

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

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

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

**Modelo hidrológico difuso para la planificación de recursos
hídricos bajo escenarios de estrés hídrico en la cuenca del
río Pampas**

Para optar el título profesional de:
INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:
Bach. Jonatan Jhony JUNO LLACTAHUAMAN

ASESOR:
Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO

AYACUCHO - PERÚ

2025

Dedicatoria

A Dios quien supo guiarme por el buen camino de la vida y dándome las fuerzas en todo momento para seguir adelante.

A mis padres quienes apostaron siempre en la educación y en mi formación personal para enfrentarlas adversidades con dignidad y respeto.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
AYACUCHO, JUNIO DE 2025

Bach. JUNO LLACTAHUAMAN, Jonatan Jhony

Agradecimiento

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga por todas las enseñanzas impartidas en mi formación académica y por haberme brindado todas las facilidades para la consecución de mis objetivos trazados.

A la universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga; Donde tendré la oportunidad de mi formación profesional.

Al Msc. Ing. Jaime Leonardo Bendezú Prado, por sus pautas en el desarrollo de esta tesis.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
AYACUCHO, JUNIO DE 2025

Bach. JUNO LLACTAHUAMAN, Jonatan Jhony

Resumen

El presente investigación tuvo como finalidad desarrollar un modelo hidrológico difuso para la planificación de los recursos hídricos bajo escenarios de estrés hídrico en la cuenca del río Pampas, región caracterizada por su alta variabilidad climática y creciente presión sobre el uso del agua. Para ello, se empleó un enfoque metodológico cuantitativo, aplicando un sistema de inferencia difusa tipo Mamdani, que permitió simular el comportamiento del caudal mensual en función de variables climáticas como la precipitación, temperatura, humedad y velocidad del viento. La estimación de la disponibilidad hídrica se realizó mediante datos históricos comprendidos entre 1965 y 2024, evaluando además diferentes escenarios de estrés hídrico (100%, 75%, 50%, 25% y 0%) con el objetivo de identificar niveles críticos de abastecimiento. El modelo mostró un buen ajuste predictivo con un coeficiente de correlación $R = 0.893$ y errores aceptables según las métricas MSE, RMSE y MAE mensuales. Asimismo, se analizaron la relación precipitación - caudal y la relación precipitación-escorrentía, evidenciando el impacto de la variabilidad climática sobre la respuesta hidrológica de la cuenca. Los resultados permitieron comprobar que el modelo hidrológico difuso es una herramienta efectiva para representar dinámicas no lineales e inciertas del ciclo hidrológico, y puede ser aplicado como instrumento de planificación en contextos donde se requiere una gestión sostenible del agua. Finalmente, se reafirma la importancia de integrar modelos inteligentes en la toma de decisiones hídricas ante el aumento de fenómenos climáticos extremos y la creciente demanda del recurso.

Palabras clave: modelo hidrológico difuso, estrés hídrico, cuenca del río Pampas, lógica difusa, planificación de recursos hídricos.

Abstract

The purpose of this research was to develop a fuzzy hydrological model for water resource planning under water stress scenarios in the Pampas river basin, a region characterized by high climatic variability and increasing pressure on water use. For this purpose, a quantitative methodological approach was used, applying a Mamdani-type fuzzy inference system, which made it possible to simulate the behavior of the monthly flow as a function of climatic variables such as precipitation, temperature, humidity and wind speed. Water availability was estimated using historical data from 1965 to 2024, also evaluating different water stress scenarios (100%, 75%, 50%, 25% and 0%) in order to identify critical supply levels. The model showed a good predictive fit with a correlation coefficient $R = 0.893$ and acceptable errors according to the monthly MSE, RMSE and MAE metrics. Likewise, the rainfall-flow relationship and the rainfall-runoff relationship were analyzed, showing the impact of climate variability on the hydrological response of the basin. The results showed that the fuzzy hydrological model is an effective tool to represent nonlinear and uncertain dynamics of the hydrological cycle, and can be applied as a planning tool in contexts where sustainable water management is required. Finally, it reaffirms the importance of integrating intelligent models in water decision making in the face of increasing extreme weather events and the growing demand for the resource.

Keywords: fuzzy hydrological model, water stress, Pampas river basin, fuzzy logic, water resources planning.

Introducción

La planificación y gestión eficiente de los recursos hídricos representan actualmente uno de los mayores desafíos en territorios vulnerables al cambio climático, como lo es la cuenca del río Pampas, ubicada en el sur del Perú. Esta cuenca presenta una marcada variabilidad en su régimen hidrológico, donde las precipitaciones se concentran estacionalmente y los periodos de estiaje pueden extenderse significativamente, comprometiendo el abastecimiento de agua para consumo humano, riego agrícola, energía y sostenibilidad ambiental. La presión creciente sobre el recurso, sumada a fenómenos climáticos extremos, ha intensificado la necesidad de aplicar herramientas técnicas que permitan anticipar escenarios de escasez hídrica y optimizar la toma de decisiones.

En este contexto, los modelos hidrológicos tradicionales presentan limitaciones al abordar la incertidumbre inherente a los sistemas naturales. Por ello, el uso de modelos basados en lógica difusa, como el modelo Mamdani, constituye una alternativa innovadora para representar con mayor flexibilidad las complejas relaciones entre variables climáticas e hidrológicas. A través de la incorporación de datos mensuales de precipitación, temperatura, humedad y viento, el modelo hidrológico difuso permite estimar el caudal y evaluar su comportamiento frente a distintos escenarios de estrés hídrico.

La presente investigación tiene como objetivo general desarrollar un modelo hidrológico difuso para la planificación de recursos hídricos bajo escenarios de estrés hídrico en la cuenca del río Pampas. Para ello, se plantea como objetivos específicos: estimar la disponibilidad hídrica utilizando el modelo difuso en escenarios de variabilidad climática; evaluar el nivel de estrés hídrico mediante simulaciones en el modelo propuesto; y analizar la relación precipitación-escorrentía para comprender el impacto de dichos escenarios sobre la gestión del recurso. Los resultados de esta investigación permiten identificar los meses críticos de menor disponibilidad hídrica, evaluar el comportamiento del modelo bajo diferentes niveles de estrés y proponer lineamientos técnicos para la gestión integrada del agua en la cuenca. Asimismo, se contribuye con evidencia científica relevante para futuras investigaciones, así como para autoridades locales y regionales responsables de la gestión del recurso.

ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Resumen	iv
Abstract	v
Introducción	vi
Índice General	vii
Índice de Cuadros	x
Índice de Figuras	xi
I Planteamiento del Problema	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Delimitación de problema ,,.....	2
1.2.1 Espacial	2
1.2.2 Temporal.....	2
1.2.3 Temática y unidad de análisis.....	2
1.3 Formulación del problema	2
1.3.1 Problema general	2
1.3.2 Problemas específicos	2
1.4 Justificación e importancia	3
1.4.1 Justificación	3
1.4.2 Importancia	3
1.5 Limitaciones de la investigación	3
1.6 Objetivos	4
1.6.1 Objetivos general	4
1.6.2 Objetivos específicos.....	4
II Marco Teórico	5
2.1 Antecedentes.....	5
2.1.1 Investigaciones internacionales.....	5

2.1.2	Investigaciones nacionales	6
2.2	Bases teóricas	7
2.2.1	Fuzzy logic o Lógica Difusa	7
2.2.2	Reglas difusas o Reglas de fuzzy logica	10
2.2.3	Estrés hídrico	11
2.2.4	Variabilidad Climática	12
2.2.5	Gestión de recursos hídricos	15
2.2.6	Precipitación	16
2.2.7	Temperatura	19
2.2.8	Caudal	19
2.2.9	Indicadores hidrológicos y climáticos en la planificación bajo estrés hídrico	21
2.2.10	Marco Conceptual	27
III	Método de la investigación	29
3.1	Diseño de investigación	29
3.1.1	Tipo de Investigación	29
3.1.2	Nivel de Investigación	29
3.2	Población y muestra	30
3.3	Hipótesis.....	30
3.3.1	Hipótesis general.....	30
3.3.2	Hipótesis específicasl	30
3.4	Operacionalización de variables	30
3.5	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	31
3.6	Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	32
3.7	Desarrollo del trabajo de tesis.....	32
3.7.1	Ubicación Geográfica, Demarcación Hidrográfica y Accesibilidad	32
3.7.2	Climatología	34
3.7.3	Precipitación Media Mensual.....	43
3.7.4	Descargas medias mensuales.....	44
3.7.5	Demanda Hídrica	48
3.7.6	Caudales medios.....	50
IV	RESULTADOS	51
4.1	Estimación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Pampas	51
4.2	Evaluación del estrés hídrico en la gestión de recursos hídricos	59
4.3	Discusión	62
V	CONCLUSIONES	65
VI	RECOMENDACIONES	67

Referencias bibliográficas.	68
Referencias bibliográficas.	68
A ANEXOS	73

ÍNDICE DE CUADROS

3.1	Vías de acceso a la cuenca del río Pampas.....	34
3.2	Variación mensual de la temperatura media según altitud	35
3.3	Temperatura Media Mensual por Subcuenca (°C)	35
3.4	Variación Mensual de la Temperatura Máxima en la Cuenca del Río Pampas	36
3.5	Temperatura Máxima Media Mensual por Subcuenca (°C)	37
3.6	Variación Mensual de la Temperatura Mínima en la Cuenca del Río Pampas	38
3.7	Temperatura Mínima Media Mensual por Subcuenca (°C)	38
3.8	Variación Mensual de la Humedad Relativa en la Cuenca del Río Pampas .	39
3.9	Humedad Relativa Media Mensual por Subcuenca (%).....	40
3.10	Variación Mensual de la Velocidad del Viento en la Cuenca del Río Pampas	41
3.11	Velocidad Media Mensual del Viento por Subcuenca (m/s).....	41
3.12	Variación Media de la Evapotranspiración a Nivel de Subcuencas (mm/mes)	42
3.13	Precipitación Media Mensual por Subcuenca (mm/mes)	43
3.14	Variación Mensual de la Precipitación Acumulada por Año (mm/mes)	45
3.15	Estadísticos descriptivos de la precipitación mensual acumulada (mm/mes)	46
3.16	Requerimiento hídrico mensual en las subcuencas del río Pampas (Hm ³).....	49
3.17	Caudales Medios Río Pampas.....	50
4.1	Precipitación Mensual Estimada periodo 1965 - 2024.....	52
4.2	Continuacion de Precipitación Mensual Estimada periodo 1965 - 2024	53
4.3	Métricas de evaluación del modelo difuso por mes.....	58
4.4	Caudal estimado mensual (m ³ /s) por escenario de estrés hídrico.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1 Operaciones típicas utilizando conjuntos difusos	9
2.2 Grupo de escenarios IE-EE	14
2.3 Clasificación de las precipitaciones.....	17
2.4 Flujo que pasa a través de una sección transversal.....	20
3.1 Cuadro de operacionalización de variables	31
3.2 Mapa hidrográfico de la cuenca del río Pampas	33
3.3 Variación Mensual De La Temperatura.....	36
3.4 Variación Mensual De La Temperatura Máxima.....	37
3.5 Variación Mensual De La Temperatura Mínima.....	39
3.6 Variación Mensual De La Humedad Relativa.....	40
3.7 Variación Media Del Viento.....	42
3.8 Variación Media De La Evapotranspiración.....	43
3.9 Variación De La Precipitación Mensual	44
3.10 Precipitación Media Mensual	47
3.11 Rango de Precipitación Mensual	47
3.12 Variabilidad Mensual de la Precipitación	48
3.13 Caudales Medios Mensuales del Río Pampas.....	50
4.1 Variación Mensual De La Precipitación Acumulada periodo 1965 - 2024	54
4.2 Comparación de caudal observado vs estimado.....	54
4.3 comparacion acumulada anual	55
4.4 Histograma del error estimado- observado	56
4.5 Error absoluto por mes.....	56
4.6 Caudal estimado con error apilado	57
4.7 Disponibilidad hídrica estimada.....	58
4.8 Resultados de estrés hídrico	60
4.9 Relación Precipitación - Caudal estimado	61
4.10 Relación Precipitación - Caudal estimado	62

Planteamiento del Problema

1.1 Descripción del problema

La cuenca del río Pampas, enfrenta diversas problemáticas relacionadas con la gestión de sus recursos hídricos, influenciadas por factores climáticos, sociales y económicos. Estos problemas se ven agravados por la variabilidad en los patrones de precipitación, el incremento de temperaturas y el impacto de actividades humanas como la agricultura intensiva, la minería y el crecimiento urbano. Estas dinámicas generan desafíos en la distribución, calidad y disponibilidad del agua, impactando tanto a las comunidades humanas como a los ecosistemas de la región.

La cuenca presenta un régimen hídrico altamente estacional, donde el 80% de las precipitaciones ocurren entre octubre y abril. Esta concentración temporal genera períodos de abundancia seguidos por déficits que afectan los sistemas de riego, el abastecimiento doméstico y la recarga de acuíferos. A esto se suman eventos extremos como sequías, inundaciones y heladas, que incrementan la vulnerabilidad de la región y complican la planificación hídrica [Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño (CIIFEN), 2019]. Además, las soluciones tradicionales de gestión hídrica, basadas en análisis lineales y proyecciones deterministas, no logran capturar la complejidad y la incertidumbre inherentes a los sistemas hidrológicos.

En este contexto, el desarrollo de un modelo hidrológico difuso aparece como una alternativa innovadora para abordar las problemáticas de la cuenca. La lógica difusa permite trabajar con datos imprecisos o ambiguos, integrando variables climáticas, socioeconómicas y biofísicas para analizar escenarios complejos de estrés hídrico. Este enfoque facilita la interpretación de condiciones intermedias, donde no es posible clasificar los estados

de las variables como estrictamente “altos” o “bajos”, sino que se consideran grados de pertenencia en un rango continuo entre 0 y 1. El modelo hidrológico difuso permitirá evaluar la disponibilidad de agua bajo diferentes escenarios de variabilidad climática, identificando áreas críticas y priorizando acciones estratégicas para la gestión sostenible del recurso. Además, este enfoque incorpora la participación de múltiples actores y el conocimiento local, promoviendo una planificación adaptativa que contemple tanto las necesidades humanas como la conservación de los ecosistemas.

En base a todo lo mencionado, el desarrollo de un modelo hidrológico basado en lógica difusa responde a la necesidad de herramientas más flexibles y precisas para la gestión hídrica en la cuenca del río Pampas. Este enfoque no solo aborda las incertidumbres propias del cambio climático, sino que también mejora la capacidad de planificación, contribuyendo a una gestión equitativa, sostenible y resiliente del agua en la región.

1.2 Delimitación de problema

1.2.1 Espacial

La presente investigación se delimita espacialmente a la cuenca del río Pampas, ubicada en el sur del Perú, abarcando territorios de las regiones de Ayacucho, Apurímac y Huancavelica. Esta cuenca es representativa por su régimen hidrológico estacional, su vulnerabilidad frente a eventos climáticos.

1.2.2 Temporal

1.2.3 Temática y unidad de análisis

Temáticamente, el estudio se centra en la planificación de recursos hídricos en contextos de estrés hídrico, mediante el desarrollo y aplicación de un modelo hidrológico basado en lógica difusa.

La unidad de análisis está constituida por el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Pampas frente a diferentes escenarios de estrés hídrico.

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Problema general

¿Cómo desarrollar un modelo hidrológico difuso para la planificación de recursos hídricos bajo escenarios de estrés hídrico en la cuenca del río Pampas?

1.3.2 Problemas específicos

- (a) ¿Cómo se puede estimar la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Pampas utilizando el modelo hidrológico difuso bajo escenarios de variabilidad climática?
- (b) ¿Cómo se manifiesta el estrés hídrico en la gestión de recursos hídricos, según las simulaciones realizadas con el modelo hidrológico difuso?
- (c) ¿Qué tan efectivo es el modelo hidrológico difuso en la predicción de caudales y

la relación precipitación-escorrentía para evaluar el impacto del estrés hídrico en la gestión hídrica?

1.4 Justificación e importancia

1.4.1 Justificación

La presente investigación se justifica por la necesidad de mejorar la planificación de los recursos hídricos en la cuenca del río Pampas, considerando los efectos de la variabilidad climática y el estrés hídrico. Los métodos convencionales no permiten abordar adecuadamente la incertidumbre y complejidad de los sistemas hidrológicos actuales. Por ello, se plantea el uso de un modelo hidrológico difuso como alternativa para representar de manera más flexible y precisa las condiciones de disponibilidad del agua, incorporando variables climáticas, hidrológicas y socioeconómicas.

Este enfoque busca apoyar el análisis y la toma de decisiones sobre la gestión del agua en escenarios variables, permitiendo identificar áreas críticas y orientar acciones de forma más oportuna. Además, aporta al desarrollo de herramientas teóricas aplicables a otras cuencas con problemáticas similares.

1.4.2 Importancia

La investigación es importante porque ofrece una herramienta metodológica que puede mejorar la gestión del recurso hídrico en una cuenca que enfrenta presiones ambientales, sociales y climáticas. La cuenca del río Pampas es una zona de importancia regional por su función en el abastecimiento de agua para diversos usos, y por su vulnerabilidad frente a eventos extremos como sequías o inundaciones. El modelo propuesto contribuirá a una planificación más eficiente y sostenible del recurso, y puede servir como referencia para futuras investigaciones o aplicaciones en otras regiones del país. Asimismo, proporciona información útil para instituciones que trabajan en el manejo del agua y la adaptación al cambio climático.

1.5 Limitaciones de la investigación

La principal limitación de esta investigación es la disponibilidad y calidad de los datos hidrometeorológicos históricos en la cuenca del río Pampas, ya que en algunas zonas no se cuenta con registros completos o actualizados. Esto puede afectar la precisión de las simulaciones y del modelo hidrológico difuso propuesto. Asimismo, al tratarse de una investigación de tipo básica, el alcance se limita al desarrollo teórico y metodológico del modelo, sin incluir una validación práctica en campo. Otra limitación es la necesidad de realizar suposiciones o estimaciones para ciertos parámetros, debido a la falta de datos específicos sobre usos del agua y demanda actual.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivos general

Desarrollar un modelo hidrológico difuso para la planificación de recursos hídricos bajo escenarios de estrés hídrico en la cuenca del río Pampas.

1.6.2 Objetivos específicos

- (a) Estimar la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Pampas utilizando el modelo hidrológico difuso bajo escenarios de variabilidad climática.
- (b) Evaluar el estrés hídrico en la gestión de recursos hídricos mediante simulaciones en el modelo hidrológico difuso.
- (c) Evaluar el modelo hidrológico difuso en la predicción de caudales y la relación precipitación-correntía, para entender el impacto del estrés hídrico en la gestión hídrica.

Marco Teórico

2.1 Antecedentes

2.1.1 Investigaciones internacionales

Lozano-Mendoza et al. (2025) en su artículo “Modelización espacial para la protección de cauces hídricos en el cantón Quinsaloma, Los Ríos, Ecuador” con el objetivo de modelar espacialmente la protección de cauces hídricos para una gestión sostenible del recurso. Se aplicó una metodología mixta, combinando encuestas a 90 habitantes y entrevistas a líderes comunitarios, junto con análisis geoespacial en ArcGIS, considerando variables como litología, pendiente, uso de suelo y cuerpos de agua. Los resultados revelaron una disminución de la calidad y cantidad del agua del río Calabí, atribuida a actividades agrícolas, mineras e industriales, además del cambio climático. El 51.1% de los encuestados reportó alteraciones en las propiedades organolépticas del agua, mientras que el 87% señaló fuentes de contaminación humana. Como respuesta, se propuso un Plan de Gestión Integral de Recursos Hídricos (PGIRH) que incluye estrategias como reforestación de riberas, tratamiento de aguas residuales y educación ambiental, con énfasis en la participación comunitaria y el monitoreo hidrológico.

Benítez (2023) en su tesis de doctorado “Metodología para la toma de decisiones estratégicas en la asignación sostenible de recursos para la recuperación hidrológica de humedales en situación de estrés hídrico”, tuvo como objetivo desarrollar una metodología para la toma de decisiones estratégicas en la asignación sostenible de recursos hídricos, aplicada específicamente a la regeneración hidrológica de humedales en situación de estrés

hídrico, como el caso de las Tablas de Daimiel. La metodología combina herramientas como el método Delphi y el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), empleando funciones de calificación para evaluar parámetros fisicoquímicos y diseñar un Índice de Sostenibilidad de Recursos Hídricos (WRSM). Este índice facilita la identificación de las fuentes de agua más adecuadas para la recuperación del humedal. Los resultados demostraron que el enfoque propuesto es reproducible, efectivo y adaptable a otros humedales, ofreciendo una herramienta estratégica para abordar la compleja tarea de restauración hídrica y conservación.

Teixeira et al. (2021) en su artículo “Instrumentos de gestión de los recursos hídricos: Planes Hidrológicos en la Cuenca del río Doce, Brasil, y en la Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil”, tuvieron como objetivo analizar los instrumentos de gestión de recursos hídricos mediante la comparación de los planos hidrológicos de la cuenca del río Doce, en Brasil, y la demarcación hidrográfica Miño-Sil, en España. La metodología consistió en un estudio de caso con análisis de documentos oficiales, legislación y revisión bibliográfica, centrado en identificar similitudes y diferencias en la planificación y gestión de los recursos hídricos. Los resultados destacaron que ambos planos priorizan la sostenibilidad, la participación social y la alineación con directrices internacionales, aunque presentan diferencias debido a sus contextos institucionales y normativos. La investigación concluye que estos instrumentos son fundamentales para una gestión integrada y sostenible, adaptándose a las particularidades de cada región y promoviendo la mejora ambiental y la conservación de los recursos hídricos.

2.1.2 Investigaciones nacionales

Yataco (2024) en su tesis “Diseño de un Plan de Manejo Ambiental para la conservación de los recursos hídricos de la Cuenca del Río Ica, 2022”, se desarrolló con el objetivo de diseñar un plan orientado a conservar los recursos hídricos de dicha cuenca. La metodología empleada fue de tipo aplicada, con un nivel descriptivo y un diseño no experimental. Se trabajó con una muestra conformada por 45 agricultores de la parte baja de la cuenca del río Ica, pertenecientes a los distritos de Ocucaje y Santiago. Para la recolección de datos se aplicaron encuestas estructuradas, y el análisis se realizó mediante estadística descriptiva y contrastación de hipótesis con Chi cuadrado. Los resultados evidenciaron una preocupante disminución del volumen de agua, altos niveles de contaminación atribuida a la actividad minera, y escasa participación comunitaria en la gestión del recurso. Como respuesta, se diseñó un plan de manejo ambiental que incluye acciones de protección de la cuenca, zonificación de parcelas, valoración económica y educación ambiental.

Del Aguila (2021) en su tesis “Modelamiento de procesos hidrológicos en cuencas de la Sierra Central del Perú”, tuvo como objetivo modelar los procesos hidrológicos en las cuencas de los ríos Anya y Mchique, ubicadas en la región de Junín, Perú, para mejorar la gestión de los recursos hídricos. Se utilizó una metodología basada en dos

modelos hidrológicos: Lutz Scholtz, un modelo empírico mensual, y SWAT, un modelo semidistribuido diario. Además, se propuso una modificación al modelo Lutz Scholtz (LSM) para incorporar características del suelo y la cobertura vegetal. Los resultados evidenciaron que los modelos SWAT y LSM mejoraron la precisión de las simulaciones en la cuenca Anya, mientras que en Mchique se lograron indicadores aprobatorios en el 66.7% de los casos. Finalmente, se proyectó un incremento de caudales bajo escenarios climáticos futuros, destacando el impacto del cambio climático en la dinámica hidrológica de las cuencas.

Alvarez (2020) en su tesis “Modelo hidrológico para pronosticar caudales recesivos y estimar el coeficiente de agotamiento: caso río Jequetepeque aguas arriba de la presa “Gallito Ciego” - Contumazá, 2020”, tuvo como objetivo proponer un modelo hidrológico para pronosticar caudales receptores y estimar el coeficiente de agotación del río Jequetepeque, aguas arriba de la presa “Gallito Ciego” en Contumazá. La metodología incluyó la utilización de caudales registrados en la estación hidrométrica “Yonán” durante el período 1988-2019. Se evaluaron y validaron 11 modelos hidrológicos de categorías exponenciales y potenciales mediante indicadores estadísticos y el método Split-Sample Test. Los resultados destacaron que el modelo hidrológico ALVI, desarrollado en el estudio, mostró una alta confiabilidad en la simulación de caudales receptores, con valores de NSE (0,84), R^2 (0,97) y RMSE (0,62). Este modelo puede ser aplicado para mejorar la gestión hídrica en periodos de estiaje, contribuyendo al manejo sostenible de recursos hídricos en la cuenca del río Jequetepeque.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Fuzzy logic o Lógica Difusa

La lógica, como señala Rivas (2009), analiza las diversas formas y fundamentos del razonamiento. La lógica clásica, centrada en proposiciones con valores absolutos de verdad o falsedad, fue ampliada significativamente por Lukasiewicz en 1930 con la introducción de una lógica trivalente que incorporaba los estados de verdadero, falso e indefinido (García, 1991; Nagy et al., 2019). Este avance subraya la importancia de comprender la relación entre el pensamiento humano y el entorno, ya que ambos interactúan dinámicamente (Aranda, 2024).

Los procesos de decisión, a menudo sujetos a ambigüedad e incertidumbre, reflejan la capacidad de adaptación de las organizaciones, que reconocen la existencia de gradaciones entre lo absoluto y lo relativo, dependiendo de cómo se perciben las realidades (Strefezza, 2009). En este contexto, Zadeh introdujo en 1965 la teoría de la lógica difusa con su trabajo “Fuzzy Sets”, complementada en 1968 con “Fuzzy Algorithms”. Estas obras fundamentan los conjuntos y la lógica difusa, extendiendo el marco determinista de la lógica clásica con una escala continua de valores entre cero y uno. Este enfoque permite modelar matemáticamente la incertidumbre, relacionándola con situaciones reales y prácticas (Strefezza, 2009).

La figura 2.1, ilustra tres operaciones fundamentales de teoría de conjuntos: unión, in-

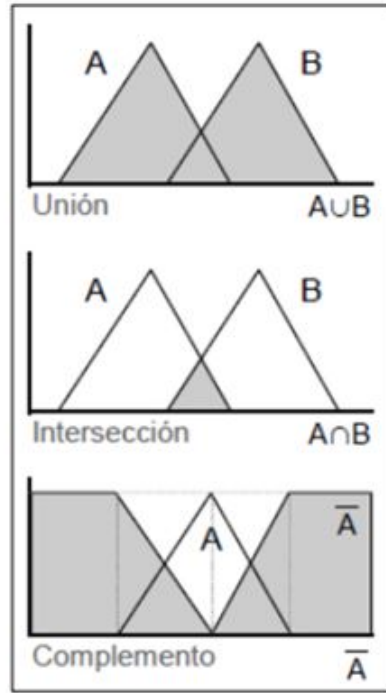
tersección y complemento, aplicadas a dos conjuntos representados como áreas sombreadas.

- **Unión ($A \cup B$):** En la primera imagen, se observa la unión de los conjuntos A y B, que incluye todos los elementos presentes en al menos uno de los dos conjuntos. Esto se representa por el área sombreada que cubre tanto el conjunto A como el conjunto B, incluyendo la región donde ambos se superponen. La notación para esta operación es $A \cup B$. La unión es fundamental en múltiples disciplinas. En lógica matemática, corresponde al operador “OR”, donde la proposición es verdadera si al menos una de las condiciones lo es. En aplicaciones prácticas, como la lógica difusa, se utiliza para combinar conjuntos difusos, calculando el valor máximo de membresía entre ellos. Por ejemplo, en sistemas de gestión de información, la unión puede identificar todos los recursos disponibles en dos bases de datos sin duplicar los registros comunes. Su representación gráfica y algebraica es clave para entender interacciones entre conjuntos y resolver problemas complejos en matemáticas y ciencias aplicadas (Strefezza, 2009).

- **Intersección ($A \cap B$):** En la segunda imagen, se muestra la intersección de los conjuntos A y B, que incluye solo los elementos comunes a ambos conjuntos. Esto se representa por el área sombreada en la región de superposición entre A y B. La notación para esta operación es $A \cap B$. En lógica matemática, la intersección se relaciona con el operador “AND”, donde una proposición es verdadera si todas las condiciones involucradas se cumplen simultáneamente. En aplicaciones como la lógica difusa, la intersección se calcula mediante el valor mínimo de membresía de los conjuntos difusos, reflejando la coincidencia más restringida (Strefezza, 2009).

- **Complemento (A^c):** En la tercera imagen, se representa el complemento del conjunto A, que contiene todos los elementos que no pertenecen al conjunto A. La región sombreada abarca las áreas fuera de A, incluyendo tanto la región fuera de B como la intersección de A y B. La notación para el complemento es A^c , indicando todo el espacio fuera del conjunto A. (Londoño, 2020) (Strefezza, 2009).

Figura N° 2.1:
Operaciones típicas utilizando conjuntos difusos



Fuente: Tomado de Strefezza, 2009

La lógica difusa es un enfoque dentro de la Inteligencia Artificial diseñado para gestionar información en escenarios de incertidumbre o imprecisión, ampliando las capacidades de toma de decisiones en contextos donde los límites no son absolutos. Este concepto, introducido por Lotfi Zadeh en 1965, surge como una alternativa a la lógica clásica, que se basa exclusivamente en valores binarios, como “verdadero” o “falso”. En su lugar, la lógica difusa emplea una escala continua de pertenencias entre 0 y 1, permitiendo representar grados parciales de verdad.

Este sistema es especialmente útil en problemas complejos donde las categorías no pueden definirse con claridad. Por ejemplo, en lugar de clasificar una temperatura como “alta” o “baja”, la lógica difusa puede indicar que es “moderadamente alta”, asignando un grado de pertenencia a distintas categorías.

Su aplicabilidad es vasta, a abarcar áreas como:

- **Sistemas de control:** Regulación de electrodomésticos (lavadoras, aires acondicionados) para optimizar su funcionamiento.
- **Toma de decisiones:** Evaluación de riesgos o planificación estratégica bajo incertidumbre.
- **Análisis y evaluación:** Clasificación de datos en áreas como economía, salud o ingeniería.

La lógica difusa destaca por su capacidad para modelar el pensamiento humano, ofreciendo soluciones adaptativas y flexibles en situaciones donde la exactitud matemática

no es suficiente (Zadeh, 1965). La lógica difusa es un enfoque de razonamiento que permite manejar incertidumbre y ambigüedad en situaciones donde las respuestas no pueden reducirse exclusivamente a valores binarios como “verdadero” o “falso”. A diferencia de la lógica clásica, que opera con un sistema binario estricto, la lógica difusa trabaja con grados de verdad, representados en un rango continuo entre 0 y 1. Esto la hace ideal para analizar sistemas complejos y no lineales en los que las relaciones entre variables son vagas o imprecisas, permitiendo una evaluación más flexible y realista de escenarios (Talledo, 2022).

En términos conceptuales, la lógica difusa se define como “un sistema de múltiples valores que permite modelar matemáticamente tanto la incertidumbre como la imprecisión”. Este enfoque imita el razonamiento humano, donde términos como “templado”, “fresco” o “cálido” transmiten ideas comprensibles sin necesidad de especificar rangos exactos. Este atributo destaca su capacidad para abordar problemas en los que los límites estrictos no son esenciales para interpretar y actuar adecuadamente, ofreciendo un enfoque adaptativo y robusto en áreas como el diagnóstico, la toma de decisiones y la automatización (García y Gaspar, 2010).

En la práctica, la lógica difusa facilita la creación de un modelo hidrológico difuso para la planificación de recursos hídricos en la cuenca del río Pampas, la lógica difusa facilita la creación de sistemas de inferencia capaces de evaluar las condiciones hídricas y sugerir estrategias adaptativas. Estos sistemas consideran variables como la disponibilidad de agua, la variabilidad climática y las condiciones socioeconómicas, asignando grados de riesgo y prioridad a diferentes escenarios de estrés hídrico. Este enfoque permite anticipar situaciones críticas, como déficits severos de agua o riesgos de desbordes, antes de que se conviertan en problemas mayores. Además, ayuda a optimizar la gestión de los recursos hídricos, promoviendo decisiones más informadas que mejoren la resiliencia de la cuenca y las comunidades locales. Al incorporar la lógica difusa, se logra un análisis más detallado y flexible, que integra datos precisos y variables imprecisas para diseñar planos de manejo sostenibles y adaptativos. El modelo, por tanto, no solo contribuye a la planificación hídrica con mayor precisión, sino que también permite identificar medidas preventivas o correctivas para mitigar impactos, reduciendo costos asociados a emergencias y mejorando la seguridad hídrica de la región. Este enfoque asegura una gestión eficiente y resiliente frente a los escenarios de estrés hídrico (Talledo, 2022).

2.2.2 Reglas difusas o Reglas de fuzzy logica

Las reglas difusas constituyen un componente clave en el desarrollo de un modelo hidrológico difuso, ya que ofrecen una herramienta matemática para manejar incertidumbres propias de escenarios de estrés hídrico. Estas reglas, expresadas en formato “si-entonces” (if-then), permiten modelar la relación entre condiciones variables, como precipitación, demanda hídrica o vulnerabilidad socioeconómica, mediante la asignación de grados de pertenencia a categorías lingüísticas, como “bajo”, “moderado” o “alto” (Espín et al., 2021).

En la planificación de recursos hídricos, las reglas difusas se integran a través de funciones de membresía que combinan entradas ambiguas para generar respuestas adaptativas. Por ejemplo, una regla podría ser: “Si la precipitación es baja y la demanda hídrica es alta, entonces priorizar la asignación al sector agrícola”. Este enfoque no requiere valores absolutos, lo que lo hace particularmente efectivo en sistemas complejos donde las relaciones entre variables son no lineales.

El uso de reglas difusas permite interpretar datos diversos, como los niveles de caudal, los cambios en la temperatura o los índices de estrés hídrico, relacionándolos con decisiones de planificación y mitigación. Además, mejora la capacidad del modelo para adaptarse a escenarios futuros, proporcionando flexibilidad ante la variabilidad climática y garantizando que las decisiones reflejen de manera precisa la interacción entre los factores ambientales y sociales involucrados (Guzmán y Cataño, 2006; Chanchí et al., 2021). Este enfoque ofrece una forma efectiva de integrar conocimiento experto y datos cuantitativos para optimizar la gestión hídrica y anticipar posibles problemas derivados del estrés hídrico.

2.2.3 Estrés hídrico

El estrés hídrico es una condición que surge cuando la demanda de agua en una región excede la cantidad disponible o cuando la calidad del recurso no es suficiente para satisfacer las necesidades humanas, ambientales o económicas. Este fenómeno no solo refleja la escasez física del agua, sino también problemas estructurales relacionados con su distribución desigual, manejo ineficiente y contaminación. Como consecuencia, el estrés hídrico tiene impactos significativos en los ecosistemas, la producción agrícola, la industria y las comunidades humanas.

La variabilidad climática y los cambios en los patrones de precipitación son factores clave que contribuyen al estrés hídrico. Fenómenos como sequías prolongadas o lluvias intensas alteran la disponibilidad del agua, afectando tanto las fuentes superficiales como subterráneas. Además, el incremento de las temperaturas intensifica la evapotranspiración, reduciendo aún más la cantidad de agua utilizable. Por otro lado, las actividades humanas también desempeñan un papel central. La agricultura intensiva incrementa la demanda de agua, especialmente en regiones dependientes del riego, mientras que la minería y la urbanización acelerada ejercen una presión adicional sobre los recursos hídricos, tanto en cantidad como en calidad. La contaminación derivada de estas actividades deteriora aún más la calidad del agua, restringiendo su uso para consumo humano, agrícola o industrial (Faustino y Jiménez, 2000).

El estrés hídrico también está vinculado a la infraestructura inadecuada y la falta de una gestión efectiva de los recursos. La ausencia de sistemas eficientes de almacenamiento, distribución y tratamiento del agua contribuye a la incapacidad de satisfacer las demandas crecientes, especialmente en contextos de rápido crecimiento poblacional y económico. En términos generales, el estrés hídrico refleja la complejidad de la interacción entre factores naturales y humanos. Abordar este fenómeno requiere estrategias integradas que combinen

el uso sostenible del agua, la mejora de infraestructuras y la mitigación de los impactos del cambio climático. Además, es crucial fortalecer los marcos de gobernanza para garantizar una gestión equitativa y eficiente de los recursos hídricos, promoviendo la resiliencia frente a este desafío global.

Impactos del estrés hídrico

- **Ecosistemas** : El estrés hídrico tiene efectos devastadores en los ecosistemas acuáticos y terrestres. La degradación de humedales, lagos, ríos y acuíferos no solo reduce la disponibilidad de agua, sino que también afecta profundamente la biodiversidad, ya que muchas especies dependen de estos hábitats para sobrevivir. La pérdida de humedales, considerada uno de los ecosistemas más productivos del mundo, impacta en servicios ecosistémicos esenciales como la regulación del ciclo hidrológico, el control de inundaciones, la purificación del agua y el almacenamiento de carbono. Estos efectos no solo amenazan la resiliencia de los ecosistemas frente al cambio climático, sino que también repercuten en las comunidades humanas que dependen de ellas para obtener alimentos, agua y recursos naturales (Benítez, 2023).
- **Agricultura**: La disminución de la disponibilidad de agua debido al estrés hídrico reduce significativamente la capacidad de riego, afectando la productividad agrícola. Este impacto es especialmente grave en regiones donde la agricultura depende de sistemas de riego intensivo. Las sequías prolongadas deterioran los rendimientos de cultivos básicos, como cereales y hortalizas, lo que incrementa la inseguridad alimentaria, eleva los precios de los alimentos y afecta la estabilidad económica de las comunidades rurales. Además, la reducción de la producción agrícola genera tensiones adicionales en los mercados globales y amenaza los medios de vida de millones de personas que dependen de la agricultura para su subsistencia (Benítez, 2023).
- **Sociedad**: La escasez de agua afecta directamente la salud y el bienestar de las comunidades, especialmente aquellas que ya enfrentan desigualdades económicas y sociales. La falta de acceso a agua limpia aumenta la incidencia de enfermedades transmitidas por el agua, como diarreas, cólera y otras infecciones gastrointestinales, que son particularmente perjudiciales para niños y personas vulnerables. Además, la presión sobre los recursos hídricos incrementa los conflictos entre comunidades y sectores económicos, exacerbando las tensiones sociales. La escasez también afecta el desarrollo urbano, limitando el acceso a agua potable y servicios básicos, lo que reduce la calidad de vida y agrava las desigualdades existentes (Benítez, 2023).

2.2.4 Variabilidad Climática

La variabilidad climática representa un desafío significativo para la disponibilidad de recursos hídricos, particularmente en regiones donde la agricultura depende de patrones estacionales de lluvia o sequía. Tradicionalmente, las prácticas agrícolas se han basado en calendarios predecibles que optimizan el uso del agua disponible. Sin embargo, fenómenos

como El Niño, La Niña y la variabilidad climática interdecadal han introducido fluctuaciones impredecibles en los patrones climáticos, alterando estas prácticas establecidas y reduciendo su efectividad (Montecinos, 2015).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) define el cambio climático como modificaciones en el clima vinculadas directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición atmosférica global, sumándose a las fluctuaciones naturales observadas en períodos comparables. Esta variabilidad, combinada con el cambio climático, no solo dificulta la predicción de condiciones climáticas, sino que también incrementa los riesgos para la agricultura y los ecosistemas, especialmente en cuencas hidrográficas como la del río Pampas (Faustino y Jiménez, 2000).

El cambio climático impacta la productividad agrícola a nivel global mediante alteraciones en los patrones de precipitación, que provocan sequías o inundaciones, y en las temperaturas, que favorecen la redistribución de plagas y enfermedades. Estas variaciones pueden intensificar eventos extremos, como aluviones, que ponen en riesgo la sostenibilidad de las actividades agrícolas, ganaderas y ecológicas. Asimismo, las modificaciones en el régimen hídrico inciden directamente en la economía y el bienestar de la población local, agravando las desigualdades regionales. Frente a estos desafíos, se vuelve necesario adoptar estrategias de gestión que incorporen herramientas como el modelo hidrológico difuso, capaz de evaluar y planificar los recursos hídricos de manera adaptativa ante escenarios de variabilidad climática. Este enfoque no solo contribuye a mitigar los efectos del cambio climático, sino que también fortalece la resiliencia comunitaria y promueve un manejo sostenible del agua en contextos futuros inciertos (FAO, 2022).

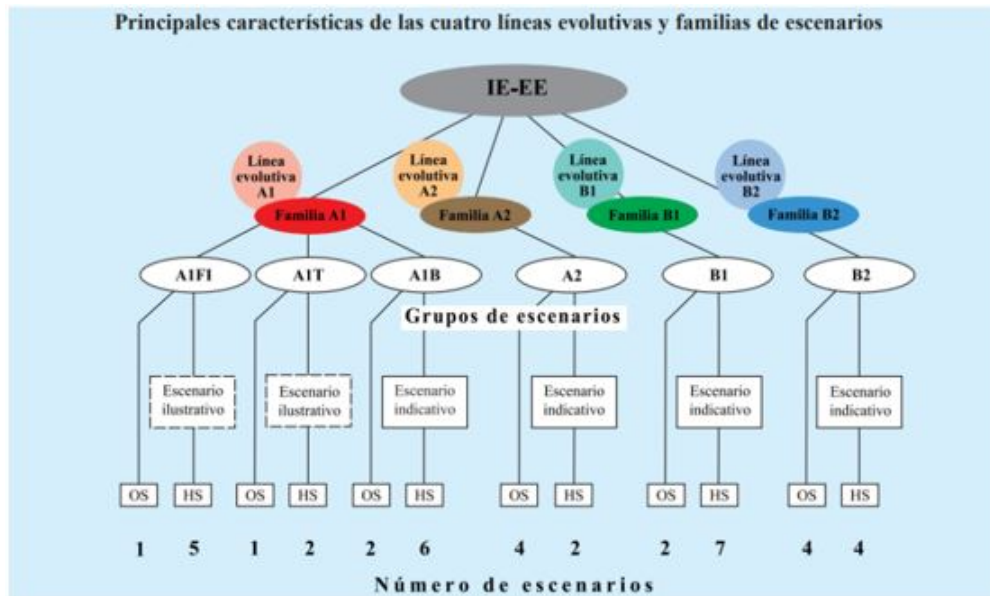
Escenarios del cambio climático

El desarrollo de escenarios, originalmente utilizado en la planificación militar, comenzó a ser adoptado por el sector público en la década de 1960. Más que predecir el futuro, estos escenarios buscan explorar las incertidumbres asociadas a diversos contextos, permitiendo la formulación de estrategias robustas frente a un rango de posibles futuros. En las últimas décadas, su aplicación se ha extendido al ámbito científico, donde se utilizan para analizar la interacción entre el sistema climático terrestre, los ecosistemas y las actividades humanas, brindando perspectivas alternativas sobre el posible desarrollo futuro (IPCC, 2016).

Para abordar la complejidad de estos análisis, los escenarios climáticos se agrupan en familias, lo que permite delimitar su alcance y evaluar sus implicaciones. Estas familias se definen principalmente en función de tendencias globales en la producción y el desarrollo tecnológico. Esta clasificación facilita la evaluación de cómo diferentes trayectorias económicas, sociales y ambientales pueden influir en el cambio climático, ofreciendo herramientas clave para la planificación y mitigación de riesgos climáticos. En investigaciones como la planificación de recursos hídricos en la cuenca del río Pampas, el uso de escenarios climáticos es esencial para evaluar los posibles impactos de la variabilidad y el cambio climático. Al integrar estos escenarios en modelos hidrológicos difusos, se pueden identificar

estrategias adaptativas que permitan gestionar de manera sostenible los recursos hídricos, considerando tanto las incertidumbres climáticas como las necesidades de las comunidades locales.

Figura N° 2.2:
Grupo de escenarios IE-EE



Fuente: Tomado de (IPCC, 2001).

Las familias de escenarios se estructuran a partir de cuatro trayectorias evolutivas principales: A1, A2, B1 y B2. Dentro de la familia A1, se identifican tres subgrupos, mientras que las familias A2, B1 y B2 contienen un único grupo cada una (Figura 2.2). Estas familias se definen con base en supuestos armonizados relacionados con la población mundial y el consumo energético, denominados “HS” (High Scenario), y en supuestos que incorporan incertidumbres adicionales, etiquetados como “OS” (Other Scenario). Según el IPCC (2001), las características distintivas de estas familias son las siguientes:

- **A1:** Representa un mundo de rápido crecimiento económico, con una población global que alcanza su máximo a mediados del siglo y disminuye posteriormente. Destaca por la adopción acelerada de tecnologías más eficientes. Los subgrupos de A1 se diferencian por su enfoque tecnológico: uso intensivo de combustibles fósiles (A1FI), energía no fósil (A1T) y una combinación equilibrada de fuentes energéticas (A1B).
- **A2:** Describe un mundo heterogéneo centrado en la autosuficiencia y la preservación de identidades locales, con una población en constante crecimiento. Los avances tecnológicos y económicos son más lentos, reflejando un enfoque en las personas y las comunidades locales.
- **B1:** Comparte un crecimiento poblacional similar al de A1, pero su economía se orienta hacia los servicios y la información, con un fuerte enfoque en tecnologías limpias y sostenibles. Este escenario promueve el desarrollo sostenible sin implementar políticas adicionales específicas sobre el clima.

- **B2:** Se enfoca en la sostenibilidad ambiental, económica y social a nivel local, con un crecimiento poblacional moderado y un desarrollo tecnológico más lento y menos diverso. Su prioridad es la protección ambiental y la equidad social.

Estas familias de escenarios proporcionan una base esencial para analizar las posibles trayectorias del cambio climático y desarrollar modelos que permitan evaluar impactos, planificar estrategias de adaptación y diseñar medidas de mitigación. Su enfoque flexible permite simular diversas realidades, facilitando la identificación de respuestas sostenibles y adaptativas, como la gestión de recursos hídricos bajo escenarios de estrés hídrico en la cuenca del río Pampas. La comprensión de estas trayectorias es crucial para anticipar desafíos y definir estrategias eficaces frente a las incertidumbres climáticas.

2.2.5 Gestión de recursos hídricos

La gestión de recursos hídricos se concibe como un enfoque que abarca el uso, administración y conservación de los recursos naturales dentro de las cuencas hidrográficas, buscando satisfacer tanto las necesidades humanas como las demandas ambientales. Este enfoque tiene como objetivo principal equilibrar la equidad social, la sostenibilidad ambiental, la viabilidad económica y el desarrollo sostenible, considerando los múltiples usos y funciones que desempeñan los recursos hídricos (Faustino y Jiménez, 2000).

La implementación de este modelo de gestión requiere una coordinación efectiva entre los recursos naturales y las comunidades que habitan en las cuencas, promoviendo un enfoque holístico que integre conocimientos de diversas disciplinas, tanto sociales como naturales. Este enfoque interdisciplinario no solo considera la conservación del recurso, sino también los efectos a largo plazo de su uso, asegurando que las decisiones actuales no comprometan la disponibilidad futura. Un aspecto fundamental de este enfoque es la participación activa de la comunidad en todas las etapas del proceso, desde la planificación y toma de decisiones hasta la implementación, monitoreo y evaluación de las medidas adoptadas. Esto no solo garantiza la legitimidad de las acciones, sino que también fortalece las capacidades locales para una gestión autónoma y sostenible (Vásquez, 2000).

La gestión de recursos hídricos, aplicada desde una perspectiva de cuencas hidrográficas, permite atender los desafíos derivados de la presión sobre el recurso hídrico, como el estrés hídrico y la degradación ambiental, fomentando la cooperación entre los diferentes actores involucrados. Esto es esencial para promover la sostenibilidad a largo plazo y minimizar los conflictos derivados del acceso y uso de los recursos naturales (Faustino y Jiménez, 2000).

La gestión de recursos hídricos se relaciona con la dimensión "planificación" de la variable dependiente, ya que permite analizar cómo se organiza y distribuye el uso del agua frente a escenarios de presión hídrica. Esta sección brinda el sustento teórico necesario para comprender el contexto operativo donde se aplicará el modelo hidrológico difuso.

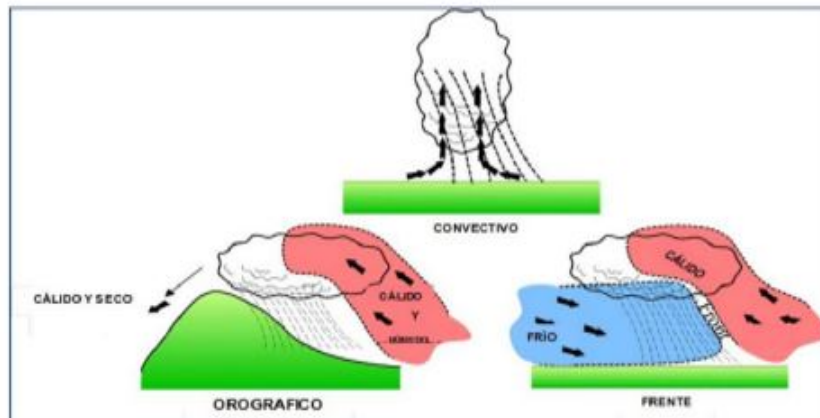
2.2.6 Precipitación

La precipitación es el proceso mediante el cual el agua en forma líquida (lluvia) o sólida (nieve, granizo) se desprende de la atmósfera y llega a la superficie terrestre. Este fenómeno es esencial dentro del ciclo hidrológico, ya que permite el retorno del agua a la Tierra. Su origen radica en el ascenso de masas de aire cargadas de humedad, que, al enfriarse en altitudes mayores, provocan la condensación del vapor de agua en gotas o cristales de hielo. Cuando estas partículas crecen lo suficiente en tamaño, la gravedad las precipita hacia el suelo, manifestándose en diferentes formas según las condiciones atmosféricas (Vásquez, 2000).

La cantidad y distribución de la radiación varían significativamente según la ubicación geográfica y los factores locales, como estaciones del año o características del terreno. Por ejemplo, hay áreas donde en un solo día puede caer una cantidad de lluvia equivalente a la acumulada en un año en regiones más áridas. La proximidad al océano, el contenido de humedad en la atmósfera y los movimientos ascendentes del aire son factores determinantes en la cantidad de precipitación. Estos movimientos son especialmente intensos en áreas montañosas, donde el aire húmedo es obligado a ascender al encontrarse con barreras geográficas. Esto ocurre en las laderas de barlovento, que suelen registrar mayores volúmenes de precipitación debido al enfriamiento rápido del aire y la consecuente condensación del vapor de agua (Guzmán et al, 2024). Este fenómeno no solo es vital para el mantenimiento de los ecosistemas terrestres, sino que también juega un papel crucial en actividades humanas como la agricultura, el abastecimiento de agua y la generación de energía hidroeléctrica. Comprender los patrones de recepción y sus variaciones espaciales y temporales es esencial para planificar y gestionar de manera sostenible los recursos hídricos, especialmente en regiones donde los efectos del cambio climático alteran la regularidad y distribución de este (Vásquez, 2000).

Los diferentes tipos de precipitación se originan bajo condiciones atmosféricas y geográficas específicas, cada uno desempeñando un papel crucial en el ciclo hidrológico y la distribución del agua en la Tierra. Las precipitaciones convectivas se generan cuando el aire caliente asciende rápidamente, lo que provoca su enfriamiento y la posterior condensación en gotas de agua o cristales de hielo. Este fenómeno da lugar a lluvias intensas o granizo y es común en regiones tropicales o durante tormentas eléctricas, donde el calor y la humedad predominan.

Figura N° 2.3:
Clasificación de las precipitaciones



Fuente: Tomado por Musy, 2001.

La Figura 2.3 muestra los tres principales tipos de precipitación: convectiva, orográfica y frontal, cada una generada bajo condiciones atmosféricas específicas.

- Las precipitaciones convectivas se originan cuando el aire caliente asciende rápidamente, se enfría y se condensa en gotas de agua o cristales de hielo, generando lluvias intensas o granizo. Este tipo de precipitación es común en zonas tropicales y durante tormentas eléctricas, donde predominan el calor y la humedad.
- Las precipitaciones orográficas ocurren cuando el aire húmedo es forzado a elevarse al encontrarse con una barrera natural como una montaña. Al ascender, el aire se enfría, se condensa y forma nubes que descargan lluvia principalmente en la ladera de barlovento. Este proceso es fundamental en regiones montañosas, ya que contribuye significativamente a la recarga hídrica local.
- Finalmente, las precipitaciones frontales se producen cuando dos masas de aire con diferente temperatura se encuentran. El aire cálido y húmedo se eleva sobre el aire frío, generando condensación y lluvias. Este fenómeno es característico de climas templados, donde las interacciones entre frentes cálidos y fríos son frecuentes.

Precipitación Orográfica

Las características geográficas como montañas y cordilleras actúan como barreras naturales que obligan a las corrientes de aire húmedo a ascender. Este ascenso genera un enfriamiento adiabático del aire al alcanzar altitudes mayores, lo que provoca la condensación del vapor de agua presente en la atmósfera. Como resultado, se forman nubes y se produce precipitación en las laderas de barlovento (Hergarten y Robl, 2022).

Debido a que estas barreras geográficas son permanentes, las áreas situadas en las laderas de sotavento suelen recibir precipitaciones de manera constante. Este fenómeno,

conocido como precipitación orográfica, es particularmente común en la región andina del Perú. En estas zonas, las cordilleras fuerzan a los vientos cargados de humedad a ascender, generando condiciones ideales para lluvias frecuentes y abundantes, esenciales para la recarga hídrica y el mantenimiento de los ecosistemas locales (Vásquez, 2000).

Precipitación Convectiva

La precipitación convectiva se produce cuando una masa de aire caliente, debido a su menor densidad, asciende en la atmósfera al estar rodeada por aire más frío y denso. Este movimiento ascendente es desencadenado por el calentamiento del suelo, cuerpos de agua o del aire en contacto directo con estas superficies. A medida que el aire caliente cargado de humedad se eleva, sufre un enfriamiento adiabático, lo que provoca la condensación del vapor de agua y la formación de nubes. Eventualmente, este proceso culmina en lluvias intensas y localizadas. Simultáneamente, el aire más frío desciende para ocupar el espacio dejado, creando un ciclo convectivo continuo que refuerza el proceso (Vásquez, 2000).

Este tipo de precipitación es característico de regiones de topografía llana y áreas tropicales con elevada humedad, como las planicies amazónicas y las superficies oceánicas. En el caso del Perú, la precipitación convectiva se manifiesta con mayor frecuencia en las regiones norteñas de la franja costera, especialmente en Piura y Tumbes. Estas lluvias intensas y localizadas están influenciadas por los anticiclones del Atlántico norte y sur, que generan condiciones atmosféricas propicias para la convección. En estas zonas, este fenómeno desempeña un papel importante en la recarga hídrica, el sustento de ecosistemas locales y la provisión de agua para la agricultura. La comprensión de los patrones de precipitación convectiva es crucial para anticipar su impacto, especialmente en contextos de variabilidad climática y eventos extremos asociados a fenómenos como El Niño (Villalobos-Puma et al., 2024).

La precipitación, en este contexto, constituye un indicador de la dimensión “variabilidad climática” correspondiente a la variable independiente “escenarios de estrés hídrico”, siendo necesario para la evaluación de los cambios en la oferta hídrica de la cuenca.

Precipitación Frontal o Ciclónica

La precipitación frontal también conocido como ciclónico, ocurre dentro de sistemas ciclónicos, que son extensas masas de aire que giran rápidamente alrededor de un núcleo de baja presión. Este fenómeno se genera debido a contrastes significativos de temperatura entre las capas atmosféricas. En el centro del ciclo, la presión atmosférica es anormalmente baja, lo que permite que corrientes de aire caliente y cargadas de humedad asciendan rápidamente. Durante este ascenso, el aire experimenta una expansión adiabática que provoca su enfriamiento, lo que favorece la condensación del vapor de agua en la atmósfera. Este proceso da lugar a la formación de densas nubes y, eventualmente, a precipitaciones intensas y persistentes. Estas lluvias son características de los sistemas ciclónicos, que

pueden extenderse sobre vastas áreas y durar varios días (Vásquez, 2000).

El receptor frontal tiene un impacto significativo en los ciclos hidrológicos y climáticos, ya que contribuye a la recarga hídrica en diversas regiones. Sin embargo, su intensidad y duración también la asocian con eventos extremos, como inundaciones, que pueden generar importantes desafíos para la gestión de recursos hídricos y la seguridad de las comunidades. Comprender los mecanismos que originan estas precipitaciones es esencial para diseñar estrategias de mitigación ante desastres y para prever impactos en sectores sensibles como la agricultura, la infraestructura y los ecosistemas (Villalobos-Puma et al., 2024). La precipitación, en este contexto, constituye un indicador de la dimensión “variabilidad climática” correspondiente a la variable independiente “escenarios de estrés hídrico”, siendo importante para la evaluación de los cambios en la oferta hídrica de la cuenca.

2.2.7 Temperatura

La temperatura es una medida de la energía térmica acumulada en el aire en un momento específico y constituye una variable esencial para los estudios de climatología e hidrología. Su principal fuente de influencia es la radiación solar, que calienta tanto la superficie terrestre como las capas inferiores de la atmósfera. Para garantizar la precisión en su medición, se utiliza un termómetro, que debe ubicarse a una altura estándar de 1,5 metros sobre el suelo. Esta disposición minimiza las interferencias del calor radiado desde la superficie y asegura que las mediciones representen de manera fiel la temperatura del aire. Además, el termómetro debe colocarse en un entorno bien ventilado y protegido de la exposición directa al sol para evitar lecturas alteradas por el calentamiento del instrumento. Las mediciones de temperatura suelen expresarse en grados centígrados (°C) o Fahrenheit (°F), dependiendo del contexto geográfico y del sistema adoptado en la región (Ríos y Vilca, 2022).

La temperatura es una variable clave en numerosos procesos ambientales e hidrológicos, ya que influye directamente en la evapotranspiración, los ciclos de precipitación y la dinámica de los cuerpos de agua. Su monitoreo es fundamental para comprender fenómenos climáticos y diseñar estrategias de manejo sostenible de los recursos hídricos, especialmente en regiones donde la variabilidad térmica impacta la disponibilidad de agua y los ecosistemas asociados (Ordoñez, 2011).

La temperatura es otro indicador clave dentro de la dimensión “variabilidad climática” de la variable independiente, ya que sus variaciones afectan los procesos de evaporación, humedad atmosférica y, por tanto, la disponibilidad hídrica.

2.2.8 Caudal

El caudal de un cuerpo de agua se define como el volumen de agua que pasa a través de una sección transversal específica de un río o canal en un período determinado. Este concepto es crucial en los estudios hidrológicos y en la gestión de recursos hídricos, ya que permite cuantificar directamente la cantidad de agua transportada por un curso fluvial. Su

medición es indispensable para evaluar la disponibilidad hídrica, planificar el uso sostenible del agua y analizar los impactos de las actividades humanas en los ecosistemas acuáticos. El caudal se utiliza como indicador clave para la toma de decisiones en proyectos de abastecimiento, riego, control de inundaciones y preservación ambiental. Su cálculo se describe matemáticamente de la siguiente forma:

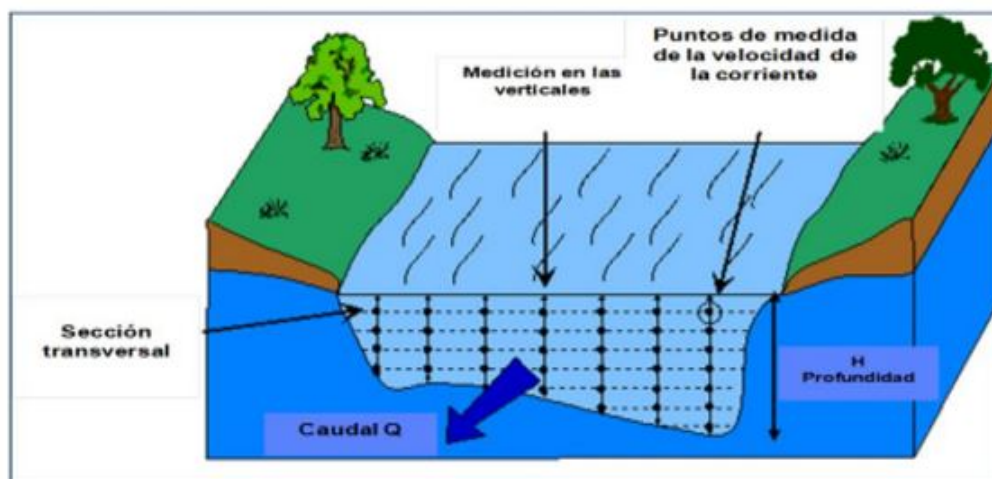
$$Q = \frac{V}{t} \cdot \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

- Q: Caudal
- V: Volumen
- t: Tiempo

En la Figura 2.4 se representa el flujo de agua que atraviesa una sección transversal de un río, elemento para el cálculo del caudal a partir de mediciones de velocidad y profundidad en distintos puntos de la corriente.

Figura N° 2.4:
Flujo que pasa a través de una sección transversal



Fuente: Tomado de Musy, 2001

La figura 2.4 muestra el procedimiento clásico para calcular el caudal (Q) de un río, el cual se determina multiplicando el área de la sección transversal del cauce por la velocidad media del flujo. Para ello, se realizan mediciones de velocidad en varias verticales distribuidas a lo largo del ancho del río. Cada vertical se divide en diferentes profundidades donde se registran los valores de velocidad, lo que permite obtener una estimación más precisa del caudal. Este método es ampliamente utilizado en hidrología para monitorear ríos, evaluar la disponibilidad hídrica y alimentar modelos de simulación como los hidrológicos difusos.

El caudal representa un indicador directo de la dimensión “alteración hidrológica” dentro de los escenarios de estrés hídrico, al reflejar los efectos del cambio climático y la presión sobre los recursos hídricos en la cuenca.

2.2.9 Indicadores hidrológicos y climáticos en la planificación bajo estrés hídrico

Precisión del modelo

La precisión en un modelo hidrológico representa qué tan bien puede simular los procesos reales del sistema hídrico que se está analizando. Específicamente, se refiere a cuán cercanos son los resultados del modelo respecto a los datos observados en la realidad. Una buena precisión indica que las diferencias entre los valores reales y los estimados son mínimas, lo cual resulta importante para realizar una planificación efectiva del recurso agua (Moriasi et al., 2007).

Esta precisión se evalúa utilizando métricas estadísticas como el RMSE, R^2 y MAE. Estas herramientas ayudan a medir cuánto se alejan las predicciones del modelo de los datos reales. Por ejemplo, un valor de R^2 alto indica que el modelo explica en gran medida la variabilidad de los datos observados (Nash y Sutcliffe, 1970). Cuando se trabaja con escenarios de estrés hídrico, lograr una alta precisión es aún más importante, ya que la incertidumbre climática y los datos incompletos pueden afectar las proyecciones. Si el modelo no es preciso, se corre el riesgo de tomar decisiones basadas en datos incorrectos (Moriasi et al., 2007).

Por ello, es recomendable evaluar la precisión del modelo en distintos escenarios: años con sequía, años lluviosos y años normales. En modelos que usan lógica difusa, esta evaluación ayuda a asegurar que el modelo se mantenga útil incluso ante variabilidad o datos ambiguos. De este modo, se mejora la confiabilidad del modelo como herramienta de apoyo para la gestión sostenible del agua (Moriasi et al., 2007).

Parámetros de calibración y validación del modelo

Los parámetros de calibración y validación son necesarios en los modelos hidrológicos, ya que permiten que el modelo se ajuste a la realidad del sistema estudiado. La calibración es el proceso mediante el cual se ajustan los parámetros internos del modelo hasta que los resultados que genera coinciden con los datos reales de un período específico (Beven y Binley, 1992).

Algunos de los parámetros que suelen calibrarse son la retención de humedad del suelo, el coeficiente de escorrentía y la evapotranspiración. Estos se ajustan con base en información histórica de caudales, lluvias y temperaturas, usando métodos estadísticos o algoritmos de optimización (Hasan et al., 2025).

Después de calibrar, se realiza la validación. Esta consiste en aplicar el modelo sobre un conjunto distinto de datos, sin cambiar los parámetros, para comprobar si el modelo mantiene su buen desempeño. Esto permite verificar si el modelo es confiable más allá del período usado en la calibración (Hasan et al., 2025). Indicadores como el Coeficiente de Nash-Sutcliffe, el RMSE o el R^2 se emplean para medir la calidad del ajuste. En modelos con lógica difusa, una buena calibración y validación garantiza que las reglas establecidas

se basen en información confiable, aumentando la utilidad del modelo para la planificación en contextos de estrés hídrico (Hasan et al., 2025).

Indicadores estadísticos: RMSE, MAE y R^2

Cuando se evalúa la calidad de un modelo hidrológico, es importante contar con herramientas estadísticas que permitan verificar cuán acertados son los resultados. Entre los indicadores más utilizados para este propósito están el RMSE, el MAE y el R^2 , que ayudan a interpretar la precisión del modelo de diferentes maneras (Torres y Rocha, 2024).

El RMSE, conocido como raíz del error cuadrático medio, calcula qué tan lejos están, en promedio, las predicciones del modelo respecto a los valores reales, dando más peso a los errores grandes. Por esta razón, es muy útil cuando se quiere detectar desviaciones importantes, ya que estas influyen más en su valor final. Cuanto más bajo es el RMSE, mejor se considera el ajuste del modelo (Torres y Rocha, 2024).

El MAE, o error absoluto medio, también mide la diferencia entre los valores predichos y observados, pero lo hace de forma más directa, tomando simplemente el promedio de las diferencias absolutas. Es una medida fácil de interpretar, menos sensible a errores extremos, y también ayuda a evaluar el rendimiento general del modelo (Torres y Rocha, 2024).

El R^2 , llamado coeficiente de determinación, expresa cuánta proporción de la variabilidad de los datos observados puede ser explicada por el modelo. Su valor va de 0 a 1, siendo 1 la mejor posible. Un R^2 cercano a 1 indica que el modelo tiene un buen nivel de ajuste (Hasan et al., 2025).

Estos tres indicadores permiten evaluar modelos hidrológicos de forma complementaria, ya que muestran diferentes aspectos del rendimiento del modelo. Por ello, se utilizan frecuentemente en estudios donde se busca predecir caudales o disponibilidad de agua, especialmente en contextos con variabilidad climática o estrés hídrico (Hasan et al., 2025).

Predicción de caudales

La predicción de caudales es una función necesaria en los modelos hidrológicos, ya que permite anticipar la cantidad de agua que circulará por un río en determinado tiempo. Esta estimación se basa en variables como lluvia, temperatura, evaporación y características del suelo y relieve (Panda et al., 2025).

Los modelos simulan cómo responde la cuenca ante diferentes condiciones climáticas, lo cual resulta muy útil para planificar el riego, prevenir inundaciones o programar el uso del agua en hogares, industria y agricultura. En particular, los modelos difusos pueden detectar patrones complejos y ofrecer respuestas más adaptativas frente a la incertidumbre (Todini, 2007).

Para realizar estas predicciones, existen diferentes enfoques. Los modelos físicos usan ecuaciones para representar el ciclo del agua, mientras que los modelos de inteligencia artificial, como los que aplican lógica difusa, analizan grandes cantidades de datos para

aprender comportamientos sin requerir ecuaciones estrictas (Todini, 2007).

En escenarios con estrés hídrico, prever caudales es necesario, ya que permite tomar medidas preventivas frente a posibles escaseces o excesos. También es útil para analizar el impacto del cambio climático o del uso del suelo sobre la disponibilidad del agua (Todini, 2007). Así, la capacidad de predecir caudales convierte al modelo hidrológico en una herramienta poderosa para la gestión del recurso hídrico, permitiendo tomar decisiones mejor informadas y adaptadas a condiciones cambiantes. La combinación con lógica difusa refuerza esta capacidad, al permitir trabajar con datos inciertos o incompletos sin perder precisión (Panda et al., 2025).

Precisión del modelo en escenarios de estrés hídrico

Cuando se analizan condiciones de escasez o alteración crítica del agua, es fundamental verificar si el modelo hidrológico mantiene su exactitud. La precisión en escenarios de estrés hídrico se refiere a qué tan bien el modelo puede reproducir situaciones como sequías extremas, aumento de la demanda o variaciones abruptas en la precipitación (Wilby y Dessai, 2010). Este tipo de evaluación no puede basarse solo en datos de años promedio. Es indispensable validar el modelo con registros históricos de años problemáticos, empleando indicadores como NSE, RMSE o R^2 . Estos ayudan a medir si el modelo realmente logra reflejar lo que ocurre en condiciones críticas, no solo en contextos normales (Singh y Frevert, 2002).

La lógica difusa mejora este proceso, ya que permite manejar información parcial o ambigua. Gracias a esta herramienta, se puede representar la realidad de manera más gradual, incluyendo categorías como “nivel bajo” o “caudal crítico”, que serían difíciles de definir con precisión en modelos clásicos (Wilby y Dessai, 2010).

Contar con una buena precisión en estos escenarios es importante para prevenir crisis hídricas. Esto ayuda a tomar decisiones anticipadas, como restringir el uso en ciertas zonas, activar alertas tempranas o redirigir el uso del recurso. De este modo, el modelo deja de ser solo una herramienta técnica y se convierte en un apoyo real para la gestión sostenible del agua en momentos de mayor vulnerabilidad (Singh y Frevert, 2002).

Precipitación anual y mensual

La lluvia es el componente principal que alimenta los sistemas hídricos, y entender su comportamiento a lo largo del año y por meses es fundamental para cualquier análisis hidrológico. La precipitación anual indica cuánta agua total se ha recibido, mientras que la mensual ayuda a detectar cuándo se concentran las lluvias y cuándo ocurren los periodos secos (Castro-Llanos y Carvajal-Escobar, 2013).

Esta variabilidad mensual es clave en zonas donde la distribución de lluvias no es uniforme durante todo el año. En el caso de la cuenca del río Pampas, por ejemplo, las lluvias se concentran en unos pocos meses, lo que puede generar problemas si no hay

una gestión adecuada del almacenamiento o distribución del agua. Conocer estos patrones permite anticipar situaciones críticas, como temporadas de sequía o exceso de caudal. También es útil para diseñar sistemas de captación de agua de lluvia, planificación de riego o control de inundaciones (Avalos et al., 2003).

El cambio climático ha alterado la regularidad de estos patrones, por lo que los modelos actuales deben adaptarse a esta nueva realidad. Incluir la precipitación mensual y anual en el modelo hidrológico permite obtener simulaciones más cercanas a lo que realmente ocurre, especialmente si se usa lógica difusa, que ayuda a interpretar datos incompletos o poco claros de forma más flexible y útil (Castro-Llanos y Carvajal-Escobar, 2013).

Frecuencia e intensidad de sequías

La sequía es uno de los fenómenos más perjudiciales para la disponibilidad de agua. Saber con qué frecuencia se presenta y qué tan severa puede llegar a ser permite entender el nivel de riesgo al que está expuesta una cuenca. La frecuencia se refiere a cuántas veces ocurre una sequía en determinado lapso, y la intensidad se mide por la magnitud de la escasez (Vicente-Serrano et al., 2010).

No todas las sequías son iguales. Algunas afectan directamente a las lluvias (meteorológicas), otras a los ríos (hidrológicas) y otras al suelo agrícola. Cuanto más frecuente e intensa sea la sequía, mayores serán los impactos en la economía, la salud y el ambiente (Quispe, 2024). El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) es una herramienta útil para cuantificar estos eventos, ya que permite analizar tendencias a corto y largo plazo. Incluir esta información en los modelos hidrológicos permite anticipar crisis y preparar respuestas adecuadas (Vicente-Serrano et al., 2010).

Con la ayuda de la lógica difusa, es posible representar distintos grados de sequía de manera más flexible. Esto significa que el modelo no se limita a decir “hay sequía o no”, sino que puede asignar grados de severidad y adaptarse mejor a los datos reales (Quispe, 2024).

Relación precipitación – escorrentía

La conexión entre la lluvia que cae y el agua que corre por la superficie del terreno se conoce como relación precipitación escorrentía. Esta relación es para entender cuánta agua termina realmente en los ríos, ya que no toda la lluvia se convierte en escorrentía: parte se infiltra en el suelo o se evapora (Gaspari et al., 2007).

Factores como el tipo de suelo, la inclinación del terreno, la vegetación y la saturación del suelo influyen directamente. Por ejemplo, si el suelo está seco y poroso, mucha agua se infiltra; pero si está compacto o ya saturado, el agua fluye rápidamente por la superficie, incrementando el riesgo de desbordes (Arrueta, 2009). Esta relación ayuda a calcular cuánta agua llegará a los ríos durante o después de una lluvia. En los modelos hidrológicos, especialmente los que usan lógica difusa, se emplea para simular distintos comportamientos

de la cuenca en función de las condiciones de lluvia y del terreno (Hernandez, 2024).

Con los cambios climáticos y el uso intensivo del suelo, esta relación se vuelve aún más variable. Aumentos en lluvias fuertes o una mayor impermeabilización del suelo pueden aumentar la escorrentía y disminuir la infiltración. Por eso, analizar esta relación permite entender mejor cómo reacciona una cuenca ante las lluvias y qué medidas tomar para un uso más eficiente y seguro del recurso hídrico (Hernandez, 2024).

Balance hídrico anual

El balance hídrico es un instrumento importante en el análisis hidrológico, ya que permite estimar la cantidad, distribución y utilización del agua en una zona específica durante un cierto periodo. Este se fundamenta en la ley de conservación de la masa, donde el volumen de agua que ingresa al sistema (por lluvias u otras fuentes externas) debe ser igual al total de agua que egresa (como escorrentía, evaporación o infiltración) más la variación en el almacenamiento. Su expresión básica es: $\text{Ingresos} - \text{Egresos} = \text{Cambio en almacenamiento}$ (Álvarez y Pisco, 2024).

Este tipo de análisis ayuda a identificar si el sistema presenta un excedente o un déficit de agua. Cuando el resultado es positivo, significa que la oferta hídrica supera la demanda, lo que permite aprovechar el excedente en reservorios o para la recarga de acuíferos. Si el resultado es negativo, se evidencia escasez, lo cual exige acciones correctivas para evitar impactos sobre el consumo humano, la agricultura o los ecosistemas (Álvarez y Pisco, 2024).

Una de las herramientas más utilizadas para este propósito es el modelo WEAP (Sistema de Evaluación y Planificación del Agua), que permite representar escenarios complejos al integrar fuentes hídricas, usos, condiciones climáticas y estrategias de manejo (Álvarez y Pisco, 2024).

Incorporar el balance hídrico en modelos basados en lógica difusa permite interpretar de forma más flexible las condiciones entre escasez y abundancia. Por tanto, constituye una herramienta valiosa para la gestión preventiva y adaptativa del recurso hídrico frente a escenarios con alta variabilidad climática (Álvarez y Pisco, 2024).

El balance hídrico anual mide si una cuenca recibe más agua de la que usa o si, por el contrario, está perdiendo recursos. Para ello, se comparan todos los ingresos de agua, como la lluvia o entradas de otros ríos, con las salidas, que incluyen evaporación, filtración, escorrentía y consumo humano (Aguilar et al., 2024). Este análisis permite saber si hay suficiente agua para cubrir necesidades como el riego, el uso doméstico o el mantenimiento de los ecosistemas. También ayuda a planificar cuándo y dónde se requiere almacenar agua, construir reservorios o mejorar la distribución (Roca, 2024). Además, el balance hídrico permite observar cómo cambian los niveles de agua de un año a otro, lo que resulta útil para anticipar periodos de escasez y preparar medidas de respuesta. Si se usa un modelo con lógica difusa, es posible representar estos cambios no como “hay o no hay agua”, sino en grados más flexibles, como “déficit leve” o “excedente moderado” (Aguilar et al., 2024). Esto mejora la capacidad de gestión en contextos donde los datos pueden ser inciertos o

las condiciones cambian con rapidez. En consecuencia, el balance hídrico se convierte en una herramienta estratégica para garantizar un uso responsable, justo y sostenible del agua a lo largo del tiempo (Aguilar et al., 2024).

Volumen de déficit o excedente hídrico

El volumen de déficit o excedente hídrico muestra si una región tiene más o menos agua de la que necesita. Se calcula comparando la cantidad de agua disponible con lo que se requiere para uso humano, agrícola o ambiental. Si la demanda supera la oferta, hay déficit; si ocurre lo contrario, se genera un excedente (Abril et al., 2024). En casos de déficit, es común recurrir a restricciones en el uso del agua, optimizar su consumo o buscar fuentes alternativas. Si existe un excedente, se pueden almacenar los excedentes, recargar acuíferos o extender el riego. No obstante, también se deben prever los riesgos de desbordes o mal uso del agua extra. Este volumen se puede expresar en unidades como metros cúbicos por año y desglosarse por zonas o sectores de uso. Incorporarlo en modelos hidrológicos mejora la capacidad de simular distintos escenarios, especialmente bajo condiciones cambiantes por el clima o el crecimiento de la población (Atachagua y Collahua, 2024).

La lógica difusa permite trabajar con estos datos usando categorías como “déficit moderado” o “excedente leve”, lo cual es útil cuando los datos no son exactos o varían con el tiempo. Así, el análisis se vuelve más práctico para planificar con anticipación y tomar decisiones efectivas en la gestión del recurso hídrico (Atachagua y Collahua, 2024).

Caudales mínimos y máximos históricos

Los caudales mínimos y máximos históricos son registros que muestran hasta dónde puede subir o bajar el caudal de un río en momentos extremos. Conocer estos valores es vital para entender los límites del comportamiento del agua en una cuenca (Herrera, 2024).

El caudal máximo suele aparecer durante lluvias intensas o desbordes, y es esencial para construir obras de defensa como diques o canales. También sirve para activar alertas cuando hay riesgo de inundaciones. Por otro lado, el caudal mínimo ocurre en épocas de sequía o estiaje, y su análisis ayuda a prever si habrá suficiente agua para consumo humano o agricultura (Herrera, 2024). Estos datos se obtienen analizando registros de caudales a lo largo del tiempo. Con ellos, se puede alimentar un modelo hidrológico que proyecte cómo se comportará el sistema en el futuro. Si el modelo usa lógica difusa, puede traducir estos datos en términos como “muy bajo”, “bajo”, “alto” o “extremadamente alto”, lo que da mayor flexibilidad ante la incertidumbre (Idrogo, 2024).

Variabilidad interanual de la disponibilidad hídrica

La cantidad de agua que hay disponible no es la misma todos los años. Esa diferencia entre un año y otro se llama variabilidad interanual de la disponibilidad hídrica. Esta variabilidad

puede deberse a cambios en las lluvias, las temperaturas, o al uso del suelo en la zona (Chacapecho y Achu, 2024).

Saber cuánto varía el agua cada año ayuda a anticipar si un periodo será más seco o más lluvioso. Esto es importante para planificar el uso del agua en agricultura, consumo humano o industrias. Cuando esta variabilidad es muy alta, resulta más difícil garantizar el suministro estable de agua. Se analiza usando datos históricos de precipitación y caudales, observando promedios y diferencias año por año. Los modelos pueden identificar patrones y prepararse para escenarios futuros (Chacapecho y Achu, 2024).

Si se utiliza un modelo hidrológico con lógica difusa, esta variabilidad puede representarse de forma gradual, usando categorías como “alta” o “moderada”. Así, se mejora la interpretación de la incertidumbre, lo cual es muy útil para tomar decisiones frente a escenarios inciertos (Chacapecho y Achu, 2024).

Proyección de déficit hídrico

La proyección de déficit hídrico busca prever cuándo y cuánto faltará el agua en el futuro. Esto se hace usando modelos que analizan cuánto agua se espera que haya (por lluvias o ríos) y cuánto se va a necesitar (para agricultura, ciudades o industrias) (Donoso, 2024).

Así se pueden tomar decisiones a tiempo, como ahorrar agua, construir reservorios o distribuir el recurso con prioridad en las zonas más afectadas. Los modelos con lógica difusa permiten expresar esta escasez en términos como “déficit moderado” o “déficit severo”, lo cual es muy útil cuando los datos no son del todo precisos o cambian constantemente. Estas proyecciones son necesarias en tiempos de cambio climático, ya que las lluvias y temperaturas son más variables y difíciles de predecir. Anticiparse a los posibles déficits ayuda a proteger a la población y asegurar que el agua esté disponible donde más se necesita (Donoso, 2024).

2.2.10 Marco Conceptual

- (a) **Precipitación:** Es el proceso mediante el cual el agua presente en la atmósfera se libera desde las nubes en forma de lluvia, nieve, granizo o aguanieve. Este fenómeno es el principal mecanismo que garantiza el retorno del agua a la superficie terrestre, manteniendo activo el ciclo hidrológico. La precipitación es esencial para recargar ríos, lagos y acuíferos, y desempeña un papel crucial en el sostenimiento de la agricultura, los ecosistemas y la vida silvestre (López, 2022).
- (b) **Escurremientos hacia ríos:** Este fenómeno ocurre cuando el agua proveniente de la lluvia o el deshielo no penetra en el suelo y fluye superficialmente hacia los ríos. Los escurremientos son vitales para mantener el caudal fluvial durante épocas secas y para transportar nutrientes y sedimentos necesarios para los ecosistemas (Ricardos, 2018).
- (c) **Filtraciones :** Es el movimiento de una parte del agua de lluvia o nieve que se infiltra en el suelo, convirtiéndose en agua subterránea. Este recurso se almacena en acuíferos

y constituye una fuente clave de agua para el consumo humano, la agricultura y otros usos (Aparicio, 2023).

- (d) **Escurremientos subterráneos:** Es el flujo de agua subterráneo que se desplaza desde acuíferos, ríos o lagos hacia el océano. Este proceso mantiene los niveles de agua subterránea y favorece la salud de los ecosistemas marinos y costeros, siendo una parte fundamental del ciclo hidrológico (Vásquez, 2000).
- (e) **Agua subterránea almacenada:** Es el agua que se acumula en los acuíferos debido a la infiltración de lluvias y fuentes superficiales como ríos y lagos. Esta reserva es fundamental para abastecer agua potable y garantizar el riego agrícola, especialmente durante periodos de escasez hídrica (MVCS, 2018).
- (f) **Evaporación:** Es el proceso en el que el agua en estado líquido se convierte en vapor y asciende a la atmósfera. Este cambio de estado, impulsado por el calor, es un componente esencial del ciclo del agua, ya que permite la formación de nubes y la posterior precipitación (Vásquez, 2000).

CAPÍTULO III

Método de la investigación

3.1 Diseño de investigación

El diseño de la investigación no es experimental, ya que no se manipulan directamente las variables de estudio. En lugar de ello, las variables se observan y analizan en su estado natural, permitiendo evaluar las dinámicas hidrológicas y los efectos de los escenarios de estrés hídrico en la planificación de recursos hídricos (Hernández et al., 2014). Este enfoque es adecuado para trabajar con modelos teóricos como el hidrológico difuso, que se basa en la simulación y análisis de datos existentes.

3.1.1 Tipo de Investigación

La presente investigación es de tipo básica, ya que busca generar nuevos conocimientos teóricos sobre la aplicación de modelos hidrológicos difusos para la planificación de recursos hídricos, sin enfocarse en la implementación práctica de los resultados. Según Hernández et al. (2014), la investigación básica se centra en ampliar el conocimiento existente, contribuyendo a la comprensión de fenómenos complejos como la gestión hídrica bajo escenarios de estrés hídrico.

3.1.2 Nivel de Investigación

El nivel de investigación es descriptivo y explicativo. Es descriptivo porque caracteriza variables como la disponibilidad de agua, los patrones de estrés hídrico y los factores climáticos en la cuenca del río Pampas. A su vez, es explicativo porque analiza las relaciones causales entre estos factores y su influencia en la sostenibilidad hídrica, evaluando cómo los escenarios climáticos afectan la planificación de recursos hídricos (Hernández et al., 2014).

3.2 Población y muestra

- (a) **Población:** La población del estudio abarca todas las cuencas hidrográficas del Perú que presentan condiciones de estrés hídrico similares, caracterizadas por la variabilidad climática.
- (b) **Muestra:** La muestra está constituida específicamente por la cuenca del río Pampas.

3.3 Hipótesis

3.3.1 Hipótesis general

El desarrollo de un modelo hidrológico difuso mejora significativamente la planificación de los recursos hídricos en la cuenca del río Pampas, bajo escenarios de estrés hídrico.

3.3.2 Hipótesis específicas

- (a) La disponibilidad hídrica en la cuenca del río Pampas puede ser estimada con precisión mediante el uso del modelo hidrológico difuso, considerando escenarios de variabilidad climática
- (b) El estrés hídrico tiene un impacto significativo en la gestión de recursos hídricos, el cual puede ser evaluado de manera efectiva a través de simulaciones realizadas con el modelo hidrológico difuso.
- (c) El modelo hidrológico difuso es eficaz en la predicción de caudales y la relación precipitación-correntía, proporcionando información clave para comprender y gestionar el impacto del estrés hídrico en la cuenca del río Pampas.

3.4 Operacionalización de variables

- (a) **Variable Independiente :** Escenarios de estrés hídrico

Indicadores:

- Precisión del modelo
- Parámetros de calibración y validación del modelo
- Predicción de caudales
- Precisión del modelo en escenarios de estrés hídrico
- Precipitación anual y mensual
- Frecuencia e intensidad de sequías
- Relación precipitación - escorrentía

- (b) **Variable Dependiente :** Planificación de recursos hídricos

Indicadores:

- Balance hídrico anual

- Volumen de déficit o excedente hídrico
- Caudales mínimos y máximos históricos
- Variabilidad interanual de la disponibilidad hídrica
- Proyección de déficit hídrico

Figura N° 3.1:
Cuadro de operacionalización de variables

Cuadro de Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	TIPO	NATURALEZA	MEDICIÓN	DIMENSIÓN	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA
Escenarios de estrés hídrico	Los escenarios de estrés hídrico son proyecciones de condiciones críticas en la disponibilidad y calidad del agua, generadas por la interacción de fenómenos climáticos extremos, usos intensivos del recurso y vulnerabilidad ambiental, afectando la seguridad hídrica de la región	Independiente	Cuantitativa	Razón	Modelo Hidrológico Difuso	Precisión del modelo	%
						Parámetros de calibración y validación del modelo	RMSE, MAE y R ²
						Predicción de caudales	m ³ /s
						Precisión del modelo en escenarios de estrés hídrico	%
					Variabilidad climática	Precipitación anual y mensual	mm/año/mes
						Frecuencia e intensidad de sequías	SPI
Planificación de recursos hídricos	La planificación de recursos hídricos es la organización sistemática del uso y conservación del agua, integrando datos climáticos y medidas de gestión sostenible, para garantizar la disponibilidad y reducir riesgos en contextos de variabilidad hidrológica.	Dependiente	Cuantitativa	Razón	Gestión de recursos hídricos	Balance hídrico anual	m ³ /año
					Disponibilidad Hídrica	Caudales mínimos y máximos históricos	m ³ /s
						Variabilidad interanual de la disponibilidad hídrica	%
						Proyección de déficit hídrico	m ³ /año

Fuente:propia

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

A. Técnicas

- Revisión documental** : Se recopilarán y analizarán datos históricos y actuales relacionados con variables hidrológicas y climáticas de la cuenca del río Pampas, tales como registros de caudales, precipitaciones y temperaturas, así como información sobre uso del agua y patrones de estrés hídrico. Esta técnica permitirá identificar tendencias y patrones relevantes para el modelo hidrológico difuso.
- Análisis de datos secundarios**: Se utilizarán bases de datos provenientes de estaciones meteorológicas, hidrométricas y organismos gubernamentales como SENAMHI y ANA, que contienen información climática e hidrológica de la cuenca. Este análisis será esencial para integrar datos cuantitativos en el modelo.
- simulaciones y modelación**: Se emplearán herramientas de simulación para analizar los escenarios de estrés hídrico utilizando lógica difusa. Esto permitirá generar resultados basados en la interacción de múltiples variables bajo condiciones de incertidumbre.

B. Instrumentos

- (a) **Bases de datos hidrometeorológicos:** Incluyen registros históricos y actuales de precipitación, caudal, temperatura y otros factores climáticos proporcionados por instituciones como SENAMHI y ANA.
- (b) **Software de modelación hidrológica:** Se utilizarán herramientas computacionales para desarrollar y validar el modelo hidrológico difuso. Entre ellas, programas como MATLAB y Python, se utilizarán para implementar algoritmos de lógica difusa y realizar simulaciones complejas.
- (c) **Documentos técnicos y estudios previos:** Publicaciones científicas, informes gubernamentales y reportes sobre la cuenca del río Pampas servirán como insumos para complementar los datos cuantitativos y contextualizar el análisis.

3.6 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

- (a) **Análisis estadístico descriptivo:** Se aplican técnicas estadísticas para describir las principales características de los datos recolectados, como promedios, desviaciones estándar y rangos de variación. Esto permitirá identificar tendencias y patrones en variables clave como precipitación, caudal y temperatura, proporcionando un panorama inicial de las condiciones hídricas de la cuenca.
- (b) **Modelación hidrológica difusa:** Se utilizarán algoritmos basados en lógica difusa para integrar datos hidrológicos, climáticos y socioeconómicos. La lógica difusa permitirá manejar la incertidumbre y la ambigüedad inherentes a las variables analizadas, generando escenarios representativos de estrés hídrico en la cuenca del río Pampas.
- (c) **Simulación de escenarios:** A través de softwares, se realizarán simulaciones para evaluar la disponibilidad de agua bajo diferentes escenarios climáticos y de estrés hídrico. Estas simulaciones ayudarán a identificar zonas vulnerables, evaluar los impactos de la variabilidad climática y proponer estrategias de mitigación.

3.7 Desarrollo del trabajo de tesis

3.7.1 Ubicación Geográfica, Demarcación Hidrográfica y Accesibilidad

La cuenca del río Pampas se ubica en el sur centro del Perú y forma parte de la vertiente del Atlántico. Su posición geográfica abarca territorios de las regiones de Ayacucho, Apurímac y Huancavelica, siendo una de las cuencas más extensas de la zona. Su superficie presenta una diversidad fisiográfica importante, con una altitud que varía desde más de 4 400 msnm en su nacimiento hasta menos de 1 000 msnm en su desembocadura. Esta ubicación permite que la cuenca tenga una importante función en la provisión de agua para diferentes usos, incluyendo agricultura, consumo humano y actividades productivas.

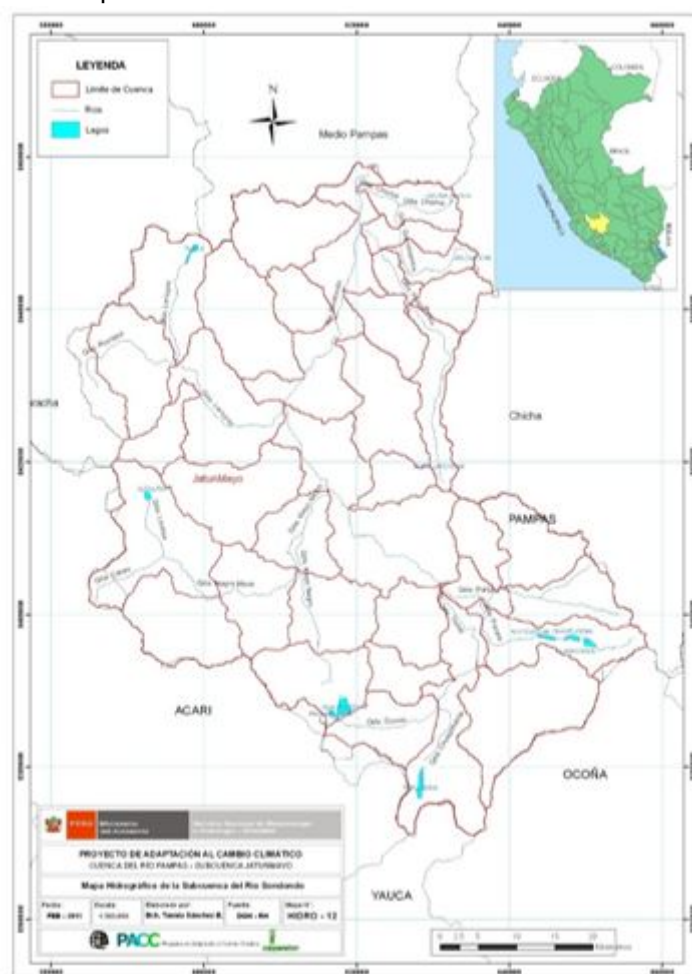
Ubicación Geográfica

La cuenca del río Pampas está situada entre las coordenadas UTM (WGS 84): 473000 a 710000 E y 8365000 a 8590000 N, abarcando zonas montañosas de los Andes peruanos. Políticamente, comprende distritos de las provincias de Huamanga, Cangallo, Vilcas Huamán, Huancasancos, Fajardo, Lucanas y Sucre (Ayacucho); Chincheros y Andahuaylas (Apurímac) y Castrovirreyña (Huancavelica).

Figura N° 3.2:

Mapa hidrográfico de la cuenca del río Pampas

Nota. Elaborado por el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica



Fuente: SINIA (2020)

Demarcación Hidrográfica

La cuenca del río Pampas pertenece a la vertiente atlántica y colinda con diversas cuencas importantes del país. Sus límites hidrográficos son:

- **Norte:** Cuenca del Mantaro e Intercuenca Bajo Apurímac
- **Este:** Intercuenca Alto Apurímac e Intercuenca Bajo Apurímac
- **Sur:** Cuenca Ocoña, Cuenca Yauca e Intercuenca Alto Apurímac
- **Oeste:** Cuencas de Pisco, Grande, Acarí y Yauca

Esta delimitación posiciona a la cuenca como un espacio estratégico para el análisis y la planificación hídrica en la región.

Accesibilidad - Vías de Comunicación

La siguiente tabla resume las principales rutas de acceso hacia la cuenca del río Pampas, considerando la ciudad de Ayacucho como punto de referencia:

Cuadro N° 3.1 :
Vías de acceso a la cuenca del río Pampas

Ruta	Distancia (km)	Medio	Tiempo estimado	Tipo de vía
Lima - Cruce San Clemente	260.4	Terrestre	4 h	Asfaltada
Cruce San Clemente - Ayacucho	314.6	Terrestre	4 h	Asfaltada
Huamanga - San Francisco - Quimbiri	175.1	Terrestre	6 h	Afirmada
Huamanga - Ayacucho - Chincheros	173.1	Terrestre	6.5 h	Afirmada
Lima - Ayacucho (alternativa aérea)	—	Aérea	—	Vuelo comercial

Nota:Elaboracion propia

3.7.2 Climatología

Temperatura

En la cuenca del río Pampas, el análisis del comportamiento térmico se ha realizado con información registrada por el CRU (Climatic Research Unit) durante el periodo 1960–1990. Estos datos han permitido caracterizar la variabilidad espacial de la temperatura y fueron utilizados en la elaboración del mapa isotérmico anual correspondiente. El cuadro 3.3 resume las temperaturas medias mensuales en diferentes altitudes de la cuenca, las cuales oscilan entre los 1157 y 4788 m.s.n.m., mostrando una relación inversa entre altitud y temperatura

Cuadro N° 3.2 :

Variación mensual de la temperatura media según altitud

Altitud (msnm)	Promedio (°C)	Máx. (°C)	Mín. (°C)
4788 – 4208	4.5	7.8	0.3
4183 – 4000	6.5	8.4	4.1
3988 – 3622	8.6	12.1	5.1
3578 – 3040	11.9	15.5	7.2
2997 – 1157	16.1	22.5	9.8

Nota. Información tomada del informe técnico realizado por (Tyspa Perú, 2019)

Por otro lado, la tabla siguiente muestra el comportamiento térmico mensual promedio en las distintas subcuencas del río Pampas. Se observa una marcada diferencia térmica entre las zonas altas y bajas de la cuenca.

Cuadro N° 3.3 :

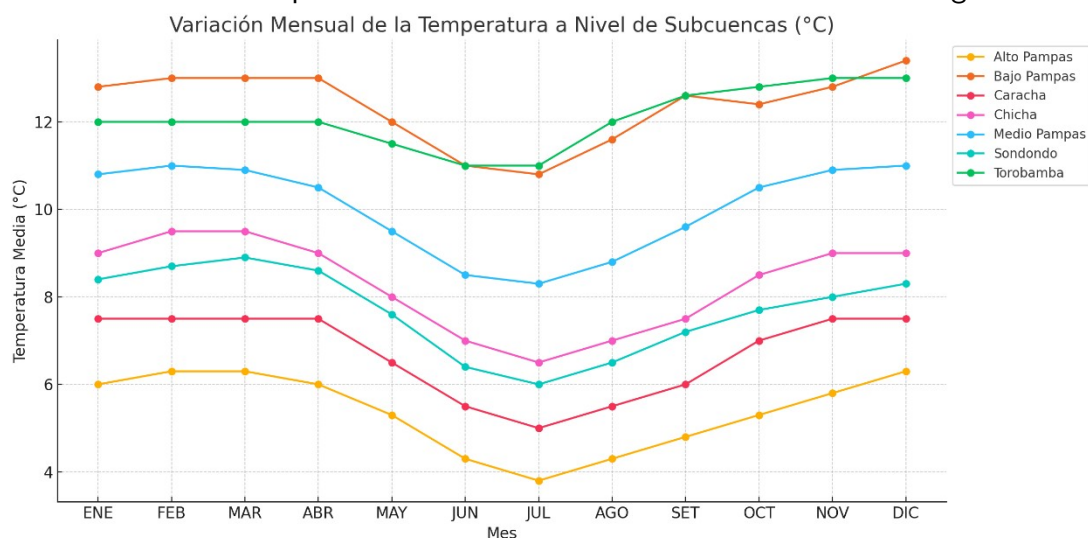
Temperatura Media Mensual por Subcuenca (°C)

Subcuenca	Alto Pampas	Bajo Pampas	Caracha	Chicha	Medio Pampas	Sondondo	Torobamba
ENE	6	12.8	7.5	9	10.8	8.4	12
FEB	6.3	13	7.5	9.5	11	8.7	12
MAR	6.3	13	7.5	9.5	10.9	8.9	12
ABR	6	13	7.5	9	10.5	8.6	12
MAY	5.3	12	6.5	8	9.5	7.6	11.5
JUN	4.3	11	5.5	7	8.5	6.4	11
JUL	3.8	10.8	5	6.5	8.3	6	11
AGO	4.3	11.6	5.5	7	8.8	6.5	12
SET	4.8	12.6	6	7.5	9.6	7.2	12.6
OCT	5.3	12.4	7	8.5	10.5	7.7	12.8
NOV	5.8	12.8	7.5	9	10.9	8	13
DIC	6.3	13.4	7.5	9	11	8.3	13

Nota. Información tomada del informe técnico realizado por (Tyspa Perú, 2019)

Figura N° 3.3:**Variación Mensual De La Temperatura**

Nota. Elaborado por el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica



Fuente: Elaboración Propia

El comportamiento mensual de la temperatura máxima en la cuenca del río Pampas, entre los 1157 y 4788 m.s.n.m., muestra una tendencia decreciente conforme aumenta la altitud. Esta relación altitudinal es observable en los valores promedio, mínimos y máximos registrados, que se detallan en la siguiente tabla:

Cuadro N° 3.4 :

Variación Mensual de la Temperatura Máxima en la Cuenca del Río Pampas

Altitud (msnm)	Prom. (°C)	Máx. (°C)	Mín. (°C)
4788 – 4208	12.3	15.4	8.6
4183 – 4000	14	15.7	12.2
3988 – 3622	16.1	19.4	13.4
3578 – 3040	19.3	22.4	15.2
2997 – 1157	23	28.1	17.2

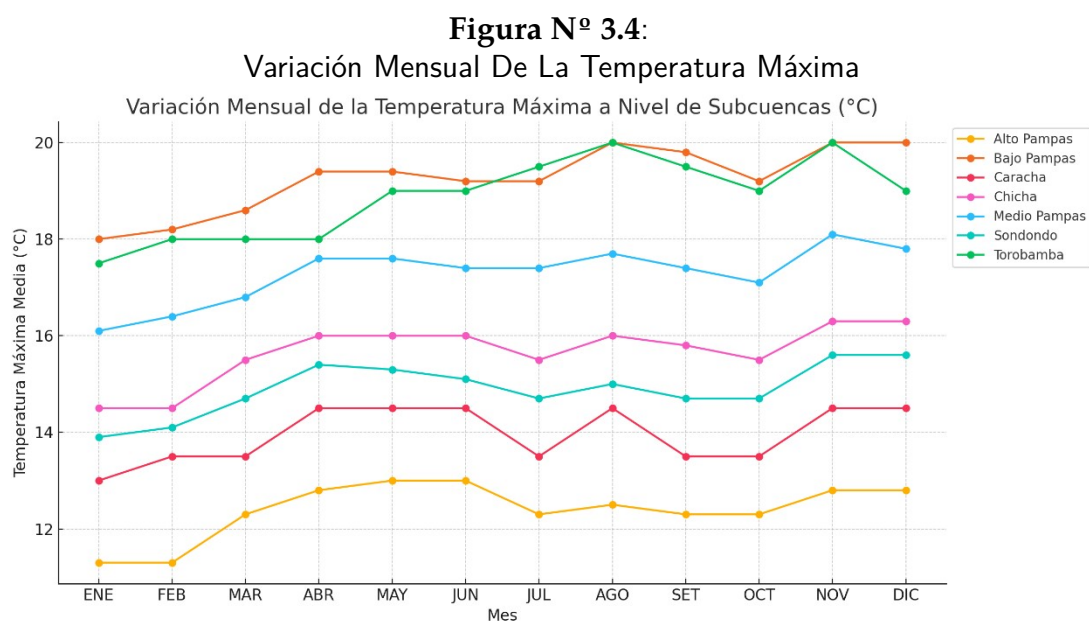
Nota. Información tomada del informe técnico realizado por (Tyspa Perú, 2019)

La siguiente tabla 3.6 resume las temperaturas máximas mensuales en diferentes subcuencas del río Pampas, destacando las variaciones térmicas asociadas a cada zona geográfica:

Cuadro N° 3.5 :
Temperatura Máxima Media Mensual por Subcuenca (°C)

Subcuenca	Alto Pampas	Bajo Pampas	Caracha	Chicha	Medio Pampas	Sondondo	Torobamba
ENE	11.3	18	13	14.5	16.1	13.9	17.5
FEB	11.3	18.2	13.5	14.5	16.4	14.1	18
MAR	12.3	18.6	13.5	15.5	16.8	14.7	18
ABR	12.8	19.4	14.5	16	17.6	15.4	18
MAY	13	19.4	14.5	16	17.6	15.3	19
JUN	13	19.2	14.5	16	17.4	15.1	19
JUL	12.3	19.2	13.5	15.5	17.4	14.7	19.5
AGO	12.5	20	14.5	16	17.7	15	20
SET	12.3	19.8	13.5	15.8	17.4	14.7	19.5
OCT	12.3	19.2	13.5	15.5	17.1	14.7	19
NOV	12.8	20	14.5	16.3	18.1	15.6	20
DIC	12.8	20	14.5	16.3	17.8	15.6	19

Nota. Información tomada del informe técnico realizado por (Tyspa Perú, 2019)



Fuente: Elaboración Propia

El comportamiento de la temperatura mínima mensual en la cuenca del río Pampas, desde los 1157 hasta los 4788 m.s.n.m., muestra un patrón inverso al de las temperaturas máximas. Las zonas de mayor altitud registran valores más bajos, e incluso negativos, en varias épocas del año. En el siguiente cuadro resume los promedios, máximos y mínimos registrados por bandas altitudinales:

Cuadro N° 3.6 :

Variación Mensual de la Temperatura Mínima en la Cuenca del Río Pampas

Altitud (msnm)	Prom. (°C)	Máx. (°C)	Mín. (°C)
4788 – 4208	-3.3	1.3	-9.4
4183 – 4000	-1.1	2.2	-5.1
3988 – 3622	1	5.4	-3.7
3578 – 3040	4.6	8.9	-1.2
2997 – 1157	9.2	17.5	2.1

Nota. Información tomada del informe técnico realizado por (Tyspa Perú, 2019)

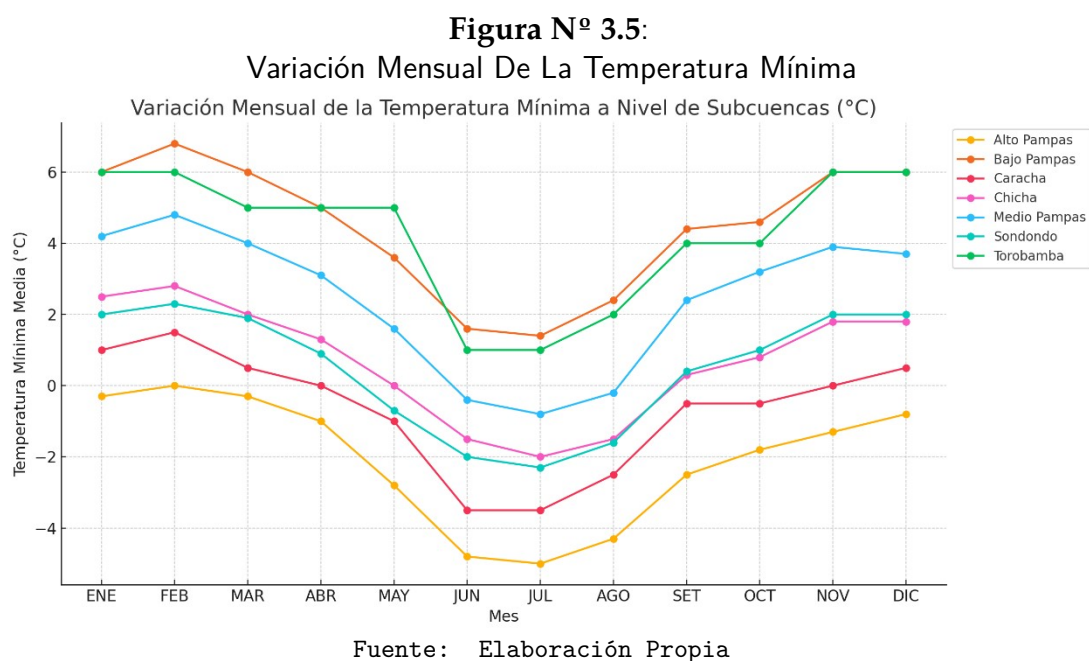
A continuación, se muestra la variación mensual de la temperatura mínima en las principales subcuencas de la cuenca del río Pampas. Los valores reflejan una marcada diferencia térmica entre sectores altos y bajos, con registros negativos en las zonas de mayor altitud durante los meses más fríos.

Cuadro N° 3.7 :

Temperatura Mínima Media Mensual por Subcuenca (°C)

Subcuenca	Alto Pampas	Bajo Pampas	Caracha	Chicha	Medio Pampas	Sondondo	Torobamba
ENE	-0.3	6	1	2.5	4.2	2	6
FEB	0	6.8	1.5	2.8	4.8	2.3	6
MAR	-0.3	6	0.5	2	4	1.9	5
ABR	-1	5	0	1.3	3.1	0.9	5
MAY	-2.8	3.6	-1	0	1.6	-0.7	5
JUN	-4.8	1.6	-3.5	-1.5	-0.4	-2	1
JUL	-5	1.4	-3.5	-2	-0.8	-2.3	1
AGO	-4.3	2.4	-2.5	-1.5	-0.2	-1.6	2
SET	-2.5	4.4	-0.5	0.3	2.4	0.4	4
OCT	-1.8	4.6	-0.5	0.8	3.2	1	4
NOV	-1.3	6	0	1.8	3.9	2	6
DIC	-0.8	6	0.5	1.8	3.7	2	6

Nota. Información tomada del informe técnico realizado por (Tyspa Perú, 2019)



Nota. Información tomada del informe técnico realizado por (Tyspa Perú, 2019)

Humedad Relativa

En el ámbito de la cuenca del río Pampas, se recopiló registros de humedad relativa mensual. Esta información ha sido empleada para analizar el comportamiento promedio de esta variable, la cual influye directamente en el balance hídrico y en los procesos de evapotranspiración. A continuación, se presenta el resumen de la humedad relativa media mensual en función de la altitud:

Cuadro N° 3.8 :
Variación Mensual de la Humedad Relativa en la Cuenca del Río Pampas

Altitud (msnm)	Prom. (%)	Máx. (%)	Mín. (%)
4788 – 4208	63.6	83.2	45.8
4183 – 4000	62.5	77.9	46.1
3988 – 3622	60.1	74.7	46.4
3578 – 3040	58	73.5	47
2997 – 1157	57.9	71.1	48.4

Nota. Información tomada del informe técnico realizado por (Tyspa Perú, 2019)

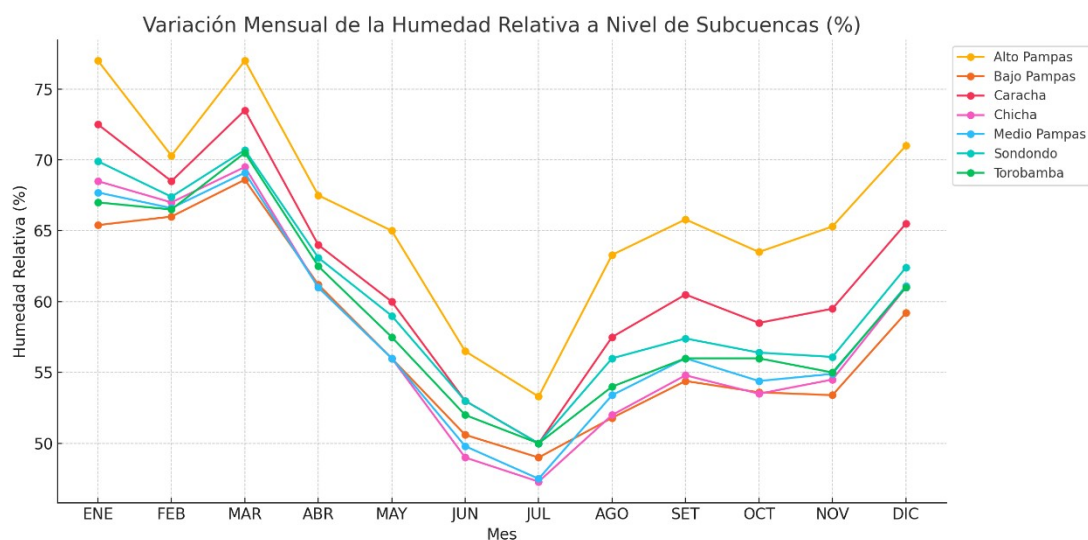
El cuadro siguiente resume la distribución mensual del porcentaje de humedad relativa en cada subcuenca. Se observa un patrón estacional marcado, con niveles más altos en los primeros y últimos meses del año.

Cuadro N° 3.9 :
Humedad Relativa Media Mensual por Subcuenca (%)

Subcuenca	Alto Pampas	Bajo Pampas	Caracha	Chicha	Medio Pampas	Sondondo	Torobamba
ENE	77	65.4	72.5	68.5	67.7	69.9	67
FEB	70.3	66	68.5	67	66.6	67.4	66.5
MAR	77	68.6	73.5	69.5	69.1	70.7	70.5
ABR	67.5	61.2	64	61	61	63.1	62.5
MAY	65	56	60	56	56	59	57.5
JUN	56.5	50.6	53	49	49.8	53	52
JUL	53.3	49	50	47.3	47.5	50	50
AGO	63.3	51.8	57.5	52	53.4	56	54
SET	65.8	54.4	60.5	54.8	56	57.4	56
OCT	63.5	53.6	58.5	53.5	54.4	56.4	56
NOV	65.3	53.4	59.5	54.5	54.9	56.1	55
DIC	71	59.2	65.5	61	61.1	62.4	61

Nota. Información tomada del informe técnico realizado por (Tyspa Perú, 2019)

Figura N° 3.6:
Variación Mensual De La Humedad Relativa



Fuente: Elaboración Propia

Velocidad del Viento

En el área de estudio de la cuenca del río Pampas, se cuenta con registros históricos sobre la velocidad del viento. Esta información ha permitido identificar el comportamiento promedio de esta variable climática en distintos niveles altitudinales. A continuación, se presenta un resumen de los valores mensuales promedio, máximos y mínimos, agrupados por intervalos de altitud:

Cuadro N° 3.10 :

Variación Mensual de la Velocidad del Viento en la Cuenca del Río Pampas

Altitud (msnm)	Prom. (m/s)	Máx. (m/s)	Mín. (m/s)
4788 – 4208	4	4.7	3.1
4183 – 4000	4.1	4.7	3.3
3988 – 3622	3.8	4.7	2.9
3578 – 3040	3.6	4.6	2.8
2997 – 1157	3.4	4.7	2.6

Nota. Información tomada del informe técnico realizado por (Tysa Perú, 2019)

El cuadro 3.12 muestra los valores mensuales de la velocidad promedio del viento en las principales subcuencas, permitiendo observar el comportamiento estacional y diferencias entre zonas más expuestas o protegidas.

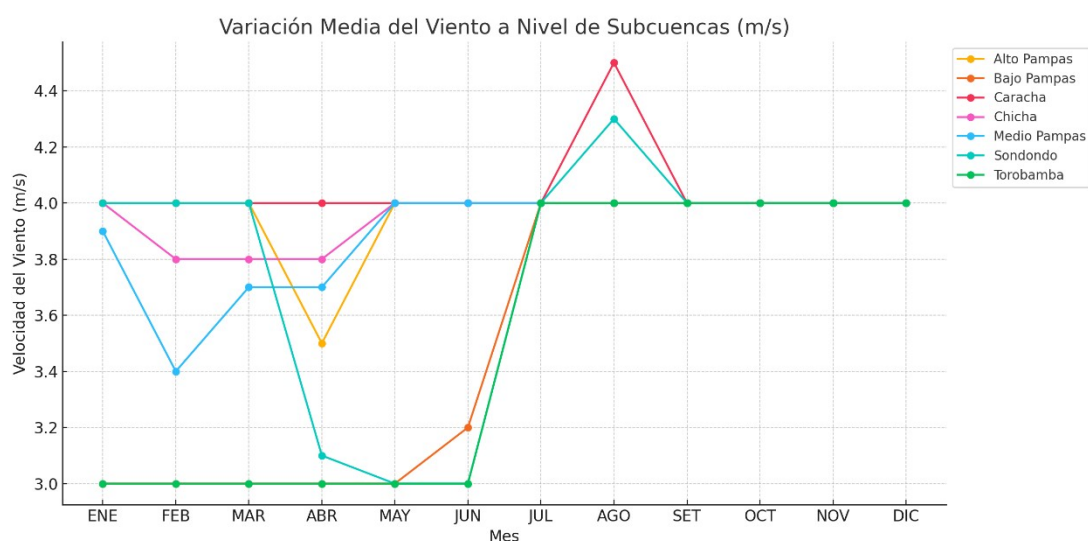
Cuadro N° 3.11 :

Velocidad Media Mensual del Viento por Subcuenca (m/s)

Subcuenca	Alto Pampas	Bajo Pampas	Caracha	Chicha	Medio Pampas	Sondondo	Torobamba
ENE	4	3	4	4	3.9	4	3
FEB	4	3	4	3.8	3.4	4	3
MAR	4	3	4	3.8	3.7	4	3
ABR	3.5	3	4	3.8	3.7	3.1	3
MAY	4	3	4	4	4	3	3
JUN	4	3.2	4	4	4	3	3
JUL	4	4	4	4	4	4	4
AGO	4	4	4.5	4	4	4.3	4
SET	4	4	4	4	4	4	4
OCT	4	4	4	4	4	4	4
NOV	4	4	4	4	4	4	4
DIC	4	4	4	4	4	4	4

Nota. Información tomada del informe técnico realizado por (Tysa Perú, 2019)

Figura N° 3.7:
Variación Media Del Viento



Fuente: Elaboración Propia

Evapotranspiración Potencial

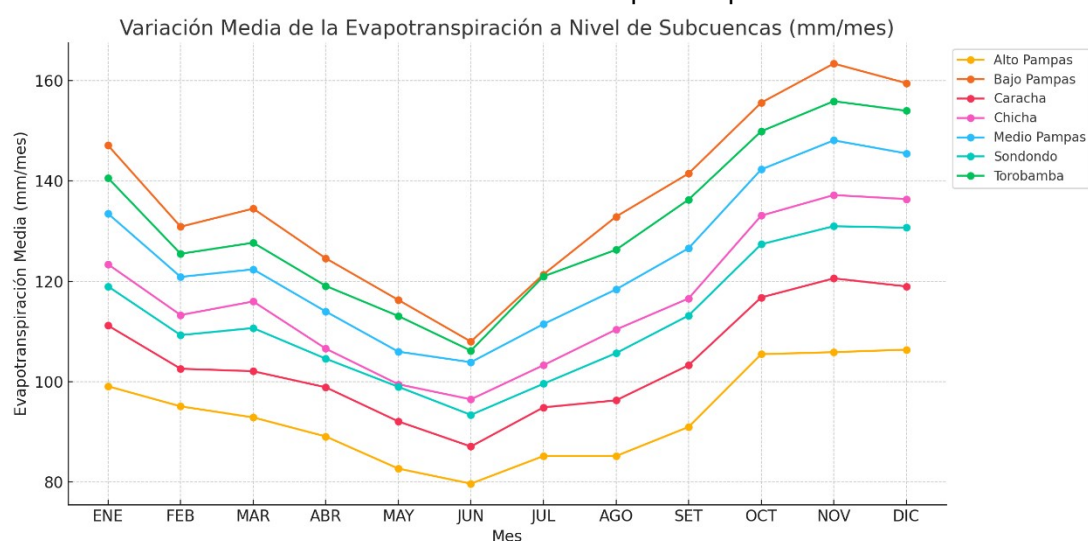
La evapotranspiración representa la pérdida de agua desde la superficie terrestre hacia la atmósfera, combinando la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas. En el caso de la cuenca del río Pampas, se han determinado los valores mensuales promedio de evapotranspiración para diferentes subcuencas. Estos datos permiten identificar patrones estacionales que pueden orientar estrategias de gestión del recurso hídrico. A continuación, se muestra la distribución mensual de la evapotranspiración media:

Cuadro N° 3.12 :
Variación Media de la Evapotranspiración a Nivel de Subcuencas (mm/mes)

Subcuenca	Alto Pampas	Bajo Pampas	Caracha	Chicha	Medio Pampas	Sondondo	Torobamba
ENE	99.1	147.1	111.2	123.4	133.5	119	140.6
FEB	95.1	130.9	102.6	113.3	120.9	109.3	125.5
MAR	92.9	134.5	102.1	116	122.4	110.7	127.7
ABR	89.1	124.6	98.9	106.6	114	104.6	119.1
MAY	82.7	116.3	92.1	99.5	106	99	113.1
JUN	79.7	108	87.1	96.5	103.9	93.4	106.2
JUL	85.2	121.4	94.9	103.3	111.5	99.6	121
AGO	85.2	132.9	96.3	110.4	118.4	105.7	126.3
SET	91	141.5	103.3	116.6	126.6	113.2	136.3
OCT	105.5	155.6	116.8	133.1	142.3	127.4	149.9
NOV	105.9	163.4	120.6	137.2	148.1	131	155.9
DIC	106.4	159.5	119	136.4	145.5	130.7	154

Nota. Información tomada del informe técnico realizado por (Tyspa Perú, 2019)

Figura N° 3.8:
Variación Media De La Evapotranspiración



Fuente: Elaboración Propia

3.7.3 Precipitación Media Mensual

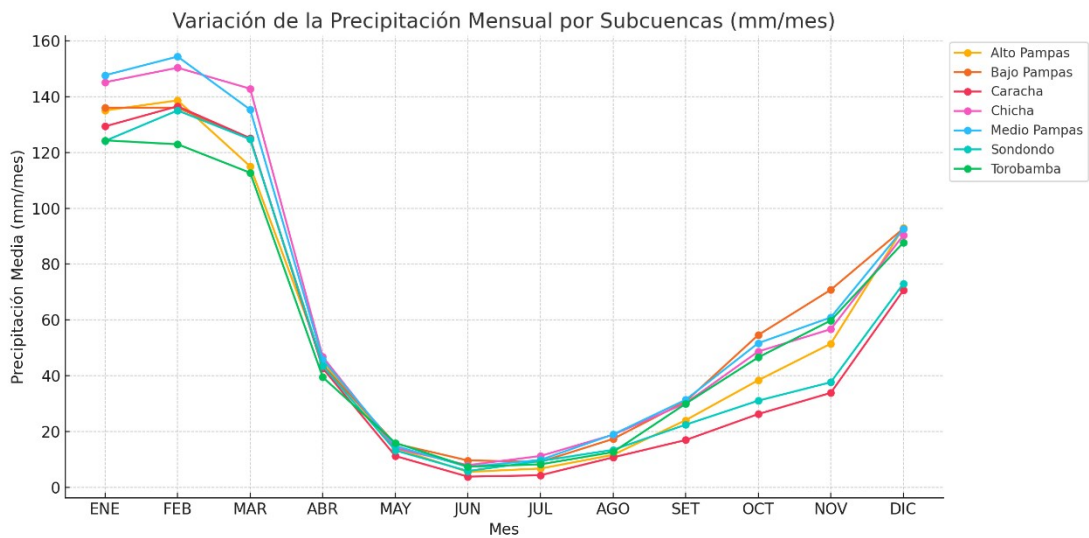
La precipitación es una de las variables climáticas más importantes para el análisis hidrológico de una cuenca. Permite evaluar la disponibilidad de agua superficial y subterránea, así como planificar el uso del recurso para actividades agrícolas, urbanas e industriales. La siguiente tabla presenta los valores promedios mensuales de precipitación (en mm/mes) en siete subcuencas de la cuenca del río Pampas. Los registros muestran un patrón estacional claramente definido, con concentraciones altas en los meses de verano (enero a marzo) y valores mínimos en invierno (junio a agosto).

Cuadro N° 3.13 :
Precipitación Media Mensual por Subcuenca (mm/mes)

Subcuenca	Alto Pampas	Bajo Pampas	Caracha	Chicha	Medio Pampas	Sondondo	Torobamba
ENE	135	136	129.3	145.1	147.6	124.1	124.3
FEB	138.6	136	136.5	150.3	154.3	135	122.9
MAR	115	124.7	125.1	142.8	135.3	124.7	112.7
ABR	45.1	43.8	42.7	46.8	45.8	43.5	39.5
MAY	14.1	15.7	11.3	14.1	14.9	13.3	16
JUN	5.6	9.7	3.9	8	7.4	5.9	7.5
JUL	6.8	9.2	4.4	11.3	9.9	9.5	8.3
AGO	11.7	17.4	10.8	18.9	19	13.5	12.7
SET	24.1	30.8	17	30.2	31.4	22.5	30
OCT	38.4	54.6	26.3	48.7	51.7	31.1	46.6
NOV	51.5	70.8	33.9	56.7	60.9	37.7	59.8
DIC	93	92.7	70.6	90.3	92.6	73	87.7

Nota. Información tomada del informe técnico realizado por (Tyspa Perú, 2019)

Figura N° 3.9:
Variación De La Precipitación Mensual



Se observa que los meses de enero, febrero y marzo concentran las mayores precipitaciones, especialmente en subcuencas como Medio Pampas y Chicha, donde se superan los 150 mm/mes en febrero. Por el contrario, el periodo junio–agosto presenta los valores más bajos, por debajo de los 10 mm/mes en varias zonas, lo que evidencia un marcado régimen estacional.

3.7.4 Descargas medias mensuales

La estimación de las descargas medias mensuales constituye un componente esencial en el estudio hidrológico de una cuenca. Estas descargas están directamente relacionadas con el volumen de agua precipitada, retenida e infiltrada en el sistema, y permiten proyectar la oferta hídrica mensual disponible para diferentes usos: agrícola, doméstico, industrial y ambiental. El comportamiento interanual y estacional de las descargas está influenciado principalmente por la precipitación acumulada y su distribución a lo largo del año. Por ello, es común emplear registros históricos de precipitación como base para estimar y modelar las descargas promedio mensuales. Estos valores sirven de insumo en la calibración de modelos hidrológicos, en el diseño de infraestructuras hidráulicas y en la evaluación del riesgo de eventos extremos como sequías o inundaciones. A continuación, se presenta la información de precipitación acumulada mensual por año en la cuenca del río Pampas. Esta tabla proporciona una visión de la variabilidad interanual desde 1965 hasta 1985, destacando los años con eventos hidrológicos intensos o atípicos que pueden tener un impacto considerable en el régimen de descarga de la cuenca.

Cuadro N° 3.14 :
Variación Mensual de la Precipitación Acumulada por Año (mm/mes)

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM.
1965	69.4	160.8	322.2	102.4	66.7	53	47.7	42.9	46.1	42.9	39.9	58.9	87.7
1966	105.7	221.5	375.7	91.4	69.9	40	32.7	26.6	24.9	66.5	82.6	147.5	107.1
1967	156.4	666.8	813.1	192.8	75.2	99.8	82.2	58.6	56.9	71.6	46	60	198.3
1968	183.7	172.2	378.9	140.9	56.6	60.7	51.1	41.1	35.8	37.8	63	89.3	109.3
1969	146.9	215.1	337.2	160.2	58.5	43.2	39.8	32.3	32.8	36.4	39.2	85.3	102.5
1970	689.4	607	388.7	183.3	119.3	47.8	42.2	36.2	40.3	34.6	36.8	72.3	191.5
1971	311.5	404.2	552.8	325	109.6	81.1	51	41.3	33.8	30	26.7	49.3	168
1972	296.7	426.2	650.9	349.7	111.2	70	59.5	45.3	49.6	44.5	44.4	89.4	186.5
1973	339.3	455.3	704.2	437.4	227.6	119.7	89.7	74.8	68.4	54.8	56.7	159.3	232.3
1974	525.6	652.3	509.5	333.6	177.5	135.6	71	86.7	67.9	49.3	49.6	52.4	225.9
1975	148	300.3	842.7	213.5	140.2	62.7	71.5	48.2	47.3	44.6	36.7	89.7	170.4
1976	335.3	811.1	676.5	311.7	180.5	145.9	137.1	35.2	41.8	42.4	45.8	139.9	241.9
1977	388.4	562.5	421.8	159.9	77.5	53.4	41.8	28.8	32	42.4	84.2	72.7	163.4
1978	331.3	297	307	100.6	76.9	50.3	40	36.7	30	37.9	66	138.2	163.4
1979	365.1	359	209.7	120.4	59	42.4	34.4	32.2	42.2	51.4	66.6	138.2	125.7
1980	128.7	237	303.5	117.7	56.7	40.7	34	29.6	33.9	31.6	65.6	91.5	122.7
1981	137.1	187.9	256.4	102.4	60.3	40	37.6	30.3	34.6	64.9	29.3	46.7	90.2
1982	197.6	549.2	326.4	205	73.7	46.7	34	47.5	60.8	58.8	75.1	185.1	155
1983	313.8	389	285.8	153.1	64.6	44.5	33.8	29	38.5	79.8	114	102.7	137.4
1984	148.4	177.6	205.5	117.8	58.5	39.8	32.3	38.5	40.6	39.6	34.2	111.6	87
1985	256.1	663.9	496.5	223.8	103.4	70	42.8	35.4	39	53.9	83.4	149.6	184.8
1965	69.4	160.8	322.2	102.4	66.7	53	47.7	42.9	46.1	42.9	39.9	58.9	87.7
1966	105.7	221.5	375.7	91.4	69.9	40	32.7	26.6	24.9	66.5	82.6	147.5	107.1
1967	156.4	666.8	813.1	192.8	75.2	99.8	82.2	58.6	56.9	71.6	46	60	198.3
1968	183.7	172.2	378.9	140.9	56.6	60.7	51.1	41.1	35.8	37.8	63	89.3	109.3
1969	146.9	215.1	337.2	160.2	58.5	43.2	39.8	32.3	32.8	36.4	39.2	85.3	102.5
1970	689.4	607	388.7	183.3	119.3	47.8	42.2	36.2	40.3	34.6	36.8	72.3	191.5
1971	311.5	404.2	552.8	325	109.6	81.1	51	41.3	33.8	30	26.7	49.3	168
1972	296.7	426.2	650.9	349.7	111.2	70	59.5	45.3	49.6	44.5	44.4	89.4	186.5
1973	339.3	455.3	704.2	437.4	227.6	119.7	89.7	74.8	68.4	54.8	56.7	159.3	232.3
1974	525.6	652.3	509.5	333.6	177.5	135.6	71	86.7	67.9	49.3	49.6	52.4	225.9
1975	148	300.3	842.7	213.5	140.2	62.7	71.5	48.2	47.3	44.6	36.7	89.7	170.4
1976	335.3	811.1	676.5	311.7	180.5	145.9	137.1	35.2	41.8	42.4	45.8	139.9	241.9
1977	388.4	562.5	421.8	159.9	77.5	53.4	41.8	28.8	32	42.4	84.2	72.7	163.4
1978	331.3	297	307	100.6	76.9	50.3	40	36.7	30	37.9	66	138.2	163.4
1979	365.1	359	209.7	120.4	59	42.4	34.4	32.2	42.2	51.4	66.6	138.2	125.7
1980	128.7	237	303.5	117.7	56.7	40.7	34	29.6	33.9	31.6	65.6	91.5	122.7
1981	137.1	187.9	256.4	102.4	60.3	40	37.6	30.3	34.6	64.9	29.3	46.7	90.2
1982	197.6	549.2	326.4	205	73.7	46.7	34	47.5	60.8	58.8	75.1	185.1	155
1983	313.8	389	285.8	153.1	64.6	44.5	33.8	29	38.5	79.8	114	102.7	137.4
1984	148.4	177.6	205.5	117.8	58.5	39.8	32.3	38.5	40.6	39.6	34.2	111.6	87
1985	256.1	663.9	496.5	223.8	103.4	70	42.8	35.4	39	53.9	83.4	149.6	184.8

Nota. Información tomada del informe técnico realizado por (Tysa Perú, 2019)

La precipitación mensual es un factor determinante para evaluar la disponibilidad hídrica en una cuenca hidrográfica, especialmente cuando se busca modelar el comportamiento del agua en escenarios de estrés climático. En este contexto, se presenta un análisis estadístico de las lluvias mensuales acumuladas registradas en la cuenca del río Pampas durante el periodo 1965–1985. Elcuadro 3.16 muestra los principales indicadores estadísticos de las lluvias acumuladas para cada mes del año: media, mediana, desviación estándar, valor máximo y valor mínimo. Estos datos permiten identificar patrones estacionales y fluctuaciones que pueden afectar la recarga hídrica, el diseño de infraestructuras hidráulicas y las decisiones de gestión del recurso.

Por ejemplo:

- Los meses con mayor media de precipitación son octubre (288.59 mm), diciembre (339.83 mm) y febrero (352.11 mm), lo que indica una concentración importante de lluvias en estos periodos.
- La variabilidad más alta (mayor desviación estándar) se observa en setiembre (116.21 mm) y febrero (110.51 mm), evidenciando una alta dispersión en los valores históricos mensuales.
- El rango de precipitación más amplio se registra también en los meses lluviosos, con máximos superiores a 500 mm, como en noviembre y febrero, y mínimos que se mantienen por encima de los 100 mm en la mayoría de meses, lo cual refleja una cuenca con lluvias relativamente frecuentes.

Cuadro N° 3.15 :

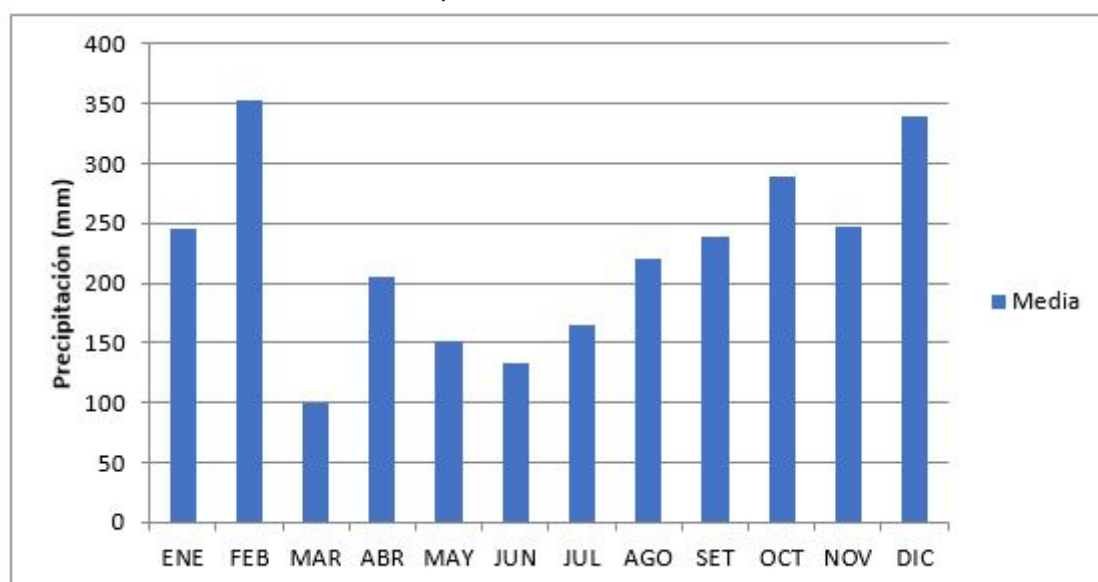
Estadísticos descriptivos de la precipitación mensual acumulada (mm/mes)

	Media	Mediana	Desviación estándar	Máximo	Mínimo
ENE	245.96	227.78	108.88	467.59	201.57
FEB	352.11	306.99	110.51	610.77	315.61
MAR	100.04	88.94	37.65	154.61	69.07
ABR	205.82	169	33.51	443.36	141.88
MAY	151.36	124.67	45.28	448.58	110.78
JUN	132.32	99.97	109.03	369.36	89.04
JUL	165.19	149.57	38.85	285.3	110.61
AGO	220.95	203.03	67.9	468.27	188.28
SET	238.87	196.84	116.21	314.68	180.16
OCT	288.59	239.86	77.98	450.56	251.25
NOV	246.72	224.18	92.27	523.87	187.25
DIC	339.83	302.14	58.4	463.23	274.84

Nota. Información tomada del informe técnico realizado por (Tyspa Perú, 2019)

Esta gráfica resume la cantidad promedio de lluvia por mes, destacando el ciclo anual de lluvias, donde se observa una tendencia creciente a partir de agosto y un pico en los meses de verano.

Figura N° 3.10:
Precipitación Media Mensual



Fuente: Elaboración Propia

La figura 3.10 presenta las diferencias entre los valores máximos y mínimos registrados por mes. Este rango refleja la variabilidad extrema y posibles eventos hidrometeorológicos.

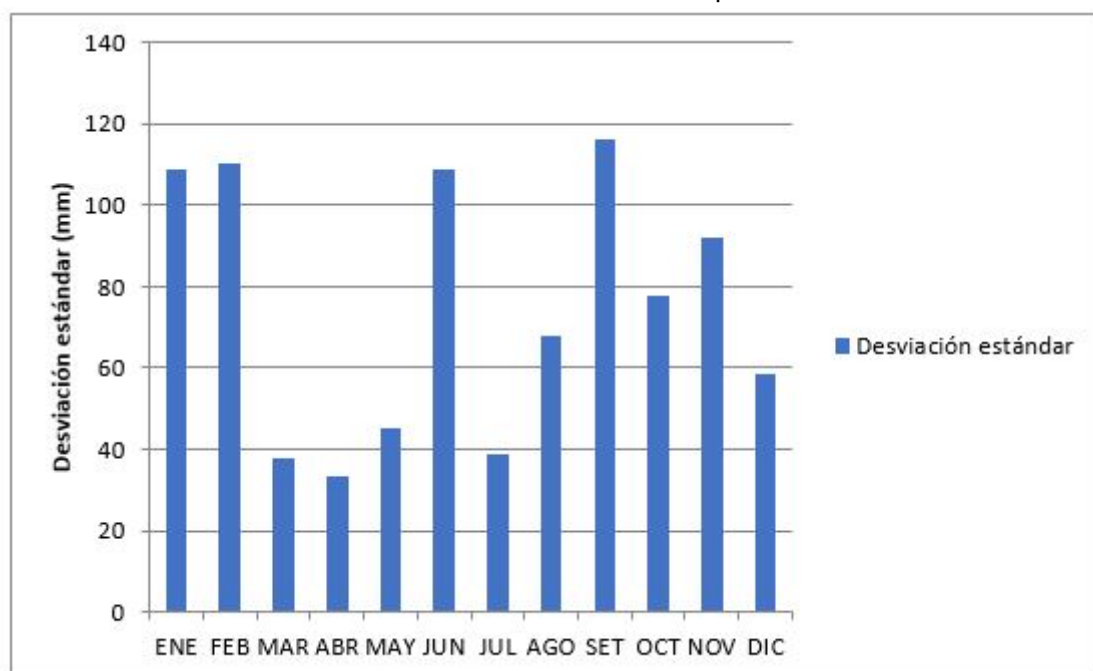
Figura N° 3.11:
Rango de Precipitación Mensual



Fuente: Elaboración Propia

La figura 3.11 muestra la desviación estándar de cada mes, lo que ayuda a comprender qué tan predecible es la precipitación mensual. Una desviación alta sugiere mayor incertidumbre en la ocurrencia y magnitud de lluvias.

Figura N° 3.12:
Variabilidad Mensual de la Precipitación



Fuente: Elaboración Propia

3.7.5 Demanda Hídrica

Demanda de agua en la cuenca del río pampas

Se ha estimado el requerimiento de agua para cada una de las subcuencas pertenecientes al sistema hidrográfico del río Pampas, considerando variables como la superficie con riego, coeficientes de cultivo, evapotranspiración potencial, precipitación útil y eficiencia del sistema de riego. La variación mensual de esta demanda se presenta de forma detallada en los cuadros respectivos, mientras que el resumen general se expone en el cuadro 3.17, correspondiente a una extensión total evaluada de 30 982,19 hectáreas. La demanda hídrica total anual alcanza un volumen de 218,78 Hm³ para las siete subcuencas. De estas, la que reporta la mayor exigencia de agua es Bajo Pampas, con 57,35 Hm³, lo cual se asocia a una superficie agrícola bajo riego de 7 489 hectáreas. La tabla a continuación presenta la distribución mensual de dicha demanda y el área que la sustenta.

Cuadro N° 3.16 :
Requerimiento hídrico mensual en las subcuencas del río Pampas (Hm³)

Subcuenca	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Total	Área (ha)
Alto Pampas	0	0	0	0.34	0	0.16	0.15	1.67	1.16	1.57	2.39	0	7.43	2,839.97
Bajo Pampas	0	0	0	8.63	0.22	0.44	0.61	7.09	6.53	6.88	13.79	13.2	57.35	7,489.00
Caracha	0	0	0	0.55	0	0.15	0.16	1.39	1.55	2.66	4.62	2.26	13.8	1,855.65
Chicha	0	0	0	0.01	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.08	15.5
Medio Pampas	0	0	0	5.24	0.16	0.49	0.56	4.97	4.46	5.16	12.83	7.47	41.14	6,854.24
Sondondo	0	0	0	3.62	0.16	0.41	0.29	4.43	4.48	8.33	15.35	9.44	46.51	5,786.00
Torobamba	0.29	0	0	7.51	0.18	0.46	0.54	6.34	5.09	7.32	13.71	11.1	52.48	6,141.82
TOTAL	0.29	0	0	26.3	0.71	2.1	2.19	25.9	23.22	31.93	62.72	43.4	218.8	30,982.19

Nota. Información tomada del informe técnico realizado por (Typsa Perú, 2019)

3.7.6 Caudales medios

El análisis de los caudales medios mensuales de los tributarios del río Pampas permite comprender la dinámica hídrica de la cuenca a lo largo del año.

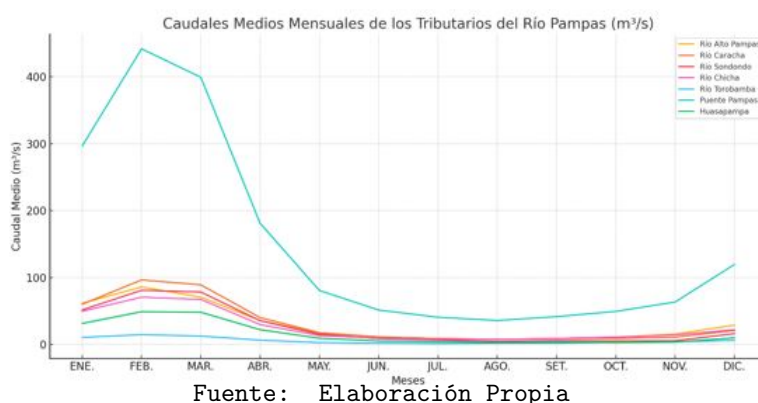
Cuadro N° 3.17 :
Caudales Medios Río Pampas

Afluentes	Río Alto Pampas	Río Caracha	Río Sondondo	Río Chicha	Río Torobamba	Puente Pampas	Huasapampa
ENE.	61.6	60.1	51.6	49.5	10.5	296.6	31.4
FEB.	85.9	96.4	80.9	70.6	14.6	441.8	48.9
MAR.	70.6	89.1	78.3	67.3	12.5	399.2	48.1
ABR.	35.7	40.1	35.5	29.6	6.4	181	22
MAY.	17	17.5	15.1	13.2	2.7	80.6	9.3
JUN.	11.1	11.3	8.6	9.3	1.7	51.4	5.1
JUL.	8.7	8.8	6.6	7.9	1.2	40.6	3.9
AGO.	7.7	8	4.7	7.9	1.5	35.8	2.7
SET.	8.9	8.5	5.6	9	2	41.5	3.3
OCT.	10.9	9	5.2	10.9	2.7	49.4	3
NOV.	15.4	10.9	5.5	14.2	4.1	63.4	3.4
DIC.	28.9	20.8	16.1	22	6	119.5	9.9

Nota. Información tomada del informe técnico realizado por (Typs Perú, 2019)

El cuadro presentada muestra los valores de caudal medio mensual (en m^3/s) de siete afluentes del río Pampas: Río Alto Pampas, Río Caracha, Río Sondondo, Río Chicha, Río Torobamba, Puente Pampas y Huasapampa. Se observa que los mayores caudales se presentan entre los meses de enero y marzo, coincidiendo con la temporada de lluvias en la sierra peruana. En contraste, los meses de junio a agosto reflejan los niveles más bajos, lo que indica la estación seca. Puente Pampas destaca con valores significativamente superiores a los demás ríos durante todo el año, con un máximo en febrero ($441.8 \text{ m}^3/\text{s}$). Esta diferencia sugiere una mayor contribución hidrológica, posiblemente por un área de captación más amplia o la presencia de aportes de origen glacial o lagunar.

Figura N° 3.13:
Caudales Medios Mensuales del Río Pampas



CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 Estimación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Pampas

La estimación de la disponibilidad hídrica constituye una etapa esencial dentro de la planificación de recursos hídricos en la cuenca del río Pampas. Este proceso requiere un análisis detallado de las condiciones climáticas históricas, particularmente de la precipitación, principal fuente de recarga hídrica superficial y subterránea. Debido al régimen pluvial estacional de la cuenca, donde la mayor parte de la lluvia se concentra entre los meses de octubre y abril, es fundamental conocer las variaciones interanuales y mensuales para caracterizar adecuadamente los escenarios de oferta hídrica.

El cuadro 4.1 presenta la precipitación mensual estimada entre los años 1965 y 2024 el cual fue desarrollada usando en código del Anexo N°2. Los datos evidencian una alta variabilidad interanual, con años donde la precipitación acumulada mensual supera los 800 mm (por ejemplo, marzo de 1975), mientras que en otros años se observan registros significativamente bajos, incluso por debajo de los 50 mm. Esta variabilidad refleja la influencia de fenómenos climáticos como El Niño y La Niña, que alteran drásticamente la cantidad y distribución de la precipitación.

Cuadro N° 4.1 :
Precipitación Mensual Estimada periodo 1965 - 2024

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1965	69.4	160.8	322.2	102.4	66.7	53	47.7	42.9	46.1	42.9	39.9	58.9
1966	105.7	221.5	375.7	91.4	69.9	40	32.7	26.6	24.9	66.5	82.6	147.5
1967	156.4	666.8	813.1	192.8	75.2	99.8	82.2	58.6	56.9	71.6	46	60
1968	183.7	172.2	378.9	140.9	56.6	60.7	51.1	41.1	35.8	37.8	63	89.3
1969	146.9	215.1	337.2	160.2	58.5	43.2	39.8	32.3	32.8	36.4	39.2	85.3
1970	689.4	607	388.7	183.3	119.3	47.8	42.2	36.2	40.3	34.6	36.8	72.3
1971	311.5	404.2	552.8	325	109.6	81.1	51	41.3	33.8	30	26.7	49.3
1972	296.7	426.2	650.9	349.7	111.2	70	59.5	45.3	49.6	44.5	44.4	89.4
1973	339.3	455.3	704.2	437.4	227.6	119.7	89.7	74.8	68.4	54.8	56.7	159.3
1974	525.6	652.3	509.5	333.6	177.5	135.6	71	86.7	67.9	49.3	49.6	52.4
1975	148	300.3	842.7	213.5	140.2	62.7	71.5	48.2	47.3	44.6	36.7	89.7
1976	335.3	811.1	676.5	311.7	180.5	145.9	137.1	35.2	41.8	42.4	45.8	139.9
1977	388.4	562.5	421.8	159.9	77.5	53.4	41.8	28.8	32	42.4	84.2	72.7
1978	331.3	297	307	100.6	76.9	50.3	40	36.7	30	37.9	66	138.2
1979	365.1	359	209.7	120.4	59	42.4	34.4	32.2	42.2	51.4	66.6	138.2
1980	128.7	237	303.5	117.7	56.7	40.7	34	29.6	33.9	31.6	65.6	91.5
1981	137.1	187.9	256.4	102.4	60.3	40	37.6	30.3	34.6	64.9	29.3	46.7
1982	197.6	549.2	326.4	205	73.7	46.7	34	47.5	60.8	58.8	75.1	185.1
1983	313.8	389	285.8	153.1	64.6	44.5	33.8	29	38.5	79.8	114	102.7
1984	148.4	177.6	205.5	117.8	58.5	39.8	32.3	38.5	40.6	39.6	34.2	111.6
1985	256.1	663.9	496.5	223.8	103.4	70	42.8	35.4	39	53.9	83.4	149.6
1986	340.5	378.1	570.7	347.7	85	58.5	93.3	53.5	37.1	55.7	46.1	82.4
1987	302	26.1	113.8	141.7	47.4	76.3	29.3	20.2	60.4	45.3	58	43.4
1988	183.2	427.5	224.3	234.4	67.3	56.6	37.2	70	42.6	34	74.9	51.7
1989	297	16.9	190.2	216.7	132.1	71.6	49.7	37.2	24.9	38.6	46.1	144.5
1990	317.4	55.9	508.4	159.2	63.6	85.9	79.2	56	32.6	44.2	63.9	141.1
1991	193.1	368.7	232.9	79.1	135.6	110.1	50.8	57.1	47.1	39.6	64.6	164.1
1992	260	715.8	0	278.5	100.6	56.4	55	11.4	40.1	53.2	89.6	80.3
1993	143.3	306	622.2	229.7	70.7	82.7	55.2	56.5	34.3	43.9	47.7	41.8
1994	310.2	457.3	446.9	174.1	27.9	52.4	43.9	29.5	40.8	53.9	98.7	108.5
1995	304.4	390.8	76.5	194.6	99.3	146	47.7	46.4	42.3	32.5	82.1	132
1996	385	225.2	716.1	58.8	124.7	137.1	27.2	33.1	43.9	41.5	21.7	104.2
1997	105	499.4	268.9	350.4	58.5	55.6	73.6	23	45.5	66.1	20.4	108.9
1998	304.7	560.6	207.8	66.8	121.6	75.7	59.1	47.1	34.5	51.5	63	72.3
1999	547.3	499.5	216.6	262.1	49.2	91.6	82.5	29.3	54.3	54	74.9	178.7
2000	228.4	256	274.7	116.7	92.6	77.1	59.8	54.4	42.9	68.1	50.5	212.2
2001	360	235.5	239.7	244.9	85.5	89.2	64.8	40.7	32.5	27.8	46.5	136.3
2002	297.8	158.5	479.3	235.3	53.6	71	54.2	24.3	47	56	80.7	144.3
2003	57.3	219.5	545.1	248	121.3	191	67.4	59.1	54.2	57.2	49.4	132.3
2004	148.7	358.6	352.5	205.4	208.3	5.5	70.3	17.2	37	63.2	57.9	57.5
2005	157.4	540.3	305.3	218.6	98.6	44.9	107.8	51.4	18.3	50.9	41.6	136.1

Cuadro N° 4.2 :

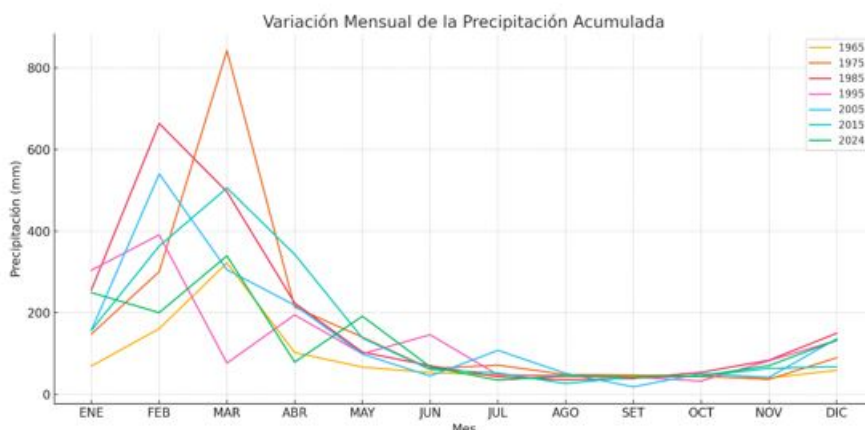
Continuacion de Precipitación Mensual Estimada periodo 1965 - 2024

2006	145.7	382.8	543.2	282.8	38.3	55.2	40.5	31.8	64	53.9	28.2	138.8
2007	586.1	610.3	153.4	149.4	157.6	43.1	64.1	53.6	31.5	47.6	0	59.7
2008	227.3	158.1	760.3	56	75.1	70.3	89.7	19.9	56.7	48.5	34.5	120.2
2009	295.5	286.5	459.4	159.2	101.8	87.5	93.4	22.9	68.4	21.8	53.1	125.4
2010	307.9	282	405.9	148.6	67.8	93.6	61.9	31.2	53.6	52.5	74.7	127.1
2011	140.2	294.4	589.9	257.6	95.3	69.9	85.5	32.7	49.3	45.6	51.6	146.2
2012	390.2	566.9	697.3	199.3	129.3	56	61	39.8	43.9	56.5	38.1	186.6
2013	113.5	164.7	669	275.5	126.5	86.4	52.4	28.1	43.6	39.2	78.3	95.4
2014	140.7	341.8	525.5	141.6	56.6	74	59	34	37	51.5	24	44.1
2015	156.9	363.2	505.8	343	137.8	60.9	52.2	26.5	42.5	44.4	63.7	67.7
2016	343.9	709.5	425	236.9	129.7	53	58.4	42	43.9	37.9	57	121.7
2017	484.7	595.8	860.6	121.5	138.5	72	109	29.4	32.6	40.2	8.9	80
2018	150.8	435.3	511.8	382.6	142.3	47.3	29.6	49.3	26.8	73.3	82.9	82.3
2019	6.6	674	423.9	319.5	19.2	46.6	52.8	42.5	37.3	56.8	32.5	95.6
2020	283.6	507.5	583	86.2	22.2	107.5	61.2	30.4	61.4	49.9	82.9	104.2
2021	576.8	753.6	398	293.2	127.6	110.5	27.9	52.2	55.5	24.4	30	18.3
2022	224.7	547.8	735.2	204.6	175.1	21.3	8.9	40.9	47.4	47.9	10.1	97.8
2023	68.4	538.3	516.5	104.4	71.5	31.7	51.1	56.3	30.8	55.2	44.6	69.1
2024	249.3	200.2	339.3	78.9	191.4	67.2	34.7	45	41.4	45.4	70.2	132.3
PROM	261.83	393.75	434.33	200.8	97.84	71.28	56.79	40.05	42.95	48.09	53.82	105.25

Nota. Elaboración Propia

La Figura 4.1 refuerza este análisis mostrando de manera gráfica las diferencias mensuales de precipitación acumulada para los años más representativos. La curva de precipitación revela que los meses de enero a marzo son los que concentran los mayores aportes hídricos, mientras que los meses de junio a septiembre presentan caídas pronunciadas, lo cual condiciona la disponibilidad del recurso hídrico durante gran parte del año.

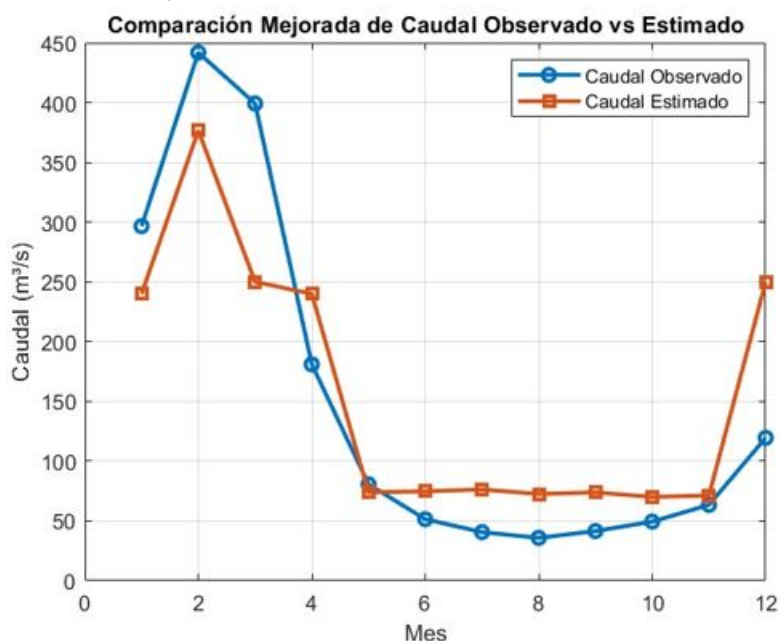
Figura N° 4.1:
Variación Mensual De La Precipitación Acumulada periodo 1965 - 2024



Fuente: Elaboración Propia

La Figura 4.2 muestra la comparación entre el caudal observado y el caudal estimado mediante el modelo hidrológico difuso para cada mes del año. Se observa que existe una buena correspondencia entre ambas curvas en los periodos de estiaje (junio a octubre), mientras que en los meses de mayor caudal (enero a marzo) se presentan ligeras desviaciones. Estas diferencias pueden deberse a la sensibilidad del modelo ante valores extremos de precipitación o a factores no considerados en la modelación, como infiltración, escorrentía superficial no captada o errores en la medición de datos históricos. No obstante, el comportamiento general del modelo se ajusta adecuadamente a la dinámica estacional del caudal en la cuenca del río Pampas.

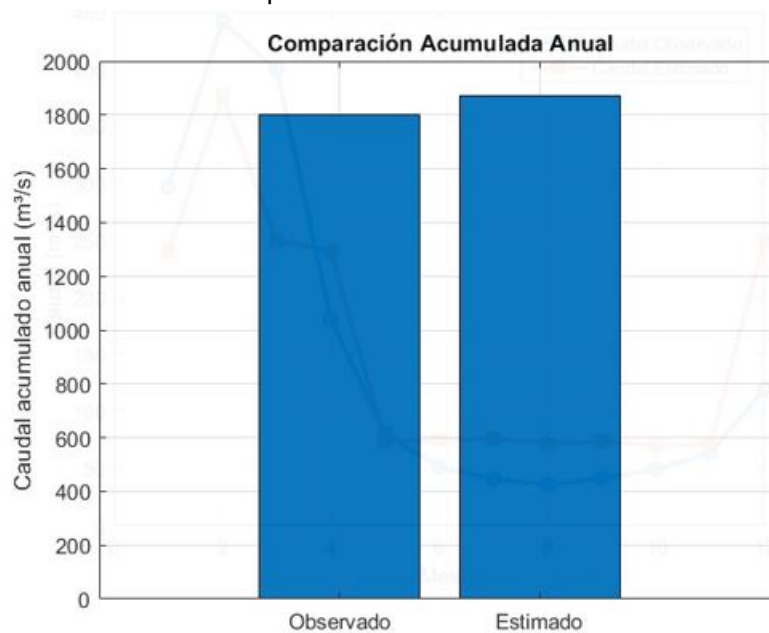
Figura N° 4.2:
Comparación de caudal observado vs estimado



Fuente: Elaboración Propia

La Figura 4.3 representa el caudal acumulado anual tanto del valor observado como del estimado. Se puede apreciar que la diferencia entre ambos es relativamente pequeña, lo cual respalda la confiabilidad del modelo difuso propuesto. Este resultado indica que el modelo es capaz de reproducir, de manera integral, la disponibilidad hídrica anual, lo cual es clave para la planificación de uso del recurso en sectores como agricultura, abastecimiento urbano e industria. La concordancia en la acumulación anual refuerza la validez del modelo para análisis hidrológicos a escala de gestión.

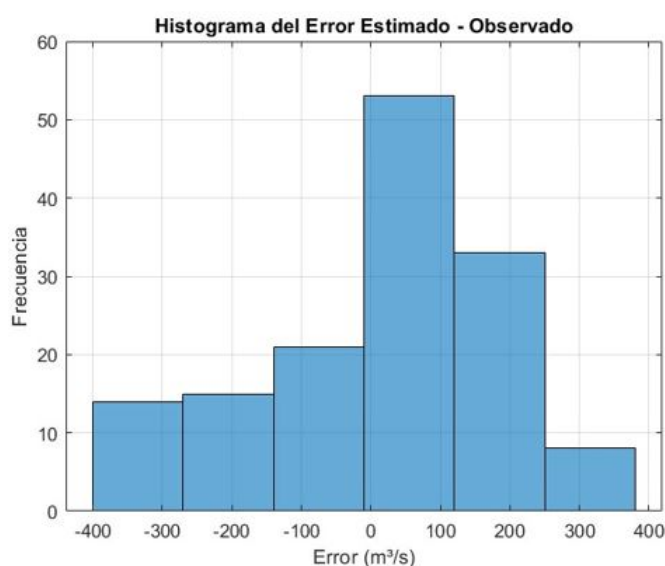
Figura N° 4.3:
comparacion acumulada anual



Fuente: Elaboración Propia

La Figura 4.4 presenta el histograma del error entre el caudal estimado y el caudal observado (diferencia entre ambos en cada periodo mensual). Se observa una distribución centrada alrededor de cero, con mayor frecuencia de errores dentro del rango ± 100 m³/s, lo cual sugiere una tendencia del modelo a sobreestimar ligeramente en ciertos meses. Sin embargo, no se identifican errores sistemáticos críticos ni desviaciones extremas que invaliden el uso del modelo. Esta gráfica permite visualizar la dispersión del error, ayudando a identificar los rangos de mayor incertidumbre y reforzando la importancia de realizar calibraciones finas en el modelo para escenarios futuros.

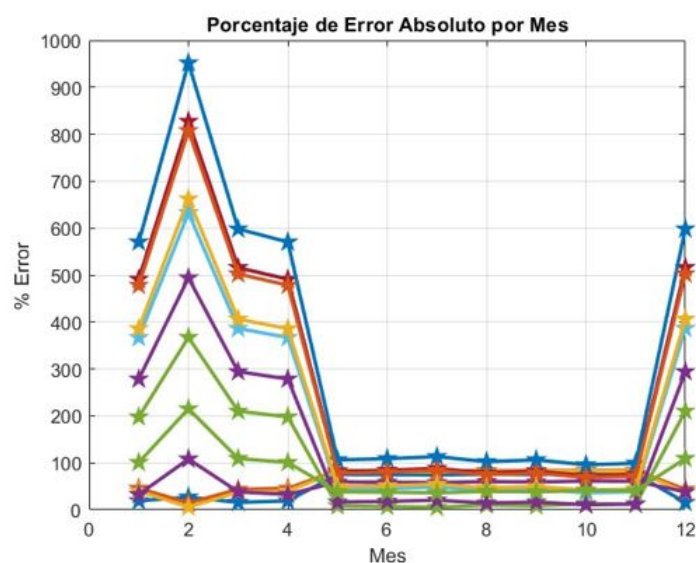
Figura N° 4.4:
Histograma del error estimado- observado



Fuente: Elaboración Propia

La Figura 4.5 muestra el porcentaje de error absoluto mensual en la estimación del caudal, lo cual permite evaluar la precisión del modelo hidrológico difuso a lo largo del año. Se observa que los meses con mayor caudal (enero a marzo y diciembre) presentan los errores más elevados, superando en algunos casos el 900%. Esto se explica por la alta sensibilidad del modelo ante variaciones abruptas de precipitación y posibles limitaciones en el modelado de eventos extremos. En cambio, los meses de estiaje (mayo a octubre) muestran errores porcentuales significativamente más bajos, reflejando una mayor estabilidad del modelo en condiciones de baja disponibilidad hídrica.

Figura N° 4.5:
Error absoluto por mes

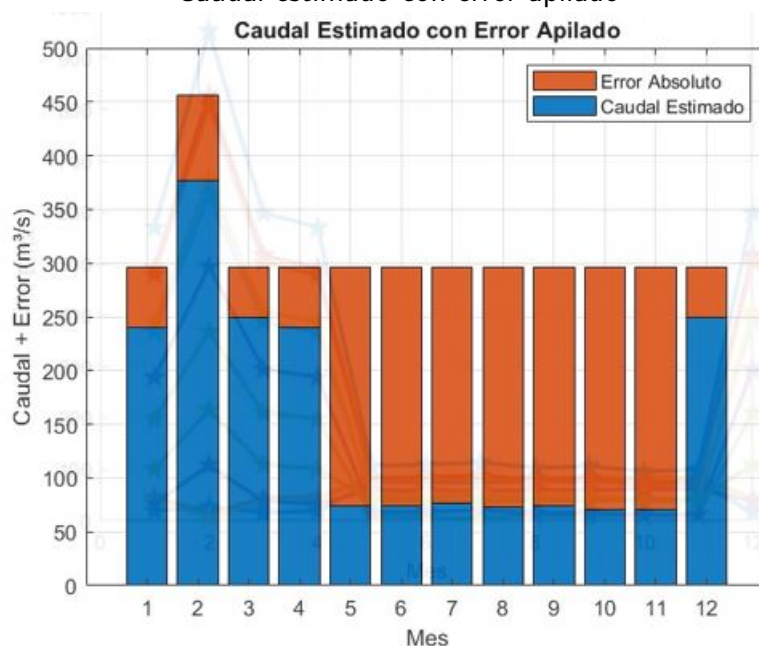


Fuente: Elaboración Propia

La Figura 4.6 presenta un gráfico de barras apiladas que descompone el caudal total

mensual estimado en dos componentes: el caudal estimado propiamente dicho y el error absoluto asociado. Esta visualización permite identificar de manera clara la magnitud del error respecto al valor estimado, mostrando que durante los primeros meses del año el error representa una proporción significativa del total. Esta herramienta gráfica facilita el análisis de incertidumbre del modelo y ayuda a priorizar los meses en los que sería conveniente aplicar ajustes o recalibraciones adicionales para mejorar la fiabilidad de los resultados.

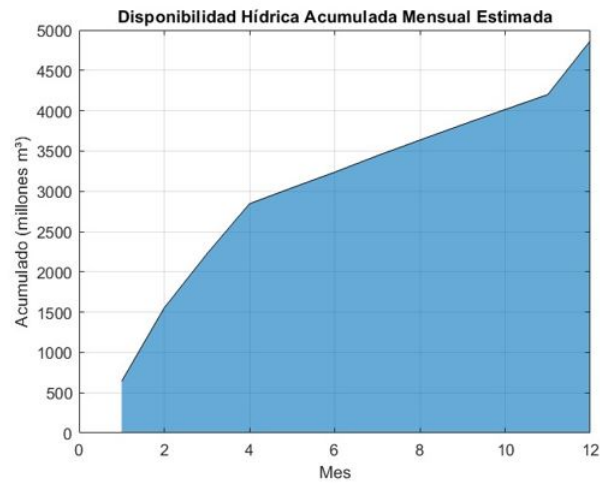
Figura N° 4.6:
Caudal estimado con error apilado



Fuente: Elaboración Propia

La Figura 4.7 representa la disponibilidad hídrica mensual acumulada estimada en millones de metros cúbicos (Mm^3). La curva ascendente indica el aporte progresivo de agua a lo largo del año, con incrementos más significativos en los primeros cuatro meses, correspondientes a la temporada de lluvias. Esta representación acumulada permite visualizar de manera integral el comportamiento del recurso hídrico en la cuenca, facilitando la planificación de su uso en actividades productivas y de consumo humano. Asimismo, permite anticipar los meses de menor recarga hídrica, lo cual es fundamental para estrategias de almacenamiento, distribución y conservación.

Figura N° 4.7:
Disponibilidad hídrica estimada



Fuente: Elaboración Propia

El cuadro N°4.3 resume las métricas de evaluación del modelo hidrológico difuso para cada mes del año, utilizando los indicadores estándar de error: el Error Cuadrático Medio (MSE), la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Error Absoluto Medio (MAE). Estos valores permiten cuantificar el grado de ajuste entre los caudales observados y los estimados por el modelo

Cuadro N° 4.3 :
Métricas de evaluación del modelo difuso por mes

Mes	MSE	RMSE	MAE
Enero	30536	174.74	154.16
Feb	92516	304.17	286.03
Mar	69961	264.5	243.43
Abr	11339	106.48	100.5
May	16352	127.88	83.76
Jun	21594	146.95	104.37
Jul	23965	154.81	115.17
Ago	25094	158.41	119.97
Sep	23759	154.14	114.27
Oct	22016	148.38	106.37
Nov	19234	138.69	92.37
Dic	12017	109.62	90.25

Nota. Elaboración Propia

Se observa que los errores son más elevados durante los primeros meses del año, coincidiendo con los picos de caudal, lo cual sugiere una mayor dificultad del modelo para representar con precisión eventos de alta magnitud. Por el contrario, en los meses secos (de abril a diciembre), los errores se reducen notablemente, indicando un mejor desempeño del modelo bajo condiciones de baja precipitación y menor variabilidad. El coeficiente de correlación $R = 0.893$ refleja un ajuste global alto entre los valores estimados y observados, lo que valida la capacidad del modelo difuso para representar de manera confiable el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Pampas.

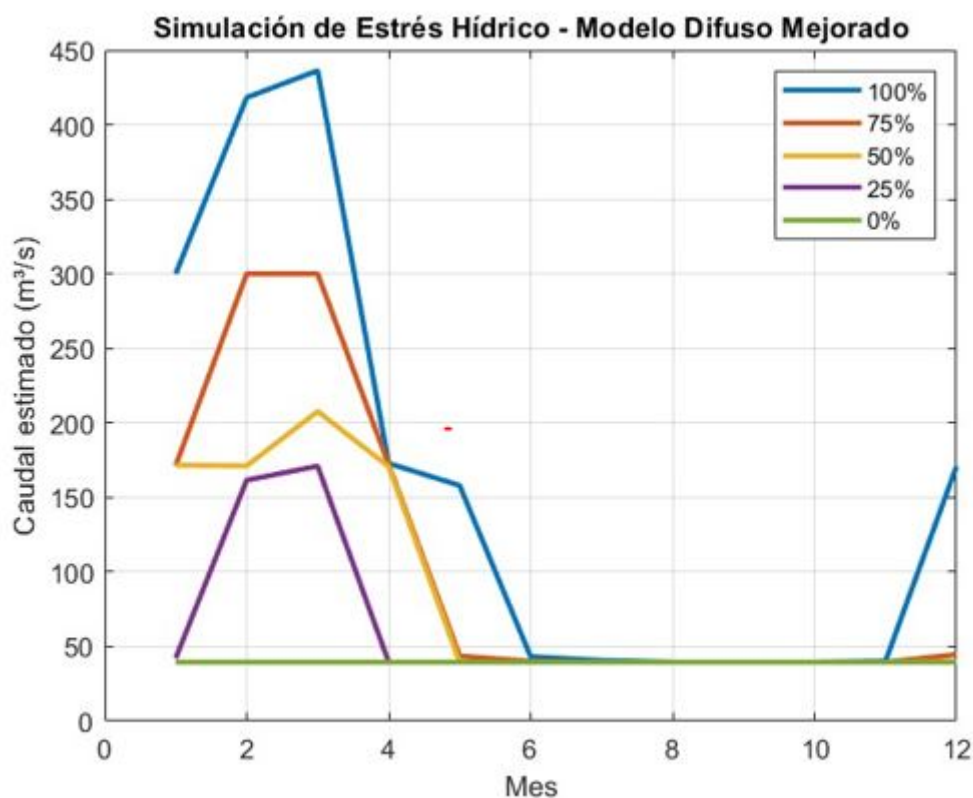
4.2 Evaluación del estrés hídrico en la gestión de recursos hídricos

El estrés hídrico es una condición crítica que ocurre cuando la demanda de agua supera la disponibilidad natural del recurso en una región determinada. En el contexto de la gestión de recursos hídricos, su evaluación es fundamental para anticipar escenarios de escasez, optimizar el uso del agua y garantizar la sostenibilidad de las actividades productivas, ambientales y sociales que dependen de ella. En cuencas con marcada estacionalidad como la del río Pampas, donde las precipitaciones se concentran en determinados meses del año, la disponibilidad hídrica se encuentra estrechamente ligada al comportamiento climático. Por ello, resulta imprescindible contar con herramientas que permitan simular y analizar cómo respondería el sistema hídrico ante reducciones progresivas de precipitación, producto del cambio climático o de eventos extremos como sequías.

Este subcapítulo desarrolla una simulación de estrés hídrico utilizando el modelo hidrológico difuso ajustado previamente, evaluando el impacto que tendría la disminución de precipitaciones en los caudales estimados. La finalidad es proporcionar una base técnica para la toma de decisiones orientadas a la planificación hídrica, la implementación de medidas de adaptación y la formulación de estrategias de gestión integrada del recurso.

La Figura 4.8 presenta los resultados obtenidos de la simulación de estrés hídrico aplicando el modelo hidrológico difuso mejorado. En este análisis se evaluó el comportamiento del caudal estimado bajo distintos niveles de reducción de precipitación (100%, 75%, 50%, 25% y 0%), con el objetivo de comprender cómo afectaría una disminución sostenida de lluvias en la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Pampas.

Figura N° 4.8:
Resultados de estrés hídrico



Fuente: Elaboración Propia

Los resultados muestran una relación directa entre el nivel de precipitación y el caudal generado: conforme disminuye la precipitación, se evidencia una caída progresiva del caudal mensual, siendo más marcada en los primeros meses del año donde históricamente se concentra el mayor volumen de agua. Bajo un escenario de precipitación reducida al 0%, el caudal se mantiene constante en niveles mínimos (40–45 m³/s), lo que indica un umbral de respuesta del modelo ante condiciones críticas. Esta simulación permite visualizar de manera anticipada el impacto potencial del cambio climático o de sequías prolongadas sobre la gestión del recurso hídrico. Además, pone en evidencia la vulnerabilidad de la cuenca frente a escenarios de escasez, lo cual resulta clave para planificar estrategias de mitigación, como el almacenamiento en época de lluvias, la implementación de sistemas de riego tecnificado o el diseño de políticas de uso racional del agua.

El cuadro 4.4 resume los caudales mensuales estimados bajo cinco escenarios de estrés hídrico, definidos por la reducción progresiva de la precipitación en 100%, 75%, 50%, 25% y 0% respecto al valor promedio observado. Esta simulación fue realizada utilizando el modelo hidrológico difuso ajustado, con el fin de evaluar el impacto directo de la disminución de lluvias sobre la disponibilidad hídrica mensual. Se evidencia una disminución significativa del caudal a medida que se reduce la precipitación, particularmente durante los meses de estiaje donde el caudal converge hacia un valor mínimo cercano a 39.55 m³/s. En los

primeros meses del año, caracterizados por los mayores aportes hídricos, la caída del caudal estimado es más notoria, pasando de valores superiores a $400\text{m}^3/\text{s}$ (en febrero y marzo con 100% de lluvia) a apenas $39.55\text{m}^3/\text{s}$ con 0% de precipitación.

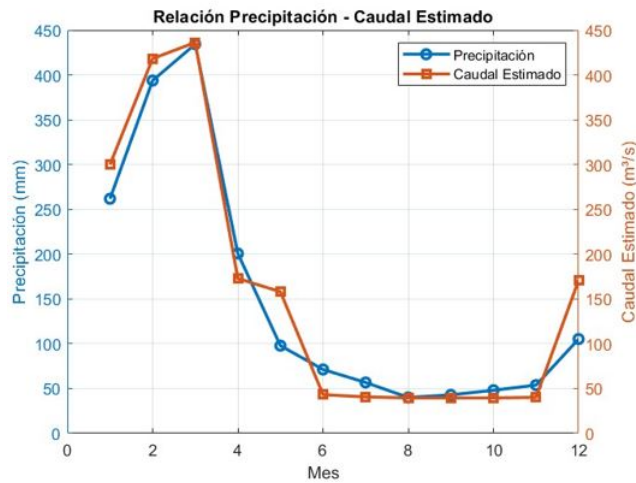
Cuadro N° 4.4 :
Caudal estimado mensual (m^3/s) por escenario de estrés hídrico

Escenario	100%	75%	50%	25%	0%
Ene	300	171.23	171.61	42.2	39.55
Feb	418.23	300	171.22	162	39.55
Mar	436.26	300	207.7	171	39.55
Abr	172.83	172.05	170.75	39.6	39.55
May	158.03	43.58	39.55	39.6	39.55
Jun	43.19	40.1	39.55	39.6	39.55
Jul	40.67	39.55	39.55	39.6	39.55
Ago	39.55	39.55	39.55	39.6	39.55
Set	39.55	39.55	39.55	39.6	39.55
Oct	39.55	39.55	39.55	39.6	39.55
Nov	40.16	39.55	39.55	39.6	39.55

Nota. Elaboración Propia

La Figura 4.9 presenta la relación directa entre la precipitación acumulada mensual (en mm) y el caudal estimado (en m^3/s), utilizando un eje doble que permite comparar visualmente ambos indicadores.

Figura N° 4.9:
Relación Precipitación - Caudal estimado

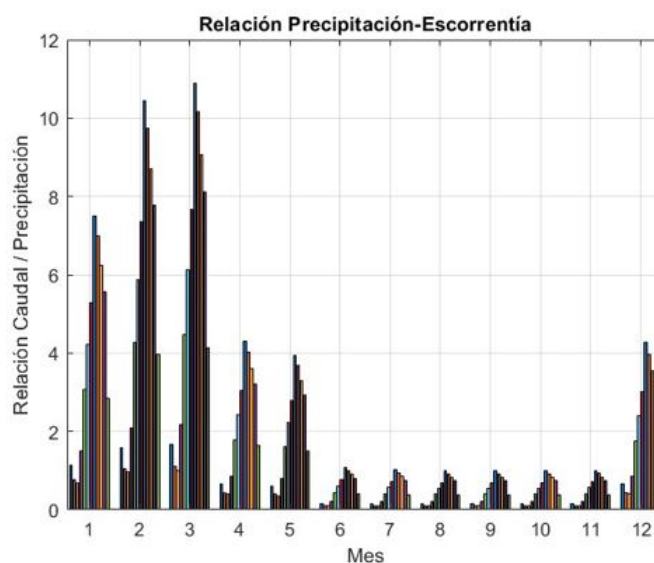


Fuente: Elaboración Propia

Se evidencia que la tendencia del caudal sigue de manera proporcional el comportamiento de la precipitación a lo largo del año, lo cual valida la coherencia del modelo hidrológico difuso empleado. Los picos más altos en ambos casos ocurren en los primeros tres meses del año (enero a marzo), reflejando la estacionalidad característica de la cuenca del río Pampas. Esta relación evidencia que el modelo capta adecuadamente el efecto de la precipitación en la generación de escorrentía superficial, siendo una herramienta útil para la estimación de caudales en escenarios de variabilidad climática.

La Figura 4.10 muestra la relación mensual entre caudal estimado y precipitación (caudal/precipitación), la cual permite evaluar la eficiencia con la que las lluvias se transforman en escorrentía dentro de la cuenca.

Figura N° 4.10:
Relación Precipitación - Caudal estimado



Fuente: Elaboración Propia

Se observa que durante los meses de mayor aporte (enero a marzo) esta relación

alcanza sus valores más altos, indicando una mayor generación de escurrimiento por unidad de precipitación. Por el contrario, entre los meses de mayo a octubre, dicha relación disminuye notablemente, lo que podría deberse a la baja disponibilidad de agua en el suelo, mayor infiltración, o mayores pérdidas por evapotranspiración. Esta métrica es clave para la planificación de recursos hídricos, ya que permite identificar los meses con mayor eficiencia hídrica y aquellos donde las lluvias tienen menor impacto en la generación de caudal utilizable.

4.3 Discusión

Los resultados obtenidos a partir del modelo hidrológico difuso aplicado a la cuenca del río Pampas han evidenciado un comportamiento coherente respecto a la estacionalidad del recurso hídrico, así como una respuesta sensible frente a escenarios de estrés hídrico. Estos hallazgos concuerdan con estudios previos que resaltan la necesidad de herramientas de simulación para una gestión hídrica eficiente y sostenible

En el estudio de Lozano-Mendoza et al. (2025), se destaca cómo el deterioro de la calidad y cantidad del agua en el cantón Quinsaloma, Ecuador, está estrechamente vinculado con factores antrópicos y climáticos. Si bien el enfoque de dicho trabajo fue geoespacial y participativo, los resultados coinciden con el presente estudio en cuanto a la necesidad de monitorear continuamente las condiciones hidrológicas y modelar escenarios de cambio. Además, el énfasis en la participación comunitaria y la gestión integrada del recurso refuerza la importancia de considerar tanto variables naturales como sociales para una gobernanza hídrica efectiva.

Por otro lado, la investigación de Yataco (2024) revela un panorama similar en la cuenca del río Ica, donde se identificó una disminución del volumen de agua disponible y una escasa participación de la población en su conservación. En comparación, este trabajo también demuestra que ante una reducción de la precipitación (escenarios del 75%, 50% y 25%), el modelo responde con una disminución significativa del caudal, lo que advierte sobre la vulnerabilidad de las cuencas frente al cambio climático. Ambos estudios sugieren que, sin una gestión anticipada y coordinada, los efectos del estrés hídrico pueden intensificarse con consecuencias negativas para las comunidades dependientes del recurso

Asimismo, los aportes de Del Aguila (2021) validan el uso de modelos hidrológicos como herramientas clave para simular el comportamiento del caudal en cuencas altoandinas, incorporando variables como cobertura vegetal y características del suelo. Aunque el presente estudio emplea un modelo difuso y no uno empírico como SWAT o Lutz Scholtz, se demuestra también una capacidad de predicción satisfactoria, especialmente en las épocas de estiaje, donde el error del modelo disminuye y se aproxima más a la realidad. La inclusión de simulaciones bajo escenarios climáticos futuros en el estudio de Del Aguila es coherente

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

La investigación logró desarrollar exitosamente un modelo hidrológico difuso Mamdani, capaz de representar el comportamiento del caudal en función de variables climáticas clave. Este modelo demostró ser una herramienta eficaz para estimar la disponibilidad hídrica, evaluar el estrés hídrico y analizar la relación precipitación–escorrentía en la cuenca del río Pampas. Los resultados obtenidos permiten no solo mejorar la comprensión de la dinámica hidrológica en contextos de variabilidad climática, sino también fortalecer la planificación estratégica del recurso hídrico, promoviendo una gestión más sostenible y anticipada frente a eventos de escasez.

La implementación del modelo hidrológico difuso permitió estimar de manera efectiva la disponibilidad hídrica mensual en la cuenca del río Pampas. A partir del análisis de las precipitaciones históricas del periodo 1965–2024 y su integración con variables climáticas como temperatura, humedad y viento, se obtuvo una predicción ajustada de caudales mensuales. El modelo mostró un buen nivel de precisión, respaldado por métricas como un R^2 de 0.893, validando así su utilidad para representar el comportamiento hidrológico de la cuenca bajo distintas condiciones climáticas.

Las simulaciones realizadas con el modelo difuso bajo diferentes escenarios de reducción de disponibilidad hídrica (100%, 75%, 50%, 25% y 0%) evidenciaron una tendencia clara hacia el estrés hídrico en varios meses del año, especialmente durante la temporada seca. Esta evaluación permitió identificar los meses más críticos para la gestión del recurso, lo que representa un insumo clave para la toma de decisiones y planificación anticipada de

estrategias de uso y conservación del agua.

La evaluación del modelo demostró una alta capacidad para reproducir la relación entre precipitación y escorrentía, así como para estimar caudales en distintos escenarios. Los gráficos comparativos de caudal observado vs estimado, así como los errores de predicción (RMSE, MAE), confirmaron la fiabilidad del modelo. Esta capacidad predictiva facilita la comprensión del comportamiento hidrológico bajo condiciones de estrés, fortaleciendo el enfoque preventivo en la gestión hídrica y la resiliencia de la cuenca frente al cambio climático.

RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar estaciones de monitoreo hidrometeorológico automatizadas en puntos críticos de la cuenca del río Pampas, con el fin de obtener datos confiables y en tiempo real para alimentar y validar modelos hidrológicos.

Se recomienda utilizar el modelo hidrológico difuso desarrollado como herramienta de apoyo en la planificación y gestión de los recursos hídricos, especialmente ante escenarios de estrés hídrico y variabilidad climática.

Se recomienda capacitar al personal técnico e institucional vinculado a la gestión hídrica en el uso y análisis de modelos basados en lógica difusa, fortaleciendo así las capacidades locales y regionales en gestión hídrica.

Se recomienda considerar en futuras investigaciones variables adicionales, como el cambio de uso de suelo, cobertura vegetal y extracción de agua, para enriquecer la precisión del modelo y su aplicación a contextos más complejos.

Referencias bibliográficas.

Abril, R., Erazo, J. M. M., Tuti, B. T. P., Guatatoca, M. K. T., Guerra, K. F. P., y Noguera, C. B. P. (2024). Balance hídrico climático de estaciones meteorológicas Puyo y Aeropuerto Río Amazonas. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (56), 54-60.

Aguilar, J. L., Mamani, J. M., y Ramírez, L. Q. G. (2024). Determinación de Balance Hídrico en la Cuenca Sulloma Caranguilla. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(1), 7910-7926.

Alvarez Chaccara, J. J., y Pisco Jimenez, C. J. (2024). Modelamiento hidrológico con WEAP para la determinación del balance hídrico en la subcuenca del río Ilabaya en Tacna.

Alvarez, J. (2020). Modelo hidrológico para pronosticar caudales recesivos y estimar el coeficiente de agotamiento: caso río Jequetepeque aguas arriba de la presa "Gallito Ciego" - Contumazá, 2020. Unc.edu.pe. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/5261>

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. Uladech.edu.pe. <https://hdl.handle.net/20.500.13032/35009>

Aranda, J. S. (2024). Influencia del método Duval en Python del análisis de aceite aislante en el diagnóstico preventivo del transformador de potencia 10/12 MVA-UM Raura. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/10992>

Arrueta, M. M. (2009). Balance hídrico y análisis de las relaciones precipitación-esorrentía en la microcuenca de la Quebrada El Gallo, San Antonio de Oriente (Doctoral dissertation, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2012). Atachagua Fernandez, D. E., y Collahua Huapaya, J. V. (2024). Simulación de abastecimiento de agua a la unidad minera de Magistral en Ancash usando el software WEAP.

Avalos, J. M. M., González, A. P., y Vázquez, E. V. (2003). TESIS DOCTORAL Estimación y simulación de la precipitación en Galicia a escala mensual.

Benítez Navío, A. (2023). Metodología para la toma de decisiones estratégicas en la asignación sostenible de recursos para la recuperación hidrológica de humedales en situación de estrés hídrico [Tesis doctoral]. Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/handle/10251/192828>

Beven, K., Binley, A. (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological processes*, 6(3), 279-298.

Castro-Llanos, D., y Carvajal-Escobar, Y. (2013). Análisis de tendencia en la precip-

itación pluvial anual y mensual en el departamento del Valle del Cauca. *Memorias*, 11(20), 9-18.

Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño (CIIFEN). (2019). Registro histórico de eventos hidroclimáticos y sus afectaciones en la cuenca del río Pampas, Perú. Ana.gob.pe. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/3949>

Chacapecho, V. R. M., y Achu, N. C. (2024). Análisis de la variabilidad de precipitación y eventos climáticos extremos en la Cuenca del Río Tipani, Potosí, Bolivia (2002-2020): Analysis of the variability of precipitation and extreme weather events in the Tipani River Basin in the Tipani River Basin, Potosi, Bolivia (2002-2020). *Revista Ciencia, Tecnología Sociedad*, 2(2), 6-12.

Chanchí, G. G. E., Sierra, M. L., y Campo, M. Y. (2021). Aplicación de la lógica difusa en la implementación de rúbricas de evaluación en el contexto universitario. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informacao*, (E42), 174-187.

Del Aguila, S. (2021). Modelamiento de procesos hidrológicos en cuencas de la Sierra Central del Perú. Lamolina.edu.pe; Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4659>

Donoso Yáñez, C. A. (2024). Proyecciones de la sustentabilidad del abastecimiento de agua en la isla Rapa Nui.

Espín, C. G. S., Valdivieso, J. C. C., Parra, B. F. C., y Fiallos, J. J. F. (2021). Diagnóstico de Fallas con Fuzzy Logic del Vehículo en Labview. Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional, 6(3), 1530-1551.

Falla Valdez, V. (2024). ¿Pudo el Plan Mercurio/Restauración contrarrestar el deterioro de los ríos en Madre de Dios, Perú? Análisis de calidad del agua y percepción de impactos ambientales.

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>

García, E. O., y Gaspar, C. O. (2010). Diagnóstico y mantenimiento de transformadores de gran potencia en aceite (Aplicado a un transformador de 160MVA, 13, 8kV/138kV de la Central Térmica Trinitaria) (Bachelor's thesis).

García-Alegre, M. C. (1991) Inteligencia Artificial en el control de procesos, controladores borrosos. *Mundo Electrónico*, n. 214, 42-49

Gaspari, F. J., Senisterra, G. E., y Marlats, R. M. (2007). Relación precipitación-escurrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo. Cuenca modal del Sistema Serrano de La Ventana, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 39(1), 21-28.

Guzmán, D., y Castaño, V. M. (2006). La lógica difusa en ingeniería: principios, aplicaciones y futuro. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 24(2).

Guzmán-Colis, G., Ramírez-López, E., Thalasso, F., Rodríguez-Narciso, S., Guerrero-Barrera, A., Avelar-González, F. (2024). Evaluación de contaminantes en agua y sedimen-

tos del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes. *Universidad Y Ciencia*, 27(1), 17–32.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792011000100002

Hasan, H. M. M., Döll, P., Hosseini-Moghari, S. M., Papa, F., Güntner, A. (2025). The benefits and trade-offs of multi-variable calibration of the WaterGAP global hydrological model (WGHM) in the Ganges and Brahmaputra basins. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29(2), 567-596.

Hergarten, S., y Robl, J. (2022). The linear feedback precipitation model (LFPM 1.0)—a simple and efficient model for orographic precipitation in the context of landform evolution modeling. *Geoscientific Model Development*, 15(5), 2063-2084.

Hernandez Quinde, V. A. (2024). Modelamiento de precipitación-escorrentía de la Quebrada Caupicho: modelamiento de precipitación-escorrentía de la Quebrada Caupicho.

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.

Herrera Cabanillas, F. A. (2024). Aplicación de Hietograma de diseño para la determinación de caudales máximos en la cuenca Julcán. Otuzco. La Libertad. 2022.

Idrogo Pérez, D. L. (2024). Regionalización de caudales para determinar umbrales de inundación en la cuenca Jequetepeque bajo condiciones normales, secas y húmedas.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. (2001). Cambio climático 2001. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/TAR_syr_full_es.pdf

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. (2016). *Ipcc.ch*. https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml

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-Mendoza, H. P., Nieto-Cañarte, C. A., Cañar-Rivas, A. L., Ramírez-Montesdeoca, W. A., Vilela-Sabando, J. R., Sinchi-Rivas, C. A. (2025). Modelización espacial para la protección de cauces hídricos en el cantón Quinsaloma, Los Ríos, Ecuador. *Brazilian Applied Science Review*, 9(1), e77612-e77612.

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.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., y Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.

Musy, A (2001). Cours “Hydrologie générale”. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. IATE/HYDRAM. Laboratoire d’Hydrologie et Aménagement. Capítulo 1, 2, 3, 4 y 5.

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

- Nagy, B.; Basbous, R.; Tajti, T. (2019). Lazy evaluations in Łukasiewicz type fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 376, n. 1, 127-151. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2018.11.014>
- Nash, J. E., y Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Ordoñez, J. (2011). Ciclo Hidrológico, Global Water Partnership, Lima, Perú.
- Panda, C., Panda, K. C., Singh, R. M., Singh, R., y Singh, V. P. (2025). A generalised hydrological model for streamflow prediction using wavelet Ensembling. *Journal of Hydrology*, 655, 132883.
- Quispe, C. C. (2024). Dinámica de la evapotranspiración en el área del Lago Titicaca y en la frecuencia e intensidad de los episodios de sequía en la región de Puno 2023. *Revista de Investigaciones*, 13(1), 13-25.
- Ricardos R (2018). Ingeniería Hidráulica para América Latina. Ciudad de México: Ediciones del Sur.
- Ríos Del Águila, N. S., y Vilca Rojas, F. S. (2022). "Influencia del cambio climático en la agricultura en tres comunidades de la cuenca alta del río Itaya" Loreto, Perú año 2021.
- Roca De la Cruz, M. P. (2024). Mejora del balance hídrico mediante la implementación de técnicas de optimización fundamentadas en bases de datos hidráulicas en la presa Cuchoquesera provincia de Cangallo, departamento de Ayacucho, 2023.
- SINIA (2020). Mapa hidrográfico de la cuenca del río Pampas - subcuenca Jatunmayo. Minam.gob.pe. <https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-hidrografico-cuenca-rio-pampas-subcuenca-jatunmayo>
- Singh, V. P., y Frevert, D. K. (Eds.). (2002). Mathematical models of small watershed hydrology and applications. Water Resources Publication.
- Strefezza, M. (2009). Lógica difusa, un punto de vista. *Ciencia e Ingeniería*, v. 30, n. 3, 259-268 <http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/cienciaeingenieria/article/view/1108>
- Talledo, D. (2022). Lógica difusa aplicada a la bolsa de valores: Fuzzy logic applied to the stock market. *Global Business Administration Journal*, 6(2), 3-16.
- Teixeira, T. H., Neto, J. A. F., do Mar Pérez-Fra, M., García-Arias, A. I., Cardoso, P. O., y Roque, M. P. B. (2021). Instrumentos de gestión de los recursos hídricos: Planes Hidrológicos en la Cuenca del rio Doce, Brasil, y en la Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil, España1. *Research, Society and Development*, 10(16).
- Typsa Perú. (2019). Evaluación de recursos hídricos en la cuenca Pampas. Ana.gob.pe. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4476>
- Todini, E. (2007). Hydrological catchment modelling: past, present and future. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(1), 468-482.
- Torres, I. F. M., y Rocha, C. J. C. (2024). Uso de Redes Neuronales para el pronóstico del PIB de Ecuador en contraste con modelos ARIMA, período 2000-2023. *Revista Veritas de Difusão Científica*, 5(3), 935-958.
- Vasquez Villanueva, A. (2000). Manejo de cuencas altoandinas (1a. ed.). LIMA: escuela superior de administración de aguas "Charles Sutton".

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., y López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.

Villalobos-Puma, E., Morales, A., Martinez-Castro, D., Valdivia, J., Cardenas-Vigo, R., Lavado-Casimiro, W., y Santiago, A. (2024). Dynamic atmospheric mechanisms associated with the diurnal cycle of hydrometeors and precipitation in the Andes–Amazon transition zone of central Peru during the summer season. *Journal of Earth System Science*, 133(2), 75.

Wilby, R. L., y Dessai, S. (2010). Robust adaptation to climate change.

Yataco Garay, F. R. (2024). Diseño de un plan de manejo ambiental para la conservación de los recursos hídricos de la Cuenca del Río Ica, 2022.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, v. 8, n. 3, 338-353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

CAPÍTULO **A**
ANEXOS

ANEXOS

Anexo N°1. Matriz de consistencia

MODELO HIDROLÓGICO DIFUSO PARA LA PLANIFICACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS BAJO ESCENARIOS DE ESTRÉS HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO PAMPAS				
Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodologías
General	General	General	Variable Independiente	
¿Cómo desarrollar un modelo hidrológico difuso para la planificación de recursos hídricos bajo escenarios de estrés hídrico en la cuenca del río Pampas?	Desarrollar un modelo hidrológico difuso para la planificación de recursos hídricos bajo escenarios de estrés hídrico en la cuenca del río Pampas.	El desarrollo de un modelo hidrológico difuso mejora significativamente la planificación de los recursos hídricos en la cuenca del río Pampas, bajo escenarios de estrés hídrico.	Escenarios de estrés hídrico. Dimensiones: ▪ Modelo Hidrológico Difuso ▪ Variabilidad climática	
Específicos	Específicos	Específicos	Variable Dependiente	
¿Cómo se puede estimar la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Pampas utilizando el modelo hidrológico difuso bajo escenarios de variabilidad climática?	Estimar la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Pampas utilizando el modelo hidrológico difuso bajo escenarios de variabilidad climática.	La disponibilidad hídrica en la cuenca del río Pampas puede ser estimada con precisión mediante el uso del modelo hidrológico difuso, considerando escenarios de variabilidad climática.	Planificación de recursos hídricos Dimensiones:	
¿Cuál es el impacto del estrés hídrico en la gestión de recursos hídricos, según las simulaciones realizadas con el modelo hidrológico difuso?	Evaluar el impacto del estrés hídrico en la gestión de recursos hídricos mediante simulaciones en el modelo hidrológico difuso	El estrés hídrico tiene un impacto significativo en la gestión de recursos hídricos, el cual puede ser evaluado de manera efectiva a través de simulaciones realizadas con el modelo hidrológico difuso.	▪ Gestión de recursos hídricos	
¿Qué tan efectivo es el modelo hidrológico difuso en la predicción de caudales y la relación precipitación-escorrentía para evaluar el impacto del estrés hídrico en la gestión hídrica?	Evaluar el modelo hidrológico difuso en la predicción de caudales y la relación precipitación-correntía, para entender el impacto del estrés hídrico en la gestión hídrica.	El modelo hidrológico difuso es eficaz en la predicción de caudales y la relación precipitación-correntía, proporcionando información clave para comprender y gestionar el impacto del estrés hídrico en la cuenca del río Pampas.	▪ Disponibilidad Hídrica	

Nota. Elaboración propia

Anexo N°2. Código para estimar la Variación Mensual De La Precipitación Acumulada periodo 1986 - 2024

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

# Crear DataFrame con los datos históricos (resumen de ejemplo)
data = {
    "Año": list(range(1965, 1986)),
    "ENE": [69.4, 105.7, 156.4, 183.7, 146.9, 689.4, 311.5, 296.7,
339.3, 525.6, 148, 335.3, 388.4, 331.3, 365.1, 128.7, 137.1, 197.6,
313.8, 148.4, 256.1],
    "FEB": [160.8, 221.5, 666.8, 172.2, 215.1, 607, 404.2, 426.2,
455.3, 652.3, 300.3, 811.1, 562.5, 297, 359, 237, 187.9, 549.2, 389,
177.6, 663.9],
    "MAR": [322.2, 375.7, 813.1, 378.9, 337.2, 388.7, 552.8, 650.9,
704.2, 509.5, 842.7, 676.5, 421.8, 307, 209.7, 303.5, 256.4, 326.4,
285.8, 205.5, 496.5],
    "ABR": [102.4, 91.4, 192.8, 140.9, 160.2, 183.3, 325, 349.7,
437.4, 333.6, 213.5, 311.7, 159.9, 100.6, 120.4, 117.7, 102.4, 205,
153.1, 117.8, 223.8],
    "MAY": [66.7, 69.9, 75.2, 56.6, 58.5, 119.3, 109.6, 111.2, 227.6,
177.5, 140.2, 180.5, 77.5, 76.9, 59, 56.7, 60.3, 73.7, 64.6, 58.5,
103.4],
    "JUN": [53, 40, 99.8, 60.7, 43.2, 47.8, 81.1, 70, 119.7, 135.6,
62.7, 145.9, 53.4, 50.3, 42.4, 40.7, 40, 46.7, 44.5, 39.8, 70],
    "JUL": [47.7, 32.7, 82.2, 51.1, 39.8, 42.2, 51, 59.5, 89.7, 71,
71.5, 137.1, 41.8, 40, 34.4, 34, 37.6, 34, 33.8, 32.3, 42.8],
    "AGO": [42.9, 26.6, 58.6, 41.1, 32.3, 36.2, 41.3, 45.3, 74.8,
86.7, 48.2, 35.2, 28.8, 36.7, 32.2, 29.6, 30.3, 47.5, 29, 38.5, 35.4],
    "SET": [46.1, 24.9, 56.9, 35.8, 32.8, 40.3, 33.8, 49.6, 68.4,
67.9, 47.3, 41.8, 32, 30, 42.2, 33.9, 34.6, 60.8, 38.5, 40.6, 39],
    "OCT": [42.9, 66.5, 71.6, 37.8, 36.4, 34.6, 30, 44.5, 54.8, 49.3,
44.6, 42.4, 42.4, 37.9, 51.4, 31.6, 64.9, 58.8, 79.8, 39.6, 53.9],
    "NOV": [39.9, 82.6, 46, 63, 39.2, 36.8, 26.7, 44.4, 56.7, 49.6,
36.7, 45.8, 84.2, 66, 66.6, 65.6, 29.3, 75.1, 114, 34.2, 83.4],
    "DIC": [58.9, 147.5, 60, 89.3, 85.3, 72.3, 49.3, 89.4, 159.3,
52.4, 89.7, 139.9, 72.7, 138.2, 138.2, 91.5, 46.7, 185.1, 102.7,
111.6, 149.6]
}

df = pd.DataFrame(data)

# Simular datos para 1986-2024
np.random.seed(42)
future_years = list(range(1986, 2025))
columns = df.columns[1:]
mean_monthly = df[columns].mean()
std_monthly = df[columns].std()

simulated_data = []
for year in future_years:
```

```

        monthly_values = np.random.normal(mean_monthly,
std_monthly).clip(min=0)
        simulated_data.append([year] + list(monthly_values))

df_simulated = pd.DataFrame(simulated_data, columns=df.columns)

# Combinar históricos y simulados
df_full = pd.concat([df, df_simulated], ignore_index=True)

# Guardar a Excel
df_full.to_excel("Precipitacion_Mensual_Simulada_1965_2024.xlsx",
index=False)

# Graficar variación mensual para años seleccionados
import matplotlib.pyplot as plt

selected_years = [1965, 1975, 1985, 1995, 2005, 2015, 2024]
monthly_columns = df_full.columns[1:]

plt.figure(figsize=(12, 6))
for year in selected_years:
    row = df_full[df_full['Año'] == year].iloc[0, 1:]
    plt.plot(monthly_columns, row, label=str(year))

plt.title("Variación Mensual de la Precipitación Acumulada")
plt.xlabel("Mes")
plt.ylabel("Precipitación (mm)")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

Anexo N°3. Modelo Hidrológico Difuso General

```
precipitacion = [261.83, 393.75, 434.33, 200.77, 97.84, 71.28, 56.79,
40.05, 42.95, 48.09, 53.82, 105.25];
temperatura    = [10.8, 11, 10.9, 10.5, 9.5, 8.5, 8.3, 8.8, 9.6, 10.5,
10.9, 11];
humedad        = [67.7, 66.6, 69.1, 61, 56, 49.8, 47.5, 53.4, 56, 54.4,
54.9, 61.1];
viento         = [3.9, 3.4, 3.7, 3.7, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4];
caudal_obs     = [296.6, 441.8, 399.2, 181.0, 80.6, 51.4, 40.6, 35.8,
41.5, 49.4, 63.4, 119.5];

fis = mamfis("Name", "ModeloHidrico");

% Entradas
fis = addInput(fis, [0 500], 'Name', 'Precipitacion');
fis = addInput(fis, [5 15], 'Name', 'Temperatura');
fis = addInput(fis, [40 80], 'Name', 'Humedad');
fis = addInput(fis, [2 6], 'Name', 'Viento');

% Salida
fis = addOutput(fis, [0 500], 'Name', 'Caudal');

% Membresía: Precipitación
fis = addMF(fis, "Precipitacion", "trapmf", [0 0 100 180], "Name",
"Baja");
fis = addMF(fis, "Precipitacion", "trimf", [160 280 400], "Name",
"Media");
fis = addMF(fis, "Precipitacion", "trapmf", [370 430 500 500], "Name",
"Alta");

% Membresía: Temperatura
fis = addMF(fis, "Temperatura", "trapmf", [5 5 7 9], "Name", "Baja");
fis = addMF(fis, "Temperatura", "trimf", [8 10.5 13], "Name",
"Media");
fis = addMF(fis, "Temperatura", "trapmf", [12 13.5 15 15], "Name",
"Alta");

% Membresía: Humedad
fis = addMF(fis, "Humedad", "trapmf", [40 40 50 58], "Name", "Baja");
fis = addMF(fis, "Humedad", "trimf", [56 65 74], "Name", "Media");
fis = addMF(fis, "Humedad", "trapmf", [70 75 80 80], "Name", "Alta");

% Membresía: Viento
fis = addMF(fis, "Viento", "trapmf", [2 2 3 3.5], "Name", "Bajo");
fis = addMF(fis, "Viento", "trimf", [3.3 4 4.7], "Name", "Medio");
fis = addMF(fis, "Viento", "trapmf", [4.5 5.5 6 6], "Name", "Alto");

% Membresía: Caudal
fis = addMF(fis, "Caudal", "trapmf", [0 0 80 160], "Name", "Bajo");
fis = addMF(fis, "Caudal", "trimf", [140 240 340], "Name", "Medio");
fis = addMF(fis, "Caudal", "trapmf", [320 400 500 500], "Name",
"Alto");
```

```

% Reglas ajustadas
rules = [
    "Precipitacion==Alta & Temperatura==Media & Humedad==Media &
Viento==Bajo => Caudal=Alto (1)";
    "Precipitacion==Media & Temperatura==Media & Humedad==Media &
Viento==Medio => Caudal=Medio (1)";
    "Precipitacion==Baja & Temperatura==Alta & Humedad==Baja &
Viento==Alto => Caudal=Bajo (1)";
    "Precipitacion==Alta & Temperatura==Alta & Humedad==Media &
Viento==Medio => Caudal=Medio (1)";
    "Precipitacion==Media & Temperatura==Baja & Humedad==Alta &
Viento==Bajo => Caudal=Alto (1)";
    "Precipitacion==Baja & Temperatura==Media & Humedad==Baja &
Viento==Medio => Caudal=Bajo (1)";
    "Precipitacion==Media & Temperatura==Alta & Humedad==Media &
Viento==Alto => Caudal=Medio (1)";
];
fis = addRule(fis, rules);

% Evaluación
X = [precipitacion', temperatura', humedad', viento'];
caudal_est = evalfis(fis, X);

figure;
plot(1:12, caudal_obs, '-o', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(1:12, caudal_est, '-s', 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('Mes'); ylabel('Caudal (m³/s)');
legend('Caudal Observado', 'Caudal Estimado');
title('Comparación Mejorada de Caudal Observado vs Estimado');

% MSE
mse = mean((caudal_obs - caudal_est).^2);
disp(['Error cuadrático medio (MSE): ', num2str(mse)]);

% Validación de tamaños
if length(caudal_est) ~= length(caudal_obs)
    error('Dimensiones incompatibles: caudal_obs (%d) vs caudal_est (%d)', ...
        length(caudal_obs), length(caudal_est));
end

mse = mean((caudal_obs - caudal_est).^2);
rmse = sqrt(mse);
mae = mean(abs(caudal_obs - caudal_est));
R = corr(caudal_obs(:), caudal_est(:));

fprintf('MSE = %.2f\n', mse);
fprintf('RMSE = %.2f\n', rmse);
fprintf('MAE = %.2f\n', mae);
fprintf('R = %.3f\n', R);

% --- G1: Comparación acumulada anual ---
figure;
bar([sum(caudal_obs), sum(caudal_est)]);
set(gca, 'xticklabel', {'Observado', 'Estimado'});
ylabel('Caudal acumulado anual (m³/s)');

```

```

title('Comparación Acumulada Anual');
grid on;

% --- G3: Histograma del error absoluto ---
errores = caudal_est - caudal_obs;
figure;
histogram(errores, 6);
xlabel('Error (m³/s)'); ylabel('Frecuencia');
title('Histograma del Error Estimado - Observado');
grid on;

% --- G4: Porcentaje de error por mes ---
porcentaje_error = 100 * abs(errores) ./ caudal_obs;
figure;
plot(1:12, porcentaje_error, '-p', 'LineWidth', 2);
xlabel('Mes'); ylabel('% Error');
title('Porcentaje de Error Absoluto por Mes');
grid on;

% --- G5: Barras apiladas caudal vs error ---
n = min(length(caudal_est), length(errores));
caudal_est_col = reshape(caudal_est(1:n), [], 1);
errores_col = reshape(errores(1:n), [], 1);
datos_apilados = [caudal_est_col, abs(errores_col)];

figure;
bar(1:n, datos_apilados, 'stacked');
xlabel('Mes'); ylabel('Caudal + Error (m³/s)');
legend('Caudal Estimado', 'Error Absoluto');
title('Caudal Estimado con Error Apilado');
grid on;

% --- Cálculo del volumen mensual disponible ---
dias_mes = [31 28 31 30 31 30 31 31 30 31 30 31]; % días por mes
segundos_dia = 24 * 3600;
volumen_mensual_m3 = caudal_est(:) .* dias_mes(:) * segundos_dia;

% --- G6: Área sombreada acumulada mensual ---
acumulado = cumsum(volumen_mensual_m3) / 1e6; % millones de m³
figure;
area(1:12, acumulado, 'FaceAlpha', 0.6);
xlabel('Mes'); ylabel('Acumulado (millones m³)');
title('Disponibilidad Hídrica Acumulada Mensual Estimada');
grid on;

```

Anexo N°3. Modelo Hidrológico Difuso de estrés hídrico

```
fis = mamfis("Name", "ModeloHidrico");

% Entradas
fis = addInput(fis, [0 500], 'Name', 'Precipitacion');
fis = addInput(fis, [5 15], 'Name', 'Temperatura');
fis = addInput(fis, [40 80], 'Name', 'Humedad');
fis = addInput(fis, [2 6], 'Name', 'Viento');

% Salida
fis = addOutput(fis, [0 500], 'Name', 'Caudal');

% Membresía de Precipitación con mayor sensibilidad
fis = addMF(fis, "Precipitacion", "trapmf", [0 0 50 100], "Name",
"MuyBaja");
fis = addMF(fis, "Precipitacion", "trimf", [80 150 250], "Name",
"Baja");
fis = addMF(fis, "Precipitacion", "trimf", [200 300 400], "Name",
"Media");
fis = addMF(fis, "Precipitacion", "trapmf", [350 450 500 500], "Name",
"Alta");

% Otras entradas (igual)
fis = addMF(fis, "Temperatura", "trimf", [8 10.5 13], "Name",
"Media");
fis = addMF(fis, "Humedad", "trimf", [56 65 74], "Name", "Media");
fis = addMF(fis, "Viento", "trimf", [3.3 4 4.7], "Name", "Media");

% Salida Caudal (misma estructura)
fis = addMF(fis, "Caudal", "trapmf", [0 0 60 100], "Name", "MuyBajo");
fis = addMF(fis, "Caudal", "trapmf", [90 150 200 250], "Name",
"Bajo");
fis = addMF(fis, "Caudal", "trimf", [240 300 360], "Name", "Medio");
fis = addMF(fis, "Caudal", "trapmf", [350 400 500 500], "Name",
"Alto");

rules = [
    "Precipitacion==MuyBaja => Caudal=MuyBajo (1)";
    "Precipitacion==Baja => Caudal=Bajo (1)";
    "Precipitacion==Media => Caudal=Medio (1)";
    "Precipitacion==Alta => Caudal=Alto (1)";
];
fis = addRule(fis, rules);

precipitacion_base = [261.83, 393.75, 434.33, 200.77, 97.84, 71.28,
56.79, 40.05, 42.95, 48.09, 53.82, 105.25];
temperatura = repmat(10.5, 1, 12);
humedad = repmat(60, 1, 12);
viento = repmat(4, 1, 12);

niveles_estres = [1, 0.75, 0.5, 0.25, 0];
caudal_est_sim = zeros(length(niveles_estres), 12);
```

```

for i = 1:length(niveles_estres)
    P = precipitacion_base * niveles_estres(i);
    entradas = [P', temperatura', humedad', viento'];
    caudal_est_sim(i, :) = evalfis(fis, entradas);
end

figure;
plot(1:12, caudal_est_sim', 'LineWidth', 2);
xlabel('Mes'); ylabel('Caudal estimado (m³/s)');
legend("100%", "75%", "50%", "25%", "0%", 'Location','northeast');
title('Simulación de Estrés Hídrico - Modelo Difuso Mejorado');
grid on;

T = array2table(caudal_est_sim, ...
    'VariableNames',
    {'Ene', 'Feb', 'Mar', 'Abr', 'May', 'Jun', 'Jul', 'Ago', 'Set', 'Oct', 'Nov', 'Dic'}, ...
    'RowNames', {'100%', '75%', '50%', '25%', '0%'});
disp('Caudal estimado por escenario de estrés hídrico (m³/s):');
disp(T);

```



UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 043-2025-FIMGC

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga de la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **RESOLUCIÓN DECANAL N° 351-2025-FIMGC-D**, a los **nueve días del mes de octubre de 2025**, siendo las **04:00 p.m.**, reunidos en el **Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil**, bajo la presidencia del **MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CARDENAS**, y los miembros: **Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANÍ**, **Ing. Edward LEON PALACIOS** y **Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO**, actuando como secretario docente el **Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNÁNDEZ**, para proceder a la sustentación de tesis para optar el **Título Profesional de Ingeniero Civil**, del bachiller:

JONATAN JHONY JUNO LLACTAHUAMAN

Quien presentó la tesis denominada:

MODELO HIDROLÓGICO DIFUSO PARA LA PLANIFICACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS BAJO ESCENARIOS DE ESTRÉS HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RIO PAMPAS

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

Aprobado con Quince (15)

Siendo las **06:00 p.m.** del día **09 de octubre de 2025**, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad con lo actuado, los miembros del jurado firman al pie del presente.

MSc. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS
Presidente

Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANÍ
Miembro

Ing. Edward LEON PALACIOS
Miembro

Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO
Miembro - Asesor

Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNANDEZ
Secretario docente de la FIMGC

FACULTAD DE INGENIERÍA
DE MINAS Y CIVIL
Av. Independencia S/N
Ciudad Universitaria
Central Tel. 066 312510
Anexo 151



CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N° 024-2025-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-UNSH-CU**, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga y **Resolución Decanal N° 697-2024-FIMGC-UNSH-D**, dejo constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

Apellidos y Nombres : Jonatan Jhony JUNO LLACTAHUAMAN
Escuela Profesional : INGENIERÍA CIVIL
Título de la Tesis : MODELO HIDROLÓGICO DIFUSO PARA LA PLANIFICACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS BAJO ESCENARIOS DE ESTRÉS HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO PAMPAS
Evaluación de la Originalidad : 11 % Índice de Similitud
Identificador de la entrega : 2826617403

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, 24 de noviembre del 2025



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

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

MODELO HIDROLÓGICO DIFUSO PARA LA PLANIFICACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS BAJO ESCENARIOS DE ESTRÉS HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO PAMPAS

por Jonatan Jhony JUNO LLACTAHUAMAN

Fecha de entrega: 24-nov-2025 04:30p. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2826617403

Nombre del archivo: Te_Jonatan_Jhony_Juno_Llactahuaman.pdf (3.13M)

Total de palabras: 27392

Total de caracteres: 142915

MODELO HIDROLÓGICO DIFUSO PARA LA PLANIFICACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS BAJO ESCENARIOS DE ESTRÉS HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO PAMPAS

INFORME DE ORIGINALIDAD

11%

INDICE DE SIMILITUD

10%

FUENTES DE INTERNET

6%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	5%
2	www.ana.gob.pe Fuente de Internet	2%
3	pt.scribd.com Fuente de Internet	1%
4	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
5	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	idoc.pub Fuente de Internet	<1%
7	livrosdeamor.com.br Fuente de Internet	<1%
8	Submitted to Esumer Institucion Universitaria Trabajo del estudiante	<1%

9	Alberto Benítez Navío. "Metodología para la toma de decisiones estratégicas en la asignación sostenible de recursos para la recuperación hidrológica de humedales en situación de estrés hídrico", Universitat Politecnica de Valencia, 2023 Publicación	<1 %
10	repositorio.ana.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
11	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
12	blogcatedraunesco.udlap.mx Fuente de Internet	<1 %
13	www.munifutrono.cl Fuente de Internet	<1 %
14	Guillén, Fanel Victoria Guevara. "Factores que Limitan o Facilitan El Desarrollo, el Funcionamiento y la Capacidad de Gestión del Consejo de Recursos Hídricos de la Cuenca Chira Piura.", Pontificia Universidad Catolica del Peru (Peru) Publicación	<1 %
15	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %

Exclur citas

Activo

Exclur coincidencias

< 30 words

Exclur bibliografía

Activo