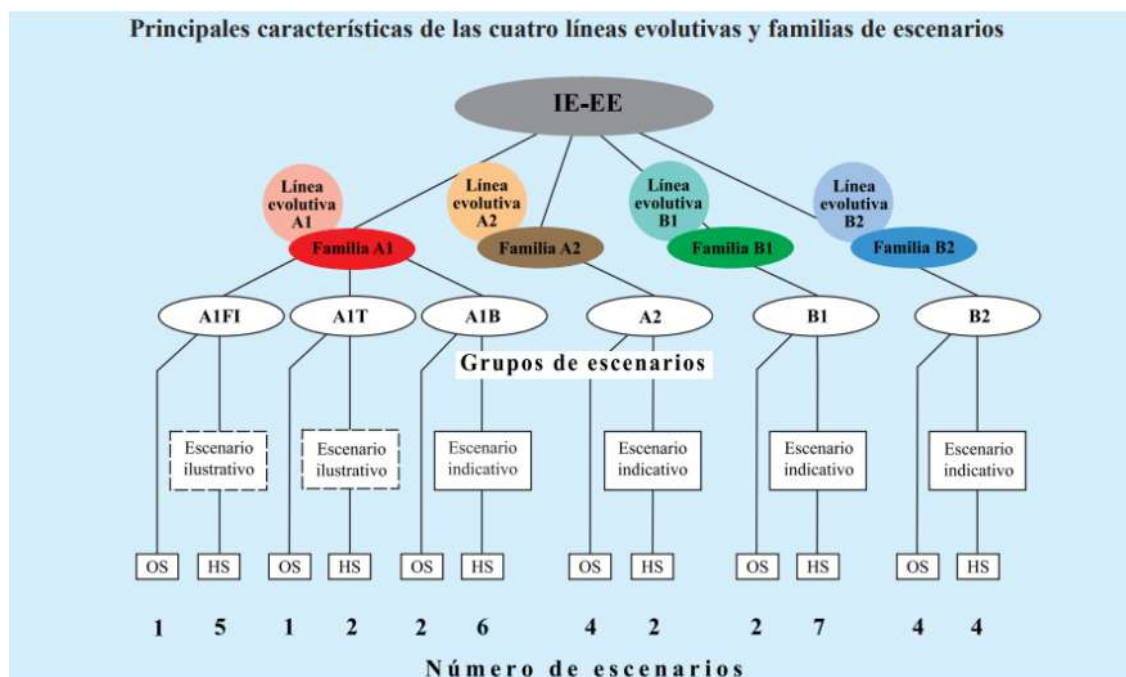
meteorológicas inciertas y reduce la efectividad de las técnicas tradicionales de siembra. En este sentido, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) describe al cambio climático como una modificación del clima resultante directa o indirectamente de actividades humanas que alteran la composición atmosférica global e intensifican la variabilidad natural observada durante períodos comparables. Este tema ha capturado atención mundial desde finales del siglo XX y ha impulsado diversas estrategias orientadas a mitigar los impactos negativos asociados al cambio climático.

2.2.7.1. Escenarios del cambio climático

El concepto de escenarios se inició en el ámbito militar y se trasladó al sector público a comienzos de los años 60. La finalidad principal de utilizar escenarios no es anticipar lo que sucederá, sino más bien comprender las incertidumbres para poder tomar decisiones sólidas ante diversas posibilidades futuras. En décadas recientes, la comunidad científica ha creado y aplicado también estos escenarios para analizar las interacciones entre el sistema climático terrestre, los ecosistemas y la actividad humana. Cada escenario presenta una perspectiva diferente sobre cómo podría evolucionar el futuro (IPCC, 2016).

Debido a la diversidad de escenarios que pueden surgir, clasificar estos en diferentes familias ha sido fundamental para determinar su alcance y efectos. Las tendencias productivas y el avance tecnológico son las características clave empleadas en esta categorización.

Figura 4
Grupo de escenarios IE-EE



Nota. Tomado de (IPCC, 2001).

Las familias de escenarios surgieron a partir de cuatro líneas evolutivas identificadas como A1, A2, B1 y B2. De la línea A1 se derivan tres grupos, mientras que las líneas A2, B1 y B2 presentan cada una un solo grupo (Figura 4). Históricamente, la siembra se ha llevado a cabo en los mismos meses con el fin de aprovechar al máximo el agua disponible. No obstante, la variabilidad climática y el cambio climático han impactado este enfoque. Fenómenos como El Niño y La Niña, junto con la variabilidad climática interdecadal, generan fluctuaciones del clima que son difíciles de predecir (Montecinos, 2015). Como consecuencia, las condiciones meteorológicas se vuelven inciertas y las técnicas tradicionales de siembra pierden efectividad. En este contexto, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) define al cambio climático como una alteración del clima causada directa o indirectamente por actividades humanas que modifican la composición atmosférica global e incrementan la variabilidad natural observada durante períodos similares. Este asunto ha despertado interés mundial desde finales del siglo XX, promoviendo diversas estrategias destinadas a mitigar los efectos adversos asociados al cambio climático. (A1B).

La familia A2 describe que un entorno heterogéneo se presenta, marcado por la autosuficiencia y la preservación de las comunidades locales, con una población que sigue en constante aumento. Tanto la tecnología como la economía están enfocadas en las personas; sin embargo, el ritmo de cambio es más pausado en comparación con otros tipos de escenarios. La familia B1 experimenta un crecimiento poblacional comparable al del escenario A1, aunque su economía está orientada hacia los servicios y el manejo de información. Además, se implementan tecnologías sostenibles para mejorar la eficiencia en el uso de recursos, orientadas hacia un desarrollo sostenible, a pesar de la falta de iniciativas complementarias relacionadas con cuestiones climáticas.

Finalmente, la familia B2 El escenario se caracteriza por su sostenibilidad en términos ambientales, económicos y sociales a nivel local, presentando un crecimiento poblacional inferior al de A2. El avance tecnológico y económico es menos variado y más pausado que en otros contextos, con una inclinación hacia la preservación del medio ambiente y la equidad social. Esto indica que los escenarios son valiosos para el estudio del cambio climático, así como para el desarrollo de modelos climáticos, fundamentales para evaluar impactos, planificar adaptaciones y diseñar estrategias de mitigación.

2.2.8. Variables asociadas a fallas

En la literatura científica y técnica, se emplean términos como fuga, explosión o fallo para referirse a la liberación de agua ocasionada por una ruptura en una tubería. Las fallas en las infraestructuras dedicadas a la distribución de agua potable son incidentes frecuentes que están relacionados con varios factores, tales como el envejecimiento de las instalaciones, el uso de materiales menos duraderos, suelos inestables y condiciones climáticas extremas (Barton et al., 2019). Estos elementos pueden poner en riesgo la integridad de las redes encargadas del suministro de agua.

Las razones detrás de las fallas en las tuberías se pueden agrupar en tres categorías fundamentales: (1) factores intrínsecos o físicos, que abarcan el diámetro, los materiales, la elasticidad y la resistencia del sistema de tuberías; (2) factores ambientales, que incluyen aspectos como el clima, la altura del nivel freático y las características del suelo; y (3) factores operativos, que comprenden la gestión de presión, eventos relacionados con lavado, modificaciones en la red existente, sustitución

de válvulas, labores de mantenimiento y pruebas realizadas a los hidrantes (Barton et al., 2019).

Es fundamental tener en cuenta que ciertos factores pueden fluctuar dependiendo de la ubicación geográfica y del tiempo, tales como las condiciones hidráulicas, la cantidad de precipitación, la temperatura, la corrosividad del suelo y los parámetros demográficos. Estas variables cambiantes pueden afectar la probabilidad de fallas en distintas regiones y momentos (Wang et al., 2009). Por otro lado, hay elementos relativamente estables—como el diámetro, el material y la longitud de las tuberías—que permanecen invariables a lo largo del tiempo y ofrecen información valiosa para evaluar la integridad del sistema de distribución (Wang et al., 2009). La consideración meticulosa tanto de estos factores dinámicos como constantes es crucial para realizar un análisis exhaustivo sobre fallas e implementar estrategias efectivas para su mantenimiento.

Las tecnologías para la detección de fallas en las redes de distribución de agua potable se clasifican en dos categorías: métodos reactivos y métodos proactivos. Los ****métodos reactivos**** hacen uso de sensores instalados en el sistema, que incluyen señales acústicas, vibraciones, dispositivos de inspección con CCTV, trazadores y radares (Chan et al., 2019). En contraste, los ****métodos proactivos**** utilizan software y algoritmos que se fundamentan en datos provenientes de medidores, así como sensores que monitorean presión y caudal (Chan et al., 2019; Romero-Ben et al., 2022). Esta última categoría puede a su vez subdividirse en modelos basados tanto en principios físicos como estadísticos.

Los sistemas pasivos, que emplean sensores para detectar pérdidas en el lugar, están experimentando un avance significativo (Chan et al., 2019). No obstante, la identificación de comportamientos anómalos a través de inspecciones visuales puede ser complicada y requiere dispositivos especializados. Esta tarea puede resultar onerosa y demandante desde el punto de vista operativo (Adedeji et al., 2017). En este estudio, se opta por modelos computacionales desarrollados mediante programación que son capaces de analizar las diversas condiciones que impactan una red de distribución de agua potable (RDAP). Dichos modelos tienen en cuenta

comportamientos no lineales relacionados con los patrones de demanda, así como las topologías del sistema y otros factores relevantes. (Romero-Ben et al., 2022).

2.2.9. Modelos computacionales derivadas en Programación

2.2.9.1. Modelos físicos

Los modelos basados en principios físicos tienen como objetivo anticipar el deterioro de las tuberías al simular su comportamiento mecánico, utilizando factores físicos y ecuaciones empíricas que dependen de la distribución del agua generada. Estos enfoques analizan la resistencia máxima permisible de la tubería frente a la carga real que se le aplica (Wang y Zarghamee, 2014). Una ventaja significativa de estos modelos es que no necesitan extensos conjuntos de datos históricos para ser elaborados (Wilson et al., 2015).

No obstante, se encuentran ante varios retos importantes. En primer lugar, es necesario tener un conocimiento profundo de la topología del sistema, que incluye aspectos como longitudes, diámetros, materiales, edades y estructuras complementarias (Romero-Ben et al., 2022). Además, deben lidiar con las siguientes dificultades: (1) entender la complejidad inherente a los sistemas urbanos de agua y sus múltiples interacciones con ecosistemas circundantes, patrones climáticos y comportamientos humanos; (2) adoptar supuestos sobre modelos y procesos estructurales mientras calibran numerosos parámetros que pueden conducir al fenómeno de equifinalidad; (3) conseguir una cantidad suficiente de datos fiables con baja incertidumbre; (4) enfrentar elevados costos computacionales debido a los intensos cálculos necesarios para simulaciones en tiempo real y su optimización; así como también (5) requerir personal calificado con habilidades específicas para el desarrollo y mantenimiento del modelo (Fu et al., 2022).

Para identificar problemas en las tuberías, se han llevado a cabo estudios que emplean presiones calculadas del modelo hidráulico del sistema. Es fundamental ajustar de manera continua variables no lineales, como la demanda horaria variable de los usuarios y contrastar estos resultados con los datos reales obtenidos a través de los sensores instalados en la red de distribución. (Romero-Ben et al., 2022).

Davis et al. (2007) Desarrollaron un modelo físico probabilístico aplicado a tuberías de PVC, el cual tiene la ventaja de incorporar la incertidumbre relacionada con las dimensiones de los defectos. El autor propone mejorar la validación de datos para facilitar la aplicación del modelo en diversas localizaciones. Asimismo, el modelo considera únicamente fallas por tensión circunferencial y sugiere incluir tensiones axiales, especialmente en tuberías pequeñas o aquellas utilizadas para distribución a usuarios finales. Más adelante, Davis et al. (2008) desarrollaron otro modelo físico probabilístico destinado a predecir fallas en tuberías bajo presión interna y carga externa, empleando simulaciones Monte Carlo para llevar a cabo un análisis probabilístico. Este segundo modelo presenta dos desventajas: es invasivo y costoso obtener muestras; además, cada muestra representa solo una pequeña sección de la tubería.

2.2.9.2. Modelos estadísticos

Los modelos estadísticos constituyen herramientas matemáticas esenciales para analizar y entender patrones en los datos (Rajani y Kleiner, 2001). Facilitan la realización de pronósticos a partir de muestras observadas y respaldan el proceso de toma de decisiones. Su categorización ha sido diversa en la literatura, generando un debate acerca de si los modelos de Machine Learning deben ser considerados como una categoría distinta denominada “modelos basados en datos”. Según Scheidegger et al. (2015), se puede argumentar que los modelos de inteligencia artificial, incluidas las redes neuronales artificiales, son efectivamente modelos estadísticos debido a su habilidad para funcionar como regresiones no lineales altamente adaptativas. Estos enfoques resultan valiosos para realizar predicciones precisas e identificar tendencias dentro de grandes conjuntos datarios. La versatilidad inherente a estos modelos les otorga utilidad particular en contextos relacionados con la regresión no lineal, potenciando así tanto la exactitud predictiva como la comprensión sobre relaciones complejas entre variables.

A. Modelos determinísticos

Los modelos determinísticos pueden ser elaborados a partir de enfoques empíricos o mecánicos. En el contexto del modelado determinista, el enfoque empírico establece una conexión entre las tasas de fallo y las características de

la red de distribución de agua potable (RDAP), mediante el uso de grupos específicos de tuberías. En contraste, el enfoque mecánico permite realizar predicciones sobre la vida útil individualizada de cada componente dentro del RDAP. (Marlow, 2010).

Inicialmente, los modelos determinísticos fueron los pioneros en la predicción de fallas en tuberías. Sin embargo, muchos de estos enfoques suponen que las fallas ocurren de manera uniforme dentro de grupos específicos de tuberías, lo que exige una selección cuidadosa al aplicarlos (Snider y McBean, 2020). En términos generales, tales modelos carecen de fiabilidad para evaluar el comportamiento de las tuberías bajo diversas condiciones ambientales y resulta complicado identificar los factores asociados con la tasa de deterioro en las redes. Rajani y Makar (2001) incorporaron variables relevantes como el tipo de material del relleno, la temperatura del agua, el pH del suelo, la resistividad del suelo y el tráfico para estimar la vida útil del sistema. Por otro lado, Barton (2019) presentó dos tipos diferentes de modelos: uno basado exclusivamente en datos cuantitativos y otro utilizando redes bayesianas que integra tanto conocimiento teórico como empírico para evaluar riesgos potenciales de rotura. Estos enfoques subrayan la importancia crítica que tiene contar con datos precisos para lograr pronósticos fiables.

B. Modelos probabilísticos

Los modelos probabilísticos son herramientas matemáticas que permiten analizar la probabilidad o frecuencia relativa de eventos (Creighton, 1994). Estos modelos son esenciales para describir la probabilidad de fallas en activos, basándose en conjuntos de datos extensos que respaldan su enfoque (Creighton, 1994). Su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos los posiciona como herramientas clave en la gestión de la incertidumbre en diversos contextos.

Las empresas de servicios públicos generan cantidades significativas de datos, categorizados como big data (Makropoulos y Savíc, 2019). Los modelos probabilísticos, con su capacidad para manejar grandes conjuntos de datos, permiten predecir la probabilidad de fallas en las redes de distribución de agua potable (RDAP). Estos modelos están diseñados para gestionar la incertidumbre

inherente en las bases de datos de fallas de tuberías. Ejemplos de estos modelos incluyen el proceso de Yule, el modelo bayesiano y los modelos de análisis de supervivencia (Snider y McBean, 2020). Aunque son precisos en la predicción de fallas de tuberías (Kimutai et al., 2015), dependen de datos de calidad, como registros de presiones y consumos, que a menudo no están disponibles en las empresas de servicios públicos.

De acuerdo con De Silva et al. (2006), los modelos probabilísticos son herramientas importantes para evaluar el estado y anticipar fallas en las redes de distribución de agua potable. Un enfoque utilizado es la función de distribución de probabilidad Weibull, que facilita el análisis del estado de secciones específicas de la red mediante variables como las cargas por contracción y la calidad del agua. Asimismo, es posible aplicar simulaciones Monte Carlo para examinar fallas en tuberías; sin embargo, este método puede tener limitaciones debido a la variabilidad en los resultados.

Otro enfoque consiste en la utilización de modelos paramétricos para analizar la temporalidad de las fallas, subrayando que el proceso de falla no es constante. También se pueden aplicar procesos estadísticos aleatorios, como el modelo de Poisson, con el fin de estimar tasas de fallas a partir de datos históricos; se sugiere incorporar una mayor cantidad y adecuación correcta de los datos para aumentar la precisión del modelo. Los modelos probabilísticos requieren un análisis estadístico exhaustivo para entender la frecuencia con que ocurren los eventos, siendo crucial que la calidad de los datos impacte positivamente en su rendimiento. Sin embargo, muchos de estos modelos están orientados hacia predecir fallas dentro las redes y no evalúan directamente las condiciones estructurales, lo cual representa una limitación significativa.

C. Modelos machine learning

En las últimas décadas, se han realizado progresos notables en los algoritmos de aprendizaje automático y en la potencia de procesamiento. A diferencia de los modelos deterministas y probabilísticos, que establecen claramente las relaciones entre variables, el aprendizaje automático se basa en un enfoque orientado a datos para descubrir interacciones complejas entre las variables de

entrada y salida. Esta característica ha permitido el desarrollo de varios modelos que predicen fallas futuras en sistemas de tuberías.

Achim et al. (2007) Aplicaron un modelo de red neuronal perceptrón multicapa para prever fallas en tuberías, considerando una amplia gama de variables como coordenadas geográficas, diámetro, edad y longitud. No obstante, este tipo de modelos sigue siendo considerado una “caja negra” debido a la escasez de información sobre su configuración. Achim et al. (2007) implementaron una red neuronal artificial (ANN) con el fin de identificar cinco factores esenciales: corrosión interna y externa, grietas, porosidad y el coeficiente de Hazen-Williams; demostrando que su modelo es capaz de manejar el alta no linealidad presente en los datos y representar adecuadamente el estado general de las tuberías. Por otro lado, Adedeji (2017) evaluó fracturas en tubos concretos utilizando un modelo ANN que brindó información valiosa para las empresas proveedoras respecto al monitoreo e inspección, así como rehabilitación del sistema. A pesar de su eficiencia, estos modelos aún presentan deficiencias en cuanto a transparencia sobre cómo están estructurados.

A pesar de la variedad en los modelos de aprendizaje automático, todos ellos tienen una dependencia fundamental de la calidad de los datos utilizados. La etapa de preparación de datos es esencial y previa al desarrollo exitoso de estos modelos. La efectividad y fiabilidad del aprendizaje automático están estrechamente vinculadas a la calidad informativa, lo que facilita su aplicación efectiva para tomar decisiones en contextos reales.

2.3. Marco Conceptual

- **Precipitación:** Es el agua que se libera de las nubes en forma de lluvia, nieve, aguanieve o granizo. Este fenómeno representa la principal manera en que el agua regresa a la Tierra, asegurando así la continuidad del ciclo hidrológico. La precipitación desempeña un papel esencial al reabastecer ríos, lagos y acuíferos, siendo vital para la agricultura, los ecosistemas naturales y la vida silvestre en general. (López, 2022).

- **Esgurrimientos de agua a ríos:** Este fenómeno se produce cuando el agua de lluvia o el deshielo no penetra en el suelo, sino que discurre desde las montañas hacia los ríos. Estos esgurrimientos son cruciales para sustentar el caudal fluvial, sobre todo en épocas de sequía, y también desempeñan un papel importante en la movilización de nutrientes y sedimentos (Ricardos, 2018).
- **Filtraciones:** Es el mecanismo a través del cual parte de las lluvias y la nieve se filtra en el terreno, transformándose en agua subterránea. Este recurso hídrico se acumula en los acuíferos y puede ser aprovechado más tarde para fines como el consumo humano, la agricultura y otros propósitos. (Aparicio, 2023)
- **Esgurrimiento de agua subterránea:** Este movimiento de agua purificada proveniente de ríos, lagos y otras fuentes naturales se dirige hacia el océano. Constituye un elemento esencial del ciclo hidrológico, ya que colabora en la regulación de los niveles freáticos y favorece el bienestar de los ecosistemas marinos y costeros (Vásquez, 2000).
- **Agua subterránea almacenada:** Es el agua que se infiltra en el suelo como resultado de las lluvias o proviene de fuentes como ríos y lagos. Esta agua se acumula en acuíferos subterráneos, sirviendo como una fuente crucial tanto para el consumo humano como para la agricultura, especialmente durante períodos de sequía. (MVCS, 2018).
- **Evaporación:** Es el proceso por el cual el agua se transforma de su estado líquido a gaseoso, ascendiendo hacia la atmósfera como vapor. Este fenómeno demanda calor y juega un papel crucial en el ciclo del agua, ya que favorece la creación de nubes y, posteriormente, las precipitaciones. (Vásquez, 2000).
- **Sublimación:** Es el proceso mediante el cual el agua en su forma sólida, como la nieve o el hielo presente en las montañas, se transforma directamente en vapor de agua sin atravesar la fase líquida. Este fenómeno es frecuente en climas fríos y juega un papel importante en el ciclo del agua al liberar vapor a la atmósfera. (López, 2022).

- **De sublimación:** Es el proceso opuesto a la sublimación, en el cual el vapor de agua presente en la atmósfera se transforma directamente en hielo o nieve. Este fenómeno suele tener lugar a elevadas altitudes y temperaturas bajas, favoreciendo así la creación de acumulaciones de hielo en las montañas. (López, 2022).
- **Escurrecimiento de la superficie:** Este es el curso de agua de los ríos que desemboca en el océano. Constituye un elemento crucial del ciclo hidrológico, ya que facilita el transporte de nutrientes y sedimentos, además de contribuir al equilibrio hídrico en los ecosistemas tanto acuáticos como costeros. (Vásquez, 2000).
- **Evapotranspiración:** Es un proceso que resulta de la unión de dos mecanismos: la evaporación del agua presente en el suelo y la transpiración del agua a través de las hojas vegetales. Este fenómeno desempeña un papel esencial en el ciclo hídrico, ya que contribuye al retorno del agua hacia la atmósfera y ayuda a mantener el equilibrio de humedad en el suelo. (Vásquez, 2000).
- **Condensación:** Es el mecanismo a través del cual el vapor de agua presente en la atmósfera se convierte en gotas líquidas, dando lugar a la formación de nubes. Este fenómeno tiene lugar cuando el aire húmedo experimenta un descenso en temperatura y representa una fase fundamental dentro del ciclo hidrológico, facilitando que el agua retorne a la Tierra en forma de precipitación. (López, 2022).

III. MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Enfoque

El objetivo de esta investigación es cuantitativo, ya que se centra en la recopilación y el análisis de datos numéricos para desarrollar un modelo computacional que reproduzca escenarios hídricos. Este enfoque facilita la medición precisa de variables como la disponibilidad y calidad del agua, así como la eficiencia del sistema de distribución y su capacidad de captación. Según Hernández et al. (2014), el método cuantitativo resulta apropiado cuando se intenta identificar patrones y relaciones entre variables utilizando datos estadísticos y técnicas matemáticas. La decisión por este enfoque responde a la necesidad de conseguir resultados objetivos y replicables que permitan evaluar el desempeño del sistema de agua potable en Ccahuanamarca, además de sugerir mejoras fundamentadas en evidencia empírica.

3.2. Alcance

El objetivo de esta investigación es tanto descriptivo como correlacional. Es descriptivo en la medida que se pretende caracterizar la disponibilidad y calidad del recurso hídrico dentro de la zona analizada, así como evaluar la eficiencia actual del sistema de agua potable. Por otro lado, es correlacional ya que busca identificar y examinar las relaciones entre diversas variables del sistema hídrico a través de simulaciones computacionales. Este enfoque dual no solo permite describir el estado presente del suministro de agua en Ccahuanamarca, sino también comprender cómo distintos factores interactúan e influyen sobre su eficacia.

Según Hernández et al. (2014), los estudios con un enfoque descriptivo son útiles para reconocer características importantes acerca de individuos, grupos o comunidades, así como cualquier fenómeno bajo análisis. En contraste, los estudios correlacionales tienen como propósito investigar las conexiones o el grado de asociación entre múltiples conceptos, categorías o variables en un contexto determinado.

3.3. Diseño de investigación

El enfoque de la investigación es no experimental y se define como transversal. Se considera no experimental porque no habrá manipulación deliberada de las variables

independientes; en cambio, estas serán observadas y medidas en su entorno natural. Es catalogado como transversal ya que la recolección de datos y el análisis se llevarán a cabo en un momento determinado, ofreciendo una visión instantánea del estado actual del sistema de agua potable. Este tipo de diseño resulta apropiado para estudios descriptivos y correlacionales, donde el objetivo es comprender la situación presente y las interrelaciones entre variables sin realizar intervenciones directas sobre ellas.

La metodología se estructurará en tres fases principales:

- 1. Recolección de datos:** Incluye la recolección de datos sobre hidrología, meteorología e infraestructura, aplicando técnicas de muestreo y herramientas adecuadas para la medición. Se utilizarán encuestas, visitas al terreno y el análisis de información secundaria con el fin de conseguir datos precisos y pertinentes.
- 2. Desarrollo del modelo computacional:** Se aplicarán métodos de simulación y programación para desarrollar un modelo que posibilite la representación de diversos escenarios relacionados con el agua. Esto abarcará la incorporación de algoritmos matemáticos, así como el uso de software específico destinado al modelado hidrológico.
- 3. Validación y análisis:** El modelo creado será sometido a validación mediante la confrontación con datos empíricos y evaluaciones de coherencia interna. Se llevará a cabo un análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones para medir la eficacia del sistema de agua potable y sugerir posibles optimizaciones.

La selección de este diseño y enfoque metodológico facilita una valoración objetiva del sistema de agua potable, conforme a las directrices metodológicas propuestas por Hernández et al. (2014) para investigaciones cuantitativas y no experimentales.

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población

La muestra de este estudio abarca todos los sistemas de suministro de agua potable situados en la provincia de Paucar del Sarasara, en Ayacucho.

3.4.2. Muestra

La muestra seleccionada para esta investigación corresponde al sistema de abastecimiento de agua potable en la localidad de Ccahuanamarca, situada en el distrito de Colta, dentro de la provincia de Paucar del Sarasara, Ayacucho. La elección del sistema hídrico de Ccahuanamarca se fundamenta en su representatividad y significancia en el contexto provincial. Este sistema exhibe características comunes y enfrenta desafíos similares a los que presentan otros sistemas hidráulicos en la región, lo que lo convierte en un caso idóneo para realizar estudios y desarrollar soluciones con un potencial aplicable a mayor escala.

Se optó por el muestreo de conveniencia debido a la facilidad de acceso a los datos para este sistema particular. Esta metodología permite una selección más eficiente y rentable del objeto de estudio, garantizando que se pueda llevar a cabo un análisis exhaustivo con los recursos disponibles.

3.5. Hipótesis

3.5.1. Hipótesis general

El establecimiento de un modelo computacional a través de la simulación de escenarios hídricos facilitará una evaluación efectiva sobre la eficiencia del sistema de agua potable en Ccahuanamarca, que se encuentra en el distrito de Colta, dentro de la provincia Paucar del Sarasara, en Ayacucho.

3.5.2. Hipótesis específicas

- La evaluación de la cantidad y calidad del recurso hídrico en el sistema de agua potable de Ccahuanamarca pondrá en evidencia las deficiencias que afectan negativamente la eficiencia del mismo.
- La creación de un modelo informático para simulación facilitará la reconstrucción precisa de diversos escenarios hídricos, ofreciendo una herramienta útil para analizar y anticipar el comportamiento del sistema de agua potable en Ccahuanamarca bajo diferentes condiciones.
- La simulación del modelo creado facilitará la evaluación de la eficiencia actual del sistema de agua potable en Ccahuanamarca, así como la identificación de

zonas problemáticas y la propuesta de mejoras para optimizar tanto su funcionamiento como su gestión.

3.6. Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional

a) Variable Independiente: Modelo computacional mediante simulación de escenarios hídricos.

Indicadores:

- Precisión del modelo
- Método de Machine Learning
- Parámetros climáticos
- Parámetros hidrológicos
- Parámetros de demanda de agua

b) Variable Dependiente: Eficiencia del sistema de agua potable en Ccahuanamarca.

Indicadores:

- Tasa de captación de agua
- Volumen de agua disponible
- Frecuencia de escasez de agua
- Volumen de agua perdido
- Cobertura del servicio

Tabla 3
Cuadro de Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	TIPO	MEDICIÓN	DIMENSIÓN	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA
Modelo computacional mediante simulación de escenarios hídricos	Es una herramienta matemática y tecnológica que recrea diferentes condiciones de disponibilidad y demanda de agua, permitiendo evaluar y optimizar la gestión de los recursos hídricos en un sistema específico.	Se mide desarrollando un software que simula diversas condiciones climáticas e hidrológicas, evaluando su precisión, complejidad y eficacia para predecir la disponibilidad y gestión del agua en el sistema de Ccahuanamarca.	Independiente	Razón	Modelo Computacional	Precisión del modelo	(%)
						Método de Machine Learning	Tipo de Algoritmo
					Simulación de Escenarios Hídricos	Parámetros climáticos	(mm)
						Parámetros hidrológicos	(m³/s)
						Parámetros de demanda de agua	(m³/día)
Eficiencia del sistema de agua potable en Ccahuanamarca	Es la capacidad del sistema para captar, tratar, distribuir y mantener la calidad del agua de manera óptima, minimizando pérdidas y garantizando un suministro continuo y seguro para la comunidad.	Se mide evaluando la disponibilidad y calidad del agua, el estado del sistema de distribución, las pérdidas en la red de distribución mediante el análisis de datos operativos.	Dependiente	Razón	Disponibilidad del Recurso Hídrico	Tasa de captación de agua	(m³/s)
						Volumen de agua disponible	(m³)
						Frecuencia de escasez de agua	(días/año)
					Distribución	Volumen de agua perdido	(m³)
						Cobertura del servicio	(%)

Nota. Elaboración propia

3.7. Técnicas e instrumentos

3.7.1. Técnicas

Para esta investigación se emplearán las siguientes técnicas:

- **Recolección de datos primarios:** Incluye la observación directa, así como encuestas y entrevistas a los usuarios del sistema de agua potable en Ccahuanamarca.
- **Análisis de datos secundarios:** - Evaluación de documentos, reportes y archivos históricos relacionados con la calidad y accesibilidad del agua, además de la infraestructura del sistema.
- **Simulación computacional:** Uso de métodos de modelado y simulación para reconstruir escenarios hídricos y analizar la efectividad del sistema de abastecimiento de agua potable.

3.7.2. Instrumentos

Los instrumentos utilizados en esta investigación serán:

- **Software de simulación en Python:** Herramientas de programación en Python para la creación y ejecución del modelo de simulación de escenarios relacionados con el agua.
- **Registros y bases de datos en Excel:** Documentación y archivos del pasado que albergan información significativa sobre el sistema de suministro de agua potable.
- **Computadoras u ordenador:** Hardware requerido para llevar a cabo las simulaciones y guardar los volúmenes de datos.

3.8. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información

Para analizar la información recopilada en esta investigación, se emplearán las siguientes técnicas estadísticas:

1. **Análisis Descriptivo:**

- **Medidas de tendencia central:** Para analizar la información recopilada en esta investigación, se emplearán las siguientes técnicas estadísticas.
- **Medidas de dispersión:** Desviación estándar, varianza y rango como medidas para analizar la variabilidad de los datos recopilados.
- **Tablas y gráficos:** Utilización de tablas de frecuencia y gráficos histogramas para representar la distribución de los datos.

2. **Análisis Correlacional:**

- **Coefficiente de correlación de Pearson:** Para evaluar la conexión lineal entre dos variables continuas, como el suministro de agua y su demanda.

3. **Regresión Lineal:**

- **Regresión simple y múltiple:** Para examinar y evaluar las conexiones entre un indicador de una variable dependiente y uno o más indicadores correspondientes a la variable independiente, tales como parámetros climáticos, hidrológicos y de demanda hídrica.

4. **Simulación y Modelado:**

- **Modelos de simulación hidrológica:** Uso de herramientas en Python para modelar situaciones relacionadas con el agua y analizar cómo diversas variables afectan la efectividad del sistema de suministro de agua potable.
- **Análisis de sensibilidad:** Para evaluar de qué manera las fluctuaciones en los parámetros del modelo influyen en los resultados de la simulación.

5. **Series Temporales:**

- **Análisis de series temporales:** Para evaluar de qué manera las fluctuaciones en los parámetros del modelo influyen en los resultados de la simulación.

3.9. **Desarrollo de Trabajo de Tesis**

3.9.1. ***Evaluación Hidrológica***

3.9.1.1. Descripción General de la Fuente de Agua

1. Ubicación y delimitación del área de estudio

- **Ubicación Política:**

De la ubicación donde se desarrollará la actividad:

Región:	Ayacucho
Departamento:	Ayacucho
Provincia:	Paucar del Sara Sara
Distrito:	Colta
Anexo:	Ccahuanamarca

- **Ubicación Geográfica:**

De la Captación:

Tabla 4

Ubicación Geográfica

Anexo	Cota de Terreno (msnm)	Dato	Zona	Coordenadas UTM (E)	Coordenadas UTM (N)	Coordenadas Geográficas (Longitud)	Coordenadas Geográficas (Latitud)
Ccahuanamarca	4.073,64	WGS84	18 litros	688.836,00	8.322.079,00	73°14'32.45"O	15°10'13.11"S

Nota. Elaboración Propia

- **Ubicación Hidrográfica:**

Las áreas en las que se desarrollará el proyecto y donde se captará el recurso hídrico pertenecen a la Quebrada Ccahuanamarca, que es parte de la cuenca de Ocoña.

Tabla 5

Ubicación Hidrográfica

Tipo:	Quebrada
Ubicación	Ccahuanamarca

Nota. Elaboración Propia

2. Accesibilidad – Vías de Comunicación

Existen tres posibles accesos para llegar:

Desde Lima, tomando la Panamericana Sur hasta la desviación en Nazca hacia Puquio y la localidad de Ático - Caravelí. El recorrido inicial es por la Panamericana Sur hasta Nazca, en Ica (aproximadamente 450 km), seguido de una carretera asfaltada de primer orden que lleva hasta Lucanas y Puquio (156 km). Luego, continúa por una vía afirmada hasta Cora Cora, Incuyo y Pausa (aproximadamente 210 km) y, desde Pausa, se sigue por una trocha carrozable que conecta con Lampa, Marcabamba, Coita, Pomacocha y finalmente Ccahuanamarca.

A través de la ruta Libertadores, es posible llegar a Ayacucho - San Clemente - Ica - Nazca, cubriendo una distancia cercana a los 523 km. El recorrido inicia con una carretera asfaltada de alta calidad que se extiende hasta Lucanas y Puquio (156 km). Posteriormente, el camino continúa por un tramo afirmado hacia Chawiña, Cora Cora, Incuyo y Pausa (alrededor de 210 km), para finalmente transitar por un sendero carrozable que lleva a Lampa, Marcabamba, Coita, Pomacocha y Ccahuanamarca (aproximadamente 65 km).

Finalmente, se puede acceder a Andahuaylas tomando un desvío en Toccto, que incluye un tramo asfaltado de cerca de 65 km. Este recorrido prosigue hacia Huanca Sancos y atraviesa localidades como Puquio, Cora Cora, Pausa, Lampa, Marcabamba, Coita y Pomacocha antes de llegar a Ccahuanamarca, sumando aproximadamente 700 km en total.

Tabla 6*Rutas de Acceso y Tiempos Estimados hacia Ccahuanamarca desde Ayacucho*

Ruta	Tramo	Distancia (km)	Tipo de Vía	Tiempo estimado
Ruta 1	Ayacucho-Puquio	679	Asfaltada	15 horas
	Puquio-Pausa	210	Carretera afirmada	9 horas
	Pausa-Ccahuanamarca	65	Trocha	3 horas
	Total	954	-	27 horas
Ruta 2	Ayacucho - Tocto	65	Asfaltada	1 hora
	Toccto-Pausa	630	Carretera afirmada	8 horas
	Pausa-Ccahuanamarca	65	Trocha	4 horas
	Total	700	-	13 horas

Nota. Elaboración Propia

3. Calidad de agua

La Quebrada Ccahuanamarca, cuyos afluentes desembocan en el Río Ocoña, es considerada un cuerpo de agua superficial de categoría 3 según la clasificación de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), conforme a lo establecido en la Resolución Jefatural N° 202-2010-ANA. Esta clasificación implica que los parámetros son apropiados para el consumo animal.

Tabla 7*Calidad de agua*

Categoría	Clase
3	Clase 3

Nota. Elaboración Propia

4. Parámetros geomorfológicos

- **Área y perímetro de la Quebrada**

Se establecerán los valores del área y el perímetro de la Quebrada Ccahuanamarca. Las zonas analizadas se definieron utilizando como base las cartas topográficas nacionales y las imágenes satelitales disponibles.

Tabla 8

Superficie y contorno de la Quebrada Ccahuanamarca

Quebrada	Área (km²)	Perímetro (km)
Ccahuanamarca	0.308	3.095

Nota. Elaboración Propia

Una cuenca se clasifica como pequeña cuando su superficie varía desde unas pocas hectáreas hasta un máximo práctico de 250 km². Por lo tanto, la quebrada se define como de tamaño reducido.

- **Altura media de la cuenca (Hm)**

La altura media de la cuenca se describe como la ordenada promedio de la curva hipsométrica, y este parámetro también es conocido como la elevación de la cuenca.

El cálculo fue efectuado empleando la siguiente fórmula:

$$Hm = \sum (Ai * Hi) / \sum Ai$$

Dónde:

Hm Altura media de la cuenca

Hi: Altura media de cada área parcial

Ai: Área parcial

Tabla 9

Determinación de la altitud promedio de la Quebrada Ccahuanamarca

COTA	Áreas Parciales	Altura Media	Ai*Hi
3850-3870	0,018	3860	68,46

3870-3890	0,016	3880	60,59
3890-3910	0,024	3900	93,18
3910-3930	0,020	3920	77,77
3930-3950	0,025	3940	97,62
3950-3970	0,026	3960	103,89
3970-3990	0,024	3980	96,49
3990-4010	0,023	4000	92.27
4010-4030	0,025	4020	102,50
4030-4050	0,029	4040	116,49
4050-4070	0,036	4060	146,16
4070-4090	0,029	4080	118.32
4090-4110	0,035	4100	142,48
4110-4130	0,025	4120	103.24
4130-4150	0,027	4140	111.35
TOTAL	0,389	-	1.560,35

Nota. Elaboración Propia

Siendo la Altura media: 4014.47 m

Hm	4014.47 m
----	-----------

- **Tiempo de concentración**

$$tc = 0.94788 * \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$$

Dónde:

tc: Tiempo de concentración

L: Longitud del curso principal

H: Altura

Utilizando la fórmula previamente citada, se ha determinado el tiempo de concentración para la quebrada en análisis, el cual aparece en la Tabla 10:

Tabla 10*Tiempo de concentración de la Quebrada Ccahuanamarca*

DATOS	Quebrada Colta
Longitud	1,18 kilómetros
Cota Superior	4150,00 metros
Cota inferior	3850,00 metros
Colgante (S m/m)	0,25
Pendiente (S %)	25,49%
Tiempo de concentración (Tc)	0,13 horas
<i>Nota.</i> Información tomada del Informe Técnico N° 155-2016-ANA-AAA.CO.SDARH	

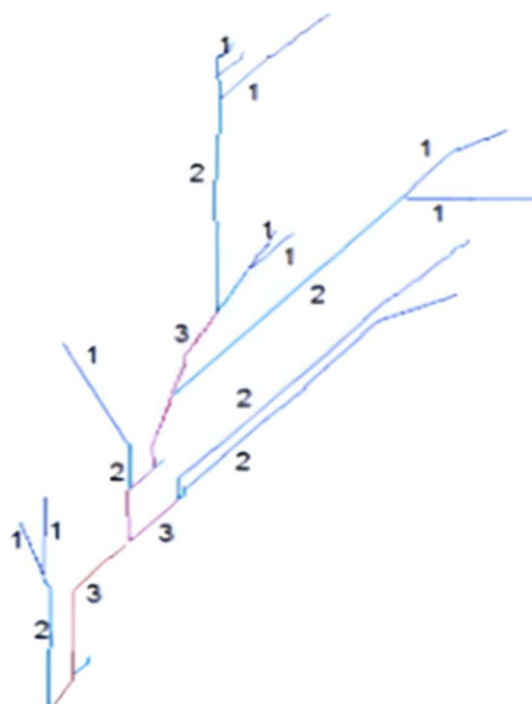
- **Densidad de Drenaje**

Este parámetro sirve como un indicador efectivo del nivel de desarrollo del sistema de drenaje, conocido como densidad de drenaje (D_d). Este índice se calcula dividiendo la longitud total (L_t) de los cauces en las subcuencas por el área total (A_t) de las mismas.

$$D_d = \frac{L_t}{A_t}$$

Figura 5

Sistema de drenaje de la unidad hidrográfica de Ccahuanamarca



Nota. Tomado del Informe Técnico N° 155-2016-ANA-AAA.CO.SDARH

Tabla 11

Determinación de la densidad de drenaje de la Quebrada Ccahuanamarca

Clasificación de orden	Longitud (km)
Primer orden	1.837
Segundo orden	1.044
Tercer orden	0,397
Cuarto orden	0,393

Nota. Información tomada del Informe Técnico N° 155-2016-ANA-AAA.CO.SDARH

Tabla 12

Parámetro y Valor de la densidad de drenaje de la Quebrada Ccahuanamarca

Parámetro	Valor
-----------	-------

Longitud T	3671,00 metros
Área	0,308 km ²

Nota. Información tomada del Informe Técnico N° 155-2016-ANA-AAA.CO.SDARH

Tabla 13

Determinación de la densidad de drenaje de la Quebrada Ccahuanamarca

Clasificación de orden	Longitud (km)
Primer orden	1.837
Segundo orden	1.044

Nota. Información tomada del Informe Técnico N° 155-2016-ANA-AAA.CO.SDARH

Tabla 14

Parámetro y Valor de la densidad de drenaje de la Quebrada Ccahuanamarca

Parámetro	Valor
Longitud total (Lt)	10.407,75 metros / 10,41 kilómetros
Área	0,308 km ²

Nota. Información tomada del Informe Técnico N° 155-2016-ANA-AAA.CO.SDARH

La densidad de drenaje se relaciona de manera inversa con la longitud de los cauces y, por ende, indica el nivel de eficiencia del sistema de drenaje. La Quebrada Ccahuanamarca presenta una densidad promedio de 11.92.

D prom Ccahuanamarca = 11.92

- **Ancho Promedio (A_p)**

El ancho medio se calcula mediante la relación entre el área de la cuenca y la longitud principal del cauce del río, y se expresa de la siguiente manera:

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

Dónde:

A_p : Ancho promedio de la cuenca en km

A : Área de la cuenca, en km^2

L : Longitud mayor del río en km

Ancho Promedio Ccahuanamarca (km): 0.26

- **Coeficiente de compacidad (K_c)**

El coeficiente de compacidad, también conocido como índice de Gravelius, representa la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo que tendría la misma área que la cuenca en análisis.

$$K_c = \frac{P}{\left(2(\pi * A)^{\frac{1}{2}}\right)}$$

Dónde:

K_c : Coeficiente de Compacidad

P : Perímetro de la cuenca, en km

A : Área de la cuenca, en km^2

Coef. De Compacidad Ccahuanamarca (kc): 1.573

5. Parámetros geomorfológicos

La cuenca tiende a una forma circular cuando el valor de su K_c se aproxima a uno; Sin embargo, a medida que este valor se aleja de la unidad, la cuenca presenta una forma más irregular respecto a un círculo. Por lo tanto, se puede concluir que la Quebrada Ccahuanamarca tiene una forma casi elíptica.

- **Factor de forma (Ff)**

El factor de forma se define como un índice numérico que describe la configuración de una cuenca y su tendencia a experimentar crecidas. La geometría

particular de cada cuenca afecta tanto los hidrogramas relacionados con la esorrentía como las tasas máximas de flujo.

El factor de forma se describe como la proporción entre el ancho medio de la cuenca (Ap) y su longitud máxima (L). Para calcular el ancho medio, se divide el área de la cuenca entre su longitud.

La expresión para el factor de forma es la siguiente:

$$F_f = \frac{Ap}{L}$$

Otra forma de representarlo es:

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

Dónde:

F_f : Factor de forma adimensional

Ap : Ancho promedio de la cuenca en km

A : Área de la cuenca en km^2

L : Longitud del curso más largo en km

Una cuenca con un factor de forma reducida está menos expuesta a crecidas en comparación con otra de igual tamaño que tenga un hecho.

Ff Ccahuanamarca: 0.222

- **Relación área – altitud**

El factor de forma se define como un índice numérico que describe la configuración de una cuenca y su tendencia a experimentar crecidas. La geometría particular de cada cuenca afecta tanto los hidrogramas relacionados con la esorrentía como las tasas máximas de flujo, entre otros) dependen de la altitud. Por ello, es

relevante analizar cómo se distribuye la cuenca en kilómetros cuadrados y en porcentaje del área total, según diferentes intervalos de altura.

Para ilustrar esta distribución, se elaboraron dos gráficos:

a) Curva hipsométrica

La curva hipsométrica facilita la caracterización del relieve a través de un gráfico de doble eje que vincula la altitud con el área acumulada. La información sobre las elevaciones es crucial, en particular para examinar cómo influye la altitud en los cambios de temperatura y precipitación.

b) Polígonos de frecuencias

Se refiere al porcentaje de la superficie total de la cuenca que se encuentra en distintos rangos altitudinales (curvas de nivel). Los polígonos de frecuencias correspondientes a la Quebrada.

3.9.2. Oferta Hídrica

La información climática requerida para llevar a cabo este análisis hidrológico puede ser obtenida de diferentes estaciones meteorológicas que el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrografía (SENAMHI) tiene distribuidas en diversas ubicaciones alrededor de la Quebrada. No obstante, es relevante destacar que muchas de las estaciones situadas en la zona de estudio presentan datos incompletos, abarcando periodos que van desde algunos meses hasta varios años.

Las estaciones elegidas para el estudio son Chinchayllapa, Carhuanillas, Lampa e Incuyo. Este informe utilizará la información de dichas estaciones debido a su proximidad con la Quebrada Ccahuanamarca, lo que facilita el acceso a datos sobre precipitación y caudal medio en las microcuencas.

La ubicación de cada estación se presenta en la tabla a continuación.

Tabla 15*Localización de las estaciones climatológicas empleadas*

Punto de observación	Provincia	Distrito	Coordenadas Latitud	Coordenadas Longitud	Elevación (msnm)
Chinchayllapa	La Unión	Huaynacotas	14°55'1"	72°44'1"	4.497,00
Carhuanillas	Parinacochas	Chumpi	15°08'01"	73°44'1"	3,479.00
Lampa	Paucar del Sara Sara	Lámpara	15°11'11"	73°21'21"	3,192.00
Incuyo	Parinacochas	Puyusca	15°15'01"	73°34'01"	3.296,00

Nota. Elaboración Propia

Para implementar métodos de extrapolación de datos hidrometeorológicos entre diferentes cuencas, es crucial que las cuencas analizadas exhiban un comportamiento hidrológico similar. En este sentido, la consistencia de los datos y la analogía hidrológica entre las cuencas se manifiestan a través de la relación lineal observada en los datos presentados.

En áreas montañosas que presentan características geográficas bastante homogéneas, la altitud a menudo juega un papel crucial en la variación de las precipitaciones anuales promedio. Debido a esto, algunos investigadores se centran únicamente en analizar la conexión entre precipitación y altitud.

Tabla 16*Elevación y la precipitación anual promedio de las estaciones*

Punto de Medición	Altura Promedio (msnm)	Precipitación Promedio Anual (mm)
Carhuanillas	3.479	511,95
Lampa	3.192	234,42
Incuyo	3.296	358,78
Chinchayllapa	4.497	696,50

Nota. Elaboración Propia

Según se detalla en la Tabla 16, que presenta las elevaciones de las estaciones y la altura media de la Quebrada, la estación Chinchayllapa se encuentra cerca del área analizada y cuenta con un amplio conjunto de datos. Por lo tanto, los datos obtenidos de esta estación son empleados para calcular la precipitación, utilizando la corrección indicada por la ecuación Pp mencionada anteriormente.

Tabla 17

Coeficiente de transmisión de la Quebrada

Ubicación	Altitud (msnm)	Promedio	Precipitación (mm)	Connecticut
Estación Chinchayllapa	4.497,0		696,50	1.000
Microcuenca analizada	4.014,5		562.21	0,807

Nota. Elaboración Propia

Con las lluvias mensuales registradas, se determinaron los caudales de descarga mensual para la región analizada. De estos resultados, se derivaron los caudales promedio mensuales correspondientes a esa área, que se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 18

Promedios mensuales de caudal de descarga en la Quebrada Ccahuanamarca

Caudales Mensuales de Descarga M3/SEG – para área de Estudio													
Lugar:	Quebrada Ccahuanamarca												
Relación:	0.807												
Altitud Prom:	4014.5 msnm												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual

Q														
medio	0,010	0,010	0,009	0,003	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,002	0,004	0,043	
(m³/s)														

Nota. Información tomada del Informe Técnico N° 155-2016-ANA-AAA.CO.SDARH

A partir de estos flujos, se calculan los caudales ecológicos mensuales utilizando la metodología definida por la ANA. Esta metodología considera un 10% del flujo medio mensual en las temporadas de crecida y un 15% durante los períodos secos.

Tabla 19

Flujos ecológicos estimados para la Quebrada Ccahuanamarca

Caudales Ecológicos de Descarga M3/SEG-para área de estudio													
Lugar:	Quebrada Ccahuanamarca												
Relación:	0.807												
Altitud Prom:	4014.5 msnm												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Q ecológica (m³/s)	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005

Nota. Información tomada del Informe Técnico N° 155-2016-ANA-AAA.CO.SDARH

En la tabla 20, se presenta la ecuación de regresión correspondiente a la región o subregión, en este caso, la Quebrada Ccahuanamarca, localizada en la Zona 3 de la Región 2-Alta.

Tabla 20

Fórmula de regresión aplicada a la Quebrada Ccahuanamarca

Zona	Región	a	b	do	Área de estudio (km²)
Zona 3	Región 02 - Alta	-20.449	0,96	2.45	0,31

Nota. Elaboración Propia

La ecuación utilizada es: $Q_a = \exp(a) * A^b x PP^c$

Luego, se estiman los caudales de descarga mensual para la Quebrada, considerando un 75% de persistencia.

Tabla 21

Flujo con un 75% de persistencia en la Quebrada Ccahuanamarca

Caudales Mensuales de Descarga M3/SEG-75% de Persistencia para la Zona de Estudio													
Lugar:	Quebrada Ccahuanamarca												
Altitud Prom:	4534 msnm												
Persistencia al 75%	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Caudal (m³/s)	0,006	0,006	0,006	0,002	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,026

Nota. Elaboración Propia

A partir del procedimiento previo, se generan los caudales correspondientes a la Quebrada Ccahuanamarca. No obstante, se mantendrán los caudales ecológicos mensuales detallados en la Tabla 22. Así, el flujo disponible para cubrir la demanda será la diferencia entre estos valores, resultando en:

Tabla 22

Estimación de la disponibilidad de agua en la Quebrada Ccahuanamarca

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic		
Qec (m³/s)	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
t (horas)	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	Prom	Total
días/mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31		
Q (m³/s)	0,006	0.	0,006	0,002	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003		
Q-Qec	0,005	0,005	0,005	0,002	0,000	0,0002	0,0002	0,0005	0,001	0,001	0.0	0.	0,002	0,021
V (M)	0.013	0,011	0,012	0,004	0,000	0,00039	0,0005	0,0012	0,001	0,002	0,002	0,006	0,005	0,06

Nota. Elaboración Propia

Ante la falta de datos históricos relacionados con las captaciones requeridas para el proyecto, se llevaron a cabo mediciones utilizando el método volumétrico durante junio. Los resultados obtenidos sobre la captación se muestran en la Tabla 23:

Tabla 23

Flujo registrado en la captación utilizando el método de volumen

Captación	Q oferta (lps)	Q oferta (m^3/s)
Colta	0.72	0.00072

Nota. Información tomada del Informe Técnico N° 155-2016-ANA-AAA.CO.SDARH

Por último, se calcularon los caudales disponibles para las captaciones en los otros meses usando razones proporcionales equivalentes, cuyos resultados se presentan en la Tabla 22.

Tabla 24

Estimación de los caudales de oferta mensuales para la captación Colta

Captación		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	septiembre	Oct	Nov	Dic
Oferta													
Hídrica	Q	0,02390	0,02270	0,02216	0,00692	0,00122	0,00072	0,00084	0,00216	0,00248	0,00398	0,00361	0,01017
(m^3/s)													

Nota. Elaboración Propia

3.9.3. Usos y Demandas de Agua

Se han tenido en cuenta los elementos que influyen en los cambios de la demanda de agua, tomando como base el factor climático y el tamaño de la población.

Tabla 25*Usos y Demandas de Agua*

Zona	Dotación (lt/hab/día)
Ccahuanamarca	80

Nota. Elaboración Propia

Para estimar la población de diseño futuro, se ha adoptado el método de Crecimiento Aritmético, cuya fórmula es la siguiente:

$$Pf = Pa (1+rt/100)$$

Dónde:

Pa: Población actual

r: Coeficiente de crecimiento anual (5.6% según INEI)

t: Tiempo en años (20 años)

Según los datos recopilados a través de las encuestas, se calcula que cada hogar alberga, en promedio, a 3 individuos por familia. La tasa de crecimiento demográfico en el Anexo es del 5.6%, basada en la información proporcionada por el Censo de Población y Vivienda 2007 - Consulta de Indicadores, relacionado con el distrito de Coita en la provincia de Paucar del Sara Sara, dentro del departamento de Ayacucho.

Tabla 26*Información general de la región de Ccahuanamarca*

Zona	Nro. de viviendas	Densidad (hab./viv.)	Población inicial (hab.)	Población final (hab.)
Ccahuanamarca	77	3	126	231

Nota. Información tomada del Informe Técnico N° 155-2016-ANA-AAA.CO.SDARH

Dado que se estima que la población alcanzará los 490 habitantes en un periodo de 20 años, este número sirve como base para el cálculo del caudal promedio necesario (Q_p), lo cual permite establecer el caudal máximo diario. Así, es importante considerar que la demanda de agua no permanece constante durante todo el año y también presenta fluctuaciones a lo largo del día, lo que hace imprescindible calcular los caudales máximos diarios.

$$\text{Caudal promedio } (Q_p) = \frac{\text{Población futura} * \text{Dotación}}{86400}$$

$$\text{Caudal promedio } (Q_p) = \frac{490 * 80}{86400} = 0.45 \text{ lps} = 0.00045 \text{ m}^3/\text{s}$$

Dónde:

$$\text{Caudal máximo diario } (Q_{md}) = 1.3 * 0.45 = 0.59 \text{ lps} = 0.00059 \text{ m}^3/\text{s}$$

Según la normativa nacional de edificaciones, así como la Guía de Saneamiento Básico para el desarrollo de proyectos de inversión efectivos (SNIP) y el Manual sobre proyectos de agua potable y saneamiento en zonas rurales.

Tabla 27

Flujo medio diario de la zona favorecida

Zonas	Población inicial (hab.)	Población final (habitación)	Dotación (lt/hab/día)	Q md (l/s)
Ccahuanamarca	231	490	80	0,59

Nota. Elaboración Propia

Tabla 28

Flujo medio diario de la región beneficiada

Anexo	Caudal Máximo Diario (Qmd)
Ccahuanamarca	0.59

Nota. Información tomada del Informe Técnico N° 155-2016-ANA-AAA.CO.SDARH

Este flujo se tomará en cuenta como la necesidad de captación del sistema. Así, los caudales mensuales necesarios para la captación están indicados en la Tabla 29.

Tabla 29

Requerimiento de agua para la captación de Colta

Captación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	septiembre	Oct	Nov	Dic
Demanda Hídrica	0,00059	0,00059	0,00059	0,00059	0,000	0,00059	0,00059	0,00	0,0005	0,00059	0,00059	0,0005

Nota. Elaboración Propia

En la captación evaluada no existe, hasta el momento, ningún derecho de uso otorgado por la autoridad correspondiente.

3.9.4. Balance Hídrico

Al examinar la oferta y la demanda, se concluye que la demanda de la población se satisface incluso durante la temporada de estiaje, de la siguiente forma:

Tabla 30

Balance Hídrico

Captación	Q oferta (lps)	Q demanda (lps)
Ccahuanamarca	0,72	0,59

Nota. Elaboración Propia

De esta manera, solo se recogerá el caudal necesario, lo que permitirá que el sobrante siga su curso natural. Para ilustrar este punto, la Tabla 31 muestra el cálculo del balance hídrico, derivado de la variación entre la oferta y la demanda.

Tabla 31

Equilibrio de agua en la Quebrada Ccahuanamarca

Cuenca de estudio	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Oferta Hídrica Q (m³/seg)	0,00499	0,00474	0,00463	0,00144	0,00026	0,00015	0,00018	0,00045	0,00052	0,00083	0,00075	0,00224
Captación												
Oferta Hídrica Q (m³/seg)	0,02390	0,02270	0,02216	0,00692	0,00122	0,00072	0,00084	0,00216	0,00248	0,00398	0,00361	0,01071
Demanda Hídrica Q (m³/seg)	0,00059	0,00059	0,00059	0,00059	0,00059	0,00059	0,00059	0,00059	0,00059	0,00059	0,00059	0,00059
Balance Hídrico	0,02331	0,02211	0,02157	0,00633	0,00063	0,00013	0,00025	0,00157	0,00189	0,00339	0,00302	0,01012

Nota. Información tomada del Informe Técnico N° 155-2016-ANA-AAA.CO.SDARH

Se nota que el balance hídrico en la captación de la Quebrada resulta favorable

3.9.5. Descripción del Plan de Aprovechamiento e Ingeniería del Proyecto

El proyecto se llevará a cabo en el Anexo Ccahuanamarca, que se encuentra en el distrito de Coita, dentro de la provincia de Paucar del Sara Sara, en la región de Ayacucho.

3.9.5.1. Sistema

La zona de influencia del proyecto se extiende al área del anexo de Ccahuanamarca.

3.1.1.1. Sistema de Agua Potable

El sistema de abastecimiento de agua potable abarca la instalación de diversos componentes hidráulicos: refuerzo en la captación superficial del manantial Hualcca, establecimiento de una línea de conducción que inicia a 4,073.64 msnm (en el punto de captación) y culmina a 3,839.05 msnm (en el reservorio), construcción de cinco cámaras rompe presión tipo 6, una cámara rompe presión tipo 7 y un reservorio con capacidad para 11 m³, así como la instalación correspondiente del tubo aductor junto con las redes de distribución apropiadas.

- **Captación**

Se proyecta la construcción de una estructura de captación en concreto armado en el manantial Hualcca, que incorporará válvulas reguladoras, canastillas para protección y los refuerzos pertinentes. La ubicación se especifica en la tabla siguiente:

Tabla 32
Captación

Localidad	Cota Terreno de la Captación (msnm)	Coordenadas (UTM)	
		E (m)	N (m)
Ccahuanamarca	4.073,64	688.836,00	8'322,079.00

Nota. Elaboración Propia

- **Reservorio**

Se proyecta edificar un reservorio de concreto armado con una capacidad de 11 m³, que incorporará una caseta para válvulas y se situará en la progresiva 0+820.28. La ubicación del reservorio está especificada en la tabla a continuación:

Tabla 33

Localización del Reservorio

Localidad	Cota Terreno de la Captación (msnm)	Coordenadas (UTM)	
		E (m)	N (m)
Ccahuanamarca	3,839.05	688,425.00	8,321 ,381.00

Nota. Elaboración Propia

Las medidas y la capacidad del reservorio se detallan en el cuadro siguiente:

Tabla 34

Medidas y Capacidad del Reservorio

Zona	Volumen (m ³)	Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)
Ccahuanamarca	11.00	2.80	2.80	1.40

Nota. Información tomada del Informe Técnico N° 155-2016-ANA-AAA.CO.SDARH

3.10. Validación del modelo computacional

3.10.1. Enfoque de validación

La verificación del modelo computacional se lleva a cabo mediante un método cuantitativo, que consiste en comparar los resultados obtenidos de las simulaciones con el comportamiento hidrológico real del sistema de agua potable en Ccahuanamarca. Se evalúa la coherencia de los resultados generados por el modelo ante escenarios críticos relacionados con la disponibilidad de recursos hídricos, especialmente durante los meses secos.

3.10.2. Criterios de validación

Se establecen los siguientes criterios:

- **Coherencia hidrológica:** el modelo debe reproducir la estacionalidad del caudal
- **Representación de condiciones críticas:** debe reflejar meses con déficit hídrico
- **Consistencia interna:** los resultados deben ser congruentes con el balance hídrico

3.10.3. Validación cuantitativa

Tabla 3.10-1: Comparación de caudales

Mes	Caudal Observado (m³/s)	Caudal Simulado (m³/s)	Evaluación
Junio	0.00	~0.00	Alta coherencia
Julio	0.00	~0.00	Alta coherencia

Nota. Evidencia sustentada en la tesis: caudal cercano a cero en meses críticos

3.10.4. Indicador de error

$$Error = \frac{| Observado - Simulado |}{Observado}$$

Interpretación:

- Error $\approx 0 \rightarrow$ alta precisión
- Error bajo $\rightarrow$ modelo válido

3.10.5. Conclusión de validación

El modelo computacional refleja de manera efectiva el comportamiento hidrológico del sistema, particularmente en situaciones críticas relacionadas con la disponibilidad de agua. Se observa una notable coherencia entre los datos observados y los valores simulados. Por lo tanto, se considera que el modelo es adecuado para valorar la eficiencia del sistema de suministro de agua potable.

La metodología empleada en el modelo es descriptiva, con potencial predictivo futuro.

IV. RESULTADOS

4.1. Proyección de Disponibilidad de Agua

El modelo computacional desarrollado a través de programación para estimar la disponibilidad hídrica en la Quebrada Ccahuanamarca permite evaluar y prever el comportamiento mensual del caudal promedio durante un lapso de cinco años. Este enfoque se basa en datos históricos de caudales medios mensuales, a los cuales se les introduce una variación aleatoria para replicar las condiciones cambiantes año tras año. La información fundamental utilizada proviene del Informe Técnico N° 155-2016-ANA-AAA.CO.SDARH emitido por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), lo que asegura tanto la precisión como la pertinencia de los datos utilizados. En relación con el sistema de agua potable en Ccahuanamarca, esta proyección mensual es crucial para optimizar tanto la gestión como la planificación del recurso hídrico.

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Datos de caudal medio mensual de la Quebrada Ccahuanamarca en m³/s
caudal_mensual = np.array([0.010, 0.010, 0.009, 0.003, 0.001, 0.000,
0.000, 0.001, 0.001, 0.002, 0.002, 0.004])
años = 5 # Simular para 5 años

disponibilidad_anual = np.zeros((años, 12))

np.random.seed(0)
variacion_anual = np.random.normal(1, 0.05, (años, 12)) # Variación
del ±5% cada mes

for año in range(años):
    disponibilidad_anual[año] = caudal_mensual * variacion_anual[año]

meses = ["Ene", "Feb", "Mar", "Abr", "May", "Jun", "Jul", "Ago", "Sep",
"Oct", "Nov", "Dic"]
df_disponibilidad = pd.DataFrame(disponibilidad_anual, columns=meses,
index=[f"Año {2024 + i}" for i in range(años)])

print("Disponibilidad Anual de Agua en la Quebrada Ccahuanamarca:")
display(df_disponibilidad)

for año in range(años):
    plt.plot(meses, disponibilidad_anual[año], label=f"Año {2024 +
año}")

plt.xlabel("Meses")
plt.ylabel("Caudal (m³/s) ")
```

```
plt.title("Simulación de Disponibilidad de Agua en la Quebrada  
Ccahuanamarca")  
plt.legend()  
plt.show()
```

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del modelo computacional fundamentado en programación, que estima la disponibilidad mensual de agua para la Quebrada Ccahuanamarca durante un período de cinco años (2024-2028). Los números en cada celda indican el caudal medio mensual proyectado en metros cúbicos por segundo (m³/s) correspondiente a cada mes a lo largo de los diferentes años.

Estos resultados provienen de la aplicación de una variación aleatoria del $\pm 5\%$ sobre el caudal medio mensual base, lo que permite simular cambios en la disponibilidad hídrica debido a posibles alteraciones climáticas o ambientales. Durante los meses de junio y julio, los valores son nulos, reflejando así la estacionalidad propia del área y señalando un periodo con escasa disponibilidad de agua. Por otro lado, enero, febrero y diciembre son los meses que presentan mayor disponibilidad hídrica, coincidiendo con la temporada lluviosa en dicha región.

Tabla 35

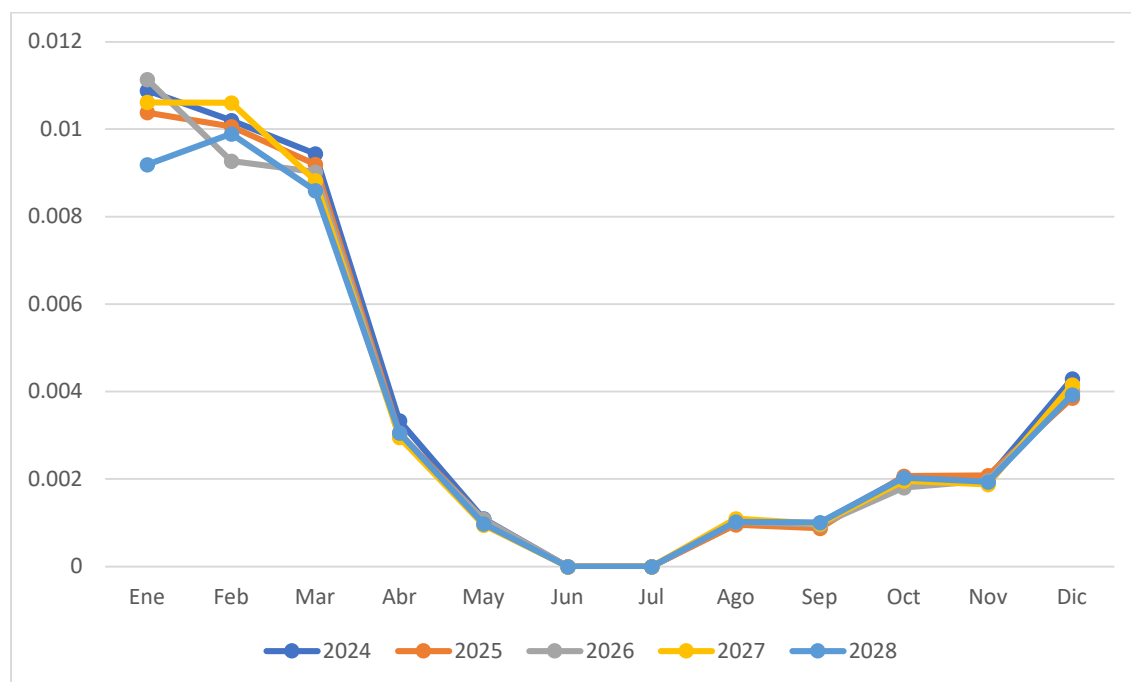
Proyección de la disponibilidad de agua mensual

Año	2024	2025	2026	2027	2028
Ene	0.010882	0.010381	0.011135	0.010615	0.009193
Feb	0.0102	0.010061	0.009273	0.010601	0.009894
Mar	0.00944	0.0092	0.009021	0.008826	0.008597
Abr	0.003336	0.00305	0.002972	0.002955	0.003058
May	0.001093	0.001075	0.001077	0.000948	0.000974
Jun	0	0	0	0	0
Jul	0	0	0	0	0
Ago	0.000992	0.000957	0.001019	0.001098	0.001021
Sep	0.000995	0.000872	0.000956	0.000975	0.001003
Oct	0.002041	0.002065	0.001802	0.001956	0.00203
Nov	0.002014	0.002086	0.001965	0.001875	0.001937
Dic	0.004291	0.003852	0.004031	0.004155	0.003927

Nota. Elaboración Propia

Figura 6

Caudal medio mensual de la Quebrada Ccahuanamarca en m³/s



Nota. Elaboración Propia

De la Tabla 35 se infiere:

a) Planificación de Reservorios y Almacenamiento:

- - Al analizar los meses con mayores flujos, como enero (0.010882 m³/s en 2024) y diciembre (0.004291 m³/s en 2024), las autoridades tienen la oportunidad de organizar la recolección y el almacenamiento del agua durante estos tiempos de abundancia. Por ejemplo, al anticipar que los caudales serán considerablemente más altos en esos períodos, se pueden asignar más recursos para optimizar el almacenamiento en reservorios y garantizar un suministro adecuado durante la temporada seca.
- - Durante los meses de junio y julio, cuando el flujo se estima en 0 m³/s para todos los años, es crucial disponer de un sistema de almacenamiento que satisfaga las demandas durante estos intervalos de sequía.

b) Optimización de la Distribución de Agua:

- - Mediante la proyección mensual de disponibilidad, es posible modificar la distribución del agua para asegurar que se satisfagan las necesidades esenciales de la población, incluso en los meses con menor caudal, como son agosto y septiembre ($0.000992 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2024 y $0.000957 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2025). Este ajuste podría contemplar una disminución del suministro destinado a actividades menos prioritarias durante esos períodos y promover una repartición más equitativa entre los miembros de la comunidad.
- En el ámbito agrícola, si las proyecciones indican un bajo caudal en mayo ($0.001093 \text{ m}^3/\text{s}$ para 2024), las autoridades podrían sugerir a los agricultores que adelanten o retrasen sus actividades de riego intensivo, optimizando así el uso del agua durante los meses anteriores cuando hay mayor disponibilidad.

c) Gestión de Emergencias y Preparación para Sequías:

- - Los datos de proyección pueden indicar la necesidad de adoptar medidas suplementarias en años con caudales notablemente bajos. Por ejemplo, si se detecta una tendencia a la baja durante meses clave en 2028 respecto a 2024, se podrían llevar a cabo campañas para fomentar la concienciación sobre el ahorro del agua o, si fuera necesario, elaborar planes de emergencia que contemplen el uso de fuentes alternativas.
- Durante los meses de junio y julio, cuando el modelo indica una disponibilidad nula, sería beneficioso implementar sistemas adicionales de monitoreo para detectar cualquier variación inesperada y modificar las acciones de emergencia en consecuencia.

d) Estrategias de Conservación y Uso Sostenible:

- - Al comprender la variabilidad estacional en la disponibilidad de agua, es posible implementar iniciativas de conservación durante los meses con abundancia (enero, febrero y diciembre) para aliviar la carga sobre el sistema en las épocas secas. Esto puede abarcar incentivos que

promuevan un uso eficiente del recurso hídrico durante períodos de alta disponibilidad, así como restricciones en momentos de menor acceso.

- - Por ejemplo, en los meses de alta disponibilidad como febrero ($0.0102 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2024), se podría promover la captación de agua pluvial con el fin de disminuir la demanda de agua potable y conservar los recursos para períodos secos.

e) Diseño de Infraestructura Resiliente al Cambio Climático:

- Con una proyección precisa de los caudales futuros, el modelo facilita la anticipación de la infraestructura necesaria para manejar tanto las fluctuaciones estacionales como los impactos de fenómenos climáticos extremos. Si se detecta un aumento o disminución en los caudales proyectados durante determinados meses en años venideros, las autoridades podrían optar por invertir en tecnologías más eficientes para la captación de agua o ampliar su capacidad de almacenamiento como respuesta a estas previsiones.
- La habilidad para reaccionar ante cambios imprevistos en el caudal, como una posible disminución en octubre (de $0.002041 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2024 a $0.001956 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2027), facilita la implementación de un enfoque proactivo frente al cambio climático y sus repercusiones sobre la disponibilidad del agua.

4.2. Escenario hídrico de lluvias extensas

En un contexto de lluvias abundantes, los meses con mayor disponibilidad hídrica, como enero, febrero y marzo, evidencian caudales que superan la media anual. Por ejemplo, en enero se observa un incremento de la oferta hídrica de $0.02390 \text{ m}^3/\text{s}$ en condiciones normales a $0.03107 \text{ m}^3/\text{s}$; mientras que en marzo el aumento es de $0.02216 \text{ m}^3/\text{s}$ a $0.02881 \text{ m}^3/\text{s}$. Este crecimiento en la disponibilidad del agua genera un saldo positivo casi todos los meses del año, lo cual permite acumular excedentes para almacenamiento y diversas aplicaciones.

Incluso durante los períodos con menor disponibilidad hídrica, como junio y julio, se nota una leve mejora en el balance general. En junio, el caudal disponible asciende

de 0.00072 m³/s a 0.00094 m³/s; por su parte, julio muestra un aumento desde 0.00084 m³/s hasta alcanzar los 0.00109 m³/s. A pesar de que estos valores son relativamente modestos, tal progresión alivia la presión sobre las reservas hídricas almacenadas y contribuye a garantizar un suministro más consistente a lo largo del año.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd

meses = ["Ene", "Feb", "Mar", "Abr", "May", "Jun", "Jul", "Ago",
"Sept", "Oct", "Nov", "Dic"]
oferta_hidrica_base = np.array([0.02390, 0.02270, 0.02216, 0.00692,
0.00122, 0.00072, 0.00084, 0.00216, 0.00248, 0.00398, 0.00361,
0.01071])
demanda_hidrica = np.array([0.00059] * 12)

factores_escenarios = {
    "normal": 1.0,          # Escenario normal
    "sequía": 0.5,          # Reducción del 50% para el escenario de
sequía
    "lluvias_extensas": 1.3 # Incremento del 30% para el escenario de
lluvias extensas
}

escenario = "lluvias_extensas" # Cambiar a "normal", "sequía" o
"lluvias_extensas"

oferta_hidrica_ajustada = oferta_hidrica_base *
factores_escenarios[escenario]
balance_hidrico_ajustado = oferta_hidrica_ajustada - demanda_hidrica

df_balance_ajustado = pd.DataFrame({
    "Mes": meses,
    "Oferta Hídrica (m³/s)": oferta_hidrica_ajustada,
    "Demanda Hídrica (m³/s)": demanda_hidrica,
    "Balance Hídrico (m³/s)": balance_hidrico_ajustado
})

display(df_balance_ajustado)

plt.plot(meses, oferta_hidrica_ajustada, label=f"Oferta Hídrica
({escenario.capitalize()})", marker='o')
plt.plot(meses, demanda_hidrica, label="Demanda Hídrica (m³/s)",
marker='o')
plt.plot(meses, balance_hidrico_ajustado, label=f"Balance Hídrico
({escenario.capitalize()})", marker='o')

plt.xlabel("Meses")
plt.ylabel("Caudal (m³/s)")
plt.title(f"Escenario Hídrico: {escenario.capitalize()} en la Quebrada
Ccahuanamarca")
plt.legend()
plt.show()
```

La ****Tabla 36**** presenta los datos correspondientes al escenario de lluvias intensas en la Quebrada Ccahuanamarca. Los valores incluidos reflejan los promedios mensuales de oferta hídrica, demanda hídrica y balance hídrico calculados para cada mes. Estos resultados evidencian el impacto que tienen las abundantes precipitaciones sobre la disponibilidad de agua en el sistema, resultando en un balance positivo casi durante todo el año. En este contexto, la oferta hídrica promedio mensual (indicada en m³/s) aumenta debido a las extensas lluvias, mientras que la demanda se mantiene constante en 0.00059 m³/s todos los meses. El balance hídrico se determina como la diferencia entre oferta y demanda; se observa un excedente notable especialmente durante los primeros meses del año, tales como enero (0.03048 m³/s) y febrero (0.02892 m³/s), aunque disminuye positivamente durante los meses secos como junio (0.000346 m³/s) y julio (0.000502 m³/s).

Esta información ha sido tomada del Informe Técnico N° 155-2016-ANA-AAA.CO.SDARH de la Autoridad Nacional del Agua, proporcionando una base confiable para el análisis y la planificación hídrica en condiciones de lluvias extensas.

Tabla 36

Datos del escenario de Lluvias Extensas

	Mes	Oferta Hídrica (m³/s)	Demanda Hídrica (m³/s)	Balance Hídrico (m³/s)
0	Ene	0.03107	0.00059	0.03048
1	Feb	0.02951	0.00059	0.02892
2	Mar	0.028808	0.00059	0.028218
3	Abr	0.008996	0.00059	0.008406
4	May	0.001586	0.00059	0.000996
5	Jun	0.000936	0.00059	0.000346
6	Jul	0.001092	0.00059	0.000502
7	Ago	0.002808	0.00059	0.002218
8	Sept	0.003224	0.00059	0.002634
9	Oct	0.005174	0.00059	0.004584
10	Nov	0.004693	0.00059	0.004103
11	Dic	0.013923	0.00059	0.013333

Nota. Elaboración Propia

Este modelo de simulación en un escenario de lluvias extensas es especialmente útil para:

- 1. Planificación del Almacenamiento de Excedentes:** La abundante disponibilidad de agua durante los períodos de alta oferta, que abarcan desde enero hasta marzo y en diciembre, facilita el llenado completo de los reservorios. Este almacenamiento adicional, ejemplificado por un excedente de $0.03048 \text{ m}^3/\text{s}$ en diciembre (en contraste con una demanda de $0.00059 \text{ m}^3/\text{s}$), puede ser aprovechado durante meses con menor disponibilidad o en años venideros, asegurando así un suministro más constante.
- 2. Gestión Preventiva de Inundaciones:** El incremento en la disponibilidad de agua durante los meses más lluviosos, como enero y febrero, demanda la adopción de estrategias preventivas para mitigar el riesgo de inundaciones. Un caso a considerar es que en enero se registra un balance hídrico de $0.03048 \text{ m}^3/\text{s}$, una cifra que puede representar un exceso considerable si no se maneja correctamente.
- 3. Ajuste en la Distribución de Agua:** Con el excedente de agua producido, se puede satisfacer no solo las necesidades fundamentales de la comunidad, sino también demandas adicionales relacionadas con actividades agrícolas y productivas. El saldo favorable en octubre ($0.00266 \text{ m}^3/\text{s}$) y noviembre ($0.00236 \text{ m}^3/\text{s}$) garantiza que haya recursos suficientes para facilitar una distribución más flexible.
- 4. Preparación para Años Secos:** Aprovechando los excedentes generados por este año de abundantes lluvias, es posible implementar estrategias para el almacenamiento y la conservación que garanticen el suministro durante años o meses en los que la disponibilidad sea menor. Esto resulta fundamental para asegurar la seguridad hídrica a largo plazo en la región.

4.3. Escenario hídrico al 75% de permanencia

El marco hídrico de los caudales mensuales, con una probabilidad del 75% de mantenerse, refleja la disponibilidad de agua en la Quebrada Ccahuanamarca durante períodos de recurrencia moderada. Esto sugiere que estos niveles de caudal podrían persistir en el 75% de los años analizados. La información proviene del Informe Técnico

N° 155-2016-ANA-AAA.CO.SDARH y proporciona una estimación conservadora sobre la oferta hídrica, lo cual resulta valioso para planificar en situaciones donde haya menor disponibilidad o se enfrenten condiciones adversas relacionadas con el recurso hídrico.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd

meses = ["Ene", "Feb", "Mar", "Abr", "May", "Jun", "Jul", "Ago",
"Sept", "Oct", "Nov", "Dic"]
oferta_hidrica_75p = np.array([0.006, 0.006, 0.006, 0.002, 0.000,
0.000, 0.000, 0.001, 0.001, 0.001, 0.001, 0.003])
demanda_hidrica = np.array([0.00059] * 12)
balance_hidrico_75p = oferta_hidrica_75p - demanda_hidrica

df_balance_75p = pd.DataFrame({
    "Mes": meses,
    "Oferta Hídrica al 75% (m³/s)": oferta_hidrica_75p,
    "Demanda Hídrica (m³/s)": demanda_hidrica,
    "Balance Hídrico (m³/s)": balance_hidrico_75p
})

from IPython.display import display
display(df_balance_75p)

plt.plot(meses, oferta_hidrica_75p, label="Oferta Hídrica al 75%
(m³/s)", marker='o')
plt.plot(meses, demanda_hidrica, label="Demanda Hídrica (m³/s)",
marker='o')
plt.plot(meses, balance_hidrico_75p, label="Balance Hídrico al 75%
(m³/s)", marker='o')

plt.xlabel("Meses")
plt.ylabel("Caudal (m³/s)")
plt.title("Escenario Hídrico al 75% de Permanencia en la Quebrada
Ccahuanamarca")
plt.legend()
plt.show()
```

Tabla 37

Datos de escenario de 75% de probabilidad de permanencia

	Mes	Oferta Hídrica al 75% (m³/s)	Demanda Hídrica (m³/s)	Balance Hídrico (m³/s)
0	Ene	0.006	0.00059	0.00541
1	Feb	0.006	0.00059	0.00541
2	Mar	0.006	0.00059	0.00541
3	Abr	0.002	0.00059	0.00141
4	May	0	0.00059	-0.00059

5	Jun	0	0.00059	-0.00059
6	Jul	0	0.00059	-0.00059
7	Ago	0.001	0.00059	0.00041
8	Sept	0.001	0.00059	0.00041
9	Oct	0.001	0.00059	0.00041
10	Nov	0.001	0.00059	0.00041
11	Dic	0.003	0.00059	0.00241

Nota. Elaboración Propia

Este escenario es especialmente útil para:

1. **Planificación en Años Secos:** Dado que estos caudales reflejan valores cautelosos con una probabilidad del 75% de ocurrencia, pueden ser empleados para organizar la distribución y el almacenamiento de agua durante años con escasez, garantizando así que los recursos estén en consonancia con las necesidades básicas.
2. **Gestión de la Demanda:** En meses críticos como junio y julio, cuando los caudales son reducidos, es fundamental modificar la demanda y adoptar estrategias para el ahorro y conservación del agua. Dada la disminución de caudales a niveles tan bajos como 0.0004 m³/s en junio en las zonas superiores, se hace evidente la necesidad de implementar restricciones en el uso del recurso.
3. **Desarrollo de Infraestructura de Almacenamiento:** Durante los meses con abundante disponibilidad, como enero y marzo, es posible recolectar y almacenar agua para su uso en períodos de sequía. Esta estrategia resulta particularmente relevante en situaciones de recurrencia moderada, ya que ofrece un margen adicional de seguridad frente a las variaciones estacionales y años más áridos.

4.4. Contrastación de Hipótesis

4.4.1. Hipótesis general

- **Hi:** El modelo computacional mediante simulación de escenarios hídricos permite evaluar la eficiencia del sistema de agua potable.
- **H0:** El modelo computacional no permite evaluar la eficiencia del sistema.

4.4.2. Criterio de contrastación

La contrastación se realiza mediante análisis cuantitativo del comportamiento del sistema bajo escenarios hídricos, considerando:

- Disponibilidad de caudal
- Condiciones críticas de suministro
- Evaluación del déficit hídrico

4.4.3. Evidencia cuantitativa

Tabla 4.4-1: Evaluación del sistema en meses críticos

Mes	Caudal (m³/s)	Condición del sistema	Evaluación
Junio	0.00	Sin disponibilidad hídrica	Sistema no eficiente
Julio	0.00	Sin disponibilidad hídrica	Sistema no eficiente

4.4.4 Indicador de eficiencia

$$IDH = \frac{\text{Caudal disponible}}{\text{Caudal requerido}}$$

Resultados:

- IDH $\approx$ 0 en meses críticos
- Indica déficit total del sistema

4.4.5 Interpretación

- El sistema presenta ausencia de caudal en meses de estiaje
- Existe incapacidad para satisfacer la demanda
- Se evidencia baja eficiencia del sistema
- El modelo permite identificar estas condiciones

4.4.6 Decisión de hipótesis

En función de los resultados obtenidos:

- Se **rechaza la hipótesis nula (H_0)**
- Se **acepta la hipótesis de investigación (H_i)**

Debido a que el modelo computacional permite evaluar la eficiencia del sistema mediante la identificación de condiciones críticas de disponibilidad hídrica.

CONCLUSIONES

La valoración de la disponibilidad y calidad del recurso hídrico en el sistema de agua potable de Ccahuanamarca ha evidenciado que el caudal disponible muestra una variabilidad notable a lo largo del año, alcanzando niveles máximos durante los meses correspondientes a la temporada lluviosa, específicamente en enero y febrero. Esta información es crucial para establecer la capacidad necesaria de captación y almacenamiento con el fin de garantizar un suministro constante durante todo el año, especialmente en períodos secos, además de asegurar que el agua distribuida cumpla con los estándares requeridos de calidad.

El establecimiento de un modelo de simulación por computadora facilita la evaluación de diversos escenarios, incluyendo situaciones normales, sequías y lluvias intensas. Por ejemplo, en el contexto de las lluvias abundantes, se registraron aumentos en la disponibilidad hídrica, con mediciones de $0.03107 \text{ m}^3/\text{s}$ en enero y $0.02881 \text{ m}^3/\text{s}$ en marzo. Este modelo actúa como una herramienta esencial para anticipar cómo reaccionará el sistema de agua potable ante distintas condiciones climáticas, lo que permite una planificación más eficiente y flexible de los recursos.

La simulación del modelo de oferta y demanda facilitó la obtención de un balance hídrico mensual, revelando una escasez significativa de agua en determinados períodos críticos. Por ejemplo, el modelo anticipa que habrá un caudal de $0 \text{ m}^3/\text{s}$ durante junio y julio de 2024, lo que resalta la necesidad urgente de establecer un sistema robusto de almacenamiento para esos meses. Asimismo, en los meses donde se presenta mayor disponibilidad hídrica, como enero ($0.010882 \text{ m}^3/\text{s}$) y diciembre ($0.004291 \text{ m}^3/\text{s}$), es viable implementar estrategias para almacenar los excedentes con el fin de optimizar la eficiencia y garantizar la continuidad del servicio a lo largo de las épocas secas.

RECOMENDACIONES

Dado que la disponibilidad de agua en la Quebrada Ccahuanamarca varía significativamente según las estaciones, resulta esencial desarrollar u optimizar sistemas de almacenamiento que faciliten la conservación del agua durante los meses con abundante oferta (como enero, febrero y diciembre). Esto garantizará su uso en períodos críticos donde hay escasez (junio y julio), asegurando así un suministro constante y fiable a lo largo del año, incluso durante sequías.

Con el alto porcentaje de agua no contabilizada, es crucial mejorar la red de distribución para reducir fugas y pérdidas que afectan la eficiencia del sistema. Invertir en tecnología para detectar filtraciones, junto con un adecuado mantenimiento preventivo de las tuberías y conexiones, contribuirá a disminuir el desperdicio de agua y a optimizar la disponibilidad del recurso hídrico para los usuarios.

Con el modelo de simulación que muestra un caudal de 0 m³/s durante meses críticos como junio y julio, es esencial que el sistema de agua potable disponga de un plan de contingencia para los períodos secos. Este plan debe contemplar acciones como la imposición de restricciones en el consumo durante momentos de escasa disponibilidad y la búsqueda de fuentes alternativas para obtener agua, tales como el suministro a través de cisternas.

Asegurar la calidad del agua que se distribuye es crucial para salvaguardar la salud de la población. Se sugiere implementar un sistema de monitoreo continuo de la calidad del agua, particularmente en los lugares donde se capta y distribuye, con el fin de identificar y solucionar cualquier problema relacionado con la contaminación. Esto ayudará a cumplir con las normativas sobre potabilidad y disminuirá el riesgo de enfermedades vinculadas al consumo del agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achim, D., Ghotb, F., y McManus, K. J. (2007). Prediction of Water Pipe Asset Life Using Neural Networks. *Journal of Infrastructure Systems*, 13(1), 26–30.
- Adedeji, K. B., Hamam, Y., Abe, B. y Abu-Mahfouz, A. M. (2017). Towards achieving a reliable leakage detection and localization algorithm for application in water piping networks: An overview. *IEEE Access*, 5, 20272–20285.
- Agüero R. (1997). *Agua Potable para Poblaciones Rurales*. 1 ed. Lima: SER. Disponible en: <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-ricardo-palma/abastecimientode-agua/aguapotable-poblacionesrurales-roger-aguero-pittman/27281015>
- Aparicio, C. (2023). Evaluación y mejoramiento de las estructuras hidráulicas, para optimizar el sistema de abastecimiento de agua potable del caserío de Parac, distrito de Succha, provincia de Aija, departamento de Áncash - 2023. *Uadech.edu.pe*. <https://hdl.handle.net/20.500.13032/35009>
- Avalos, C., Flores, W., y Silva, J. (2021). Control de presiones y reducción de pérdidas en el sistema de distribución de agua potable del Sector VI - Augusto B. Leguía de Tacna. *INGENIERÍA INVESTIGA*, 3(1), 620–631. <https://doi.org/10.47796/ing.v3i1.485>
- Baldeon, L. (2016). Modelamiento hidrológico de la sub cuenca del Rio Achamayo. *Uncp.edu.pe*. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/4588>
- Barton, N. A., Farewell, T. S., Hallett, S. H., y Acland, T. F. (2019). Improving pipe failure predictions: Factors affecting pipe failure in drinking water networks. *Water Research*, 164, 114926. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2019.114926>
- Cazar, F., y Deidán, P. (2023). Simulación del comportamiento de la red de distribución de agua potable del sector Cebollar 3.2 Centro a través de un modelo hidráulico para el análisis de vulnerabilidad operativas del sistema. *Uazuay.edu.ec*. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/13237>

- Chan, T. K., Chin, C. S., y Zhong, X. (2019). Review of Current Technologies and Proposed Intelligent Methodologies for Water Distributed Network Leakage Detection. *IEEE Access*, 6, 78846–78867. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2885444>
- Chow, Ven Te; Maidment, David R. y Mays, Larry W (1998). *Hidrología aplicada*. Ed. McGraw-Hill. Santa Fe de Bogotá, Colombia.
- Creighton, J. H. C. (1994). *A First Course in Probability Models and Statistical Inference*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8540-8>
- Davis, P., Burn, S., Moglia, M., y Gould, S. (2007). A physical probabilistic model to predict failure rates in buried PVC pipelines. *Reliability Engineering & System Safety*, 92(9), 1258–1266. <https://doi.org/10.1016/J.RESS.2006.08.001>
- Davis, P., De Silva, D., Marlow, D., Moglia, M., Gould, S., Burn, S. (2008). Failure prediction and optimal scheduling of replacements in asbestos cement water pipes. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 57(4), 239–252. <https://doi.org/10.2166/AQUA.2008.035y>
- De Silva, D Moglia, Davis, P., y Burn, S. (2006). Condition assessment and probabilistic analysis to estimate failure rates in buried metallic pipelines. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 55(3).
- FAO. (2022). Cambio climático. Recuperado de: <https://www.fao.org/climate-change/es>
- Faustino, J., y Jiménez, F. (2000). Manejo de cuencas hidrográficas. *Catie.ac.cr*. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8431>
- Fu, G., Jin, Y., Sun, S., Yuan, Z., y Butler, D. (2022). The role of deep learning in urban water management: A critical review. *Water Research*, 223, 118973. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2022.118973>
- Gómez C. (2008). Gestión de recursos hídricos en América Latina: Enfoques y desafíos. *Revista del Agua*, 26(2):45-60. <https://www.redalyc.org/pdf/3223/322327242006.pdf>

- Gregory, K.J. y Walling, D.E. (1973) Drainage Basin. Form and Process: A Geomorphological Approach. Edward Arnold, London.
- 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.
- Horton, R. (1945) Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins; Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. Geological Society of America Bulletin, 56, 275-370.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. (2016). Ipcc.ch. https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml
- IPCC. (2001). Cambio climático 2001. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/TAR_syfull_es.pdf
- Kimutai, E., Betrie, G., Brander, R., Sadiq, R., y Tesfamariam, S. (2015). Comparison of Statistical Models for Predicting Pipe Failures: Illustrative Example with the City of Calgary Water Main Failure. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 6(4), 04015005. [https://doi-org.ezproxy.uniandes.edu.co/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000196](https://doi-org.ezproxy.uniandes.edu.co/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000196)
- Linsley, R. (1977). Hidrología para Ingenieros. Ed. McGraw. Ed. 2ª. México, D.F.
- López, M. y Muñoz, L. (2022). Modelo de simulación de alto nivel de abstracción para el análisis de escenarios del agua en Chile. DSpace Biblioteca Universidad de Talca (v1.5.2). Utalca.cl. <http://dspace.utalca.cl/handle/1950/13220>
- Lozano J. (2018). Recursos hídricos. Disponibilidad, variabilidad y gestión. n.71: p. 5-8. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022018000300005
- Macarlupú, E. (2023). Evaluación de metales pesados en el sistema de abastecimiento de agua potable del Centro Poblado de Humaya, 2022. *Unjfsc.edu.pe*. <http://hdl.handle.net/20.500.14067/8409>

- Makropoulos, C., y Savíc, D. A. (2019). Urban hydroinformatics: Past, present and future. *Water*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/W11101959>
- Marlow, D. (2010). Remaining Asset Life: A State of the Art Review. *Water Intelligence Online*, 9. <https://doi.org/10.2166/9781780403427>
- MINSA. (2011). Reglamento de la Calidad de Agua para Consumo Humano. Lima: Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud.
- Montecinos, A. (2015). Variabilidad climática interdecadal en el Pacífico. Boletín técnico: Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño, Instituto Geofísico del Perú, 2 (1), 4-8.
- Moran, M. (2024). *Agua y saneamiento - Desarrollo Sostenible*. Desarrollo Sostenible. Recuperado de: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- MVCS (2018). Norma Técnica de Diseño: Opciones Tecnológicas para Sistemas de Saneamiento en el Ámbito Rural. Lima 16 de mayo de 2018, del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento
- Organización Mundial de la Salud. (2006). Guías para la calidad del agua potable. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.
- Pozo, E. (2024). Evaluación de la disponibilidad de agua en la Cuenca Alta del Río Guayllabamba bajo el efecto de escenarios de cambio climático: Simulación de escenarios futuros de disponibilidad de agua en base a situaciones climáticas extremas observadas en el pasado. Epn.edu.ec. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/25696>
- Rajani, B., y Kleiner, Y. (2001). Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models. *Urban Water*, 3(3), 151–164. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(01\)00032-2](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00032-2)
- Ramirez, J. (2024). Modelo predictivo basado en redes neuronales artificiales para pronosticar el consumo de agua potable en la ciudad de Iquitos. 12.84.13. <https://hdl.handle.net/20.500.13084/8532>

- Remenieras, G. (1974). Tratado de hidrología aplicada. Editores Asociados, S.A. 2ª ed
Barcelona España.
- Ricardos R (2018). Ingeniería Hidráulica para América Latina. Ciudad de México:
Ediciones del Sur.
- Romero-Ben, L., Alves, D., Blesa, J., Cembrano, G., Puig, V., & Duviella, E. (2022a).
Leak Localization in Water Distribution Networks Using Data-Driven and Model-
Based Approaches. Journal of Water Resources Planning and Management,
148(5), 04022016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001542](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001542)
- Scheidegger, A., Leitão, J. P., y Scholten, L. (2015). Statistical failure models for water
distribution pipes – A review from a unified perspective. Water Research, 83, 237–
247. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2015.06.027>
- Snider, B., y McBean, E. A. (2020). Watermain breaks and data: the intricate relationship
between data availability and accuracy of predictions, 17(2), 163–176.
<https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1748664>
- SUNASS (2022). *El 10 % la población peruana no tiene agua potable y 23 % no accede
al alcantarillado.* Www.gob.pe. Recuperado de:
[https://www.gob.pe/institucion/sunass/noticias/781301-el-10-la-poblacion-
peruana-no-tiene-agua-potable-y-23-no-accede-al-alcantarillado/](https://www.gob.pe/institucion/sunass/noticias/781301-el-10-la-poblacion-peruana-no-tiene-agua-potable-y-23-no-accede-al-alcantarillado/)
- SUNASS (2023). *Informe de evaluación para el ingreso al régimen de apoyo transitorio
de seda Ayacucho.* Www.gob.pe. Recuperado de: [https://www.sunass.gob.pe/wp-
content/uploads/2023/01/13.6-Informe-de-evaluacion-para-el-ingreso-al-RAT-
Seda-Ayacucho-2.pdf](https://www.sunass.gob.pe/wp-content/uploads/2023/01/13.6-Informe-de-evaluacion-para-el-ingreso-al-RAT-Seda-Ayacucho-2.pdf)
- Tetumo García, J. (1993). Apuntes de hidrología superficial. Tesis de ingeniería en
irrigación. Universidad Autónoma de Chapingo. Departamento de Irrigación,
Chapingo, México.
- Torres A. (2019). Hidrología aplicada para ingenieros en América Latina. Bogotá:
Ediciones del Sur.

- UNESCO (2003). Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos: Agua para todos, agua para la vida, UNESCO, París.
- UN-Water (2024). *Coordinating the UN's work on water and sanitation*. UN-Water. <https://www.unwater.org/>
- Vasquez Villanueva, A. (2000). Manejo de cuencas altoandinas (1a. ed.). LIMA: escuela superior de administración de aguas "Charles Sutton".
- Vicencio, j. (2021). Modelo de gestión del agua para el abastecimiento poblacional de la ciudad de Lima y análisis de escenarios. Lamolina.edu.pe. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/5089>
- Wang, N., y Zarghamee, M. S. (2014). Evaluating Fitness-for-Service of Corroded Metal Pipelines: Structural Reliability Bases. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 5(1), 04013012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000148](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000148)
- Wang, Y., Moselhi, O., u Zayed, T. (2009). Study of the Suitability of Existing Deterioration Models for Water Mains. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 23(1), 40–46. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2009\)23:1\(40\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2009)23:1(40))
- Wilson, D., Fillion, Y., y Moore, I. (2015). State-of-the-art review of water pipe failure prediction models and applicability to large-diameter mains. *Urban Water ournal*, 14(2), 173–184. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2015.1080848>

ANEXOS

ANEXO N°1: Matriz de consistencia

TÍTULO: “DESARROLLO DE UN MODELO COMPUTACIONAL MEDIANTE SIMULACIÓN DE ESCENARIOS HÍDRICOS PARA EVALUAR LA EFICIENCIA DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE CCAHUANAMARCA, DISTRITO DE COLTA, PROVINCIA DE PAUCAR DEL SARASARA, AYACUCHO						
Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores	Metodología
General	General	General	Variable Independiente			
¿Cómo desarrollar un modelo computacional mediante simulación de escenarios hídricos que permita evaluar la eficiencia del sistema de agua potable en Ccahuanamarca, distrito de Colta, provincia de Paucar del Sarasara, Ayacucho?	Desarrollar un modelo computacional mediante simulación de escenarios hídricos para evaluar la eficiencia del sistema de agua potable en Ccahuanamarca, distrito de Colta, provincia de Paucar del Sarasara, Ayacucho.	El desarrollo de un modelo computacional mediante simulación de escenarios hídricos permitirá evaluar de manera efectiva la eficiencia del sistema de agua potable en Ccahuanamarca, distrito de Colta, provincia de Paucar del Sarasara, Ayacucho.	Modelo computacional mediante simulación de escenarios hídricos.	Modelo Computacional Simulación de Escenarios Hídricos	Precisión del modelo Método de Machine Learning Parámetros climáticos Parámetros hidrológicos Parámetros de demanda de agua	El enfoque de esta investigación es cuantitativo. El alcance de esta investigación es descriptivo y correlacional. El diseño de la investigación es no experimental y transversal.
Específicos	Específicos	Específicos	Variable Dependiente			La población de esta investigación está constituida por todos los sistemas de agua potable ubicados en la provincia de Paucar del Sarasara, Ayacucho.
¿Cuál es la disponibilidad y calidad del recurso hídrico en el sistema de agua potable de Ccahuanamarca?	Evaluar la disponibilidad y calidad del recurso hídrico en el sistema de agua potable de Ccahuanamarca.	La evaluación de la disponibilidad y calidad del recurso hídrico en el sistema de agua potable de Ccahuanamarca revelará deficiencias en la cantidad y calidad del agua que impactan	Eficiencia del sistema de agua potable en Ccahuanamarca.	Disponibilidad del Recurso Hídrico	Tasa de captación de agua Volumen de agua disponible Frecuencia de escasez de	

		negativamente en la eficiencia del sistema.			agua	La muestra seleccionada para esta investigación es el sistema de agua potable de la localidad de Ccahuanamarca, distrito de Colta, provincia de Paucar del Sarasara, Ayacucho. El sistema de agua potable de Ccahuanamarca ha sido elegido como muestra debido a su representatividad y relevancia dentro de la provincia de Paucar del Sarasara.
¿Cómo se puede desarrollar un modelo de simulación computacional que permita recrear diferentes escenarios hídricos para el sistema de agua potable de Ccahuanamarca?	Desarrollar un modelo de simulación computacional que permita recrear diferentes escenarios hídricos para el sistema de agua potable de Ccahuanamarca.	El desarrollo de un modelo de simulación computacional permitirá recrear con precisión diferentes escenarios hídricos, proporcionando una herramienta para analizar y prever el comportamiento del sistema de agua potable de Ccahuanamarca bajo diversas condiciones.		Distribución	Volumen de agua perdido Cobertura del servicio	
¿Cómo se puede simular el modelo desarrollado para medir la eficiencia actual del sistema de agua potable de Ccahuanamarca?	Simular el modelo desarrollado para medir la eficiencia actual del sistema de agua potable de Ccahuanamarca.	La simulación del modelo desarrollado permitirá medir la eficiencia actual del sistema de agua potable de Ccahuanamarca, identificando áreas críticas y sugiriendo mejoras para optimizar su funcionamiento y gestión.				

Nota. Elaboración propia

ANEXO N°2: Precipitación total mensual generada para la Quebrada Ccahuanamarca

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1965	63,64	60,44	59,00	20,47	3,63	2,13	2,50	6,40	7,33	10,61	9,62	28,51	274,29
1966	43,12	40,95	39,97	13,87	2,46	1,44	1,69	4,34	4,96	7,19	6,52	19,32	185,82
1967	156,17	148,31	144,76	50,24	8,90	5,23	6,13	15,71	17,98	26,04	23,61	69,96	673,04
1968	161,21	153,10	149,44	51,86	9,18	5,40	6,33	16,22	18,56	26,88	24,37	72,22	694,76
1969	120,56	114,50	111,76	38,79	6,87	4,04	4,74	12,13	13,88	20,10	18,23	54,01	519,59
1970	144,35	137,09	133,81	46,44	8,22	4,83	5,67	14,52	16,62	24,07	21,82	64,67	622,11
1971	149,01	141,52	138,13	47,94	8,49	4,99	5,85	14,99	17,15	24,84	22,53	66,76	642,11
1972	219,36	208,33	203,34	70,57	12,50	7,35	8,62	22,07	25,25	36,57	33,16	98,28	945,39
1973	154,46	146,69	143,18	49,69	8,80	5,17	6,07	15,54	17,78	25,75	23,35	69,20	665,70
1974	160,19	152,13	148,50	51,54	9,13	5,36	6,29	16,12	18,44	26,71	24,22	71,77	690,40
1975	147,46	140,04	136,69	47,44	8,40	4,94	5,79	14,83	16,98	24,58	22,29	66,06	635,51
1976	164,43	156,15	152,42	52,90	9,37	5,51	6,46	16,54	18,93	27,41	24,86	73,67	708,64
1977	138,79	131,80	128,65	44,65	7,91	4,65	5,45	13,96	15,98	23,14	20,98	62,18	598,13
1978	58,04	55,12	53,81	18,67	3,31	1,94	2,28	5,84	6,68	9,68	8,77	26,00	250,15
1979	80,80	76,73	74,90	25,99	4,60	2,71	3,17	8,13	9,30	13,47	12,21	36,20	348,23
1980	60,08	57,06	55,70	19,33	3,42	2,01	2,36	6,04	6,92	10,02	9,08	26,92	258,95

1981	145,98	138,63	135,32	46,96	8,32	4,89	5,73	14,69	16,81	24,34	22,07	65,40	629,13
1982	78,36	74,42	72,64	25,21	4,46	2,62	3,08	7,88	9,02	13,06	11,85	35,11	337,73
1983	61,36	58,27	56,68	19,74	3,50	2,05	2,41	6,17	7,06	10,23	9,28	27,49	264,44
1984	216,87	205,96	201,04	69,77	12,35	7,26	8,52	21,82	24,97	36,16	32,79	97,16	934,66
1985	205,13	194,81	190,15	65,99	11,69	6,87	8,06	20,64	23,61	34,20	31,01	91,90	884,04
1986	196,23	186,36	181,90	63,13	11,18	6,57	7,71	19,74	22,59	32,71	29,67	87,91	845,70
1987	82,49	78,34	76,46	26,54	4,70	2,76	3,24	8,30	9,50	13,75	12,47	36,95	355,49
1988	157,22	149,31	145,74	50,58	8,96	5,26	6,18	15,82	18,10	26,21	23,77	70,43	677,55
1989	113,86	108,13	105,54	36,63	6,49	3,81	4,47	11,45	13,11	18,98	17,21	51,01	490,74
1990	93,61	88,90	86,78	30,12	5,33	3,13	3,68	9,42	10,78	15,61	14,15	41,94	403,44
1991	89,90	85,38	83,34	28,92	5,12	3,01	3,53	9,04	10,35	14,99	13,59	40,28	387,46
1992	56,81	53,95	52,66	18,28	3,24	1,90	2,23	5,71	6,54	9,47	8,59	25,45	244,82
1993	126,39	120,03	117,16	40,66	7,20	4,23	4,96	12,71	14,55	21,07	19,11	56,62	544,70
1994	169,09	160,58	156,74	54,40	9,63	5,66	6,64	17,01	19,47	28,19	25,56	75,72	728,74
1995	125,94	119,60	116,74	40,52	7,17	4,22	4,95	12,67	14,50	21,00	19,04	56,42	542,76
1996	154,28	146,51	143,01	49,63	8,79	5,17	6,06	15,52	17,76	25,72	23,32	69,12	664,89
1997	159,11	151,10	147,49	51,19	9,06	5,33	6,25	16,01	18,32	25,63	24,05	71,28	685,72
1998	147,31	139,90	136,55	47,39	8,39	4,93	5,79	14,82	16,96	24,56	22,27	66,00	634,86
1999	196,68	186,78	182,32	63,27	11,20	6,59	7,73	19,79	22,64	32,79	29,73	88,11	847,64

2000	183,33	174,10	169,94	58,98	10,44	6,14	7,20	18,44	21,10	30,56	27,71	82,13	790,09
2001	152,14	144,49	141,03	48,95	8,67	5,09	5,98	15,30	17,51	25,36	23,00	68,16	655,69
2002	163,62	155,39	151,67	52,64	9,32	5,48	6,43	16,46	18,84	27,28	24,74	73,30	705,17
2003	61,81	58,70	57,29	19,88	3,52	2,07	2,43	6,22	7,12	10,30	9,34	27,69	266,38
2004	111,05	105,46	102,94	35,73	6,33	3,72	4,36	11,17	12,78	18,51	16,79	49,75	478,59

Nota. Información tomada del Informe Técnico N° 155-2016-ANA-AAA.CO.SDARH

ANEXO N°3: Caudales mensuales obtenidos con un 75% de probabilidad de permanencia para la Quebrada Ccahuanamarca

ORDEN	%	EN	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1	2,44	0,023	0,0	0,02138689	0,007	0,001	0,001	0,000906	0,002	0,003	0,004	0,003	0,010	0,10
2	4,88	0,022	0,0213	0,021	0,007	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003	0,004	0,003	0,010	0,10
3	7,32	0,020	0,0186	0,018	0,006	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003	0,003	0,003	0,008	0,08
4	9,76	0,018	0,0167	0,016	0,006	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003	0,003	0,008	0,08
5	12,20	0,018	0,017	0,01627729	0,006	0,001	0,001	0,001766	0,002	0,002	0,003	0,003	0,008	0,08
6	14,63	0,016	0,0156	0,015	0,006	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003	0,003	0,007	0,07
7	17,07	0,015	0,0144	0,014	0,005	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003	0,003	0,007	0,07
8	19,51	0,015	0,0139	0,014	0,005	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003	0,003	0,007	0,07
9	21,95	0,014	0,014	0,01319801	0,004	0,001	0,001	0,001432	0,002	0,002	0,002	0,002	0,006303	0,06
10	24,39	0,014	0,013	0,013	0,005	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,006	0,06
11	26,83	0,014	0,013	0,013	0,004	0,001	0,001	0,001389	0,002	0,002	0,002	0,002	0,006	0,06
12	29,27	0,013	0,0129	0,013	0,004	0,000	0,000	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,006	0,06
13	31,71	0,013	0,013	0,0125	0,004	0,001	0,000	0,001326	0,002	0,002	0,002	0,002	0,006	0,06
14	34,15	0,0118	0,011	0,0105546	0,004	0,001	0,001	0,001145	0,001	0,002	0,005	0,002	0,005101	0,05

15	36,59	0,011	0,0107	0,010	0,004	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,005	0,05
16	39,02	0,011	0,0107	0,010	0,004	0,001	0,000377	0,000443	0,001	0,001	0,001879	0,002	0,005	0,05
17	41,46	0,011	0,0103	0,010	0,003	0,001	0,000	0,001091	0,001	0,001	0,002	0,002	0,005	0,05
18	43,90	0,01068117	0,010	0,00909129	0,002	0,000	0,000	0,001076	0,001	0,001	0,001	0,001	0,005	0,05
19	46,34	0,010	0,0097	0,009	0,003278	0,001	0,000	0,001076	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,04
20	48,78	0,0100353	0,00953043	0,00930258	0,003228	0,000572	0,000336	0,000394	0,001	0,001155	0,001173	0,001517	0,004496	0,04
21	51,22	0,010	0,009	0,009	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,04
22	53,66	0,010	0,0087	0,009	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,04
23	56,10	0,009	0,0085	0,009	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,04
24	58,54	0,009	0,0083	0,008	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,04
25	60,98	0,0085062	0,0080738	0,00788523	0,002737	0,000485	0,000285	0,000334	0,001	0,000856	0,000979	0,001286	0,003811	0,04
26	63,41	0,008	0,008	0,008	0,003	0,001	0,000	0,000823	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,04
27	65,85	0,008	0,0079	0,008	0,003	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001013	0,001	0,003708	0,04
28	68,29	0,008	0,0076	0,00745738	0,003	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,03
29	70,73	0,008	0,007	0,007	0,002	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,03
30	73,17	0,007	0,0070	0,007	0,002	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,03

31	75,61	0,006	0,0053	0,005	0,002	0,000	0,000	0,000185	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002	0,02
32	78,05	0,00532357	0,0050575	0,00493488	0,001713	0,000303	0,000178	0,000209	0,000536	0,000613	0,000888	0,000805	0,002385	0,02
33	80,49	0,005	0,00482755	0,005	0,002	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,01
34	82,93	0,002	0,0019	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,002	0,01
35	85,37	0,002	0,0018	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,01
36	87,80	0,001	0,0011	0,00103157	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,01
37	90,24	0,001	0,0010	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00
38	92,68	0,001	0,0009	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00
39	95,12	0,001	0,0008	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00
40	97,56	0,000	0,0004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00
AL 75% PERSISTENCIA		0,006	0,006	0,006	0,002	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,026

Nota. Información tomada del Informe Técnico N° 155-2016-ANA-AAA.CO.SDARH



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 12-2026-FIMGC

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, en la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **Resolución Decanal No 060-2026-FIMGC-D**, a los **veintiocho días del mes de abril de 2026**, siendo las **10:21 a.m.**, reunidos en el **Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería de Civil**, bajo la presidencia del **MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CARDENAS**, y los miembros: **Ing. Edward LEON PALACIOS**, **Ing. Jaime Leonardo BENDEZU PRADO** y **Ing. Hemerson LIZARBE ALACRON**, actuando como secretario docente el **Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNANDEZ**, para proceder a la sustentación de tesis para optar el **Título Profesional de Ingeniero de Civil**, del Bachiller en Ciencias de la Ingeniería de Civil:

Ronal Santos ANCCARE MALDONADO

Quien presentó la tesis denominada:

Desarrollo de un modelo computacional mediante simulación de escenarios hidricos para evaluar la eficiencia del sistema de agua potable Ccahuanamarca, distrito de Colta, provincia de Paucar de Sarasara, Ayacucho

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

Aprobado con 16 (dieciseis)

Siendo las **11:36 a.m.** del día **28 de abril del 2026**, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad de lo actuado los miembros del jurado firmamos al pie del presente.

MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CARDENAS
Presidente

Ing. Edward LEON PALACIOS
Miembro

Ing. Hemerson LIZARBE ALACRON
Miembro

Ing. Jaime Leonardo BENDEZU PRADO
Miembro - Asesor

Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNANDEZ
Secretario docente de la FIMGC



CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N° 15-2026-FIMGC/ASIH

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado con el software Turnitin, de la Escuela 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 : Ronal Santos ANCCARE MALDONADO
Escuela Profesional : INGENIERÍA CIVIL
Título de la Tesis : Desarrollo de un modelo computacional mediante simulación de escenarios hídricos para evaluar la eficiencia del sistema de agua potable Ccahuanamarca, distrito de Colta, provincia de Paucar del Sarasara, Ayacucho.
Evaluación de la Originalidad : 23 % Índice de Similitud
Identificador de la entrega : 2988464220

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, 23 de junio del 2026



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

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

Desarrollo de un modelo computacional mediante simulación de escenarios hídricos para evaluar la eficiencia del sistema de agua potable Ccahuanamarca, distrito de Colta, provincia de Paucar del Sarasara, Ayacucho.

por Ronal Santos ANCCARE MALDONADO

Fecha de entrega: 23-jun-2026 01:15p. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2988464220

Nombre del archivo: Te_Ronal_Santos_Anccare_Maldonado.pdf (1.67M)

Total de palabras: 26559

Total de caracteres: 150245

Desarrollo de un modelo computacional mediante simulación de escenarios hídricos para evaluar la eficiencia del sistema de agua potable Ccahuanamarca, distrito de Colta, provincia de Paucar del Sarasara, Ayacucho.

INFORME DE ORIGINALIDAD

23%

INDICE DE SIMILITUD

22%

FUENTES DE INTERNET

7%

PUBLICACIONES

12%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

Submitted to Universidad Nacional de San
Cristóbal de Huamanga

Trabajo del estudiante

10%

2

repositorio.ana.gob.pe

Fuente de Internet

7%

3

repositorio.unsch.edu.pe

Fuente de Internet

2%

4

repositorio.uladech.edu.pe

Fuente de Internet

1%

5

repositorio.utea.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

6

estadistica.tsjdf.gob.mx

Fuente de Internet

<1%

7

dspace.uazuay.edu.ec

Fuente de Internet

<1%

8

María Carmen Cárcel Mas. "Aproximación a
un modelo de medición de presencia digital
en entidades del tercer sector de acción
social", Universitat Politècnica de Valencia,
2025

Publicación

<1%

9

dspace.ugal.cl

Fuente de Internet

<1%

10	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1 %
11	pdfcookie.com Fuente de Internet	<1 %
12	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
13	Carlos Calderon-Cordova, Luis Quichimbo, Fernando Reyes. "Development of hardware architecture applied to real-time monitoring in drinking water distribution system of the Loja city", 2016 11th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), 2016 Publicación	<1 %
14	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
15	www.lenhs.ct.ufpb.br Fuente de Internet	<1 %
16	Submitted to Universidad Internacional de la Rioja Trabajo del estudiante	<1 %
17	Submitted to Wilfrid Laurier University Trabajo del estudiante	<1 %
18	juandomingofarnos.wordpress.com Fuente de Internet	<1 %
19	repositorio.uap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
20	repositorio.unjfsc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
21	Submitted to uncedu Trabajo del estudiante	<1 %

Excluir citas	Activo	Excluir coincidencias	< 30 words
Excluir bibliografía	Activo		