TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

**UNIVERSIDAD ANDINA**

**NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN INGENIERIA CIVIL**

**MENCIÓN: HIDRÁULICA**

# INTEGRACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA PREDICCIÓN DE CAUDALES EN EL DISEÑO DE PUENTES EN EL DISTRITO DE PLATERIA, 2025

**TESIS PRESENTADA POR:**

**ROGELIO TITO APAZA**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**MAESTRO EN INGENIERIA CIVIL**

**MENCIÓN: HIDRÁULICA**

JULIACA- PERÚ

2026

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

**UNIVERSIDAD ANDINA**

**NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ**

**ESCUELA DE POSGRADO**

MAESTRÍA EN INGENIERIA CIVIL

MENCIÓN: HIDRÁULICA

# INTEGRACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA PREDICCIÓN DE CAUDALES EN EL DISEÑO DE PUENTES EN EL DISTRITO DE PLATERIA, 2025

TESIS PRESENTADA POR:

**ROGELIO TITO APAZA**

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

**MAESTRO EN INGENIERIA CIVIL**

**MENCIÓN: HIDRÁULICA**

APROBADA POR EL JURADO REVISOR:

**PRESIDENTE** : Dr. LEONEL SUASACA PELINCO

**PRIMER MIEMBRO** : Dr. FRITZ WILLY MAMANI APAZA

**SEGUNDO MIEMBRO** : M.Sc. JULIO CESAR CHUCUYA ZAGA

**ASESOR DE TESIS** : Dr. ARNALDO YANA TORRES

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN** : TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN - P51

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor

http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

# UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ" ESCUELA DE POSGRADO

## RESOLUCIÓN DIRECTORAL N° 00060-2026-D-EPG-UANCV/J

Juliaca, 16 de enero de 2026

**VISTOS:**
El expediente N° 340 presentado por el (la) Bachiller: **TITO APAZA ROGELIO** quien solicita nominación de jurados, fecha y hora de sustentación de tesis, en la Escuela de Posgrado de la Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez".

**CONSIDERANDO:**
**Que,** el (a) Bachiller: **TITO APAZA ROGELIO** con número de **DNI 02435775** con número de matrícula **1610101508** ha solicitado asignación de jurados, Fecha y hora de sustentación de la Tesis Titulada: **INTEGRACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA PREDICCIÓN DE CAUDALES EN EL DISEÑO DE PUENTES EN EL DISTRITO DE PLATERIA, 2025** para optar el **GRADO** de: **MAESTRO EN INGENIERIA CIVIL** Mención: **HIDRÁULICA** de la Escuela de Posgrado de la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez;
**Que,** de conformidad con lo previsto en el artículo 18° del Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, **COMITÉ DE INVESTIGACIÓN;**
**Que,** mediante Resolución **N°1122-2025-USA-EPG/UANCV SE APRUEBA Y AUTORIZA LA EJECUCION DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACION y con Resolución N°1892-2025-USA-EPG/UANCV, se APRUEBA y AUTORIZA EL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN** (BORRADOR DE TESIS) Titulada: **INTEGRACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA PREDICCIÓN DE CAUDALES EN EL DISEÑO DE PUENTES EN EL DISTRITO DE PLATERIA, 2025** La misma que pertenece a la Línea de Investigación: **TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN - P51;**
**Que,** al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos en su artículo 28° **DE LA SUSTENTACIÓN.**
**Y estando, la opinión favorable del Director de la Unidad de Investigación y el Director de la Escuela de Posgrado** mediante acta de sorteo de jurado, con registro N° 000683 de fecha: 14 de enero de 2026 se nomina jurados.
**Que,** conforme al artículo 66° del Reglamento General de la Escuela de Posgrado de la UANCV, establece que *la Tesis de Posgrado es un trabajo de investigación científica original de actualidad y de alto valor científico;*
En uso de las atribuciones conferidas a la Dirección en el inciso "J" del artículo 17° del Reglamento General de la Escuela de Posgrado, y el artículo 76° del Estatuto Universitario;

**SE RESUELVE:**
**ARTÍCULO PRIMERO. - DECLARAR APTO** para la sustentación presencial del **INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN** (borrador de tesis), TITULADO: **INTEGRACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA PREDICCIÓN DE CAUDALES EN EL DISEÑO DE PUENTES EN EL DISTRITO DE PLATERIA, 2025** del (la) Bach: **TITO APAZA ROGELIO,** para optar el **GRADO** de: **MAESTRO EN INGENIERIA CIVIL** Mención: **HIDRÁULICA,** en virtud de los considerandos expuestos.

**ARTÍCULO SEGUNDO. - NOMINAR JURADOS** para la sustentación presencial y defensa de la tesis a los siguientes docentes ordinarios:

| | |
|---|---|
| **Presidente** | **: Dr. LEONEL SUASACA PELINCO** |
| **Primer miembro** | **: Dr. FRITZ WILLY MAMANI APAZA** |
| **Segundo miembro** | **: M.Sc. JULIO CESAR CHUCUYA ZAGA** |
| **Asesor** | **: Dr. ARNALDO YANA TORRES** |

**ARTÍCULO TERCERO. - PROGRAMAR FECHA Y HORA** de sustentación como se detalla:

| | |
|---|---|
| **Fecha** | **: Viernes, 23 de enero del 2026** |
| **Hora** | **: 04:00 p.m.** |
| **Lugar** | **: Aula N°206 Centro Comercial N° 03 UANCV-JULIACA** |

**ARTÍCULO CUARTO. -** El Director de la Escuela de Posgrado queda encargado del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, comuníquese y archívese.

Dr. Enrique Eleuterio Zuñiga Medina
DIRECTOR (e)



OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

# UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ" ESCUELA DE POSGRADO

## RESOLUCIÓN DIRECTORAL N° 01892-2025-USA-EPG/UANCV

Juliaca, 06 de noviembre de 2025

**VISTOS:**

El Expediente **N° 2025-C-6079** de fecha **20 de octubre de 2025**, el (la) Bach. **TITO APAZA ROGELIO**, con DNI **N° 02435775**, código de matricula **N° 1610101508**, quien solicita Revisión de Informe Final de la Investigación (borrador de Tesis); **INFORME N° 001613-2025-UI-EPG-UANCV y el Anexo (04 o 05) "Ficha de Opinión del Informe Final de la Investigación (borrador de Tesis)"** del **30 de octubre de 2025**, que fue revisada por el Comité de Investigación de la Escuela de Posgrado.

**CONSIDERANDO:**

**Que,** las Unidades de Investigación son unidades académicas que agrupan a docentes y estudiantes de diversas disciplinas, en razón del desarrollo de investigación científica, tecnológica y humanista de acuerdo al Estatuto Universitario Modificado 2020 de nuestra primera Casa Superior de Estudios.

**Que,** con Expediente **N°2025-C-6079** el (la) Bach. **TITO APAZA ROGELIO**, solicita la revisión y aprobación del Informe Final de la Investigación (borrador de Tesis) titulado: **INTEGRACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA PREDICCIÓN DE CAUDALES EN EL DISEÑO DE PUENTES EN EL DISTRITO DE PLATERIA, 2025** Línea de investigación **TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN - P51**, para optar el **GRADO** de **MAESTRO EN INGENIERIA CIVIL**, mención: **HIDRÁULICA.**

**Que,** al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos plasmado en la Resolución N° 0294-2023-UANCV-CU-R.

**Que,** el Comité de Investigación emitió su opinión **FAVORABLE** al Informe Final de la Investigación (borrador de Tesis).

**Que,** el Director de la Unidad de Investigación de la Escuela de Posgrado, corroboró el asesoramiento en el Informe Final de la Investigación (borrador de Tesis) del **ASESOR Dr. ARNALDO YANA TORRES**; y,

**Estando,** la opinión favorable del Comité de Investigación, según **INFORME N° 001613-2025-UI-EPG-UANCV** y el **Anexo (04 o 05) "Ficha de Opinión del Informe Final de la Investigación (borrador de Tesis)"** en concordancia con el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos Resolución N° 0294-2023-UANCV-CU-R, de conformidad a lo que establece la Ley Universitaria N° 30220, Ley de Creación de la UANCV N° 23738 y Modificatoria N° 24661 y el Estatuto de la UANCV, que confiere facultades a la unidad de Investigación de la Escuela de Posgrado.

**SE RESUELVE:**

**ARTICULO PRIMERO.- APROBAR Y AUTORIZAR EL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (BORRADOR DE TESIS)** para la **REVISIÓN DE SIMILITUD TURNITIN**, titulado: **INTEGRACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA PREDICCIÓN DE CAUDALES EN EL DISEÑO DE PUENTES EN EL DISTRITO DE PLATERIA, 2025** presentado por el (la) **Bach. TITO APAZA ROGELIO**, en virtud de los considerandos expuestos.

**ARTICULO SEGUNDO.- RATIFICAR**, como **ASESOR** al (a) **Dr. ARNALDO YANA TORRES.**

**ARTICULO TERCERO. - DISPONER** que la Escuela de Posgrado, la Secretaria Académica y administrativa, quedan encargados del cumplimiento de la presente resolución.

Regístrese, comuníquese y archívese.

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

# UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
# ESCUELA DE POSGRADO

## RESOLUCIÓN DIRECTORAL N° 001122-2025-USA-EPG/UANCV

Juliaca, 08 de setiembre de 2025

**VISTOS:**

El Expediente N° **2025-001653** de fecha **11 de agosto de 2025**, el (la) Bach. **TITO APAZA ROGELIO**, con DNI N° **02435775**, código de matricula N° **1610101508**, quien solicita Revisión de propuesta de Investigación; **INFORME N° 00898-2024-UI-EPG-UANCV** y el **Anexo (02 o 03) "Ficha de Opinión de la Propuesta de Investigación"** del **29 de agosto de 2025**, que fue revisada por el Comité de Investigación de la Escuela de Posgrado.

**CONSIDERANDO:**

**Que,** las Unidades de Investigación son unidades académicas que agrupan a docentes y estudiantes de diversas disciplinas, en razón del desarrollo de investigación científica, tecnológica y humanista de acuerdo al Estatuto Universitario Modificado 2020 de nuestra primera Casa Superior de Estudios.

**Que,** con Expediente N° **2025-001653** el (la) Bach. **TITO APAZA ROGELIO**, solicita la revisión y aprobación de la propuesta de Investigación titulado: **INTEGRACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA PREDICCIÓN DE CAUDALES EN EL DISEÑO DE PUENTES EN EL DISTRITO DE PLATERIA, 2025** Línea de investigación **TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN - P51**, para optar el **GRADO** de **MAESTRO EN INGENIERIA CIVIL**, mención: **HIDRÁULICA.**

**Que,** al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos plasmado en la Resolución **Nº** 0294-2023-UANCV-CU-R.

**Que,** el Comité de Investigación emitió su opinión **FAVORABLE** a la propuesta de investigación.

**Que,** el Director de la Unidad de Investigación de la Escuela de Posgrado, corroboró la propuesta del **ASESOR Dr. ARNALDO YANA TORRES**, quien debe estar acreditado y facultado para orientar y ayudar al asesorado en el proceso de elaboración del trabajo de investigación (Tesis) de acuerdo a la DIRECTIVA Nº 004-2019-UANCV-VRAD-OI; y,

**Estando,** la opinión favorable del Comité de Investigación, según **INFORME N° 00898-2025-UI-EPG-UANCV** y el **Anexo (02 o 03) "Ficha de Opinión de la Propuesta de Investigación"** en concordancia con el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos Resolución Nº 0294-2023-UANCV-CU-R, de conformidad a lo que establece la Ley Universitaria Nº 30220, Ley de Creación de la UANCV Nº 23738 y Modificatoria Nº 24661 y el Estatuto de la UANCV, que confiere facultades a la unidad de Investigación de la Escuela de Posgrado.

**SE RESUELVE:**

**ARTICULO PRIMERO.- APROBAR Y AUTORIZAR LA EJECUCIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN**, titulado: **INTEGRACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA PREDICCIÓN DE CAUDALES EN EL DISEÑO DE PUENTES EN EL DISTRITO DE PLATERIA, 2025** presentado por el (la) **Bach. TITO APAZA ROGELIO**, para optar el **GRADO** de **MAESTRO EN INGENIERIA CIVIL**, mención: **HIDRÁULICA** en virtud de los considerandos expuestos.

**ARTICULO SEGUNDO.- RECONOCER**, como **ASESOR** al (a) **Dr. ARNALDO YANA TORRES.**

**ARTICULO TERCERO. - DISPONER** que la Escuela de Posgrado, la Secretaría Académica y administrativa, quedan encargados del cumplimiento de la presente resolución.

Regístrese, comuníquese y archívese.

UNA, UNIVERSIDAD ANDINA NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ
ESCUELA DE POSGRADO
Dr. Javier Rómulo Quispe Zapana
DIRECTOR (e)

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"


# ROGELIO TITO APAZA

## INTEGRACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA PREDICCIÓN DE CAUDALES EN EL DISEÑO DE PUENTES EN ...

Trabajos de Maestria para Repositorio 2026

### Detalles del documento

Identificador de la entrega
**trn:oid:::13016:587852085**

Fecha de entrega
**7 may 2026, 23:15 GMT-5**

Fecha de descarga
**12 may 2026, 8:19 GMT-5**

Nombre del archivo
**T036_02435775_M.docx**

Tamaño del archivo
**16.9 MB**

**145 páginas**

**24.096 palabras**

**136.363 caracteres**


OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

# 20% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

## Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

## Fuentes principales

16% Fuentes de Internet
6% Publicaciones
16% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad

**N.º de alertas de integridad para revisión**

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.


OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

| Título de la tesis | |
|---|---|
| **INTEGRACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA PREDICCIÓN DE CAUDALES EN EL DISEÑO DE PUENTES EN EL DISTRITO DE PLATERIA, 2025** | |
| **Datos de autor** | |
| Nombres y apellidos | ROGELIO TITO APAZA |
| Tipo de documento de identidad | DNI |
| Número de documento de identidad | 02435775 |
| URL de ORCID | https://orcid.org/0009-0000-8958-6180 |
| **Datos de asesor** | |
| Nombres y apellidos | ARNALDO YANA TORRES |
| Tipo de documento de identidad | DNI |
| Número de documento de identidad | 41414676 |
| URL de ORCID | https://orcid.org/0000-0002-6740-5024 |
| **Datos del jurado** | |
| **Presidente del jurado** | |
| Nombres y apellidos | LEONEL SUASACA PELINCO |
| Tipo de documento | DNI |
| Número de documento de identidad | 40865558 |
| **Miembro del jurado 1** | |
| Nombres y apellidos | FRITZ WILLY MAMANI APAZA |
| Tipo de documento | DNI |
| Número de documento de identidad | 02306659 |
| **Miembro del jurado 2** | |
| Nombres y apellidos | JULIO CESAR CHUCUYA ZAGA |
| Tipo de documento | DNI |
| Número de documento de identidad | 01328442 |

**Datos de investigación**

| | |
|---|---|
| Línea de investigación | TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN - P51 |
| Grupo de investigación | No aplica |
| Agencia de financiamiento | Sin Financiamiento |
| | **País:** Perú<br>**Departamento:** Puno<br>**Provincia:** Puno<br>**Distrito:** Plateria<br>**Longitud:** 15°56'54.5"S<br>**Latitud:** 69°49'59.6"W<br><br>**Url Maps**<br>https://maps.app.goo.gl/cp6Nci5dNPuicwUZ7<br> |
| Año o rango de años en que se realizó la investigación | SETIEMBRE 2025 – ENERO 2026 |
| URL de disciplinas OCDE https://concytec-pe.github.io/Peru-CRIS/vocabularios/ocde_ford.html - Librería | **Ingeniería Civil**<br>https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.00<br>**Ingeniería de la Construcción**<br>https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.03 |

UNIVERSIDAD ANDINA NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ
ESCUELA DE POSTGRADO
M.Sc. Julio C. Chucuya Zaga
DIRECTOR
DE INVESTIGACIÓN - EPG.

TESIS UANCV
TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

# DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo ROGELIO TITO APAZA, identificado con DNI Nro. 02435775 en mi condición de egresado de:

☐ **Escuela Profesional**

☐ **Programa de Segunda Especialidad,**

☒ **Programa de Maestría o Doctorado**

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL,

informo que he elaborado el/la ☒ **Tesis** o ☐ **Trabajo de Investigación,** ☐ **Trabajo Académico** denominada:

INTEGRACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA PREDICCIÓN DE CAUDALES EN EL DISEÑO DE PUENTES EN EL DISTRITO DE PLATERIA, 2025

Asesorado por: Dr. ARNALDO YANA TORRES

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como suyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Juliaca 12 de Marzo del 2026

FIRMA (obligatoria)

Huella

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, cuyo apoyo incondicional y amor me han impulsado a seguir mis sueños, incluso en los momentos de incertidumbre. A mis padres, que siempre creyeron en mi potencial, y a mis hermanos, por ser mi fuente constante de motivación. A mis amigos, por su compañía y comprensión durante todo este proceso. Este logro es el reflejo de su constante aliento y sacrificio.

**Rogelio**

**AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido parte fundamental en el desarrollo de este trabajo. A mi tutor, por su orientación, paciencia y valiosos consejos que me han permitido mejorar cada día. A los colaboradores que me brindaron sus conocimientos y experiencias, contribuyendo al enriquecimiento de este proyecto.

**Rogelio**

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA ..... 2
AGRADECIMIENTO ..... x
ÍNDICE DE CONTENIDOS ..... xi
ÍNDICE DE TABLAS ..... xiv
ÍNDICE DE FIGURAS ..... xvi
RESUMEN ..... xviii
ABSTRACT ..... xix
INTRODUCCIÓN ..... xx
CAPÍTULO I ..... 17
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA ..... 17
1.1. Análisis de la situación problemática ..... 17
1.2. Formulación del planteamiento del problema ..... 19
1.2.1. Problema general ..... 19
1.2.2. Problemas específicos ..... 19
1.3. Justificación del problema ..... 20
1.3.1. Justificación Teórica ..... 20
1.3.2. Justificación Práctica ..... 20
1.3.3. Justificación Metodológica ..... 21
1.4. Objetivos ..... 21
1.4.1. Objetivo general ..... 21
1.4.2. Objetivos específicos ..... 21
1.5. Hipótesis ..... 22
1.5.1. Hipótesis general ..... 22
1.5.2. Hipótesis Especificas ..... 22

1.6. Variables ..... 23
1.6.1. Variable independiente ..... 23
1.6.2. Variable dependiente ..... 23
1.6.3. Matriz operacional de las variables ..... 24
CAPÍTULO II ..... 26
MARCO TEÓRICO ..... 26
2.1. Antecedentes de la investigación ..... 26
2.1.1. Antecedentes internacionales ..... 26
2.1.2. Antecedentes nacionales ..... 28
2.1.3. Antecedentes locales ..... 29
2.2. Marco teórico ..... 32
2.2.1. Integración de la Inteligencia Artificial ..... 32
2.2.2. Caudales en el Diseño de Puentes ..... 41
2.3. Marco conceptual ..... 49
CAPÍTULO III ..... 53
METODOLÓGIA DE LA INVESTIGACIÓN ..... 53
3.1. Enfoque de la investigación ..... 53
3.2. Método de la investigación ..... 53
3.3. Tipo de la investigación ..... 54
3.4. Nivel de la investigación ..... 54
3.5. Diseño de la investigación ..... 54
3.6. Población y muestra ..... 54
3.6.1. Población ..... 55
3.6.2. Muestra ..... 55
3.7. Técnicas e instrumentos de investigación ..... 56

3.7.1. Técnicas: ..... 56
3.7.2. Instrumento: ..... 57
3.8. Confiablidad y Validez del instrumento ..... 57
3.8.1. Confiabilidad ..... 57
CAPÍTULO IV ..... 58
RESULTADOS ..... 58
4.1. RESULTADOS OBTENIDOS ..... 58
4.1.1. Información previa para el análisis del resultado ..... 58
4.1.2. Análisis de consistencia de datos de una serie hidrológica ..... 64
4.1.3. Análisis Hidrológico ..... 72
4.1.4. Modelos de Inteligencia Artificial ..... 108
4.2. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS ..... 113
CONCLUSIONES ..... 118
RECOMENDACIONES ..... 121
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 123
ANEXOS ..... 131

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Coordenadas del Proyecto ..... 59

Tabla 2: Ubicación política, hidrográfica y geográfica ..... 62

Tabla 3: Modelo Digital de Elevación (DEM) para la delimitación de la cuenca ..... 62

Tabla 4: Resumen de caracterización de la cuenca ..... 63

Tabla 5: Precipitaciones máximas 24 horas de la Estación Puno ..... 74

Tabla 6: Datos de precipitación anual acumulada de la Estación Puno y estaciones vecinas ..... 75

Tabla 7: Análisis Estadístico mediante las pruebas de "t" de Studen y "F" de Fisher Estación Puno ..... 79

Tabla 8: Análisis de la tendencia en la Media por saltos – Estación Puno ..... 80

Tabla 9: Precipitaciones mensuales máximas corregidas - Estación Puno ..... 81

Tabla 10: Máximos y mínimos registrados en la Estación Puno ..... 82

Tabla 11: Parámetros estadísticos para el test de outliers ..... 83

Tabla 12: Valores máximos de precipitación, haciendo uso de IQR ..... 84

Tabla 13: Ajuste a las distribuciones de probabilidad ..... 85

Tabla 14: Pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov – Smirnov de la Estación Puno ..... 88

Tabla 15: Precipitaciones máximas anuales en 24 horas Estación Puno ..... 89

Tabla 16: Coeficientes de duración para tiempos menores a 1440 minutos ..... 93

Tabla 17: Lluvias máximas para duraciones de 5 - 1440 minutos ..... 94

Tabla 18: Parámetros obtenidos de la regresión múltiple ..... 95

Tabla 19: Intensidades máximas para duraciones de 5 – 1440 minutos ..... 95

Tabla 20: Hietograma para Tr=140 años ..... 98

Tabla 21: Hietograma para Tr=500 años ..... 99

Tabla 22: Texturas del suelo para determinar el número de curva. ..... 102

Tabla 23:..... 102

Tabla 24: Caudales instantáneos generados para Tr = 140 años ..... 104

Tabla 25: Caudales instantáneos generados para Tr = 500 años ..... 105

Tabla 26: Parámetros en común para MRM..... 106

Tabla 27: Estimación de Caudal para Tr=140 Años mediante MRM ..... 107

Tabla 28: Estimación de Caudal para Tr=500 Años mediante MRM ..... 107

Tabla 29: Comparación de resultados de estimación de caudales ..... 108

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación Política: Departamental, Provincial y Distrital ..... 59
Figura 2: Zona de Influencia del Proyecto ..... 61
Figura 3: Diagrama típico de proceso de escurrimiento en HEC-HMS ..... 68
Figura 4: Ubicación de estaciones cercanas al proyecto ..... 73
Figura 5: Histograma del registro Histórico de la Estación Puno ..... 74
Figura 6: Análisis de doble masa Estación Puno y estaciones vecinas ..... 76
Figura 7: Estación Puno VS Estación Juli ..... 77
Figura 8: Histograma de precipitación máxima – Estación Puno ..... 82
Figura 9: Ajuste estadístico para la distribución Normal ..... 86
Figura 10: Ajuste estadístico para la distribución Gumbel ..... 86
Figura 11: Ajuste estadístico para la distribución Log Normal ..... 86
Figura 12: Ajuste estadístico para la distribución Pearson Tipo III ..... 87
Figura 13: Ajuste estadístico para la distribución Log Pearson Tipo III ..... 87
Figura 14: Precipitación máxima anual para diferentes periodos de retorno ..... 89
Figura 15: Curva Intensidad – Duración – Frecuencia, Estación Puno ..... 96
Figura 16: Hietograma para Tr=140 años ..... 99
Figura 17: Hietograma para Tr=500 años ..... 100
Figura 18: Vista de la modelación en el programa HEC-HMS ..... 103
Figura 19: Gráfico de la precipitaciones totales, efectivas y caudales para un Tr=140 años ..... 104
Figura 20: Gráfico de la precipitaciones totales, efectivas y caudales para un Tr=500 años ..... 105

Figura 21: Arquitectura del modelo LSTM ..... 109

Figura 22: Modelo Híbrido (MRM + IA) ..... 110

Figura 23: Modelo CNN-LSTM ..... 111

Figura 24: Modelos de IA detallados para la predicción de caudales en puentes ..... 112

**RESUMEN**

El objetivo general de esta investigación fue determinar de qué manera la integración de la inteligencia artificial (IA) permite la predicción de caudales en el diseño de puentes en el distrito de Platería, 2025. Para ello, se emplearon modelos de inteligencia artificial, específicamente redes neuronales LSTM, para predecir los caudales a partir de datos hidrometeorológicos históricos de 53 años, considerando variables como precipitaciones máximas y caudales de eventos extremos. Los resultados mostraron que la IA mejora significativamente la precisión de las estimaciones de caudales, con predicciones de 93.0 $m^3/s$ para un periodo de retorno de 140 años y 113.0 $m^3/s$ para 500 años, valores más ajustados a las condiciones reales que los proporcionados por los métodos tradicionales. Esta mejora en las estimaciones permitió un dimensionamiento más preciso de los puentes, considerando factores como la altura de los vanos y la protección contra socavación. En conclusión, la implementación de IA en el diseño de puentes en Platería no solo optimiza la precisión de las predicciones de caudales, sino que también mejora la seguridad y eficiencia del diseño de infraestructuras hidráulicas, garantizando estructuras más adaptativas ante eventos climáticos extremos.

**Palabras clave:** Caudales, inteligencia artificial, LSTM, puentes, predicción.

**ABSTRACT**

The overall objective of this research was to determine how the integration of artificial intelligence (AI) enables flow prediction in bridge design in the Platería district, 2025. To this end, artificial intelligence models, specifically LSTM neural networks, were used to predict flows based on 53 years of historical hydrometeorological data, considering variables such as maximum precipitation and extreme event flows. The results showed that AI significantly improves the accuracy of flow estimates, with predictions of 93.0 $m^3/s$ for a 140-year return period and 113.0 $m^3/s$ for 500 years, values that are closer to actual conditions than those provided by traditional methods. This improvement in estimates allowed for more accurate bridge sizing, considering factors such as span height and protection against scouring. In conclusion, the implementation of AI in bridge design in Platería not only optimizes the accuracy of flow predictions, but also improves the safety and efficiency of hydraulic infrastructure design, ensuring more adaptive structures in the face of extreme weather events.

Keywords: Flows, artificial intelligence, LSTM, bridges, prediction.

# INTRODUCCIÓN

La construcción de infraestructuras resilientes, sostenibles y seguras es uno de los mayores desafíos en el ámbito de la ingeniería civil, particularmente en regiones donde los fenómenos naturales, como las crecidas de ríos, representan riesgos significativos. En este contexto, el diseño de puentes no solo exige precisión estructural, sino también una profunda comprensión de los patrones hidrológicos del entorno. Platería, una localidad marcada por la variabilidad de sus caudales fluviales, enfrenta año tras año la amenaza de inundaciones y daños en su infraestructura vial. Ante este panorama, surge la necesidad urgente de incorporar tecnologías innovadoras que permitan anticiparse a dichos eventos y optimizar el diseño de las obras hidráulicas.

La inteligencia artificial (IA) se presenta hoy como una herramienta poderosa para afrontar estos retos. Su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos, identificar patrones complejos y generar predicciones con altos niveles de precisión ha transformado múltiples disciplinas, y la ingeniería civil no es la excepción. Integrar modelos de IA en la predicción de caudales representa una oportunidad sin precedentes para mejorar la toma de decisiones durante la planificación y construcción de puentes, permitiendo diseños más adaptados al comportamiento real de los ríos y a los escenarios de cambio climático.

Esta tesis propone el desarrollo de un modelo basado en inteligencia artificial para predecir los caudales en Platería y analizar su aplicación en el diseño hidráulico de puentes. Se busca, no solo mejorar la precisión de los cálculos hidráulicos, sino también contribuir a la seguridad vial, la sostenibilidad ambiental y la eficiencia económica de las

obras públicas. En esencia, este trabajo refleja el compromiso con una ingeniería más inteligente, adaptativa y centrada en las necesidades reales de la comunidad.

Por tanto, el estudio se divide en cuatro capítulos:

capítulo I: Se analiza la situación problemática, la formulación, justificación del problema, se presenta los objetivos que dan relevancia a la investigación, las hipótesis que se presentan en la investigación.

capítulo II: Se presenta la parte teórica desde los antecedentes, marco teórico de ambas variables, marco conceptual.

capítulo III: Se detallan los procedimientos metodológicos, diseño, tipo, nivel, muestra, población, y diseños estadísticos.

IV capítulo: Se exponen los resultados, prueba de hipótesis, discusión de resultados, conclusión, recomendaciones y sus respectivas referencias bibliográficas con sus anexos.

# CAPÍTULO I

# FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

## 1.1. Análisis de la situación problemática

A nivel internacional, las técnicas convencionales para estimar el flujo y la socavación alrededor de estructuras como puentes son imprecisas y no tienen suficientemente en cuenta la intrincada dinámica hidrológica. La inteligencia artificial mediante redes profundas, LSTM y CNN ha demostrado mejoras significativas en la precisión de las previsiones hidrológicas y de socavación en tiempo real (Hashem & Yousefpour, 2024).

Se utilizó LSTM para un sistema de alerta temprana de erosión de puentes utilizando datos de sensores de nivel y de lecho fluvial recogidos a lo largo de 11 años en Alaska. La técnica predice la profundidad de la erosión con hasta siete días de antelación (Yousefpour & Correa, 2022).

A nivel nacional, Cisterna García et al. (2025) afirman que la previsión precisa del caudal en cuencas hidrográficas muy variables es crucial para la gestión del agua y el diseño de infraestructuras, especialmente para puentes en regiones susceptibles de lluvias intensas. Afirman que los modelos hidrológicos convencionales representan

inadecuadamente la intrincada dinámica no lineal de estos sistemas y abogan por la implementación de metodologías de inteligencia artificial (como Random Forest y LSTM) para mejorar su precisión, logrando coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe superiores a 0,89 en intervalos de 1 hora y mayores para 12 y 24 horas, lo que influye directamente en el diseño seguro y económicamente viable de puentes.

Guo et al. (2020) afirman que las predicciones de caudal multipaso basadas en IA, utilizando modelos como LSTM, GRU y LSSVM, proporcionan una gestión mejorada en la explotación de embalses y, por tanto, en el diseño de estructuras hidráulicas relacionadas con puentes. Sus resultados indican que la precisión de las predicciones mejora la fiabilidad del suministro de agua y optimiza los costes de explotación, por lo que abogan por incluirlas en la planificación y sostenibilidad del diseño estructural.

Yousefpour y Correa (2022) afirman que la socavación es la causa predominante del derrumbe de puentes en todo el mundo y critican las ecuaciones empíricas por su insuficiente fiabilidad dada la complejidad física del problema. Se propone un sistema de alerta temprana basado en IA, que utiliza redes LSTM entrenadas con más de 11 años de datos de sensores, capaz de predecir la profundidad de la socavación hasta con una semana de antelación, proporcionando así un instrumento crucial para salvaguardar la seguridad y la longevidad de los puentes.

A nivel regional, Reynoso (2023) indica que la cuenca del río Crisnejas, en Puno, cuenta con datos insuficientes (apenas 11 años de caudales medios mensuales), lo que obstaculiza la construcción de infraestructuras como puentes y la gestión eficaz del agua. El autor emplea redes neuronales artificiales, utilizando 53 años de datos climáticos para recrear series de caudales mensuales y proyectarlas a 15 años, ofreciendo un método

adaptativo que alivia la escasez de información y mejora la predicción local. Esta metodología facilita la evaluación de la disponibilidad de agua considerando los flujos biológicos, mitigando así los riesgos asociados a las construcciones de ingeniería civil en la zona.

Paredes (2022) respecto a la cuenca del río Ilave (provincia de El Collao, Puno) indica que los métodos estadísticos tradicionales (Gumbel, Normal, Gamma) y la implementación del modelo SCS con hidrograma unitario facilitan la estimación de caudales máximos de diseño (hasta aproximadamente 175 $m^3/s$); sin embargo, son inadecuados para predecir eventos extremos y sus efectos reales sobre puentes, subrayando la necesidad de incorporar IA para mejoras significativas en la confiabilidad y seguridad de proyectos regionales.

## 1.2. Formulación del planteamiento del problema

### *1.2.1. Problema general*

- ¿De qué manera la integración de la inteligencia artificial permite predecir caudales en el diseño de puentes en el distrito de Platería, 2025?

### *1.2.2. Problemas específicos*

- ¿De qué manera la integración de la inteligencia artificial permite utilizar Métodos de Estimación de Caudales en el distrito de Platería, 2025?
- ¿De qué manera la integración de la inteligencia artificial permite calcular el Impacto del Caudal en el Dimensionamiento de Puentes en el distrito de Platería, 2025?

- ¿De qué manera la integración de la inteligencia artificial permite evaluar la Variabilidad Hidrológica y Riesgo en el distrito de Platería, 2025?
- ¿De qué manera la integración de la inteligencia artificial permite analizar la Integración de Datos Hidrometeorológicos en el distrito de Platería, 2025?

## 1.3. Justificación del problema

### *1.3.1. Justificación Teórica*

Las ideas modernas de aprendizaje automático y modelización hidrológica sientan las bases para el uso de la IA en la previsión de caudales. Para mejorar la precisión de las predicciones de caudal, estas tecnologías permiten analizar cantidades ingentes de datos hidrometeorológicos pasados y presentes. Teóricamente, superando las restricciones de las metodologías convencionales, el uso de redes neuronales, algoritmos de regresión y modelos de series temporales mejora considerablemente nuestra comprensión del comportamiento de los ríos y de los patrones de escorrentía. Se aboga por enfoques computacionales inteligentes para digitalizar y automatizar los procesos de ingeniería, lo que está en consonancia con las corrientes científicas actuales.

### *1.3.2. Justificación Práctica*

En la práctica, el uso de la IA para la predicción de caudales hace que el diseño de puentes en la zona de la Platería sea más eficiente y seguro, al reducir la probabilidad de fallos estructurales causados por predicciones inexactas de la carga hidráulica. Cuando los datos son limitados y las condiciones hidrológicas muy variables, como suele ocurrir en las zonas rurales, esta herramienta adquiere un valor incalculable. Mejorar la

resistencia de las infraestructuras al cambio climático, optimizar los materiales, ahorrar costes y plazos de construcción y prever acontecimientos graves con la ayuda de modelos predictivos bien entrenados. Así, la inteligencia artificial (IA) se convierte en una herramienta esencial para la ingeniería civil aplicada y la ordenación del territorio.

### *1.3.3. Justificación Metodológica*

Desde un punto de vista metodológico, el trabajo integra enfoques computacionales para el entrenamiento y la validación de modelos de predicción basados en IA con técnicas cuantitativas de análisis de datos históricos de caudal. Se recogen datos hidrológicos, se preprocesan, se eligen modelos de inteligencia artificial (por ejemplo, árboles de decisión o redes neuronales recurrentes), se lleva a cabo un entrenamiento supervisado, se realiza una validación cruzada y, por último, se utiliza el enfoque para el diseño estructural. Al reforzar la toma de decisiones en el diseño de puentes sobre la base de criterios científicos y técnicos sólidos, esta técnica garantiza resultados repetibles al tiempo que es muy adaptable a nuevos datos y condiciones locales.

## 1.4. Objetivos

### *1.4.1. Objetivo general*

- Determinar de qué manera la integración de la inteligencia artificial permite la predicción de caudales en el diseño de puentes en el distrito de Platería, 2025.

### *1.4.2. Objetivos específicos*

- Analizar de qué manera la integración de la inteligencia artificial utiliza los métodos de Estimación de Caudales en el distrito de Platería, 2025.

- Determinar de qué manera la integración de la inteligencia artificial permite el cálculo del Impacto del Caudal en el Dimensionamiento de Puentes en el distrito de Platería, 2025.
- Identificar de qué manera la integración de la inteligencia artificial permite la evaluación de la Variabilidad Hidrológica y Riesgo en el distrito de Platería, 2025.
- Analizar de que manera la integración de la inteligencia artificial utiliza la Integración de Datos Hidrometeorológicos en el distrito de Platería, 2025.

## 1.5. Hipótesis

### *1.5.1. Hipótesis general*

- La integración de la inteligencia artificial permite la predicción de caudales en el diseño de puentes en el distrito de Platería, 2025.

### *1.5.2. Hipótesis Especificas*

- La integración de la inteligencia artificial utiliza de manera eficiente los métodos de Estimación de Caudales en el distrito de Platería, 2025.
- La integración de la inteligencia artificial permite el cálculo eficiente del Impacto del Caudal en el Dimensionamiento de Puentes en el distrito de Platería, 2025.
- La integración de la inteligencia artificial permite la evaluación eficiente de la Variabilidad Hidrológica y Riesgo en el distrito de Platería, 2025.
- La integración de la inteligencia artificial utiliza de manera eficiente la Integración de Datos Hidrometeorológicos en el distrito de Platería, 2025.

## 1.6. Variables

### *1.6.1. Variable independiente*

Integración de la Inteligencia Artificial

### *1.6.2. Variable dependiente*

Caudales en el Diseño de Puentes

### *1.6.3. Matriz operacional de las variables*

| Variables | D. Conceptual | D. Operacional | Dimensiones | Indicadores |
|---|---|---|---|---|
| 1. Integración de la Inteligencia Artificial | Al analizar cantidades ingentes de datos mediante algoritmos capaces de aprender y mejorar con el tiempo, la inteligencia artificial permite pasar de las operaciones tradicionales a las predictivas, adaptativas y optimizadas (Delgado Caballero, 2024). | Esta variable no será medida por diseño experimental | 1.1. Tecnologías de IA Utilizadas<br>1.2. Grado de Automatización en el Proceso de Cálculo<br>1.3. Precisión y Fiabilidad del Modelo de IA<br>1.4. Interacción Humano–IA en el Diseño | 1.1.1. Tipo de algoritmo empleado<br>1.1.2. Nivel de complejidad del modelo IA<br>1.1.3. Grado de innovación tecnológica<br>1.2.1. Porcentaje del proceso automatizado por IA<br>1.2.2. Frecuencia de intervención humana en el cálculo<br>1.2.3. Tiempo promedio de ejecución automatizada<br>1.3.1. Error cuadrático medio (RMSE) del modelo<br>1.3.2. Coeficiente de correlación ($R^2$)<br>1.3.3. Número de veces que el modelo acierta dentro de un margen de tolerancia<br>1.4.1. Nivel de autonomía del sistema en la toma de decisiones<br>1.4.2. Porcentaje de decisiones ajustadas manualmente<br>1.4.3. Satisfacción del usuario con la interfaz IA |
| 2. Caudales en el Diseño de Puentes | Para evitar subestimaciones que pongan en peligro la seguridad estructural, estas categorías se incluyen en las normas del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2019). En cuencas con gran fluctuación climática, es particularmente importante emplear clasificaciones precisas al proyectar obras | Esta variable no será medida por diseño experimental | 2.1. Métodos de Estimación de Caudales<br>2.2. Impacto del Caudal en el Dimensionamiento de Puentes<br>2.3. Variabilidad Hidrológica y Riesgo<br>2.4. Integración de Datos Hidrometeorológicos | 2.1.1. Tipo de método aplicado para la estimación<br>2.1.2. Frecuencia de uso de métodos comparativos<br>2.1.3. Grado de coincidencia entre métodos tradicionales y basados en IA<br>2.2.1. Variación en la luz del puente según caudal máximo esperado<br>2.2.2. Relación entre caudal y altura mínima sobre el cauce (altura libre)<br>2.2.3. Influencia del caudal en la elección del tipo de |

| | | |
|---|---|---|
| | hidráulicas para garantizar la funcionalidad y la responsabilidad ambiental (Lima et al., 2021). | cimentación<br>2.3.1. Coeficiente de variación del caudal anual<br>2.3.2. Número de eventos extremos registrados en los últimos 10 años<br>2.3.3. Índice de riesgo hídrico en la zona de estudio<br>2.4.1. Cantidad de variables climáticas integradas en el modelo<br>2.4.2. Frecuencia de actualización de los datos hidrometeorológicos<br>2.4.3. Cobertura espacial de las estaciones meteorológicas utilizadas |

*Nota:* elaboración propia

# CAPÍTULO II

# MARCO TEÓRICO

## 2.1. Antecedentes de la investigación

### *2.1.1. Antecedentes internacionales*

El-Hady Rady (2020). El objetivo era comparar la IA con los enfoques tradicionales para predecir la profundidad de socavación alrededor de los pilotes de un puente en situaciones de aguas tranquilas. Se entrenaron modelos de programación genética (GP) y ANFIS utilizando 320 datos de laboratorio y de campo, y se evaluaron cinco parámetros de diseño. Mediante la validación en el puente de Imbaba (Egipto), GP superó a ANFIS y a las fórmulas empíricas en términos de ajuste. Por último, GP ofrece mayor precisión y representatividad de una forma fácil de entender.

Forghani et al. (2020). Con el fin de estimar rápidamente las velocidades del caudal de los ríos, se propuso una alternativa a las complicadas ecuaciones hidrodinámicas clásicas basada en el aprendizaje profundo. Se utilizaron los datos de caudal del río Savannah (EE.UU.) para combinar una técnica estadística de componentes principales (PCGA) con redes neuronales (PCA-DNN, SE, SVE). Los modelos fueron capaces de anticipar con precisión el caudal con un coste computacional

reducido. Según la investigación, estos modelos reducen los cálculos al tiempo que mantienen la fiabilidad.

Che et al. (2022). Esta investigación se propuso encontrar la forma de utilizar una red neuronal artificial (RNA) optimizada mediante la búsqueda de cuco para predecir mejor los caudales fluviales de los proyectos hidroeléctricos. Evaluaron el RMSE y el $R^2$ utilizando datos hidroclimáticos del río Terengganu de Malasia. La RNA CS obtuvo mejores resultados que la RNA convencional en cuanto a exactitud y precisión. El estudio descubrió que, en condiciones climáticas cambiantes, la fiabilidad mejora cuando las redes neuronales se combinan con la búsqueda metaheurística.

Shiri, Karimi & Shiri (2023). Con el fin de pronosticar los caudales diarios en Iowa (EE.UU.), la investigación pretendía evaluar tres métodos de ML: MARS, BT y RF. Utilizaron modelos de regresión multivariante para analizar cinco años de registros diarios. A pesar de algunas variaciones según la partición de datos K-fold, todos los modelos registrados fluyen bien; se aconseja la validación cruzada. Según sus conclusiones, RF puede manejar series temporales hidrológicas dispersas con facilidad.

Cunha et al. (2025). El objetivo era proporcionar un servicio de previsión remota de caudales basado en un Perceptrón Multicapa para los ríos Tajo y Mondego en Portugal, regulados por embalses. La calibración de la red MLP se realizó utilizando datos hidrométricos para previsiones de caudal a 3 días. Es posible utilizar estos modelos en sistemas operativos de control de presas debido a su gran precisión y rápida reacción. Llegan a la conclusión de que MLP funciona y puede utilizarse para la monitorización a distancia.

MDPI Water (2024). Estudiamos la predicción de la socavación alrededor de los estribos de los puentes utilizando enfoques de IA (ANN, ANFIS, RF). Optimizaron los datos experimentales con MATLAB y utilizaron variables como la profundidad, la velocidad, el caudal y el sedimento. Además de ser el caudal y la velocidad los factores más importantes, ANFIS demostró un rendimiento superior al captar complicadas no linealidades. Por último, la IA permite realizar análisis de sensibilidad útiles para el diseño y la evaluación de puentes, superando a las técnicas empíricas.

### *2.1.2. Antecedentes nacionales*

Álvarez (2022). En la cuenca del río Huayanay (Acobamba, Huancavelica), los investigadores utilizaron redes neuronales artificiales para simular caudales en cuencas no aforadas a partir de variables fisiográficas, meteorológicas y de uso del suelo. El modelo produjo estimaciones mensuales de caudal muy precisas, lo que lo convierte en una herramienta útil para la planificación hídrica y el desarrollo de infraestructuras en lugares sin estaciones de aforo.

Ore (2020). Utilizando datos remotos de precipitación de CHIRPS, PISCO y GPM, se creó un modelo NARX para pronosticar los caudales del río Ichu (Huancavelica) para intervalos de tiempo que van de un día a cuatro días. Los modelos demostraron valores de $R^2$ de hasta 0,99 en el segundo día y de 0,73 a 0,91 en el cuarto día, respectivamente, lo que demuestra su utilidad en regiones con datos limitados y la posibilidad de alertas hidrológicas.

Vásquez (2023). Se ha entrenado una red neuronal artificial utilizando 53 años de datos de precipitaciones y 11 años de datos de caudal de la estación de Puente Crisnejas, en Crisnejas (Perú). El objetivo es predecir la cantidad de agua que estará

disponible hasta 2032. La red puede identificar caudales ecológicos con diferentes niveles de probabilidad (50, 75 y 95 por ciento), lo que puede ser útil para la gestión de recursos y la predicción de la volatilidad del clima en cuencas altoandinas.

Zárate (2021). empleó redes neuronales en conjunto con el método de Lutz Scholz para predecir caudales en la microcuenca Huajuiri-Oropesa (Apurímac), integrando datos hidrométricos con procesamiento en MATLAB; los resultados mejoraron la certeza de las predicciones de caudales, particularmente para el desarrollo de infraestructura hidráulica en microcuencas sujetas a datos dispersos.

Vidaurre (2022). Utilización de redes neuronales artificiales para estimar la necesidad de agua potable en la Empresa EPS EL (Lambayeque), demostrando que la IA puede disminuir la varianza en las predicciones de consumo, lo que ayuda en la planificación de los recursos hídricos y puede extenderse a la modelización de caudales basada en la demanda del metro.

Guzmán (2021). desarrolló una red neuronal para apoyar al TRMM en la cuenca del río Cachi, utilizando datos del SENAMHI y del TRMM junto con MATLAB para ampliar la cobertura de la medición de las precipitaciones a regiones que carecen de estaciones, produciendo sistemáticamente resultados precisos incluso en sitios no entrenados, y mejorando la evaluación de los recursos hídricos en cuencas con datos limitados.

### *2.1.3. Antecedentes locales*

Ledesma (2022). Utilizando el modelo conceptual GR4J, conocido por su capacidad para predecir la escorrentía diaria con pocos datos, esta tesis evaluó la disponibilidad de agua en la cuenca del río Coata, una importante subcuenca que

desemboca en el lago Titicaca. Se utilizaron datos recogidos entre 1990 y 2013 para realizar simulaciones de caudales medios mensuales, y luego se utilizó la distribución de Weibull para determinar las frecuencias de persistencia de caudales del 75% y 95%. Según los resultados, el diseño hidráulico de infraestructuras como puentes, canales y sistemas de protección contra inundaciones puede hacer uso de los caudales críticos identificados de 14.750 y 26.087 $m^3/s$, respectivamente. El estudio hidrológico en lugares altoandinos con escasos instrumentos hidrométricos puede realizarse eficazmente utilizando el modelo GR4J, según la tesis.

Paredes (2023). El propósito de esta investigación era determinar la mejor manera de aplicar el modelo de Lutz Scholz para predecir los caudales medios mensuales del río Lluscamayo en el pueblo de Collana, en la zona de Puno. El objetivo principal era crear un balance hídrico, ya que revelaría si el recurso podía o no mantener a la población local. El caudal mensual previsto oscilaba entre 13,7 L/s en julio y un máximo de 400,1 L/s en enero. Además, se detectó un excedente de 10,08 L/s durante todo el mes crucial, lo que valida la sostenibilidad del recurso en relación con la demanda de la población. Se utilizaron datos sobre precipitación, evaporación y escorrentía para adaptar el modelo a las características fisiográficas específicas de la zona. Según el estudio, los modelos estocásticos simples pueden ser útiles para diseñar obras de agua potable en regiones rurales muy vulnerables a la escasez de agua.

Neciosup (2022). elaboró un estudio sobre las crecidas fluviales en la zona de Sandia, en la región de Puno, utilizando las tecnologías más avanzadas de modelización hidráulica e hidrológica. Modelizaron el comportamiento hidráulico del caudal del cauce utilizando el modelo HEC-RAS y la escorrentía superficial durante las grandes

precipitaciones utilizando el modelo HEC-HMS. Para completar estos modelos, se utilizó el modelo digital de elevación ALOS PALSAR, que proporciona datos topográficos muy precisos. Los resultados mostraron que, según el análisis, los periodos de retorno de 100 y 500 años produjeron 24,04 ha y 25,61 ha de terreno inundable, respectivamente. Estos resultados tienen importantes implicaciones para la preparación ante catástrofes, la planificación urbana y el desarrollo de puentes y otras estructuras de paso en lugares de alto riesgo.

Arocutipa y Huaynapata (2021). Utilizando redes neuronales artificiales (RNA), esta tesis desarrolló y desplegó una aplicación web para predecir las necesidades de consumo de agua de Puno. El objetivo era proporcionar a EMSA Puno S.A. un instrumento actualizado y preciso para la gestión de sus recursos hídricos. El modelo fue entrenado utilizando entornos y plataformas de programación en línea, incluyendo MATLAB y Python, utilizando datos históricos de precipitación, temperatura y población desde 2000 hasta 2023. Los resultados demostraron que el modelo de RNA superaba a los enfoques estadísticos convencionales y podía utilizarse para prever los caudales urbanos y crear infraestructuras hidráulicas complementarias, como drenajes y puentes. Se demostró que la herramienta creada podría ser útil para situaciones como la urbanización y el cambio climático.

Álvarez (2022). Esta investigación tuvo como objetivo producir caudales mensuales en cuencas no medidas utilizando redes neuronales artificiales entrenadas con datos fisiográficos (altura, pendiente, cobertura vegetal), meteorológicos (temperatura, precipitación) y de uso del suelo. Elegimos como ejemplo la cuenca del río Huayanay por ser típica de las microcuencas de la región de Puno. Obtuvimos un valor

$R^2$ superior a 0,85 y un error de predicción aceptable cuando utilizamos datos del mundo real para evaluar el modelo MLP (perceptrón multicapa). Los resultados muestran que la IA puede estimar caudales en zonas altoandinas con datos escasos, lo que resulta útil para desarrollar infraestructuras rurales.

Cayetano (2020). Con el fin de proporcionar predicciones a corto plazo (1-4 días) para mejorar la gestión del agua en lugares altoandinos con poca cobertura instrumental, esta tesis construyó un modelo predictivo de los caudales del río Ichu utilizando redes neuronales NARX. Tanto en el proceso de entrenamiento como en el de validación se utilizaron series históricas de caudales en conjunción con datos satelitales de precipitación de CHIRPS, PISCO y GPM. Con un mínimo de errores y un coeficiente de determinación $R^2$ de 0,99, la previsión a 1 día mostró el mayor rendimiento. Redes neuronales similares mostraron una capacidad impresionante para captar la intrincada dinámica hidrológica de las regiones montañosas; pueden utilizarse en cuencas comparables de la región de Puno.

## 2.2. Marco teórico

### *2.2.1. Integración de la Inteligencia Artificial*

#### 2.2.1.1. Definición

Al incorporar modelos de aprendizaje automático, redes neuronales y algoritmos inteligentes al ciclo de planificación, diseño, construcción y mantenimiento de infraestructuras, los ingenieros civiles pueden optimizar la toma de decisiones, aumentar la precisión de los cálculos, reducir los tiempos y costes de ejecución y agilizar el proceso de integración de la IA.

Al analizar cantidades ingentes de datos mediante algoritmos capaces de aprender y mejorar con el tiempo, la inteligencia artificial permite pasar de las operaciones tradicionales a las predictivas, adaptativas y optimizadas (Delgado Caballero, 2024).

La integración de la inteligencia artificial (IA) en la ingeniería civil implica resolver problemas de predicción hidrológica, diseño estructural y monitorización en tiempo real mediante herramientas como las redes neuronales artificiales (RNA), los algoritmos evolutivos, los modelos de visión por ordenador (CNN) y los modelos predictivos (LSTM, NARX).

Al incorporar la IA a la ingeniería civil, podemos automatizar la detección de fallos, evaluar el comportamiento de los materiales, simular circunstancias de funcionamiento severas y aumentar la precisión de las predicciones estructurales (Maguiña & Pascacio 2021).

#### 2.2.1.2. Redes Neuronales Artificiales (RNA)

El objetivo de construir modelos informáticos llamados redes neuronales artificiales (RNA) es imitar el funcionamiento del cerebro humano para que puedan identificar patrones complicados y correlaciones no lineales en los datos. Pueden aprender mediante técnicas de entrenamiento como la retropropagación y se componen de neuronas artificiales organizadas en capas (entrada, oculta y salida).

Mediante funciones de activación no lineales y modificaciones repetidas de los pesos sinápticos, las RNA son capaces de aprender y generalizar comportamientos a partir de ejemplos. Son modelos matemáticos (Sinche, 2024).

#### *2.2.1.2.1. Aplicada a Ingeniería e Hidrología*

Cuando se carece de datos o es difícil representar correctamente los procesos físicos, se emplean redes neuronales artificiales (RNA) para modelizar fenómenos hidrológicos complicados en ingeniería civil e hidrología. Estos fenómenos incluyen la predicción de caudales, la generación de series sintéticas y la estimación de la socavación en estructuras hidráulicas.

El uso de redes neuronales permite superar a los modelos estadísticos tradicionales en la predicción de caudales punta, incluso cuando las series temporales subyacentes presentan lagunas o anomalías (Ordoñez,2022).

#### *2.2.1.2.2. Características Principales de las RNA en Ingeniería*

**a) Capacidad de Aprendizaje y Generalización**

Ticona Atehortua (2025) Las RNA pueden entrenarse utilizando datos anteriores de forma supervisada, como ya se ha mencionado. Para reducir el error de predicción, el método de retropropagación modifica los pesos sinápticos. Además, si se confirma el modelo, estas redes pueden aprender a partir de datos no vistos.

Las redes neuronales autónomas (RNA) son potentes porque pueden aprender y generalizar, lo que las hace útiles en situaciones complicadas como las estimaciones de caudal en regiones con datos ausentes.

**b) Capacidad de Modelado No Lineal**

Ordoñez (2022) Las RNA pueden representar interacciones no lineales entre varias variables, lo que constituye una propiedad particular de las RNA. Aplicando su investigación a la cuenca del río Chancay, demostró que las redes neuronales artificiales

(RNA) superaban a los enfoques estadísticos convencionales a la hora de captar episodios graves de escorrentía.

Al detectar patrones de entrada-salida sin imponer estrictos supuestos físicos o estadísticos, las RNA sortean las deficiencias de los modelos lineales.

**c) Flexibilidad y Adaptabilidad**

Según Palomino y Steiner (2023), Una ventaja esencial de las redes neuronales artificiales (RNA) es su adaptabilidad a muchas variables de entrada, incluidas características físicas, ambientales y geotécnicas. Demostraron que las RNA son útiles fuera de la hidráulica al utilizarlas para predecir la resistencia del hormigón.

Las RNA son versátiles y pueden entrenarse en bases de datos representativas de cualquier conjunto de variables, lo que las hace aplicables a diversos campos de la ingeniería.

**d) Aplicación con Datos Satelitales y Físicos**

Oré Cayetano (2019) destaca el potencial de las redes neuronales artificiales (RNA) para aumentar las lagunas de datos de las estaciones meteorológicas mediante métodos de teledetección como CHIRPS o GPM. Entrenó una red NARX para pronosticar caudales diarios en la cuenca del río Ichu, y sus conclusiones fueron alentadoras.

En zonas con datos in situ insuficientes o inexactos, la RNA combinada con datos de satélite mejora la modelización (Oré Cayetano, 2019, p. 83).

#### 2.2.1.3. Support Vector Regression (SVR) para Predicción de Caudales Andinos

Los métodos de aprendizaje supervisado, como la regresión de vectores de apoyo (SVR), consisten en proyectar datos en un espacio de mayor dimensión y luego utilizar esa información para construir un hiperplano ideal que minimice el error dentro de un margen razonable. Utilizando datos hidrometeorológicos e hidrométricos, Aguirre (2024) implementó SVR lineal para el río Torata (Moquegua) en un entorno andino. En pronósticos a corto plazo, el modelo produjo un $R^2$ de 0,946 y un MSE de 0,041. En una proyección a 5 años, el modelo alcanzó un $R^2$ de 0,877 y un MSE de 0,123, demostrando su capacidad para estimar el suministro futuro de agua en cuencas con una variabilidad climática significativa.

#### 2.2.1.4. K-Nearest Neighbors (KNN): Modelado Hidrológico a Corto Plazo

En el caso de los caudales de agua, el algoritmo KNN considera tanto los datos históricos como las condiciones meteorológicas actuales al realizar proyecciones basadas en métricas que son comparables. Según Lujano (2023), el algoritmo fue capaz de validar el río Ramis (Puno) utilizando datos del SENAMHI y de la ANA. Cuando se incluyeron los caudales retardados y la precipitación de 3 días, el método obtuvo una eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,96 y un ACC de 0,989. Los sistemas de alerta temprana en cuencas hidrográficas altoandinas se adaptan bien a KNN por su sencillez y bajo coste computacional.

#### 2.2.1.5. Redes Neuronales Multicapa (MLP) y RBF para Predicción Mensual

Para capturar las interacciones no lineales, existen dos topologías distintas: las redes de perforación multicapa (MLP) y de función de base radial (RBF). Utilizando datos sobre precipitación y evapotranspiración, reyes (2021) aplicó MLP y RBF a la cuenca del río Shullcas en Huancayo. Incluso en regiones semiáridas, el modelo MLP fue capaz de obtener un $R^2$ de 0.81 y un RBF de 0.71 durante la validación, demostrando que ambos modelos pueden estimar caudales mensuales de manera confiable.

#### 2.2.1.6. Redes Neuronales Recurrentes (RNN) y LSTM para Caudales Subdiarios

Las memorias a corto plazo (LSTM) son un tipo especial de RNN que pueden procesar y recordar eventos que ocurren a lo largo de distintos periodos de tiempo. En 2024, SENAMHI utilizó un modelo de memoria a largo plazo (LSTM) para proporcionar alertas de inundaciones durante 24 horas en la cuenca del río Rímac. Esta técnica supera los problemas de los enfoques físicos y puede detectar tanto los patrones estacionales como la dependencia inmediata en las regiones andinas.

#### 2.2.1.7. Modelos Híbridos Física-IA: SWAT + Aprendizaje Automático

Los métodos híbridos combinan las capacidades de predicción de la inteligencia artificial (IA) con la comprensión del comportamiento físico de la cuenca. Para anticipar mejor los caudales en determinadas regiones, Jimeno (2024) integró el SWOT con la agrupación de IA. El resultado final fue una mejora en la estimación de caudales en cuencas no aforadas y la identificación de cuencas biológicamente relacionadas. El

terreno andino y la falta de datos en las cuencas peruanas hacen que estos conceptos sean aplicables allí también.

#### 2.2.1.8. Estimación de Caudal Ecológico con IA Supervisada

Determinar los caudales mínimos ecológicos es crucial para la conservación de los ecosistemas acuáticos. Utilizando modelos supervisados de inteligencia artificial que incluyen datos hidrológicos y bioclimáticos, Liu et al. (2023) proporcionan una forma de categorizar los caudales básicos y los caudales de conservación. Para incluir consideraciones medioambientales en el diseño de proyectos de infraestructuras como puentes, la técnica se utilizó por primera vez en Lima y Cajamarca.

#### 2.2.1.9. Optimización de Redes Hidrometeorológicas con IA

La precisión de las predicciones depende de la calidad del muestreo y la calibración de las estaciones. La IA se utilizó para evaluar las redes hidrometeorológicas de los ríos Piura y Chira con el fin de identificar las deficiencias de los sensores y ajustar la ubicación y calibración de las estaciones (INIDA, 2022). Para aprovechar al máximo los datos cargados en los modelos ML, se sugirió reordenar las estaciones.

#### 2.2.1.10. Validación Estadística de Modelos IA: Métricas Hidrológicas

Métricas como RMSE, NSE, KGE', ACC y MAPE se utilizan para evaluar la robustez de un modelo de IA. Estas medidas han sido cruciales para comparar técnicas, según Lujano et al. (2023), al igual que lo fueron para los ríos Ramis y Shullcas: ACC=0,989, MAPE=6% y NSE=0,96, mientras que los modelos mensuales obtienen valores de $R^2$ de 0,81-0,95. Cuando se trata de diseñar infraestructuras hidráulicas como puentes, estas mediciones son el patrón oro para evaluar los modelos predictivos.

### 2.2.1.11. Dimensiones Integración de la Inteligencia Artificial

#### *2.2.1.11.1. Tecnologías de IA Utilizadas*

Las redes neuronales artificiales (RNA), los árboles de decisión, las máquinas de vectores de apoyo (SVR), los algoritmos k-próximo vecino (KNN), las redes neuronales recurrentes (RNN) y la memoria a corto plazo (LSTM) son algunos de los modelos contemporáneos de IA utilizados en hidrología. La cantidad de datos, la no linealidad del sistema hidrológico y la existencia de factores climáticos externos determinan cuál es el método más eficaz.

Para predecir cuándo pueden producirse crecidas repentinas en la cuenca del río Rímac, SENAMHI (2024) empleó redes LSTM (Long Short-Term Memory), un tipo de RNN. Es especialmente destacable el hecho de que estos modelos pueden mejorar la predicción de eventos graves al capturar correlaciones a largo plazo entre factores meteorológicos. Del mismo modo que los modelos SVR logran un compromiso entre complejidad y precisión, son perfectos para la predicción hidrológica en cuencas semiáridas donde los datos son escasos o intermitentes, como se muestra en el río Torata (Moquegua) (SENAMHI, 2024).

#### *2.2.1.11.2. Grado de Automatización en el Proceso de Cálculo*

Las tareas que antes requerían discreción humana y amplios cálculos pueden mecanizarse ahora con ayuda de la IA. En el diseño hidráulico, el término «grado de automatización» describe lo bien que un sistema puede procesar datos, limpiarlos, entrenar modelos y proporcionar previsiones en tiempo real sin ayuda de una persona.

Varios experimentos peruanos recientes, incluido uno en la cuenca del río Ramis (Lujano et al., 2023), han demostrado la viabilidad de integrar modelos KNN y SVR en sistemas de previsión automatizados que obtienen actualizaciones diarias de datos meteorológicos y satelitales. Cuando se trata del diseño estructural, por ejemplo de puentes rurales, esta automatización aumenta la eficiencia operativa, reduce los errores humanos y permite tomar decisiones mejores y más rápidas (Lujano et al. 2023).

#### *2.2.1.11.3. Precisión y Fiabilidad del Modelo de IA*

Fiabilidad significa que el modelo puede seguir funcionando bien aunque se le presenten datos nuevos o diferentes, mientras que precisión significa que los valores predichos y observados están muy próximos entre sí. Los puentes y otras estructuras hidráulicas dependen de los valores de caudal máximo, medio y mínimo, por lo que estas características son cruciales para su construcción segura.

Varias investigaciones realizadas en Perú han demostrado la fiabilidad de los modelos. Con un valor $R^2$ de 0,946, el modelo SVR demostró una excelente precisión cuando se aplicó al río Torata. Además, los modelos NARX que utilizaron datos satelitales en el río Ichu (Huancavelica) pudieron obtener una efectividad de predicción a corto plazo de más del 90% (Aguirre et al., 2024). Gracias a estos resultados podemos afirmar con mayor seguridad que la IA es una herramienta útil para los ingenieros hidráulicos.

#### *2.2.1.11.4. Interacción Humano–IA en el Diseño*

Cuando los sistemas de IA trabajan en tándem con ingenieros humanos para planificar y construir estructuras complejas como puentes, se habla de interacción

humano-IA. Aunque la IA es muy buena haciendo predicciones, sigue necesitando humanos con mentes técnicas para validar, comprender y ajustar los resultados. Trabajando juntos, podemos aprovechar al máximo la potencia y la velocidad de procesamiento de la IA, así como el juicio contextual de los humanos.

Python + TensorFlow, QGIS + plugins de modelización hidrológica y cuadros de mando automatizados con Power BI son algunas de las plataformas integradas en la IA que los ingenieros civiles e hidráulicos de Perú tendrán que aprender a utilizar. Adaptar las prescripciones de los modelos a las circunstancias sobre el terreno de la geología, el nivel freático, el terreno, etc., es especialmente importante en lugares rurales como Platería, donde esta interacción es crucial (García & Paredes, 2021).

### *2.2.2. Caudales en el Diseño de Puentes*

#### 2.2.2.1. Concepto

El diseño hidráulico de estructuras como puentes, alcantarillas y defensas fluviales gira en torno al caudal, que es la cantidad de agua que se mueve a través de la sección transversal de un curso de agua por unidad de tiempo ($m^3/s$). Desde un punto de vista técnico, existen cuatro tipos distintos de caudal: el caudal medio, que representa el régimen hídrico general, el caudal máximo, que se reserva para los casos graves, el caudal mínimo, que se asocia a las sequías, y el caudal ecológico, que tiene por objeto mantener sanos los ecosistemas acuáticos.

Para evitar subestimaciones que pongan en peligro la seguridad estructural, estas categorías se incluyen en las normas del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2019). En cuencas con gran fluctuación climática, es particularmente importante

emplear clasificaciones precisas al proyectar obras hidráulicas para garantizar la funcionalidad y la responsabilidad ambiental (Lima et al., 2021).

Cuando se diseñan estructuras para salvar ríos, como puentes para vehículos, peatones o trenes, «caudales en el diseño de puentes» significa utilizar valores de caudal de agua como parámetros básicos. Estos valores suelen medirse en metros cúbicos por segundo, o $m^3/s$. Factores como la longitud de los vanos, la altura libre, la protección contra la socavación, las dimensiones de los estribos y la selección de materiales resistentes al flujo y a la erosión se ven afectados por el caudal, que a su vez dicta la cantidad de agua que tiene que pasar sin obstáculos por debajo del puente.

Al diseñar una estructura en ingeniería hidráulica, es importante tener en cuenta el caudal medio anual, el caudal punta o máximo probable (vinculado a un periodo de retorno específico, como 50, 100 o 500 años) y el caudal de diseño. Estos dos últimos caudales sirven de base técnica para garantizar que la estructura pueda soportar eventos hidrológicos severos sin fallar. Además, en el contexto medioambiental actual se tienen en cuenta los caudales ecológicos; estos caudales permiten integrar los requisitos de sostenibilidad en las obras civiles y, al mismo tiempo, proteger la dinámica fluvial natural y los ecosistemas (MTC, 2019).

#### 2.2.2.2. Variabilidad de Caudales en Cuencas Altoandinas

En las cuencas altoandinas es necesario contar con modelos de diseño hidráulico adaptables porque los caudales pueden variar mucho debido a la estacionalidad (estación seca vs. estación lluviosa), los efectos de los glaciares y nevados, y fenómenos climáticos como El Niño. El retroceso glaciar disminuye los caudales base en la zona de Arequipa en un 10-20% durante las épocas secas, mientras que las crecidas aumentan

durante las épocas lluviosas, según estudios como el de Sánchez & Huanca (2020). Además, el comportamiento hidrológico de la cuenca se ve drásticamente alterado por actividades humanas como la deforestación, la minería o la agricultura intensiva, que provocan un aumento de la erosión y la escorrentía. Los puentes de Platería deben diseñarse para soportar sucesos intensos y cambios a largo plazo, por lo que es crucial comprender esta imprevisibilidad (Sánchez& Huanca, 2020).

#### 2.2.2.3. Métodos de Aforo y Medición de Caudales

Las técnicas directas, como el molinete, el aforo por flotador o los sensores ultrasónicos, son la columna vertebral de la medición precisa del caudal. Los métodos indirectos se basan en fórmulas hidráulicas (Manning) y en la modelización mediante herramientas como HEC RAS. Sánchez y Paucar (2020) utilizaron el río Chiclayo en Perú para calibrar las curvas de nivel con datos de aforos reales, lo que mejoró la precisión de la modelización hidráulica. El diseño y dimensionamiento de puentes, especialmente en regiones propensas a sucesos graves, depende de la estimación continua de los valores críticos de caudal que permiten estos métodos. La medición automatizada también ha mejorado la fiabilidad de los datos al reducir los errores humanos y dar a los servicios de emergencia acceso a información actualizada al minuto.

#### 2.2.2.4. Caudal de Diseño en Ingeniería Hidráulica

Para dimensionar las estructuras hidráulicas, primero hay que determinar el caudal de diseño, que es una estimación del caudal extremo durante un cierto tiempo de retorno (por ejemplo, 50 ó 100 años). A partir de datos meteorológicos y topográficos específicos de la cuenca, su cálculo se realiza mediante análisis estadístico de frecuencias de series históricas (Gumbel, Log Pearson III). Para escenarios futuros,

especialmente en infraestructuras públicas, el Manual del MTC (2019) establece que es necesario un enfoque LRFD que incluya aspectos de seguridad y análisis de sensibilidad. Garantizar que los puentes de Platería están diseñados para resistir grandes avenidas y tener en cuenta los posibles impactos a medio y largo plazo del cambio climático requiere la correcta selección de este caudal.

#### 2.2.2.5. Caudales de Crecida y Diseño Estructural de Puentes

Los picos críticos, como los caudales de crecida, pueden causar desbordamientos, daños estructurales o la socavación de puentes durante periodos de altas precipitaciones o deshielo. En la cuenca del río Viru, Ramos (2021) utilizó HEC-RAS para modelizar escenarios severos de El Niño, registrando aumentos de caudal de hasta el 300% y el potencial de erosión extensiva en los estribos. Con estos detalles, podemos garantizar el funcionamiento y la seguridad estructural de la plataforma dimensionando adecuadamente su envergadura, altura y protección. Para prepararse ante circunstancias difíciles y garantizar la longevidad de las infraestructuras rurales, es crucial identificar estos caudales extremos.

#### 2.2.2.6. Caudal Ecológico en el Diseño Hidráulico

Considerando factores biológicos, físico-químicos y de hábitat acuático, el caudal ecológico se determina como el caudal mínimo requerido para mantener sanos y en funcionamiento los ecosistemas fluviales. En la cuenca del río Tres Ríos (Cajamarca), Alvarez & Huamán (2023) estimaron valores que garantizan la supervivencia de especies nativas y la conectividad ecológica utilizando enfoques cuantitativos y procedimientos tradicionales (Schmutz, Vannote). Incluirlos en los diseños de puentes evita que la infraestructura se interponga en procesos naturales como la migración de peces y el

movimiento de nutrientes. Un paso crucial en el desarrollo de obras hidráulicas sostenibles que preserven la biodiversidad local es estimar con precisión este caudal y atenerse a él.

#### 2.2.2.7. Modelos Matemáticos e Hidráulicos para Predicción de Caudales

Las simulaciones dinámicas las proporcionan modelos matemáticos como HEC RAS, SWMM o MIKE. Estos modelos incluyen las precipitaciones, el suelo, el terreno y las estructuras, lo que permite predecir el comportamiento del flujo en diferentes situaciones. Para ayudar en la planificación hídrica en las regiones de Moquegua, Aguirre Vásquez et al. (2024) integraron HEC RAS con algoritmos de aprendizaje automático para predecir los caudales futuros del río Torata. Estas herramientas permiten variar el tamaño del puente y realizar análisis de sensibilidad en varios escenarios, algunos de los cuales se ven afectados por el cambio climático o los cambios realizados aguas arriba. Además, proporcionan una base sólida para elegir medidas preventivas como obras de control o protección ribereña.

#### 2.2.2.8. Impacto del Cambio Climático en el Diseño Hidráulico

El diseño convencional basado en datos del pasado se ve desafiado por los cambios en los patrones de precipitación y la disponibilidad de recursos hídricos causados por el cambio climático. Esto, a su vez, provoca cambios en la fuerza, frecuencia y duración de los caudales. Se ha comprobado que los caudales mínimos del río Chilli (Arequipa) han disminuido hasta en un 25%, según Zeballos y Ticona (2022), lo que hace necesario redimensionar la infraestructura hidráulica actual. Asimismo, los episodios más potentes van acompañados de mayores caudales punta, por lo que es necesario incluir factores de ajuste en las evaluaciones de frecuencia. Para garantizar la

durabilidad a corto y largo plazo, el diseño de los puentes debe tener en cuenta esta doble tendencia.

#### 2.2.2.9. Normativa Peruana para Diseño Hidráulico de Puentes

El Manual de Diseño de Puentes del MTC (2019) es la fuente autorizada de las normas peruanas vigentes para el cálculo de caudales de diseño, socavación, peralte y condiciones de cruce. Para garantizar la seguridad funcional de los puentes se requieren modelos hidráulicos y análisis de frecuencias. Los caudales ambientales, las reservas hídricas y la seguridad funcional frente a sucesos graves se abordan en las normas complementarias del ANA y de gestión de cuencas hidrográficas. Siguiendo estrictamente estas directrices, los puentes rurales pueden tener la certeza de que cumplen todos los criterios técnicos nacionales y tienen en cuenta los aspectos hidrológicos y medioambientales.

#### 2.2.2.10. Estudios de Caso en Diseño de Puentes con Enfoque Hidrológico

Los estudios de casos validan el uso de ideas hidráulicas en contextos climáticos, topográficos y materiales particulares. Integrando las previsiones de caudal con el enfoque KNN, Lujano et al. (2023) pudieron establecer el diseño estructural del puente del río Ramis (Puno), teniendo en cuenta las crecidas regulares y la rápida escorrentía del río. Su investigación demuestra que las normas locales de ingeniería civil deben tenerse en cuenta junto con los algoritmos predictivos para obtener diseños mejores y más precisos en los altos Andes.

### 2.2.2.11. Dimensiones de caudales de diseños de puentes

#### *2.2.2.11.1. Métodos de Estimación de Caudales*

Dado que permite especificar la capacidad de la estructura para resistir caudales fluviales en distintas situaciones, la estimación de caudales es un método crucial en el diseño de infraestructuras hidráulicas, sobre todo en la planificación de puentes. Existen principalmente dos tipos de enfoques: empíricos y matemáticos. En las cuencas pequeñas, donde los datos hidrométricos son escasos, se utilizan métodos empíricos como el de Creager o la fórmula racional para definir el caudal de diseño. En cambio, los métodos matemáticos definen el caudal de diseño mediante el análisis estadístico de series históricas de caudales máximos diarios, por ejemplo con las distribuciones de Gumbel o Log-Pearson III. Estos enfoques son requeridos para ser utilizados en el diseño hidráulico de obras fluviales en el Perú por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2019). Del mismo modo, para obtener estimaciones más precisas, especialmente en escenarios futuros con cambio climático, es esencial contar con software especializado como HEC-HMS para simulación hidrológica y HEC-RAS para modelación hidráulica.

#### *2.2.2.11.2. Impacto del Caudal en el Dimensionamiento de Puentes*

En concreto, el llamado «caudal de diseño» es una estimación clave que afecta a las dimensiones geométricas y estructurales del puente. La altura hidráulica, la profundidad de los cimientos, la longitud de los vanos (la distancia libre entre apoyos), la separación entre cimientos y los sistemas de protección contra la socavación son algunos de los factores más cruciales. Si se subestima el caudal, existe un peligro considerable de desbordamiento, colapso estructural o erosión en los estribos, y puede

haber gastos adicionales si se sobreestima el caudal. En un estudio de diseño hidráulico realizado en la cuenca del río Viru, Ramos (2021) informó de que las cimentaciones sufrieron daños sustanciales durante una crecida extrema asociada al fenómeno de El Niño debido a la subestimación del caudal de crecida. Por lo tanto, una investigación exhaustiva del comportamiento del caudal en todas las circunstancias, teniendo en cuenta tanto los datos pasados como los futuros, debería informar directamente sobre el tamaño hidráulico del puente.

#### *2.2.2.11.3. Variabilidad Hidrológica y Riesgo*

Los cambios en el régimen de caudales de la cuenca hidrográfica a lo largo del tiempo y el espacio se conocen como variabilidad hidrológica. La estacionalidad climática (estaciones lluviosas y secas), la topografía del terreno y el efecto de fenómenos climáticos globales como El Niño o La Niña son los principales factores que afectan en gran medida a esta fluctuación en lugares andinos como el distrito de Platería. Una descripción inadecuada de esta heterogeneidad puede dar lugar a errores de diseño y, por extensión, a riesgos para las infraestructuras. El retroceso de los glaciares afecta tanto a la duración de los periodos secos como a los caudales base, encontrándose en algunos estudios (Sánchez & Huanca, 2020) disminuciones de hasta el 20%. El fracaso de las condiciones de socavación, la erosión lateral o el desbordamiento del canal pueden ser el resultado de diseños de puentes que no tengan en cuenta esta imprevisibilidad. En consecuencia, es necesario un conocimiento profundo de la dinámica hidroclimática para la evaluación del riesgo hidrológico, además de un punto de vista estructural.

#### *2.2.2.11.4. Integración de Datos Hidrometeorológicos*

Para crear estimaciones de caudal y modelos de predicción precisos para el diseño de puentes hidráulicos, es necesario utilizar datos hidrometeorológicos que incluyan precipitaciones, temperatura, humedad del suelo, evapotranspiración y niveles de agua. Estos datos pueden introducirse en modelos de simulación hidrológica como HEC-HMS o algoritmos de IA como las redes neuronales integrándolos con datos de estaciones tradicionales o sensores por satélite como PISCO y CHIRPS. Con fines de abastecimiento de agua y diseño de infraestructuras resilientes, Aguirre Vásquez et al. (2024) utilizaron datos satelitales y de campo para estimar los caudales del río Torata en Perú. Debido a la posible cobertura restringida de las estaciones meteorológicas, esta integración es de suma importancia en las regiones rurales. En consecuencia, es técnicamente imposible lograr diseños hidráulicos eficaces, eficientes y seguros sin una correcta gestión e integración de los datos hidrometeorológicos.

## 2.3. Marco conceptual

### 1. Inteligencia Artificial (IA)

El campo de la informática conocido como «inteligencia artificial» pretende crear máquinas capaces de aprender, razonar y tomar decisiones de forma muy parecida a las personas. Cuando se trata de diseñar infraestructuras como puentes, la inteligencia artificial se emplea para cribar montañas de datos medioambientales e hidrológicos, hacer previsiones precisas sobre aspectos como el caudal de los ríos y allanar el camino para tomar decisiones arquitectónicas mejores y más seguras.

### 2. Redes Neuronales Artificiales (RNA)

Un uso habitual de las redes neuronales artificiales es la predicción de series temporales, como el caudal de los ríos. Estos modelos se basan en el funcionamiento del cerebro humano. Incluso ante la incertidumbre climática, estas redes pueden aprender de datos pasados y reconocer patrones intrincados en los caudales de agua, lo que les permite ofrecer proyecciones precisas. Aplicados a la ingeniería civil, cambian las reglas del juego del diseño de infraestructuras resilientes.

**3. Modelado Hidrológico**

Un método que pretende imitar las acciones del ciclo del agua dentro de una cuenca hidrográfica es la modelización hidrológica. Para predecir los caudales, estos modelos utilizan características como la precipitación, la evaporación, la infiltración y la escorrentía. El uso de la inteligencia artificial (IA) en la modelización hidrológica ha demostrado mejorar enormemente la precisión de las predicciones, lo que resulta esencial para evitar el derrumbamiento de puentes por inundaciones repentinas.

**4. Diseño de Puentes**

A la hora de diseñar puentes se tienen en cuenta aspectos estructurales y medioambientales, como el caudal del río. La estabilidad y longevidad de la estructura corren peligro si estos flujos no se predicen con precisión. Por consiguiente, optimizar las dimensiones, los materiales y los refuerzos mediante la integración de tecnologías de predicción basadas en la IA desde las primeras fases del diseño minimiza los riesgos ante sucesos graves.

**5. Cambio Climático y Variabilidad Hidrológica**

El cambio climático ha provocado cambios en la frecuencia y distribución de fenómenos hidrometeorológicos graves, como sequías y fuertes lluvias. Estas fluctuaciones afectan directamente a los caudales y, por extensión, a la estabilidad de los puentes. Los algoritmos basados en inteligencia artificial (IA) pueden ajustarse dinámicamente a los datos climáticos cambiantes, mientras que los modelos tradicionales tienen dificultades para hacerlo.

**6. Big Data en Ingeniería Civil**

Big Data es un término utilizado en ingeniería civil para describir el uso de cantidades masivas de datos recogidos de fuentes como estaciones meteorológicas, imágenes de satélite, registros históricos y sensores. Como herramienta fundamental para la toma de decisiones basada en pruebas, esta información puede introducirse en los sistemas de IA utilizados para la construcción de puentes. Estos algoritmos analizan cientos de factores para elaborar previsiones sólidas sobre el comportamiento hidráulico de un río.

**7. Algoritmos de Aprendizaje Automático**

El aprendizaje automático permite a los ordenadores «aprender» de ejemplos para predecir lo que ocurrirá a continuación. En la predicción de caudales se utilizan algoritmos como las RNN, los árboles de decisión o la regresión lineal para predecir cambios en el nivel de los ríos. Estos modelos se actualizan y perfeccionan con el tiempo a partir de nuevos datos.

**8. Sistemas de Información Geográfica (SIG)**

A la hora de diseñar infraestructuras, los SIG pueden recopilar, analizar y mostrar datos geográficos. Al integrar datos de topografía, uso del suelo y redes hidrográficas, los SIG

ayudan a proyectos como la construcción de puentes a identificar ubicaciones de alto riesgo y planificar vías más seguras y sostenibles cruzándolas con proyecciones de caudal generadas por IA.

**9. Gestión de Riesgos en Infraestructura**

El objetivo de la gestión de riesgos en las infraestructuras es identificar las amenazas potenciales para el funcionamiento y la seguridad de una estructura y, a continuación, tomar medidas para eliminarlas o reducirlas. Reducir la probabilidad de derrumbe de puentes y las consiguientes repercusiones económicas y sociales utilizando la IA para estimar adecuadamente los flujos, lo que permite crear estructuras que sobreviven a sucesos catastróficos.

**10. Interdisciplinariedad en Proyectos de Ingeniería**

Una estrategia multidisciplinar ejemplar es el uso de la inteligencia artificial (IA) en el diseño de puentes, que reúne a expertos en gestión medioambiental, climatología, informática, estadística e ingeniería civil. Trabajando juntos, podemos mejorar la eficacia, la seguridad y la longevidad de los proyectos de infraestructuras públicas creando soluciones de vanguardia adaptadas a zonas específicas, como el distrito de Platería.

# CAPÍTULO III

# METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

## 3.1. Enfoque de la investigación

Según Hernández & Mendoza (2018), Este estudio se considera cuantitativo porque se basa en el análisis de datos numéricos para verificar las hipótesis y resolver los problemas de la investigación. Utilizando encuestas organizadas para recopilar datos, este enfoque se basará en métricas objetivas y análisis estadísticos. Después, analizaremos los datos mediante técnicas estadísticas.

## 3.2. Método de la investigación

Según Hernández & Mendoza (2018), Para explorar posibles explicaciones, esta investigación emplea el razonamiento lógico y especulativo. Al partir de una hipótesis general y construir sobre ella hipótesis más específicas basadas en teorías y observaciones actuales, este método permite deducir conclusiones lógicas y hacer previsiones. El objetivo de la recogida de datos es poner a prueba estas teorías y averiguar si se sostienen o no.

### 3.3. Tipo de la investigación

Este estudio es de carácter fundamental. Este método se centra principalmente en los principios, teorías y relaciones más básicos dentro de un determinado campo de estudio. Además, requiere la creación de nuevos conocimientos teóricos, la evaluación de modelos teóricos y un análisis y una síntesis exhaustivos de la bibliografía. (Hernández & Mendoza, 2018, p. 138).

### 3.4. Nivel de la investigación

La investigación será aplicada, este nivel pretende concentrarse más en el qué que en el porqué de la población investigada, como indica Ramos (2020), profundizando en las especificidades de los fenómenos estudiados. Es posible, pero no obligatorio, crear una hipótesis en este nivel que intente definir el tema estudiado.

### 3.5. Diseño de la investigación

Esta investigación utiliza un diseño experimental, lo que significa que no cambia nada ni controla nada más que observar y medir lo que ocurre (Hernández & Mendoza, 2018, p. 139).

Dado que el instrumento de recogida de datos tenía una duración de funcionamiento restringida, esta investigación utilizó un diseño temporal transversal. En una investigación correlacional transversal que no sea experimental, es habitual el siguiente diagrama. (Hernández & Mendoza, 2018, p. 140).

### 3.6. Población y muestra

### *3.6.1. Población*

Según Hernández & Mendoza (2018), simboliza el conjunto de individuos que comparten una misma característica, como ser ciudadano, pertenecer al mismo grupo racial o étnico, ser estudiante de la misma institución, o algo similar.

La población en este estudio se delimita como la colección completa de información hidrológica y meteorológica histórica, junto con los puentes actuales o propuestos a través de canales fluviales en la región de Platería (Puno). Los datos técnicos sobre precipitaciones, niveles de caudal y diseño estructural, mantenidos por instituciones públicas y estaciones hidrométricas, también pueden considerarse parte de la población.

**Población total:**

- Registros hidrométricos (caudales, precipitaciones, niveles del agua) de los últimos 10 a 20 años.
- Infraestructuras de puente existentes sobre ríos o quebradas principales del distrito.
- Datos geoespaciales relevantes del distrito recopilados por entidades como SENAMHI, ANA o el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC).

### *3.6.2. Muestra*

Dado el carácter amplio y diversificado de la base de datos, se seleccionará una muestra intencionada y no probabilística, centrada en registros o estructuras que cumplan los requisitos de importancia técnica y disponibilidad de datos fiables.

**Criterios de selección de la muestra:**

- Puentes ubicados en zonas con historial de crecidas o vulnerabilidad hidráulica.
- Registros de caudales con al menos 10 años de datos continuos.
- Ubicación de estaciones hidrométricas o meteorológicas en las cercanías del área de estudio.
- Accesibilidad a datos de diseño estructural (memorias de cálculo, planos, expedientes técnicos).

**Ejemplo de muestra concreta:**

- Datos de caudal de 3 a 5 puntos críticos en ríos o quebradas del distrito (por ejemplo, el río llave si cruza Platería, u otras quebradas locales).
- Información de diseño de 2 a 3 puentes representativos (uno ya construido, otro en planificación, y un tercero afectado por variaciones climáticas recientes).

### 3.7. Técnicas e instrumentos de investigación

#### *3.7.1. Técnicas:*

**1. Técnicas de Recolección de Datos**

**a) Análisis Documental**

Se empleará esta técnica para recopilar información secundaria proveniente de fuentes oficiales y confiables como el SENAMHI, la ANA, el INEI, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, así como artículos científicos, informes técnicos, planos estructurales y expedientes de puentes. Esta técnica es clave para obtener series históricas de datos de caudal, precipitación y características topográficas.

**b) Minería de Datos (Data Mining)**

Es utilizada para el tratamiento, limpieza y depuración de grandes volúmenes de datos hidrológicos y climáticos históricos. Esta técnica permite identificar patrones relevantes y preparar los datos para los modelos de inteligencia artificial.

### *3.7.2. Instrumento:*

**a) Ficha de Registro Documental**

Es una matriz diseñada para recopilar datos técnicos relevantes de fuentes documentales: caudales máximos y mínimos, datos de precipitación acumulada, años de referencia, ubicación geográfica, etc. Se organiza por estación hidrométrica, año, mes y variable.

**b) Bases de Datos Hidrometeorológicos (en Excel o CSV)**

Archivos de datos numéricos obtenidos de estaciones climatológicas e hidrológicas del distrito. Estos serán utilizados como insumos para el entrenamiento de modelos de IA.

## 3.8. Confiablidad y Validez del instrumento

### *3.8.1. Confiabilidad*

Según (Hernández & Mendoza, 2018, p. 140), nos menciona que la coherencia y estabilidad de un instrumento a lo largo del tiempo y en diferentes condiciones al evaluar una variable o constructo se denomina fiabilidad. La investigación es esencial, ya que garantiza que el instrumento genera mediciones precisas y coherentes al demostrar el grado de consistencia de sus datos a lo largo de un uso frecuente.

# CAPÍTULO IV

# RESULTADOS

## 4.1. RESULTADOS OBTENIDOS

### *4.1.1. Información previa para el análisis del resultado*

Dentro de la evaluación hidrológica de campo se identificaron las características generales de la subcuenca del río Ccacca hasta el punto de interés, información que será de gran utilidad para el cálculo de caudales mediante las metodologías SCS y MRM, las cuales se detallan. Asimismo, se registró la huella máxima de agua en los bordes del cauce, evidenciando un tirante aproximado de hasta 2,00 m, dato que será posteriormente validado en el estudio hidráulico.

El área proyectada se ubica en las nacientes de la ***Unidad Hidrográfica 0173***. Al encontrarse en la zona de mesetas andinas, esta cuenca presenta una pendiente relativamente baja, lo que se traduce en velocidades de flujo del orden de hasta 4,0 m/s en eventos de máxima avenida. La zona se caracteriza por la presencia de pastizales e ichu, vegetación típica del área de proyecto, que favorece la infiltración de un porcentaje de las precipitaciones. En las riberas del río, próximas a la zona de intervención, se observa escasa cobertura vegetal, condición propia de la meseta altoandina.

El cauce del río presenta una composición heterogénea de gravas, arenas y limos, dispuestos de forma irregular a lo largo de su recorrido. Estos materiales corresponden al arrastre natural proveniente de zonas próximas al área del proyecto, condición característica de la dinámica fluvial altoandina. En determinadas zonas de la cuenca se identifican suelos de alta permeabilidad que permiten la infiltración de parte de las precipitaciones, mientras que en la parte alta predominan macizos rocosos que, al recibir el aporte pluvial, generan escorrentía superficial inmediata hacia las áreas de mayor pendiente, hasta confluir en el cauce principal.

**a) Ubicación Política**

| | | |
|---|---|---|
| Región | : | Puno |
| Provincia | : | Puno |
| Distrito | : | Platería |

**b) Ubicación Geográfica**

En coordenadas UTM Sistema WGS-84 –19S Eje de puente, se tienen las siguientes coordenadas.

**Tabla 1:**

*Coordenadas del Proyecto*

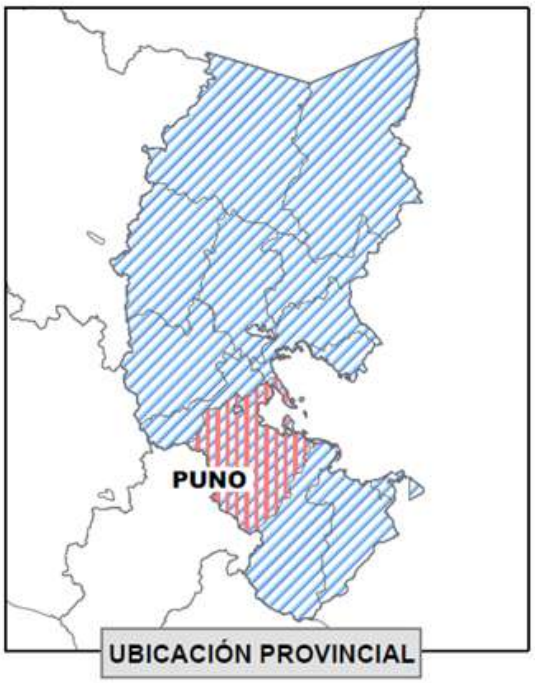
| NOMBRE DEL PUENTE | COORDENADAS UTM | | | | ALTITUD |
|---|---|---|---|---|---|
| | INICIO | | FINAL | | |
| PUENTE CCACCA | 415977.93 E | 8236135.31 N | 415987.04 E | 8236144.63 N | 3818 m.s.n.m. |

*Nota:* Elaboración propia

**Figura 1:**

*Ubicación Política: Departamental, Provincial y Distrital*










*Nota:* Elaboración propia

#### 4.1.1.1. Ubicación geográfica

La zona donde se encuentra ubicada en el Distrito de Platería, provincia de Puno, departamento de Puno, específicamente en las coordenadas UTM Norte *8236135.31*; Este *415977.93* en sus inicios y Norte *8236144.63*; Este *415987.04* al final de su longitud

(WGS-84-19S). La cota topográfica de la sub cuenca del Río Ccacca va desde 3822 msnm en su punto de desfogue hasta 4455 msnm en sus nacientes.

La escorrentía superficial que converge en el punto donde se construirá el Puente Ccacca, corresponde a la región hidrográfica del Titicaca específicamente a la Unidad Hidrográfica N°0173.

**Figura 2:**

*Zona de Influencia del Proyecto*




*Nota:* Google Earth

A continuación se muestra una tabla resúmen de la ubicación política, hidrográfica y geográfica:

**Tabla 2:**

*Ubicación política, hidrográfica y geográfica*

| UBICACIÓN POLÍTICA | UBICACIÓN HIDROGRÁFICA | UBICACIÓN GEOGRÁFICA |
|---|---|---|
| **Región:** Puno<br>**Provincia:** Puno<br>**Distrito:** Platería<br>**Localidad:** Acora | **Unidad Hidrográfica Nivel 1:** Región Hidrográfica del Titicaca<br>**Unidad Hidrográfica Nivel 2:** U. Hidrog. 01<br>**Unidad Hidrográfica Nivel 3:** U. Hidrog. 017<br>**Unidad Hidrográfica Nivel 4:** U. Hidrog. 0173 | **Inicio:** 415977.93E; 8236135.31 N<br>**Fin:** 415987.04 E; 8236144.63 N<br>**Datum:** UTM WGS 84, zona 19 S (UTM84-19S)<br>**Cartas Nacionales:** Ver tabla 3. |

*Nota:* Elaboración propia

#### 4.1.1.2. Modelos Digitales de Elevación (DEM)

Para la delimitación de la sub cuenca del Río Ccacca hasta el punto de interés preliminarmente se usó la carta nacional obtenida de la página web geogpsperu.com, el cual se encuentra en la zona sur 19 del sistema WGS-84.

Adicionalmente se usó la carta de los servidores internacionales, los cuales arrojan resultados suficientemente confiables para el cálculo de parámetros geomorfológicos. Los resultados obtenidos por ambos servidores mostraros valores bastantemente cercanos. El resumen de las fuentes se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 3:**

*Modelo Digital de Elevación (DEM) para la delimitación de la cuenca*

| SERVIDOR | NOMBRE | CÓDIGO | ZONA | CUADRÍCULA | HEMISFERIO |
|---|---|---|---|---|---|
| GeoGPSPerú | Acora | 32 - x | 19 | L | Sur |
| GeoGPSPerú | Ilave | 33 - x | 19 | L | Sur |
| Earth Explorer | Entity: SRTM344798W078V3 | | 19 | L | Sur |

*Nota:* Elaboración propia

#### 4.1.1.3. Geomorfología

La geomorfología de la subcuenca del río Ccacca, hasta el punto de interés, permitió identificar las características del relieve en sus zonas altas y medias, determinando la forma y pendiente que presenta el cauce natural, especialmente en el área de emplazamiento del puente. No se evidenciaron indicios de grandes depósitos aluviales, por lo que la superficie resulta favorable para el libre flujo del agua.

A lo largo de su curso natural, el agua desciende desde la zona alta a través de pequeños arroyos de trazado casi recto, transportando, principalmente en temporadas de crecida, sedimentos en suspensión que son depositados en la parte media de la cuenca y, en menor medida, en su desembocadura.

#### 4.1.1.4. Resumen de caracterización de la cuenca:

Según los datos calculados con anterioridad se tiene:

**Tabla 4:**

*Resumen de caracterización de la cuenca*

| DESCRIPCIÓN | ABR. | UND. | CANTIDAD | OBSERVACIÓN |
|---|---|---|---|---|
| ÁREA | **A** | **km2** | 195.65 | - |
| PERÍMETRO | **P** | **km** | 80.68 | - |
| LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL | **Lc** | **Km** | 21.66 | - |
| LARGO TOTAL DE LOS CURSOS DE AGUA | **Li** | **km** | 139.50 | - |
| LONGITUD AXIAL | **La** | **km** | 16.65 | - |
| DIÁM. DEL CIRCULO EQUIVALENTE | **D** | **km** | 15.78 | - |
| COEFICIENTE DE COMPACIDAD | **Kc** | **-** | 1.62 | Oval oblonga a rectangular oblonga |
| FACTOR DE FORMA | **Ff** | **-** | 0.42 | Ni alargada - ni ensanchada |
| ANCHO | **W** | **km** | 11.75 | - |
| NÚMERO DE ORDEN | **O** | **-** | 4 | - |
| CANTIDAD DE RÍOS DE 1er ORDEN | **n1** | **-** | 41 | - |
| CANTIDAD DE RÍOS DE 2do ORDEN | **n2** | | 14 | - |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| CANTIDAD DE RÍOS DE 3er ORDEN | **n3** | | 4 | - |
| CANTIDAD DE RÍOS DE 4to ORDEN | **n4** | **-** | 1 | - |
| RAZÓN DE BIFURCACIÓN 1 | **Rb1** | **-** | 2.93 | - |
| RAZÓN DE BIFURCACIÓN 2 | **Rb2** | | 3.50 | - |
| RAZÓN DE BIFURCACIÓN 3 | **Rb3** | | 4.00 | - |
| RAZÓN DE BIFURCACIÓN MEDIA | **Rbm** | **-** | 3.45 | No presenta homogeneidad |
| DENSIDAD DE DRENAJE | **Dd** | **1/km** | 0.71 | Cuenca lentamente drenada. |
| EXTENSIÓN MEDIA DE ESCURRIMIENTO SUPERF. | **Es** | **km** | 0.35 | - |
| ALTURA MEDIA DE LA CUENCA | **Hmed** | **m** | 3889.41 | - |
| ALTURA MÁXIMA DEL CAUCE | **HM** | **m** | 4455 | - |
| ALTURA MÍNIMA DEL CAUCE | **Hm** | **m** | 3822 | - |
| PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE PRINCIPAL | **S** | **m/m** | 0.0292 | Pendiente llana |
| PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA | **Sm** | **m/m** | 11.47% | En la cuenca, la pendiente es bastante llana, zona del altiplano |

### *4.1.2. Análisis de consistencia de datos de una serie hidrológica*

Antes de realizar los distintos modelos hidrológicos y metodologías para la determinación del caudal en máximas avenidas, se realizaron ajustes probabilísticos para determinar la precipitación para los periodos de retorno requeridos y con ello determinar los caudales de diseño. En el presente estudio se determinaron los caudales con el modelo HEC-HMS a partir de hietogramas generadas de la Estación Puno.

#### 4.1.2.1. Análisis doble masa.

Este análisis se utiliza para tener una cierta confiabilidad en la información, así como también, para analizar la consistencia de los datos relacionado a los errores que pueden producirse durante la obtención de los mismos, y no para una corrección a partir de la recta doble masa.

El diagrama doble masa se obtiene ploteando los valores acumulados de las precipitaciones máximas para 24 horas. El análisis doble masa propiamente dicho,

consiste en conocer mediante los quiebres que se presentan en los diagramas, las causas de los fenómenos naturales, o si estos han sido ocasionados por errores sistemáticos.

En este último caso, permite determinar el rango de los periodos dudosos y confiables para la estación en estudio, la cual se deberá corregir utilizando ciertos criterios estadísticos.

#### 4.1.2.2. Análisis Estadístico

Después de obtener los gráficos para el análisis visual y gráfica de doble masa, los períodos de posible corrección, y los períodos de datos que se mantendrán con sus valores originales, se procede al análisis estadístico de saltos, tanto en la media como en la desviación estándar.

#### 4.1.2.3. Análisis de Saltos

##### *4.1.2.3.1. Consistencia de la media*

El análisis estadístico consiste en probar, mediante la prueba t (prueba de hipótesis), si los valores medios (x1, x2) de las submuestras, son estadísticamente iguales o diferentes con una probabilidad del 95% o con 5% de nivel de significancia, de la siguiente manera:

Ecuación 1: Cálculo de las medias y de la desviación estándar para las submuestras.

$$\overline{x_1} = \frac{1}{n_1}\sum_{i=1}^{n_1} x_i \quad ; \quad S_1(x) = \left[\frac{1}{n_1 - 1}\sum_{i=1}^{n_1}\left(x_i - \overline{x_1}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\overline{x_2} = \frac{1}{n_2}\sum_{j=1}^{n_2} x_j \quad ; \quad S_2(x) = \left[\frac{1}{n_2 - 1}\sum_{j=1}^{n_2}\left(x_j - \overline{x_2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

xi: valores de la serie del período 1

xj: valores de la serie del período 2

$\bar{x}_1$: $\bar{x}_2$ : media de los períodos 1 y 2 respectivamente.

S1(x), S1(x): desviación estándar de los períodos 1 y 2 respectivamente.

n: tamaño de la muestra

n1 y n2: tamaño de las submuestras

n=n1+n2

Cálculo del (tc) calculado según:

$$t_c = \frac{(\overline{x_1} - \overline{x_2}) - (\mu_1 - \mu_2)}{S_{\bar{d}}}$$

Ecuación 2: Cálculo del (tc) calculado

Donde:

$\mu 1 - \mu 2 = 0$ (la hipótesis es que las medias son iguales)

Quedando:

$$t_c = \frac{\overline{x_1} - \overline{x_2}}{S_{\bar{d}}}$$

Ecuación 3: Cálculo del (tc) en relación a las medias

Además:

$$S_p = \left[\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}\right]^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 4: Desviación de las diferencias de los promedios

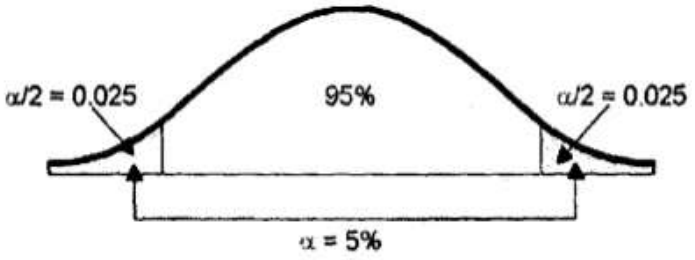
$$S_{\bar{d}} = S_p\left[\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right]^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 5: Desviación estándar ponderada

Cálculo del t tabular tt:

El valor crítico de t se obtiene de la tabla de t de Student, con una probabilidad al 95% o con un nivel de significación del 5%, es decir con a/2=0.025 y con grados de libertad y=n1+n2-2

Ilustración 1: Valor crítico para el t de Student




Comparación del tc con el tt:

*Si |tc| ≤ tt (95%)* → $\bar{x}_1 = \bar{x}_2$ *, estadísticamente. En este caso, siendo las medias estadísticamente iguales, no se debe realizar procesos de corrección.*

*Si |tc| > tt (95%)* → $\bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$ *, estadísticamente. En este caso, siendo las medias estadísticamente diferentes, se debe realizar procesos de corrección.*

***4.1.2.3.2. Modelo HEC-HMS***

El modelo HEC-HMS es un programa computacional del sistema de modelamiento hidrológico del cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos de Norteamérica.

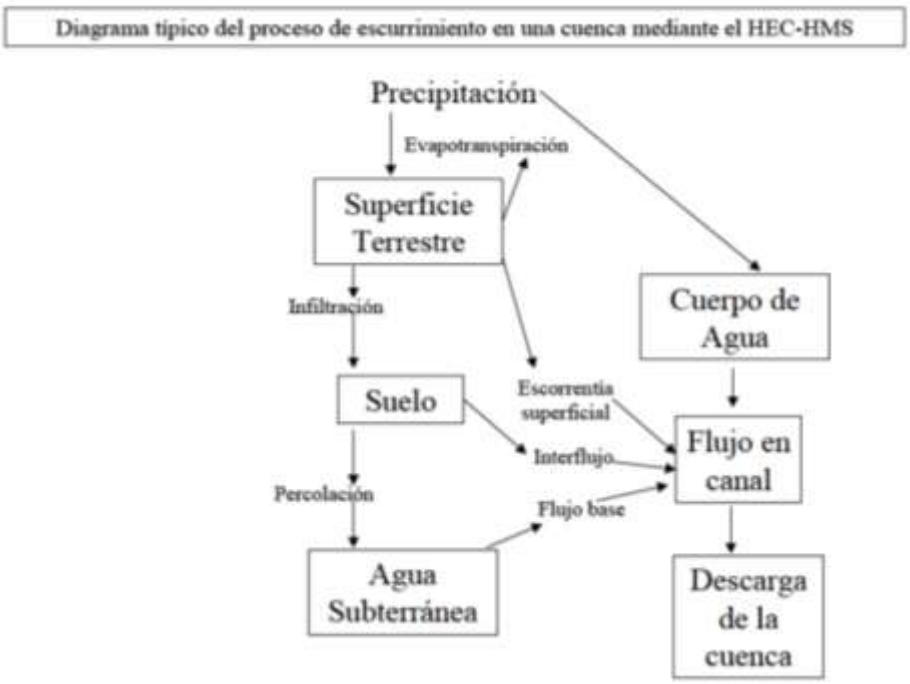
Para el uso y aplicación de este modelo, se debe tener la siguiente información:

Características de la precipitación, la intensidad se obtiene de las curvas I-D-F (Intensidad, duración, frecuencia) o puede ajustarse utilizando los procedimientos mencionados anteriormente. Es importante señalar que las precipitaciones parciales deben introducirse en intervalos fijos.

Características de la cuenca (Área, forma, Longitud del cauce principal, centro de gravedad, pendiente media del terreno, cobertura vegetal, tipo de prácticas de pastoreo, tipos de precipitación, etc.).

**Figura 3:**

*Diagrama típico de proceso de escurrimiento en HEC-HMS*




**4.1.3.3. Método Racional Modificado (Mrm).**

Es el método racional según la formulación propuesta por Témez adaptada originalmente para las condiciones climáticas, permite estimar los caudales pico en cuencas de drenaje natural con áreas menores de 770 km2 y con tiempos de concentración entre 0.25 y 24 horas, mediante la siguiente fórmula:

$$Q = 0.278CIAK$$

Ecuación 6: Descarga máxima de diseño por MRM

Donde:

Q: Descarga máxima de diseño (m3/s)

C: Coeficiente de escorrentía para el intervalo en el que se produce I.

I: Intensidad de precipitación máxima horaria (mm/h)

A: Área de la cuenca (Km2)

K: Coeficiente de Uniformidad

Las fórmulas que definen los factores de la fórmula general, son los siguientes:

Tiempo de Concentración (Tc)

$$\boldsymbol{T_C = 0.3 \times (\frac{L}{S^{0.25}})^{0.76}}$$

Ecuación 7: Tiempo de concentración para MRM

Donde:

L= Longitud del cauce mayor (km)

S= Pendiente promedio del cauce mayor (m/m)

Coeficiente de Uniformidad

$$K = 1 + \frac{T_C^{1.25}}{T_C^{1.25} + 14}$$

Ecuación 8: Coeficiente de Uniformidad para MRM

Donde:

Tc= Tiempo de concentración (horas)

Coeficiente de simultaneidad o Factor reductor (ka)

$$\boldsymbol{k_A = 1 - \log_{10} \frac{A}{15}}$$

Ecuación 9: Coeficiente de simultaneidad o Factor reductor

Donde:

A: Área de la cuenca (Km2)

Precipitación máxima corregida sobre la cuenca (P)

$$P = k_A \times P_d$$

Ecuación 10: Precipitación máxima corregida sobre la cuenca para MRM

Donde:

kA: Factor reductor

Pd: Precipitación máxima diaria (mm)

Intensidad de Precipitación (I)

$$I = \left(\frac{P}{24}\right) \times (11)^{\frac{28^{0.1} - T_C^{0.1}}{28^{0.1} - 1}}$$

Ecuación 11: Intensidad de precipitación para MRM

Donde:

P: Precipitación máxima corregida (mm)

Tc: Tiempo de concentración (horas)

Coeficiente de Escorrentía (C)

$$C = \frac{(P_d - P_o) \times (P_d + 23 \times P_o)}{(P_d + 11 \times P_o)^2}$$

Ecuación 12: Coeficiente de Escorrentía para MRM

Donde:

Pd: Precipitación máxima diaria (mm)

Po: Umbral de escorrentía = (5000/CN) - 50

CN: Número de curva

***4.1.2.3.3. Tiempo de concentración***

Es el tiempo requerido por una gota para recorrer desde el punto hidráulicamente más lejano hasta la salida de la cuenca. Transcurrido el tiempo de concentración se considera que toda la cuenca contribuye a la salida. Como existe una relación inversa entre la duración de una tormenta y su intensidad (a mayor duración disminuye la intensidad), entonces se asume que la duración crítica es igual al tiempo de concentración tc, según la disponibilidad de información de la cuenca se proponen los siguientes métodos:

Según lo recomendado por el Ministerio de Transportes y comunicaciones:

**Método Kirpich (1940)**

Desarrollada a partir de información del SCS en siete cuencas rurales de Tennessee con canales bien definidos y pendientes empinadas (3 a 10%); para flujo superficial en superficies de concreto o asfalto se debe multiplicar tc por 0.4; para

canales de concreto se debe multiplicar por 0.2; no se debe hacer ningún ajuste para flujo superficial en suelo descubierto o para flujo en cunetas.

$$t_c = 0.01947 \times \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

Ecuación 13: Fórmula de Kirpich

Donde:

tc : Tiempo de concentración (hr)

L : Longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida (m)

S : pendiente promedio del cauce (m/m)

**Método de California Culverts Practice (1942)**

Esencialmente es la ecuación de Kirpich; desarrollada para pequeñas cuencas montañosas en California.

$$t_c = 0.0195 \times (\frac{L^3}{H})^{0.385}$$

Ecuación 14: Fórmula de California Culverts Practice

Donde:

tc : Tiempo de concentración (hr)

L : Longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida (m)

H : Diferencia de altura entre el punto más alto del cauce principal y la salida (m/m)

**Método Racional Modificado, o ecuación de Témez**

Tiempo de concentración estimado para el método Racional modificado

$$t_C = 0.3 \times (\frac{L}{S^{0.25}})^{0.76}$$

Ecuación 15: Tiempo de concentración para MRM

Donde:

tc : Tiempo de concentración (hr)

L : Longitud del cauce mayor (km)

S : Pendiente promedio de la cuenca (m/m)

Según otros métodos:

Método de Bransby-Williams

Tiempo de concentración estimado para el método Racional modificado

$$t_C = \frac{L}{1.5 \times D} \sqrt[5]{\frac{M^2}{F}}$$

Ecuación 16: Fórmula de Bransby-Williams

Donde:

tc : Tiempo de concentración (hr)

L : Longitud del cauce mayor (km)

D : Diámetro del círculo de área equivalente al área de la cuenca (km)

M : Área de la cuenca (km2)

F : Pendiente media del cauce principal (%)

### *4.1.3. Análisis Hidrológico*

#### 4.1.3.1. Información pluviométrica

La información hidrológica utilizada en el estudio es la hidrometeorológica, de la precipitación total mensual, precipitación máxima de 24 horas, de 25 años de registro histórico (1999 – 2023) de la Estación Puno, que se encuentra en el distrito de Puno, provincia de Puno, departamento de Puno (Latitud: 15°49'S; Longitud: 70°00' W), cercana a la zona de influencia del proyecto y con una altitud de 3825 m.s.n.m. que es muy cercano a la altura en donde se ubica el puente (3820 m.s.n.m.).

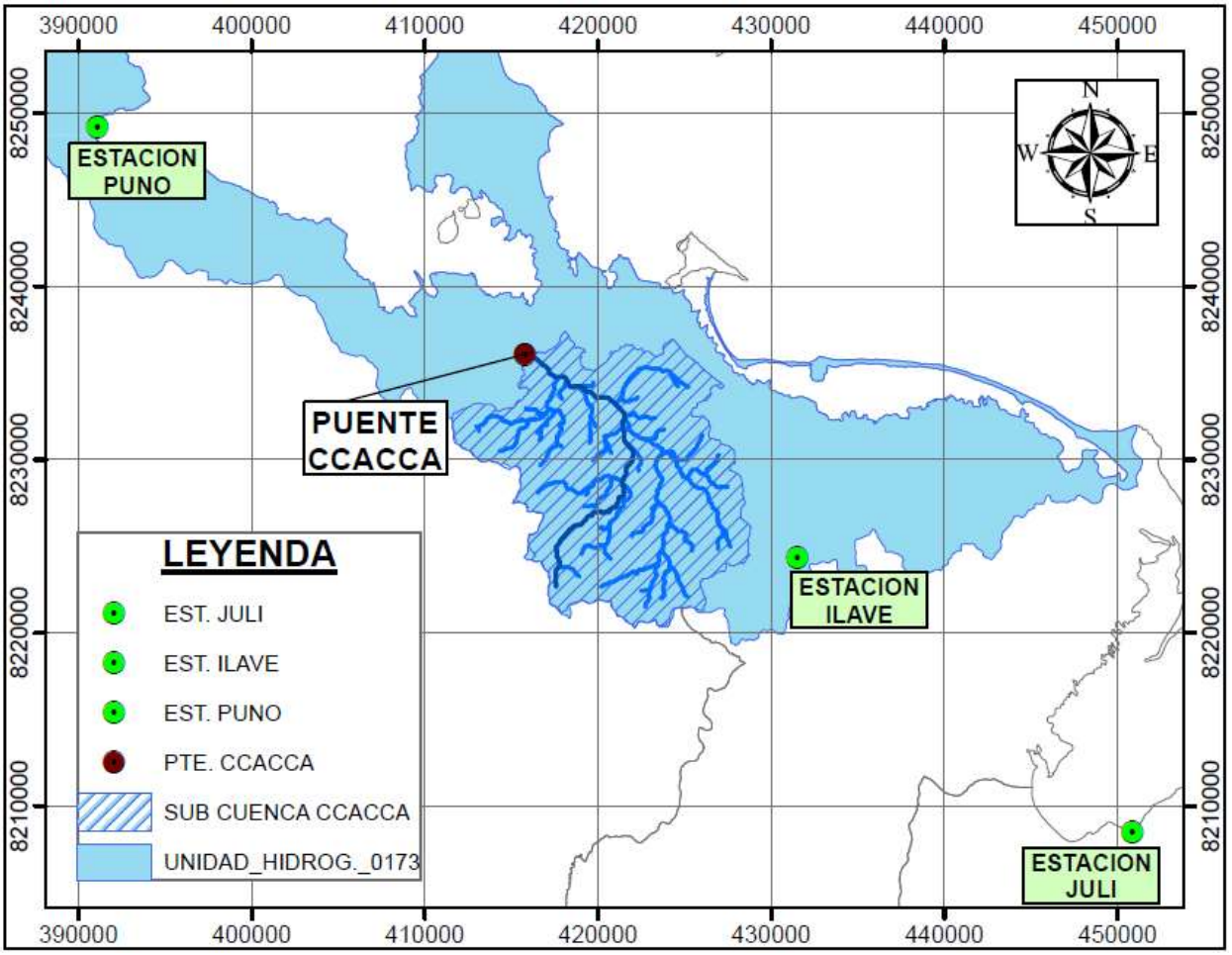
En la figura 4, se muestra la nube de estaciones cercanas a la zona de influencia del proyecto, en el cual la estación más cercana es la Estación Puno y las estaciones vecinas son la Estación Ilave y Juli, estas estaciones tienen alturas muy cercanas a la estación de análisis, por lo que serán de uso muy importante para realizar un análisis de curva masa de las mismas.

La información del registro histórico de la precipitación pluviométrica utilizada es de fuente oficial de SENAMHI, el cual se indica en el cuadro correspondiente, el cual se

ajustará previamente a las funciones de distribución para eventos máximos extraordinarios.

**Figura 4:**

*Ubicación de estaciones cercanas al proyecto*




*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 5:**

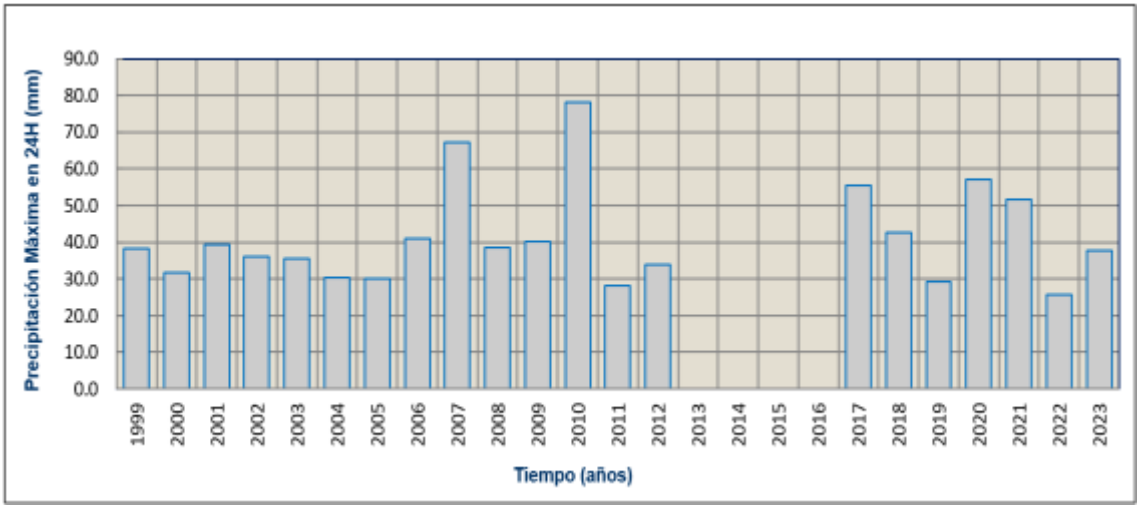
*Precipitaciones máximas 24 horas de la Estación Puno*

| AÑO | ENE. | FEB. | MAR. | ABR. | MAY. | JUN. | JUL. | AGO. | SET. | OCT. | NOV. | DIC. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1999 | 36.10 | 27.50 | 36.00 | 33.50 | 7.50 | 0.00 | 0.00 | 1.50 | 5.60 | 38.20 | 10.80 | 11.40 |
| 2000 | 19.00 | 31.60 | 13.50 | 22.20 | 0.40 | 1.40 | 3.10 | 8.00 | 6.20 | 31.40 | 6.60 | 14.90 |
| 2001 | 25.70 | 37.70 | 39.40 | 17.00 | 8.40 | 2.20 | 0.00 | 7.00 | 8.40 | 14.00 | 23.00 | 23.30 |
| 2002 | 36.10 | 23.70 | 22.80 | 18.70 | 12.00 | 9.60 | 12.80 | 18.40 | 4.20 | 18.20 | 11.00 | 29.00 |
| 2003 | 35.60 | 23.20 | 12.10 | 28.00 | 14.70 | 4.80 | 0.20 | 4.00 | 24.80 | 11.10 | 2.90 | 26.20 |
| 2004 | 27.80 | 24.70 | 30.40 | 9.20 | 5.40 | 0.00 | 3.60 | 25.90 | 12.00 | 2.10 | S/D | 15.60 |
| 2005 | 30.10 | 22.20 | 26.80 | 16.90 | 0.40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 3.00 | 18.00 | 24.40 | 17.60 |
| 2006 | 40.90 | 11.90 | 28.70 | 13.00 | 0.90 | 0.00 | 0.00 | 0.60 | 11.00 | 9.40 | 15.80 | 28.30 |
| 2007 | 23.80 | 38.80 | 67.20 | 15.70 | 7.20 | 0.00 | 2.90 | 1.60 | 13.50 | 40.20 | 11.70 | 11.60 |
| 2008 | 38.50 | 18.00 | 27.00 | 2.70 | 6.20 | 1.40 | 0.20 | 0.80 | 1.30 | 34.60 | 9.50 | 16.60 |
| 2009 | 31.00 | 16.00 | 40.20 | 16.20 | 0.40 | 0.00 | 1.80 | 0.00 | 5.20 | 18.40 | 24.20 | 9.90 |
| 2010 | 23.60 | 78.20 | 12.40 | 7.20 | 10.60 | 0.00 | 0.00 | 7.10 | 1.50 | 8.60 | 5.20 | 21.00 |
| 2011 | 25.40 | 28.20 | 14.80 | 14.20 | 2.60 | 0.00 | 5.30 | 0.20 | 17.30 | 15.60 | S/D | 20.60 |
| 2012 | 28.70 | 34.00 | 27.50 | 15.40 | 0.00 | 0.20 | 0.00 | 5.60 | 6.80 | 4.50 | S/D | 18.50 |
| 2013 | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D |
| 2014 | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D |
| 2015 | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D |
| 2016 | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D |
| 2017 | 55.50 | 25.60 | 38.40 | 11.40 | 10.50 | 0.00 | 1.60 | 0.00 | 20.40 | 29.40 | 11.00 | 25.00 |
| 2018 | 42.70 | 22.80 | 22.50 | 18.90 | 7.10 | 10.60 | 18.70 | 0.00 | 2.60 | 24.30 | S/D | 25.00 |
| 2019 | 22.20 | 15.90 | 8.10 | 29.20 | 7.60 | 1.10 | 6.30 | S/D | S/D | S/D | S/D | 15.40 |
| 2020 | 19.60 | 57.20 | 13.50 | S/D | S/D | S/D | 0.00 | 0.00 | 5.60 | 11.50 | 7.20 | 19.30 |
| 2021 | 37.20 | 0.00 | 51.50 | 17.40 | 8.00 | 0.00 | 0.10 | 2.80 | 11.20 | 12.50 | 6.00 | 27.10 |
| 2022 | 25.60 | 20.80 | 19.70 | 7.00 | 4.00 | 0.00 | 2.60 | 6.40 | 1.00 | S/D | 2.80 | 12.80 |
| 2023 | 0.00 | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | 1.70 | 0.00 | 4.00 | 37.80 | 15.10 |

De la tabla 5 y la Figura 4, se observa que, en el año 2023 se tuvo el mayor registro de precipitación respecto al resto de años (68.20 mm respectivamente), de lo que preliminarmente podría considerarse que estos datos son anómalos, por lo que se procederá a realizar el análisis de consistencia de la información cruda obtenida de Senamhi, en el cual para el análisis de Doble Masa se usarán los datos recogidos de estaciones vecinas y adicionalmente se realizará el test de datos dudosos de acuerdo al Water Resources Council (1981).

**Figura 5:**

*Histograma del registro Histórico de la Estación Puno*




*Nota:* Elaboración propia

#### 4.1.3.2. Análisis de doble masa

Para el presente análisis, nos apoyaremos de dos estaciones vecinas pertenecientes a la Unidad Hidrográfica del Amazonas y muy cercanas a la zona del proyecto, en donde la Estación Puno es la más cercana a la cuenca de estudio. Los datos de precipitación de las estaciones vecinas fueron tomadas directamente de la información cruda del SNIRH – ANA (https://snirh.ana.gob.pe/), además de la información de la página de SENAMHI, mientras que las precipitaciones de la Estación Puno cuentan con certificación de SENAMHI, adjunto en el presente estudio.

**Tabla 6:**

*Datos de precipitación anual acumulada de la Estación Puno y estaciones vecinas*

| AÑO | | ESTACIONES | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | | 2 | | 3 | | PROMEDIO | |
| | | PUNO | | ILAVE | | JULI | | | |
| | | 3810 | | 3874 | | 3830 | | | |
| | | ANUAL | ACUM | ANUAL | ACUM | ANUAL | ACUM | ANUAL | ACUM |
| 1 | 1999 | 208.10 | 208.10 | 187.20 | 187.20 | 246.30 | 246.30 | 213.87 | 213.87 |
| 2 | 2000 | 158.30 | 366.40 | 141.60 | 328.80 | 143.40 | 389.70 | 147.77 | 361.63 |
| 3 | 2001 | 206.10 | 572.50 | 200.50 | 529.30 | 204.80 | 594.50 | 203.80 | 565.43 |
| 4 | 2002 | 216.50 | 789.00 | 212.40 | 741.70 | 222.00 | 816.50 | 216.97 | 782.40 |
| 5 | 2003 | 187.60 | 976.60 | 128.90 | 870.60 | 191.20 | 1007.70 | 169.23 | 951.63 |

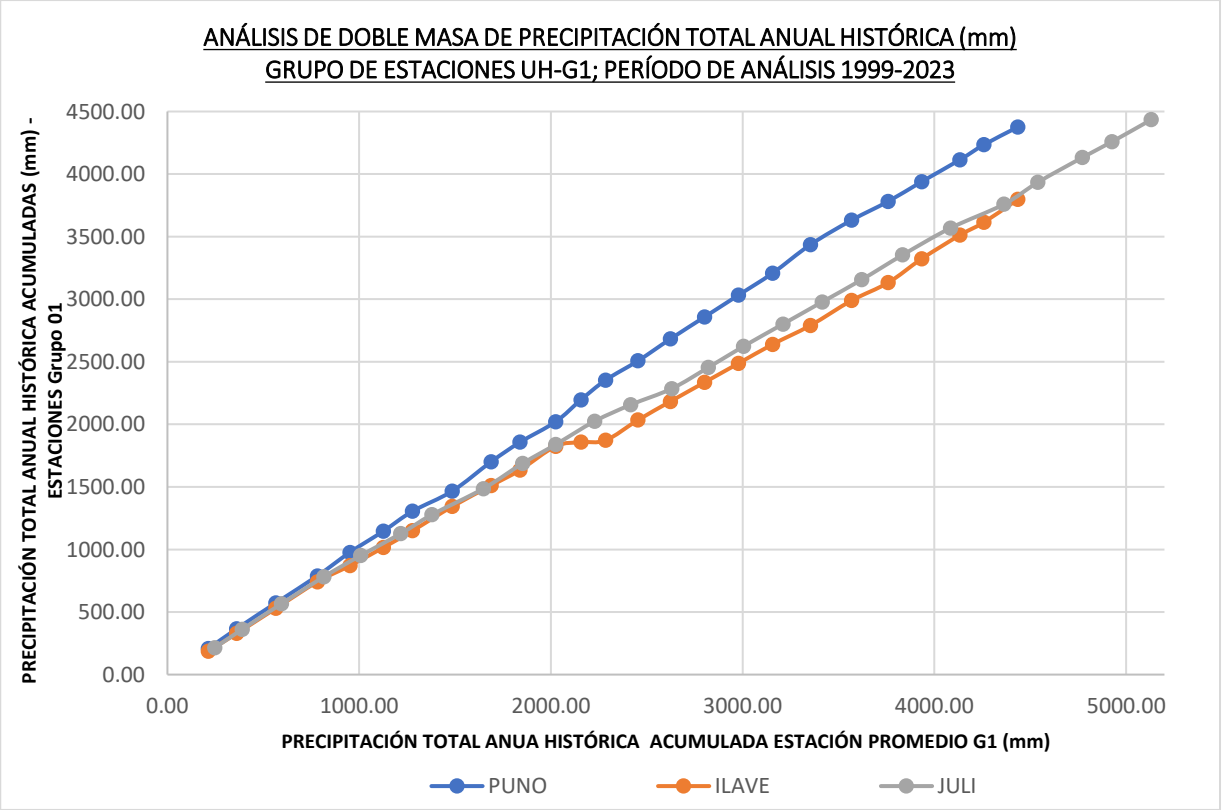
| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **6** | **2004** | 169.82 | 1146.42 | 144.90 | 1015.50 | 208.90 | 1216.60 | 174.54 | 1126.17 |
| **7** | **2005** | 159.40 | 1305.82 | 134.21 | 1149.71 | 163.50 | 1380.10 | 152.37 | 1278.54 |
| **8** | **2006** | 160.50 | 1466.32 | 193.80 | 1343.51 | 267.30 | 1647.40 | 207.20 | 1485.74 |
| **9** | **2007** | 234.20 | 1700.52 | 166.80 | 1510.31 | 205.30 | 1852.70 | 202.10 | 1687.84 |
| **10** | **2008** | 156.80 | 1857.32 | 124.70 | 1635.01 | 172.60 | 2025.30 | 151.37 | 1839.21 |
| **11** | **2009** | 163.30 | 2020.62 | 190.00 | 1825.01 | 202.80 | 2228.10 | 185.37 | 2024.58 |
| **12** | **2010** | 175.40 | 2196.02 | 32.50 | 1857.51 | 188.61 | 2416.71 | 132.17 | 2156.75 |
| **13** | **2011** | 157.32 | 2353.34 | 14.70 | 1872.21 | 213.30 | 2630.01 | 128.44 | 2285.19 |
| **14** | **2012** | 154.32 | 2507.66 | 162.10 | 2034.31 | 190.80 | 2820.81 | 169.07 | 2454.26 |
| **15** | **2013** | 175.03 | 2682.69 | 148.90 | 2183.21 | 183.80 | 3004.61 | 169.24 | 2623.50 |
| **16** | **2014** | 175.03 | 2857.72 | 151.91 | 2335.12 | 205.25 | 3209.86 | 177.40 | 2800.90 |
| **17** | **2015** | 175.03 | 3032.75 | 151.91 | 2487.03 | 205.25 | 3415.11 | 177.40 | 2978.30 |
| **18** | **2016** | 175.03 | 3207.78 | 151.91 | 2638.94 | 205.25 | 3620.36 | 177.40 | 3155.69 |
| **19** | **2017** | 228.80 | 3436.58 | 151.91 | 2790.85 | 214.10 | 3834.46 | 198.27 | 3353.96 |
| **20** | **2018** | 195.20 | 3631.78 | 198.90 | 2989.75 | 249.40 | 4083.86 | 214.50 | 3568.46 |
| **21** | **2019** | 149.88 | 3781.66 | 142.41 | 3132.16 | 279.30 | 4363.16 | 190.53 | 3758.99 |
| **22** | **2020** | 158.06 | 3939.72 | 191.09 | 3323.25 | 176.13 | 4539.29 | 175.09 | 3934.09 |
| **23** | **2021** | 173.80 | 4113.52 | 188.50 | 3511.75 | 232.70 | 4771.99 | 198.33 | 4132.42 |
| **24** | **2022** | 120.91 | 4234.43 | 102.80 | 3614.55 | 153.94 | 4925.93 | 125.88 | 4258.30 |
| **25** | **2023** | 141.24 | 4375.67 | 183.20 | 3797.75 | 205.25 | 5131.18 | 176.56 | 4434.87 |

Nótese que, para los años faltantes, estos al no tener suficiente cantidad de datos fueron descartados (algunos solo cuentan con menos de 4 registros), mientras que para meses faltantes fueron completados con los promedios mensuales de todo el registro, esta metodología se repitió para las otras dos estaciones (data anexada en información digital).

De la tabla se desprende el siguiente gráfico para darnos mayor visión en el análisis de saltos y así escoger una estación base, entonces se tiene:

**Figura 6:**

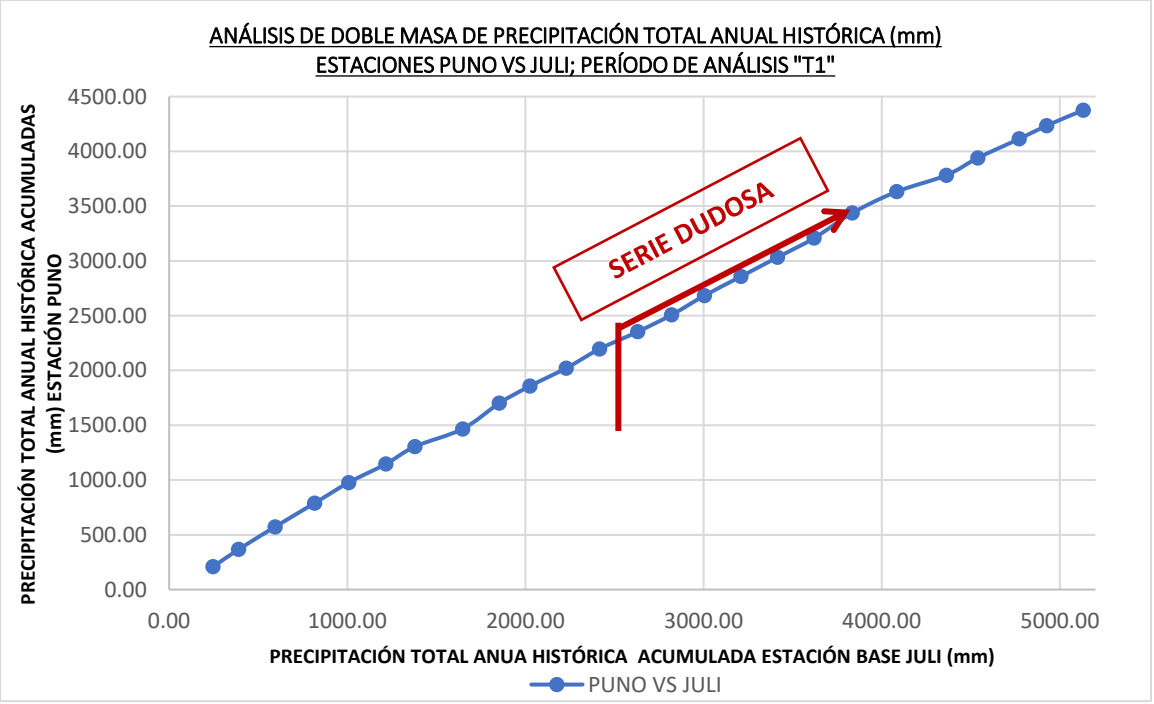
*Análisis de doble masa Estación Puno y estaciones vecinas*




De la gráfica anterior se observa que la estación Puno tiene un mayor comportamiento lineal, mientras que la estación Juli presenta un acumulado mucho mayor a las otras dos. En tanto, para el presente proyecto la estación Juli será elegida como la estación base al tener una precipitación acumulada mucho más cercana a la estación de análisis, por lo que se tiene:

**Figura 7:**

*Estación Puno VS Estación Juli*




A partir de la gráfica anterior podemos observar una serie de periodos dudosos, los cuales se encuentran en el período de 1999 - 2010, mientras que la serie confiable se encuentra en el período 2011 - 2023, a continuación, se muestra las tablas de los análisis respectivos, teniendo:

- Serie de períodos dudosos: 1999- 2010
- Serie de períodos confiables: 2011 - 2023

**Tabla 7:**

*Análisis Estadístico mediante las pruebas de "t" de Studen y "F" de Fisher Estación Puno*

E. PUNO: Precipitación total anual histórica completada; periodo de análisis: 1999 - 2023
Análisis estadístico: Pruebas de "t" de Student y "F" de Fisher

| | Años | Precipitación total anual (mm) | Periodos muestrales | Precipitación total anual corregida (mm) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1999 | 208.10 | | |
| 2 | 2000 | 158.30 | | |
| 3 | 2001 | 206.10 | | |
| 4 | 2002 | 216.50 | | |
| 5 | 2003 | 187.60 | Periodo 1 : "CONFIABLE" | |
| 6 | 2004 | 169.82 | 1999 - 2012 | |
| 7 | 2005 | 159.40 | Longitud muestral : N1 = 12 | |
| 8 | 2006 | 160.50 | | |
| 9 | 2007 | 234.20 | Media del período : X1 = 183.0 | |
| 10 | 2008 | 156.80 | | |
| 11 | 2009 | 163.30 | Desviación Std. : S1 = 26.8 | |
| 12 | 2010 | 175.40 | | |
| 13 | 2011 | 157.32 | | |
| 14 | 2012 | 154.32 | | |
| 15 | 2013 | 175.03 | | |
| 16 | 2014 | 175.03 | Periodo 2 : "DUDOSO" | |
| 17 | 2015 | 175.03 | 2013 - 2023 | |
| 18 | 2016 | 175.03 | | |
| 19 | 2017 | 228.80 | Longitud muestral : N2 = 13 | |
| 20 | 2018 | 195.20 | | |
| 21 | 2019 | 149.88 | Media del período : X2 = 167.7 | |
| 22 | 2020 | 158.06 | | |
| 23 | 2021 | 173.80 | Desviación Std. : S2 = 26.3 | |
| 24 | 2022 | 120.91 | | |
| 25 | 2023 | 141.24 | | |

**Prueba "T" de Student**

**Criterio : Si Tt > Tc : Homogeneidad; Si Tt < Tc : No Homogeneidad**

Tc = 1.442 Grados de Libertad = 23
Tt = 2.069 Tc < Tt α = 0.95

**Las medias X1 y X2 son Estadísticamente Homogéneas**

**No corregir la precipitación en la Media**

**Prueba "F" de Fisher**

**Criterio : Si Ft > Fc : Homogeneidad; Si Ft < Fc : No Homogeneidad**

Fc = 1.036 Grados de Libertad : M1 11
Ft = 2.717 Fc < Ft M2 = 12

**Las desviaciones standard S1 y S2 son Estadísticamente Homogéneas**

**No corregir la precipitación en la Desviación Estándar**

**Procedimiento de corrección**

**Xi = ( ( (Xo - X1) / S1 ) * S2 ) + X2**

Xi = valor corregido; Xo = valor por corregir; X1 y S1 = media y desviación estándar del periodo dudoso; X2 y S2 = media y desviación estándar del periodo confiable

En la tabla anterior se muestra el análisis estadístico mediante los parámetros mencionados, de lo cual se concluye que no es necesario corregir las precipitaciones en

el período dudoso. Los valores registrados son bastante confiables, finalmente a fin de verificar su registro se realizará un análisis de tendencia en la media con la prueba del "t" de Student, por lo que se tiene:

**Tabla 8:**

*Análisis de la tendencia en la Media por saltos – Estación Puno*

EST. PUNO - ANÁLISIS DE LA TENDENCIA EN LA MEDIA DE LA PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL HISTÓRICA CORREGIDA POR SALTOS

| | AÑOS | TIEMPO ti (años) | PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL Yi (mm) | TIEMPO * PRECIPITACIÓN ti * Yi (mm*año) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1999 | 1 | 208.1 | 208.1 |
| 2 | 2000 | 2 | 158.3 | 316.6 |
| 3 | 2001 | 3 | 206.1 | 618.3 |
| 4 | 2002 | 4 | 216.5 | 866.0 |
| 5 | 2003 | 5 | 187.6 | 938.0 |
| 6 | 2004 | 6 | 169.8 | 1,018.9 |
| 7 | 2005 | 7 | 159.4 | 1,115.8 |
| 8 | 2006 | 8 | 160.5 | 1,284.0 |
| 9 | 2007 | 9 | 234.2 | 2,107.8 |
| 10 | 2008 | 10 | 156.8 | 1,568.0 |
| 11 | 2009 | 11 | 163.3 | 1,796.3 |
| 12 | 2010 | 12 | 175.4 | 2,104.8 |
| 13 | 2011 | 13 | 157.3 | 2,045.2 |
| 14 | 2012 | 14 | 154.3 | 2,160.5 |
| 15 | 2013 | 15 | 175.0 | 2,625.5 |
| 16 | 2014 | 16 | 175.0 | 2,800.5 |
| 17 | 2015 | 17 | 175.0 | 2,975.5 |
| 18 | 2016 | 18 | 175.0 | 3,150.5 |
| 19 | 2017 | 19 | 228.8 | 4,347.2 |
| 20 | 2018 | 20 | 195.2 | 3,904.0 |
| 21 | 2019 | 21 | 149.9 | 3,147.5 |
| 22 | 2020 | 22 | 158.1 | 3,477.3 |
| 23 | 2021 | 23 | 173.8 | 3,997.4 |
| 24 | 2022 | 24 | 120.9 | 2,901.8 |
| 25 | 2023 | 25 | 141.2 | 3,531.1 |

ANÁLISIS DE LA TENDENCIA EN LA MEDIA
PRUEBA ESTADÍSTICA DE "t" DE STUDENT

| Parámetro | Media | Desv. Std. | Coeficiente de Correlación : R | |
|---|---|---|---|---|
| Precipitación (Y) : Yi | Yx = 175.03 | Yds = 27.16 | R = ( Yi * ti x - Yx * tx ) / (Yds * tds) | R = -0.38 |
| Tiempo (t) : ti | tx = 13.00 | tds = 7.36 | Valor de T calculado (Tc) y T tabular (Tt) | |
| Producto Y * t : Yi * ti | Yi*ti x= 2,200.26 | | Tc = R ((n - 2 )^0.5) / ((1 - R)^0.5) | Tc = -1.94 |
| N° de Datos : n | n = | 25 | Tt con: a = 0.05; G.L. = n-2 = 23 (Tabla distribución acumulativa "t") | Tt = 2.06 |

CONDICIÓN

SI Tt > Tc : La Tendencia en la Media de la Precipitación Total Anual es No Significativa

Si Tt < Tc : La Tendencia en la Media de la Precipitación Total Anual es Significativa

RESULTADOS

La Tendencia en la Media de la Precipitación Total Anual es No Significativa

Al tener que la tendencia de la precipitación total anual es no significativa no se corregirán los valores, por lo que los valores de la tabla 10 se mantendrán a excepción de los registros faltantes, en donde este será completado con el promedio anual tal como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 9:**

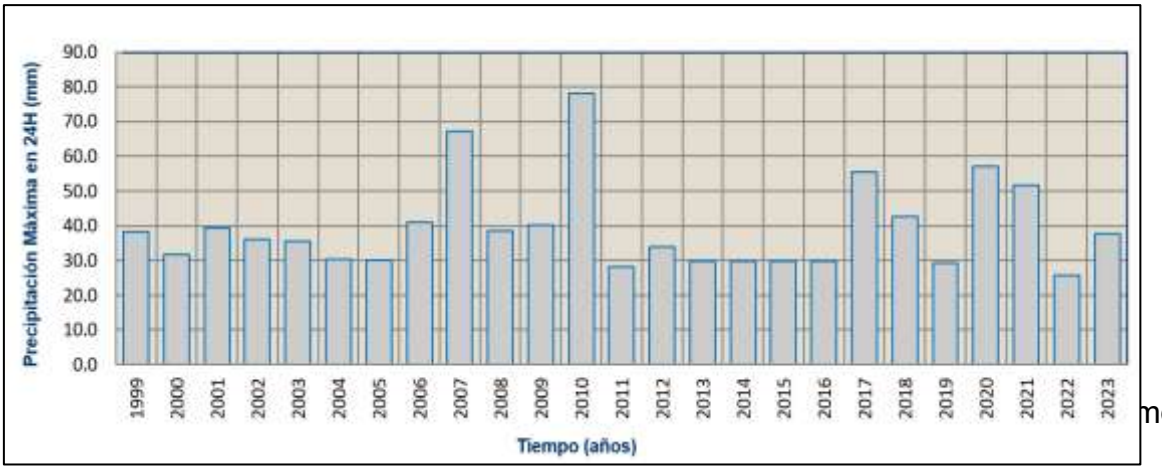
*Precipitaciones mensuales máximas corregidas - Estación Puno*

| AÑO | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SET | OCT | NOV | DIC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1999 | 36.10 | 27.50 | 36.00 | 33.50 | 7.50 | 0.00 | 0.00 | 1.50 | 5.60 | 38.20 | 10.80 | 11.40 |
| 2000 | 19.00 | 31.60 | 13.50 | 22.20 | 0.40 | 1.40 | 3.10 | 8.00 | 6.20 | 31.40 | 6.60 | 14.90 |
| 2001 | 25.70 | 37.70 | 39.40 | 17.00 | 8.40 | 2.20 | 0.00 | 7.00 | 8.40 | 14.00 | 23.00 | 23.30 |
| 2002 | 36.10 | 23.70 | 22.80 | 18.70 | 12.00 | 9.60 | 12.80 | 18.40 | 4.20 | 18.20 | 11.00 | 29.00 |
| 2003 | 35.60 | 23.20 | 12.10 | 28.00 | 14.70 | 4.80 | 0.20 | 4.00 | 24.80 | 11.10 | 2.90 | 26.20 |
| 2004 | 27.80 | 24.70 | 30.40 | 9.20 | 5.40 | 0.00 | 3.60 | 25.90 | 12.00 | 2.10 | 13.12 | 15.60 |
| 2005 | 30.10 | 22.20 | 26.80 | 16.90 | 0.40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 3.00 | 18.00 | 24.40 | 17.60 |
| 2006 | 40.90 | 11.90 | 28.70 | 13.00 | 0.90 | 0.00 | 0.00 | 0.60 | 11.00 | 9.40 | 15.80 | 28.30 |
| 2007 | 23.80 | 38.80 | 67.20 | 15.70 | 7.20 | 0.00 | 2.90 | 1.60 | 13.50 | 40.20 | 11.70 | 11.60 |
| 2008 | 38.50 | 18.00 | 27.00 | 2.70 | 6.20 | 1.40 | 0.20 | 0.80 | 1.30 | 34.60 | 9.50 | 16.60 |
| 2009 | 31.00 | 16.00 | 40.20 | 16.20 | 0.40 | 0.00 | 1.80 | 0.00 | 5.20 | 18.40 | 24.20 | 9.90 |
| 2010 | 23.60 | 78.20 | 12.40 | 7.20 | 10.60 | 0.00 | 0.00 | 7.10 | 1.50 | 8.60 | 5.20 | 21.00 |
| 2011 | 25.40 | 28.20 | 14.80 | 14.20 | 2.60 | 0.00 | 5.30 | 0.20 | 17.30 | 15.60 | 13.12 | 20.60 |
| 2012 | 28.70 | 34.00 | 27.50 | 15.40 | 0.00 | 0.20 | 0.00 | 5.60 | 6.80 | 4.50 | 13.12 | 18.50 |
| 2013 | 29.77 | 27.90 | 27.63 | 16.52 | 5.99 | 1.65 | 2.96 | 4.58 | 8.08 | 18.21 | 13.12 | 19.25 |
| 2014 | 29.77 | 27.90 | 27.63 | 16.52 | 5.99 | 1.65 | 2.96 | 4.58 | 8.08 | 18.21 | 13.12 | 19.25 |
| 2015 | 29.77 | 27.90 | 27.63 | 16.52 | 5.99 | 1.65 | 2.96 | 4.58 | 8.08 | 18.21 | 13.12 | 19.25 |
| 2016 | 29.77 | 27.90 | 27.63 | 16.52 | 5.99 | 1.65 | 2.96 | 4.58 | 8.08 | 18.21 | 13.12 | 19.25 |
| 2017 | 55.50 | 25.60 | 38.40 | 11.40 | 10.50 | 0.00 | 1.60 | 0.00 | 20.40 | 29.40 | 11.00 | 25.00 |
| 2018 | 42.70 | 22.80 | 22.50 | 18.90 | 7.10 | 10.60 | 18.70 | 0.00 | 2.60 | 24.30 | 13.12 | 25.00 |
| 2019 | 22.20 | 15.90 | 8.10 | 29.20 | 7.60 | 1.10 | 6.30 | 4.58 | 8.08 | 18.21 | 13.21 | 15.40 |
| 2020 | 19.60 | 57.20 | 13.50 | 16.52 | 5.99 | 1.65 | 0.00 | 0.00 | 5.60 | 11.50 | 7.20 | 19.30 |
| 2021 | 37.20 | 0.00 | 51.50 | 17.40 | 8.00 | 0.00 | 0.10 | 2.80 | 11.20 | 12.50 | 6.00 | 27.10 |
| 2022 | 25.60 | 20.80 | 19.70 | 7.00 | 4.00 | 0.00 | 2.60 | 6.40 | 1.00 | 18.21 | 2.80 | 12.80 |
| 2023 | 0.00 | 27.90 | 27.63 | 16.52 | 5.99 | 1.65 | 2.96 | 1.70 | 0.00 | 4.00 | 37.80 | 15.10 |

Note, que, al carecer datos de precipitación en los años faltantes estos pueden ser reemplazados con promedios mensuales o anuales previamente consistenciados, esto por ser rangos de datos faltantes pequeños.

**Figura 8:**

*Histograma de precipitación máxima – Estación Puno*




mero de acuerdo al cálculo por el Water Resources Council (1981) y el segundo verificando la distancia admisible de datos dentro de un rango intercuartílico para datos anómalos (IQR), con los datos restantes se obtuvo la siguiente tabla.

**Tabla 10:**

*Máximos y mínimos registrados en la Estación Puno*

| Nº | AÑO | ORDEN | P24 | log(P24) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1999 | 11 | 38.20 | 1.5821 |
| 2 | 2000 | 16 | 31.60 | 1.4997 |
| 3 | 2001 | 9 | 39.40 | 1.5955 |
| 4 | 2002 | 13 | 36.10 | 1.5575 |
| 5 | 2003 | 14 | 35.60 | 1.5514 |
| 6 | 2004 | 17 | 30.40 | 1.4829 |
| 7 | 2005 | 18 | 30.10 | 1.4786 |
| 8 | 2006 | 7 | 40.90 | 1.6117 |
| 9 | 2007 | 2 | 67.20 | 1.8274 |
| 10 | 2008 | 10 | 38.50 | 1.5855 |
| 11 | 2009 | 8 | 40.20 | 1.6042 |
| 12 | 2010 | 1 | **78.20** | 1.8932 |
| 13 | 2011 | 24 | 28.20 | 1.4502 |
| 14 | 2012 | 15 | 34.00 | 1.5315 |
| 15 | 2013 | 19 | 29.77 | 1.4737 |
| 16 | 2014 | 20 | 29.77 | 1.4737 |
| 17 | 2015 | 21 | 29.77 | 1.4737 |
| 18 | 2016 | 22 | 29.77 | 1.4737 |
| 19 | 2017 | 4 | 55.50 | 1.7443 |
| 20 | 2018 | 6 | 42.70 | 1.6304 |
| 21 | 2019 | 23 | 29.20 | 1.4654 |
| 22 | 2020 | 3 | 57.20 | 1.7574 |
| 23 | 2021 | 5 | 51.50 | 1.7118 |
| 24 | 2022 | 25 | **25.60** | 1.4082 |
| 25 | 2023 | 12 | 37.80 | 1.5775 |

**Tabla 11:**

*Parámetros estadísticos para el test de outliers*

| | | |
|---|---|---|
| **Numero de datos n** | 25 | 25 |
| **Suma ∑** | 987.2 | 39.4413 |
| **Máximo** | 78.2 | 1.8932 |
| **Mínimo** | 25.6 | 1.4082 |
| **Promedio x̄** | 39.5 | 1.5777 |
| **Desviación estándar s** | 13.0593 | 0.1248 |
| **Coeficiente asimetría Cs** | 1.6171 | 1.0433 |
| **Cs/6 k** | 0.2695 | 0.1739 |

El Water Resources Council (1981), presentó en su publicación valores de $K_n$ para distintos tamaños de muestras, por lo cual establece que para una muestra de 25 datos el valor de $K_n$ es de 2.486, a partir de ello calculamos el umbral de datos dudosos altos y bajos y precipitación máxima y mínima aceptada.

UMBRAL DE DATOS DUDOSOS ALTOS (xH: unidades logarítmicas)

$$x_H = \bar{\boldsymbol{x}} + Kn.s = 1.89$$

PRECIPITACIÓN MÁXIMA ACEPTADA

$$PH = 10^{x_H} = 77.3\ mm$$

UMBRAL DE DATOS DUDOSOS BAJOS (xL: unidades logarítmicas)

$$x_L = \bar{\boldsymbol{x}} - Kn.s = 1.27$$

PRECIPITACIÓN MÍNIMA ACEPTADA

$$PL = 10^{x_L} = 18.5\ mm$$

Se observa que todos los valores "$P_{24}$" no están dentro de los límites PH y PL, es decir que se encuentran fuera del rango de 18.5 mm y 77.3mm. Para una mejor verificación analizaremos los rangos Intercuartiles, haciendo uso del cuartil 1, 2 y 3, tal como se resume en la siguiente tabla:

**Tabla 12:**

*Valores máximos de precipitación, haciendo uso de IQR*

| | |
|---|---|
| **MÍNIMO** | 25.60 |
| **Q1** | 29.77 |
| **Q2** | 36.10 |
| **Q3** | 41.80 |
| **IQR** | 12.03 |
| **Imax(Q3+1.5IQR)** | 59.85 |

De la tabla anterior, se observa que como máximo se debe considerar un valor de 59.85 y descartar los valores que superan este valor, para el presente proyecto no se descartan los valores anómalos, ya que, al ser valores registrados en dos años bastante próximos, el diseño deberá ser el correspondiente para poder soportar avenidas extraordinarias tales como las registradas.

#### 4.1.3.4. Análisis de la precipitación máxima de 24 horas

Se han ajustado los datos máximos 24 horas a las funciones de probabilidad Normal, Log normal (2 parámetros), Pearson Tipo III, Log Pearson Tipo III y Gumbel. En los Cuadros se muestran los ajustes a las distribuciones antes indicadas de las precipitaciones máximas en 24 horas de la Estación Puno.

**Tabla 13:**

*Ajuste a las distribuciones de probabilidad*

| ESTACIÓN PUNO | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N | T | P(X≤xT) | VALOR OBSERVADO | | NORMAL | | GUMBEL | | LOGNORMAL | | PEARSON III | | LOGPEARSON III | |
| | | | P24 | log(P24) | $K_T$ | ESPERADO | $K_T$ | ESPERADO | $K_T$ | ESPERADO | $K_T$ | ESPERADO | $K_T$ | ESPERADO |
| 1 | 26.00 | 3.85% | 78.2 | 1.8932 | 1.7688 | 62.6 | 2.0750 | 66.6 | 1.7688 | 62.9 | 2.1877 | 68.1 | 2.0783 | 68.7 |
| 2 | 13.00 | 7.69% | 67.2 | 1.8274 | 1.4261 | 58.1 | 1.5188 | 59.3 | 1.4261 | 57.0 | 1.5555 | 59.8 | 1.5447 | 58.9 |
| 3 | 8.67 | 11.54% | 57.2 | 1.7574 | 1.1984 | 55.1 | 1.1864 | 55.0 | 1.1984 | 53.4 | 1.1818 | 54.9 | 1.2179 | 53.7 |
| 4 | 6.50 | 15.38% | 55.5 | 1.7443 | 1.0201 | 52.8 | 0.9452 | 51.8 | 1.0201 | 50.7 | 0.9136 | 51.4 | 0.9769 | 50.1 |
| 5 | 5.20 | 19.23% | 51.5 | 1.7118 | 0.8694 | 50.8 | 0.7536 | 49.3 | 0.8694 | 48.5 | 0.7031 | 48.7 | 0.7832 | 47.4 |
| 6 | 4.33 | 23.08% | 42.7 | 1.6304 | 0.7363 | 49.1 | 0.5932 | 47.2 | 0.7363 | 46.7 | 0.5289 | 46.4 | 0.6193 | 45.2 |
| 7 | 3.71 | 26.92% | 40.9 | 1.6117 | 0.6151 | 47.5 | 0.4540 | 45.4 | 0.6151 | 45.1 | 0.3798 | 44.4 | 0.4761 | 43.4 |
| 8 | 3.25 | 30.77% | 40.2 | 1.6042 | 0.5024 | 46.0 | 0.3300 | 43.8 | 0.5024 | 43.7 | 0.2488 | 42.7 | 0.3477 | 41.8 |
| 9 | 2.89 | 34.62% | 39.4 | 1.5955 | 0.3957 | 44.7 | 0.2173 | 42.3 | 0.3957 | 42.4 | 0.1315 | 41.2 | 0.2306 | 40.4 |
| 10 | 2.60 | 38.46% | 38.5 | 1.5855 | 0.2934 | 43.3 | 0.1133 | 41.0 | 0.2934 | 41.1 | 0.0250 | 39.8 | 0.1221 | 39.2 |
| 11 | 2.36 | 42.31% | 38.2 | 1.5821 | 0.1940 | 42.0 | 0.0160 | 39.7 | 0.1940 | 40.0 | -0.0730 | 38.5 | 0.0203 | 38.0 |
| 12 | 2.17 | 46.15% | 37.8 | 1.5775 | 0.0966 | 40.7 | -0.0761 | 38.5 | 0.0966 | 38.9 | -0.1641 | 37.3 | -0.0762 | 37.0 |
| 13 | 2.00 | 50.00% | 36.1 | 1.5575 | 0.0000 | 39.5 | -0.1643 | 37.3 | 0.0000 | 37.8 | -0.2495 | 36.2 | -0.1686 | 36.0 |
| 14 | 1.86 | 53.85% | 35.6 | 1.5514 | -0.0966 | 38.2 | -0.2495 | 36.2 | -0.0966 | 36.8 | -0.3302 | 35.2 | -0.2578 | 35.1 |
| 15 | 1.73 | 57.69% | 34.0 | 1.5315 | -0.1940 | 37.0 | -0.3326 | 35.1 | -0.1940 | 35.8 | -0.4071 | 34.2 | -0.3448 | 34.2 |
| 16 | 1.63 | 61.54% | 31.6 | 1.4997 | -0.2934 | 35.7 | -0.4146 | 34.1 | -0.2934 | 34.8 | -0.4809 | 33.2 | -0.4302 | 33.4 |
| 17 | 1.53 | 65.38% | 30.4 | 1.4829 | -0.3957 | 34.3 | -0.4961 | 33.0 | -0.3957 | 33.7 | -0.5521 | 32.3 | -0.5150 | 32.6 |
| 18 | 1.44 | 69.23% | 30.1 | 1.4786 | -0.5024 | 32.9 | -0.5782 | 31.9 | -0.5024 | 32.7 | -0.6215 | 31.4 | -0.5998 | 31.8 |
| 19 | 1.37 | 73.08% | 29.8 | 1.4737 | -0.6151 | 31.5 | -0.6619 | 30.8 | -0.6151 | 31.7 | -0.6895 | 30.5 | -0.6856 | 31.1 |
| 20 | 1.30 | 76.92% | 29.8 | 1.4737 | -0.7363 | 29.9 | -0.7485 | 29.7 | -0.7363 | 30.6 | -0.7569 | 29.6 | -0.7736 | 30.3 |
| 21 | 1.24 | 80.77% | 29.8 | 1.4737 | -0.8694 | 28.1 | -0.8399 | 28.5 | -0.8694 | 29.5 | -0.8242 | 28.7 | -0.8654 | 29.5 |
| 22 | 1.18 | 84.62% | 29.8 | 1.4737 | -1.0201 | 26.2 | -0.9388 | 27.2 | -1.0201 | 28.2 | -0.8924 | 27.8 | -0.9631 | 28.7 |
| 23 | 1.13 | 88.46% | 29.2 | 1.4654 | -1.1984 | 23.8 | -1.0503 | 25.8 | -1.1984 | 26.8 | -0.9628 | 26.9 | -1.0708 | 27.8 |
| 24 | 1.08 | 92.31% | 28.2 | 1.4502 | -1.4261 | 20.9 | -1.1845 | 24.0 | -1.4261 | 25.1 | -1.0378 | 25.9 | -1.1960 | 26.8 |
| 25 | 1.04 | 96.15% | 25.6 | 1.4082 | -1.7688 | 16.4 | -1.3710 | 21.6 | -1.7688 | 22.7 | -1.1227 | 24.8 | -1.3602 | 25.6 |

**Figura 9:**

*Ajuste estadístico para la distribución Normal*

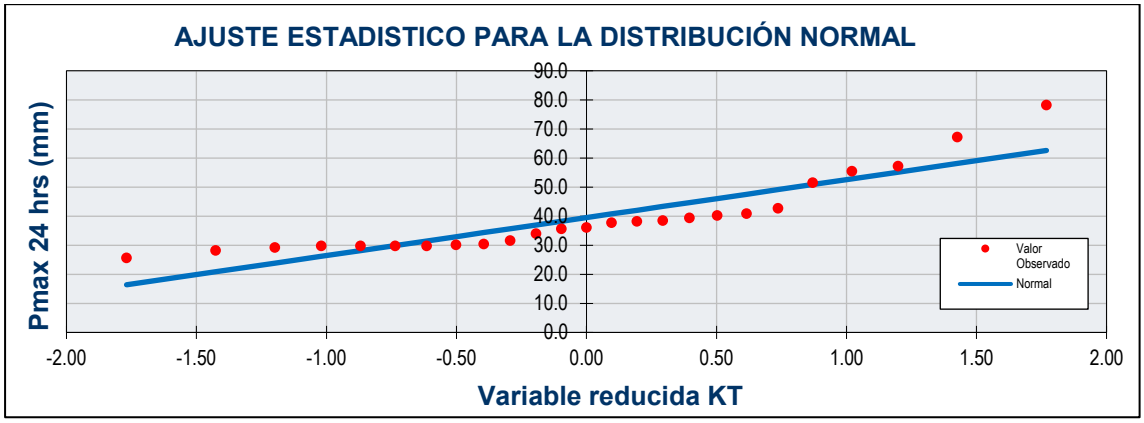



**Figura 10:**

*Ajuste estadístico para la distribución Gumbel*

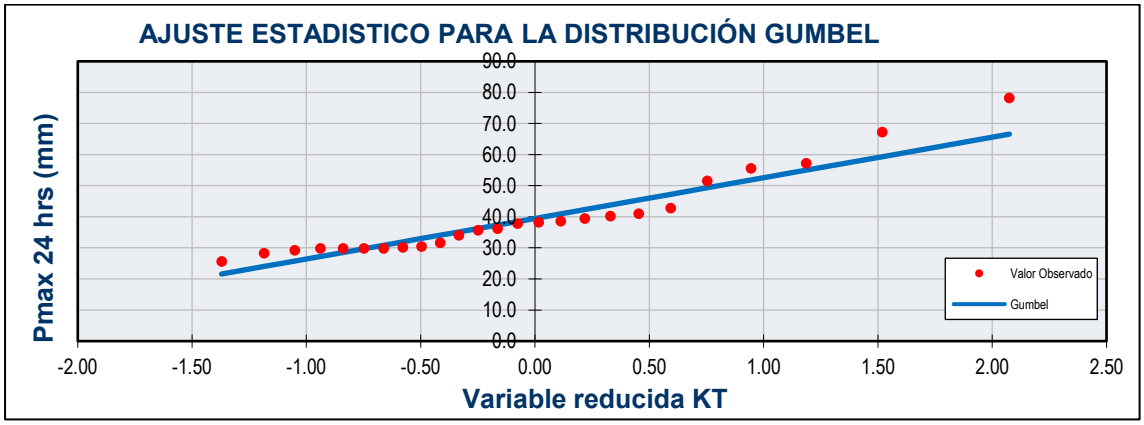



**Figura 11:**

*Ajuste estadístico para la distribución Log Normal*

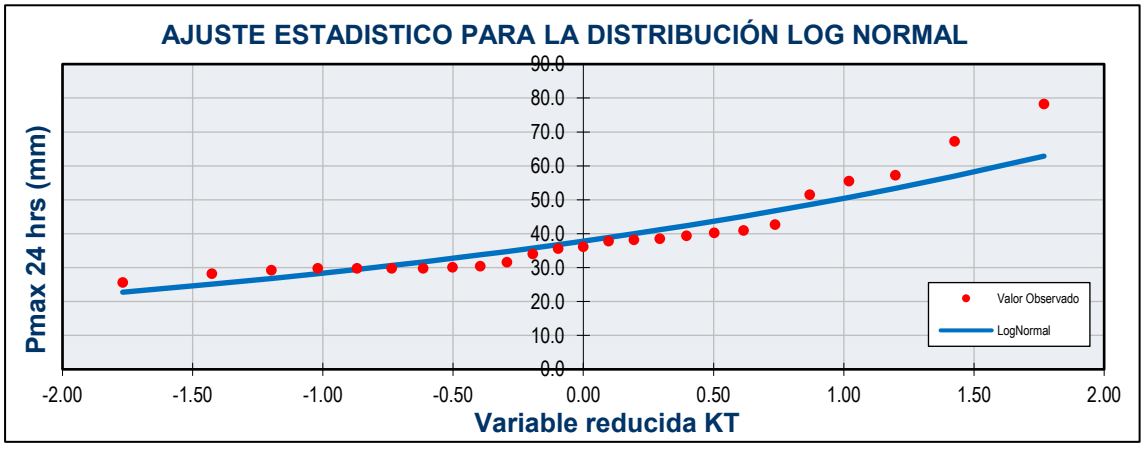


**Figura 12:**

*Ajuste estadístico para la distribución Pearson Tipo III*

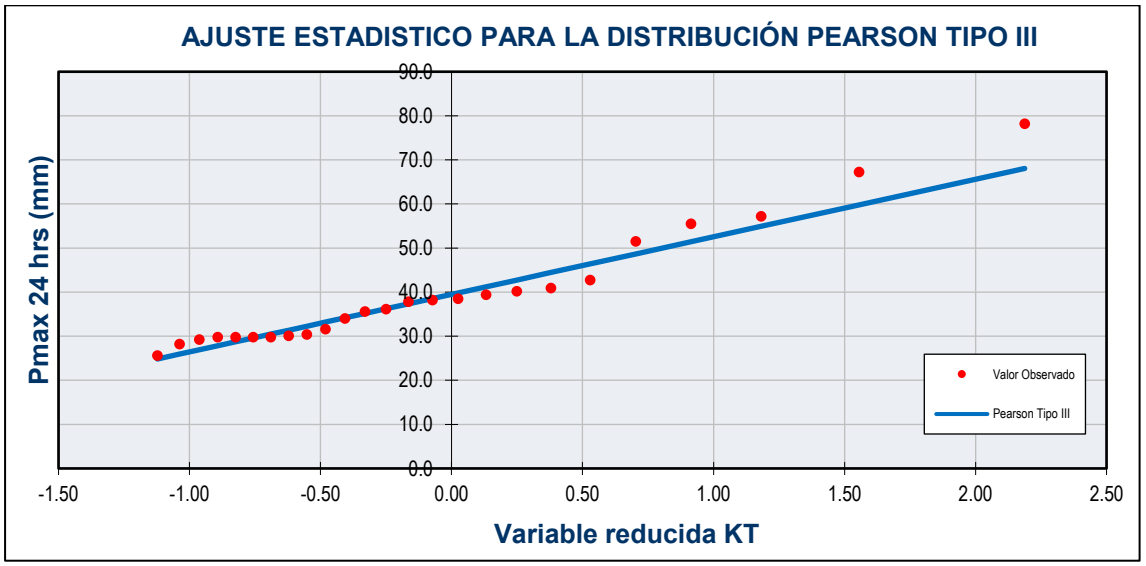



**Figura 13:**

*Ajuste estadístico para la distribución Log Pearson Tipo III*

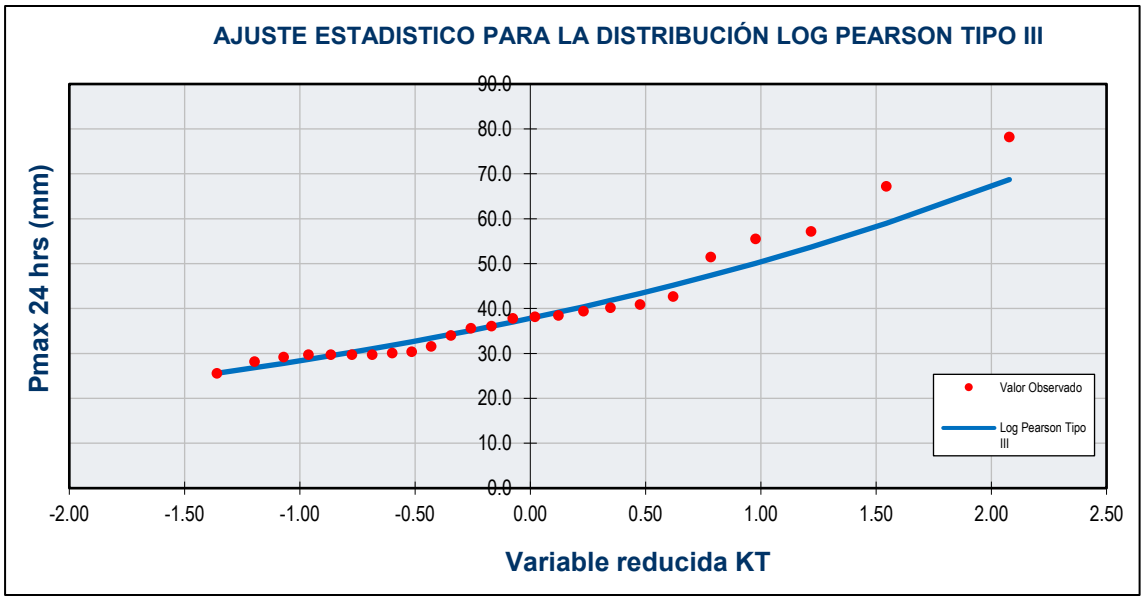


**Tabla 14:**

*Pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov – Smirnov de la Estación Puno*

| m | $x_m$ | $F_o(x_m)$ | $F(x_m)$ Normal | $\|F_o(x_m)-F(x_m)\|$ Normal | $F(y_m)$ Log - Normal | $\|F_o(y_m)-F(y_m)\|$ Log - Normal | $F(y_m)$ Pearson III | $\|F_o(y_m)-F(y_m)\|$ Pearson III | $F(y_m)$ Log Pearson III | $\|F_o(y_m)-F(y_m)\|$ Log Pearson III | $F(x_m)$ Gumbel | $\|F_o(x_m)-F(x_m)\|$ Gumbel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 78.20 | 0.961538 | 0.998483763 | 0.03695 | 0.994267 | 0.03273 | 0.983646 | 0.02211 | 0.979029 | 0.01749 | 0.9875 | 0.02600 |
| 2 | 67.20 | 0.923077 | 0.983085959 | 0.06001 | 0.977286 | 0.05421 | 0.958614 | 0.03554 | 0.957326 | 0.03425 | 0.9638 | 0.04067 |
| 3 | 57.20 | 0.884615 | 0.912510391 | 0.02790 | 0.925075 | 0.04046 | 0.904439 | 0.01982 | 0.912182 | 0.02757 | 0.9061 | 0.02150 |
| 4 | 55.50 | 0.846154 | 0.889938599 | 0.04378 | 0.909076 | 0.06292 | 0.889914 | 0.04376 | 0.899976 | 0.05382 | 0.8900 | 0.04388 |
| 5 | 51.50 | 0.807692 | 0.821189184 | 0.01350 | 0.858771 | 0.05108 | 0.847175 | 0.03948 | 0.862928 | 0.05524 | 0.8415 | 0.03382 |
| 6 | 42.70 | 0.769231 | 0.597180991 | 0.17205 | 0.663788 | 0.10544 | 0.691295 | 0.07794 | 0.715399 | 0.05383 | 0.6640 | 0.10526 |
| 7 | 40.90 | 0.730769 | 0.543091112 | 0.18768 | 0.607560 | 0.12321 | 0.645618 | 0.08515 | 0.667945 | 0.06282 | 0.6134 | 0.11735 |
| 8 | 40.20 | 0.692308 | 0.521780448 | 0.17053 | 0.584297 | 0.10801 | 0.626652 | 0.06566 | 0.647648 | 0.04466 | 0.5925 | 0.09985 |
| 9 | 39.40 | 0.653846 | 0.497352481 | 0.15649 | 0.556838 | 0.09701 | 0.603088 | 0.05076 | 0.622973 | 0.03087 | 0.5676 | 0.08621 |
| 10 | 38.50 | 0.615385 | 0.469887442 | 0.14550 | 0.524940 | 0.09044 | 0.575824 | 0.03956 | 0.593082 | 0.02230 | 0.5387 | 0.07669 |
| 11 | 38.20 | 0.576923 | 0.460757733 | 0.11617 | 0.514095 | 0.06283 | 0.566373 | 0.01055 | 0.582689 | 0.00577 | 0.5288 | 0.04810 |
| 12 | 37.80 | 0.538462 | 0.448617714 | 0.08984 | 0.499486 | 0.03898 | 0.553843 | 0.01538 | 0.568444 | 0.02998 | 0.5155 | 0.02296 |
| 13 | 36.10 | 0.500000 | 0.397690353 | 0.10231 | 0.435889 | 0.06411 | 0.495309 | 0.00469 | 0.502954 | 0.00295 | 0.4570 | 0.04298 |
| 14 | 35.60 | 0.461538 | 0.382997824 | 0.07854 | 0.416861 | 0.04468 | 0.477461 | 0.01592 | 0.482298 | 0.02076 | 0.4394 | 0.02218 |
| 15 | 34.00 | 0.423077 | 0.337193466 | 0.08588 | 0.355716 | 0.06736 | 0.416037 | 0.00704 | 0.411393 | 0.01168 | 0.3820 | 0.04109 |
| 16 | 31.60 | 0.384615 | 0.272951086 | 0.11166 | 0.266103 | 0.11851 | 0.316532 | 0.06808 | 0.295089 | 0.08953 | 0.2958 | 0.08884 |
| 17 | 30.40 | 0.346154 | 0.243276883 | 0.10288 | 0.223822 | 0.12233 | 0.263510 | 0.08264 | 0.233877 | 0.11228 | 0.2540 | 0.09218 |
| 18 | 30.10 | 0.307692 | 0.236140504 | 0.07155 | 0.213639 | 0.09405 | 0.250159 | 0.05753 | 0.218788 | 0.08890 | 0.2438 | 0.06392 |
| 19 | 29.77 | 0.269231 | 0.228348332 | 0.04088 | 0.202534 | 0.06670 | 0.234998 | 0.03423 | 0.202156 | 0.06707 | 0.2326 | 0.03664 |
| 20 | 29.77 | 0.230769 | 0.228348332 | 0.00242 | 0.202534 | 0.02824 | 0.234998 | 0.00423 | 0.202156 | 0.02861 | 0.2326 | 0.00182 |
| 21 | 29.77 | 0.192308 | 0.228348332 | 0.03604 | 0.202534 | 0.01023 | 0.234998 | 0.04269 | 0.202156 | 0.00985 | 0.2326 | 0.04028 |
| 22 | 29.77 | 0.153846 | 0.228348332 | 0.07450 | 0.202534 | 0.04869 | 0.234998 | 0.08115 | 0.202156 | 0.04831 | 0.2326 | 0.07874 |
| 23 | 29.20 | 0.115385 | 0.215439301 | 0.10005 | 0.184198 | 0.06881 | 0.209724 | 0.09434 | 0.174359 | 0.05897 | 0.2140 | 0.09858 |
| 24 | 28.20 | 0.076923 | 0.193721754 | 0.11680 | 0.153691 | 0.07677 | 0.164839 | 0.08792 | 0.126565 | 0.04964 | 0.1825 | 0.10556 |
| 25 | 25.60 | 0.038462 | 0.14381056 | 0.10535 | 0.087343 | 0.04888 | 0.055097 | 0.01664 | 0.028151 | 0.01031 | 0.1113 | 0.07279 |
| n | 25 | | Dmáx | 0.18768 | | 0.12321 | | 0.09434 | | 0.11228 | | 0.11735 |
| a | 0.05 | | Dcritico > Dmax | Si se ajusta | | Si se ajusta | | Si se ajusta | | Si se ajusta | | Si se ajusta |
| Dcritico | 0.26495 | | Mejor Ajuste | 5 | | 4 | | 1 | | 2 | | 3 |

De las dos tablas anteriores y las ilustraciones del 16 al 20, se observa que la función que más se ajusta es la Person III.

A continuación, se calculará las precipitaciones máximas anuales en 24 horas, para distintos períodos de retorno. Debido a que en la Estación Puno se realiza en dos lecturas, una a las 7 de la mañana y otras a las 7 de la noche, se le suele dar un factor de seguridad del 13% adicional, pero al tratarse de una cuenca bastante llana, no se aplicará este criterio:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Promedio : | x = | 39.487 | y = | 1.578 |
| Desviación estándar : | s = | 13.059 | sy = | 0.125 |
| Cs/6 : | k = | 0.270 | k = | 0.174 |

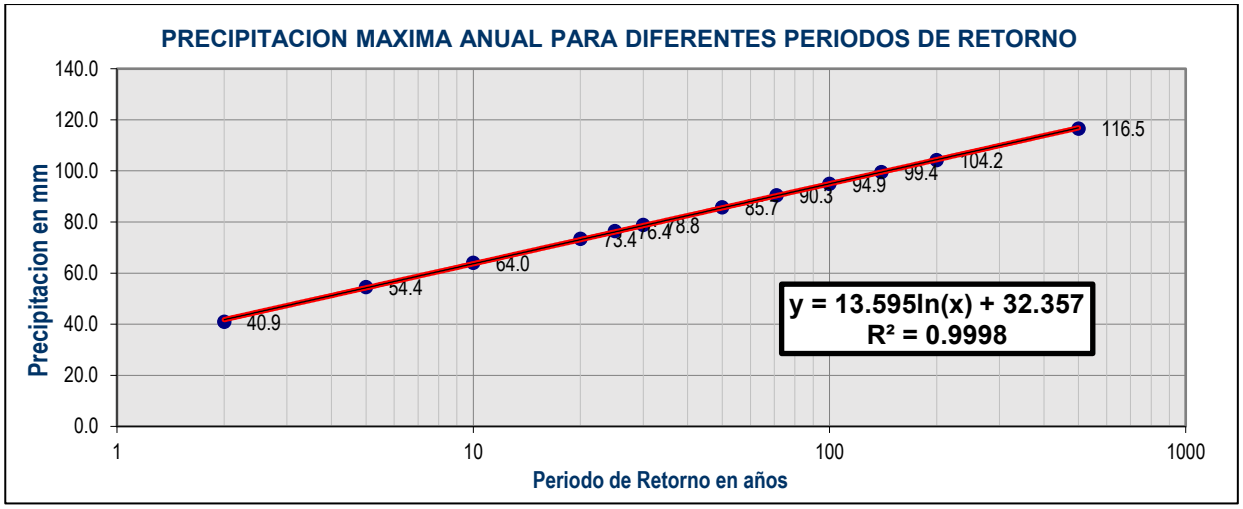
**Tabla 15:**

*Precipitaciones máximas anuales en 24 horas Estación Puno*

| T (años) | $P(X \leq x_T)$ | DISTRIB. NORMAL | | DISTRIB. PERSON III | | $P_{MAX}$ mm | $P_{MAX}$ (corregida) mm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $K_T$ | $x_T$ | $K_T$ | $10^{x_T}$ | | |
| **2** | 0.500 | 0.0000 | 39.4867 | -0.2495 | 36.2288 | **36.2** | **40.9** |
| **5** | 0.800 | 0.8416 | 50.4776 | 0.6658 | 48.1816 | **48.2** | **54.4** |
| **10** | 0.900 | 1.2816 | 56.2228 | 1.3141 | 56.6482 | **56.6** | **64.0** |
| **20** | 0.950 | 1.6449 | 60.9673 | 1.9491 | 64.9403 | **64.9** | **73.4** |
| **25** | 0.960 | 1.7507 | 62.3494 | 2.1521 | 67.5913 | **67.6** | **76.4** |
| **30** | 0.967 | 1.8339 | 63.4363 | 2.3176 | 69.7535 | **69.8** | **78.8** |
| **50** | 0.980 | 2.0537 | 66.3072 | 2.7807 | 75.8008 | **75.8** | **85.7** |
| **71** | 0.986 | 2.1949 | 68.1508 | 3.0983 | 79.9487 | **79.9** | **90.3** |
| **100** | 0.990 | 2.3263 | 69.8671 | 3.4087 | 84.0016 | **84.0** | **94.9** |
| **140** | 0.993 | 2.4500 | 71.4819 | 3.7139 | 87.9871 | **88.0** | **99.4** |
| **200** | 0.995 | 2.5758 | 73.1252 | 4.0379 | 92.2184 | **92.2** | **104.2** |
| **500** | 0.998 | 2.8782 | 77.0734 | 4.8735 | 103.1310 | **103.1** | **116.5** |

**Figura 14:**

*Precipitación máxima anual para diferentes periodos de retorno*




### 4.1.3.5. Determinación de la intensidad máxima de lluvias

#### *4.1.3.5.1. Periodos de retorno para el cálculo de avenidas*

Una vez que se dispone de la información básica de planimetría y de los datos de precipitación, se debe buscar un método que logre proporcionar los caudales de diseño para brindar seguridad a las estructuras hidráulicas. De este modo se facilita el drenaje longitudinal y transversal de la escorrentía natural sobre la vía.

Los criterios para estimar la avenida de cálculo que deben soportar las estructuras de drenaje, han sido definidos por diseñadores y estudiosos de hidráulica. El principio es que las avenidas deben de ser calculadas según su periodo de repetición o retorno en el tiempo.

Para la determinación del periodo de retorno de los puentes se debe considerar dos aspectos, la vida útil de la estructura y el riesgo de falla ante la socavación. La vida útil a considerar para el puente de concreto armado es de 40 años y el riesgo admisible de falla es 25%. Según Yevjevich el riesgo de falla de una estructura está en función a:

$$R = 1 - (1 - p)^N$$

Ecuación 17: Riesgo asociado a probabilidad y vida útil

Donde R, es el riego de falla de la estructura.

p, es la probabilidad de no ocurrencia de la falla.

N, es el periodo de vida de la estructura.

Y el tiempo de retorno está en función al riego de falla según:

$$T_r = \frac{1}{\left[1 - (1 - R)^{\frac{1}{N}}\right]}$$

Ecuación 18: Periodo de Retorno Asociado a Riesgo y Años de Vida

Donde Tr, es el tiempo de retorno del evento.

Considerando que el riesgo de falla de las estructuras (puentes) sea el 25%, producto de que estas estructuras en ningún caso comprometen directamente a grandes ni pequeñas poblaciones de habitantes, que tampoco comprometen a grandes proyectos de riego, energía o, sea es una vía principal en el sistema de transporte. También considerando que la vida útil de la estructura es de 40 años se tiene que:

***Tr = 139.54 años ≈ 140 años.***

**4.1.3.6. Intensidades de precipitación para el cálculo de avenidas en pequeñas cuencas.**

Las precipitaciones máximas con sus periodos de retorno, son útiles para determinar caudales máximos en cuencas grandes, en el caso de las áreas que involucran la vía, en su mayoría son pequeñas y tienen tiempos de concentración en minutos, por tanto, se tiene que encontrar precipitaciones para tiempos de concentración cortos.

#### *4.1.3.6.1. Curvas IDF*

Las curvas IDF son una de las herramientas más importantes para el diseño hidrológico de caudales máximos. Son la herramienta fundamental de los modelos lluvia-escorrentía, como son el modelo HEC-HMS. Las curvas IDF dependen del lugar de medición de la lluvia.

Debido a la falta de pluviógrafos en las estaciones próximas al sitio de proyecto, que permitan una determinación directa de las curvas de intensidad - duración - frecuencia, se trabajó sobre la base de registros de precipitaciones máximas en 24 horas de la Estación Puno.

La precipitación máxima probable es aquella magnitud de lluvia que ocurre sobre una cuenca particular, en la cual generará un gasto de avenida, para el que virtualmente no existe riesgo de ser excedido.

Aunque existe un número importante de distribuciones de probabilidad empleadas en hidrología, son sólo unas cuantas las comúnmente utilizadas, debido a que los datos hidrológicos de diversos tipos han probado en repetidas ocasiones ajustarse satisfactoriamente a un cierto modelo teórico. En este proyecto se empleó la distribución Exponencial.

El método de desagregación de las precipitaciones máximas se realizó mediante la fórmula Dyck y Peschke. $$P_d = P_{24h}\left(\frac{d}{1440}\right)^{0.25}$$

Ecuación 19: Lluvia máxima de duración "d"

$P_d$= lluvia máxima de duración

5'<d<60'

d = duración de la lluvia en min.

$P_{24h}$= lluvia máxima diaria en mm.

El manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) hace mención que, en nuestro país, debido a la escasa cantidad de información pluviométrica con el que cuenta, es difícil elaborar curvas de intensidad – duración – frecuencia (IDF). Generalmente, sólo contamos con información de lluvias máximas en 24 horas, por lo que, la intensidad máxima se estima a partir de la precipitación máxima en 24 horas multiplicada por un coeficiente de duración. Cada coeficiente está en función de una duración determinada, tal como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 16:**

*Coeficientes de duración para tiempos menores a 1440 minutos*

| Duración horas | Coeficiente | Duración horas | Coeficiente |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.25 | 12 | 0.79 |
| 2 | 0.31 | 14 | 0.83 |
| 3 | 0.38 | 16 | 0.87 |
| 4 | 0.44 | 18 | 0.90 |
| 5 | 0.50 | 20 | 0.93 |
| 6 | 0.56 | 22 | 0.97 |
| 8 | 0.64 | 24 | 1.00 |
| 10 | 0.73 | 48 | 1.32 |

A continuación, se detallan los resultados:

**Tabla 17:**

*Lluvias máximas para duraciones de 5 - 1440 minutos*

| Tr (años) | 2 | 10 | 30 | 50 | 71 | 100 | 140 | 500 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pmx24h(mm) | **25.64** | **35.90** | **44.76** | **49.59** | **53.20** | **57.00** | **61.01** | **79.06** |
| Durac (min) | Precipitaciones Máximas (mm) | | | | | | | |
| 5 | 9.94 | 15.54 | 19.13 | 20.79 | 21.93 | 23.04 | 24.14 | 28.29 |
| 10 | 11.82 | 18.48 | 22.75 | 24.73 | 26.08 | 27.40 | 28.70 | 33.64 |
| 15 | 13.08 | 20.45 | 25.18 | 27.36 | 28.86 | 30.32 | 31.76 | 37.23 |
| 30 | 15.55 | 24.32 | 29.95 | 32.54 | 34.32 | 36.06 | 37.77 | 44.27 |
| 60 | 10.23 | 16.00 | 19.71 | 21.41 | 22.59 | 23.73 | 24.86 | 29.13 |
| 120 | 12.69 | 19.84 | 24.43 | 26.55 | 28.01 | 29.43 | 30.82 | 36.13 |
| 180 | 15.56 | 24.32 | 29.95 | 32.55 | 34.33 | 36.07 | 37.78 | 44.28 |
| 240 | 18.01 | 28.17 | 34.68 | 37.69 | 39.75 | 41.77 | 43.75 | 51.28 |
| 300 | 20.47 | 32.01 | 39.41 | 42.83 | 45.17 | 47.46 | 49.71 | 58.27 |
| 360 | 22.93 | 35.85 | 44.14 | 47.97 | 50.59 | 53.16 | 55.68 | 65.26 |
| 480 | 26.20 | 40.97 | 50.45 | 54.82 | 57.82 | 60.75 | 63.63 | 74.58 |
| 600 | 29.89 | 46.73 | 57.54 | 62.53 | 65.95 | 69.29 | 72.58 | 85.07 |
| 720 | 32.34 | 50.57 | 62.27 | 67.67 | 71.37 | 74.99 | 78.55 | 92.07 |
| 840 | 33.98 | 53.13 | 65.42 | 71.09 | 74.98 | 78.79 | 82.52 | 96.73 |
| 960 | 35.62 | 55.69 | 68.57 | 74.52 | 78.60 | 82.58 | 86.50 | 101.39 |
| 1080 | 36.84 | 57.61 | 70.94 | 77.09 | 81.31 | 85.43 | 89.48 | 104.88 |
| 1200 | 38.07 | 59.53 | 73.30 | 79.66 | 84.02 | 88.28 | 92.47 | 108.38 |
| 1320 | 39.71 | 62.09 | 76.46 | 83.09 | 87.63 | 92.07 | 96.44 | 113.04 |
| 1440 | 40.94 | 64.01 | 78.82 | 85.65 | 90.34 | 94.92 | 99.43 | 116.54 |

Con el cuadro anterior se puede graficar las curvas IDF. Asimismo, se debe buscar la ecuación de la curva IDF para describir de forma estadística las tres variables involucradas (I, Tr y t), por lo cual se utiliza una regresión lineal múltiple para derminar K, m y n:

$$\mathrm{I} = \frac{10^{K} Tr^{m}}{t^{n}}$$

Ecuación 20: Intensidad de precipitación

Donde:

I: Intensidad máxima (mm/hr)

Tr: Período de Retorno (años)

t: Duración de la tormenta (minutos)

De la regresión múltiple se tiene:

**Tabla 18:**

*Parámetros obtenidos de la regresión múltiple*

| | | |
|---|---|---|
| **Constante** | 2.470263 | - |
| **Err. Estándar de est. Y** | 0.090704 | - |
| **R cuadrado** | 0.968105 | - |
| **Núm. de observaciones** | 128 | - |
| **Grado de libertad** | 127 | - |
| **Coeficiente(s) X** | -0.735691 | 0.188404 |
| **Error estándar de coef.** | 0.012269 | 0.011657 |

Por lo tanto, obtenemos los siguientes parámetros de ajuste:

K = 2.470

m = 0.188

n= 0.736

Finalmente se tiene la ecuación de intensidad válida para la cuenca:

$$\mathbf{I = \frac{295.3 * Tr^{0.188}}{t^{0.736}}}$$

Ecuación 21: Aproximación de Intensidad de precipitación para la zona de estudio

Siendo la ecuación conocida se puede reemplazar en ella valores para cualquier Tr y t, obteniéndose como resultados la intensidad. A continuación, se muestra algunos valores de Intensidades según dicha ecuación y su respectiva curva IDF.

**Tabla 19:**

*Intensidades máximas para duraciones de 5 – 1440 minutos*

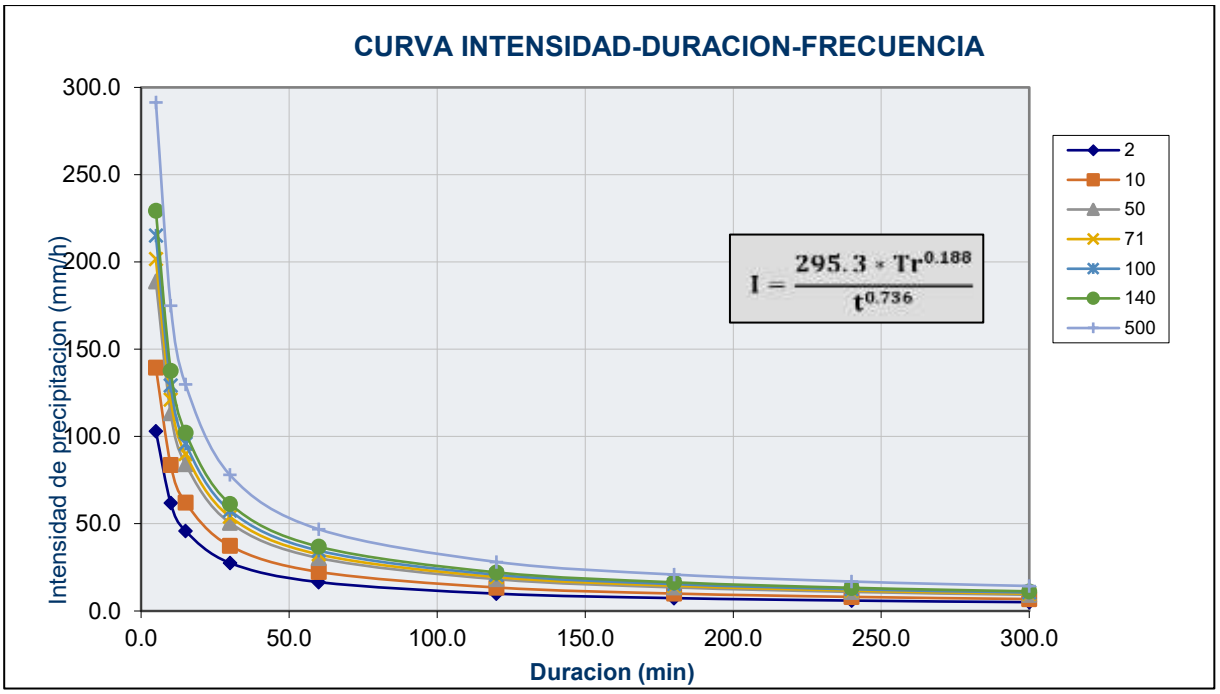
| INTENSIDADES MÁXIMAS (mm/hr) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Duración (min) | Duración (hr) | Tiempo de retorno (años) | | | | | | |
| | | 2 | 10 | 50 | 71 | 100 | 140 | 500 |
| 5 | 0.08 | 102.98 | 139.46 | 188.86 | 201.75 | 215.20 | 229.29 | 291.43 |
| 10 | 0.17 | 61.84 | 83.75 | 113.41 | 121.16 | 129.23 | 137.69 | 175.01 |
| 15 | 0.25 | 45.89 | 62.15 | 84.16 | 89.91 | 95.90 | 102.18 | 129.87 |
| 30 | 0.50 | 27.56 | 37.32 | 50.54 | 53.99 | 57.59 | 61.36 | 77.99 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 60 | 1.00 | 16.55 | 22.41 | 30.35 | 32.42 | 34.59 | 36.85 | 46.84 |
| 120 | 2.00 | 9.94 | 13.46 | 18.23 | 19.47 | 20.77 | 22.13 | 28.13 |
| 180 | 3.00 | 7.38 | 9.99 | 13.53 | 14.45 | 15.41 | 16.42 | 20.87 |
| 240 | 4.00 | 5.97 | 8.08 | 10.95 | 11.69 | 12.47 | 13.29 | 16.89 |
| 300 | 5.00 | 5.07 | 6.86 | 9.29 | 9.92 | 10.58 | 11.28 | 14.33 |
| 360 | 6.00 | 4.43 | 6.00 | 8.12 | 8.68 | 9.26 | 9.86 | 12.53 |
| 480 | 8.00 | 3.58 | 4.85 | 6.57 | 7.02 | 7.49 | 7.98 | 10.14 |
| 600 | 10.00 | 3.04 | 4.12 | 5.58 | 5.96 | 6.36 | 6.77 | 8.61 |
| 720 | 12.00 | 2.66 | 3.60 | 4.88 | 5.21 | 5.56 | 5.92 | 7.53 |
| 840 | 14.00 | 2.37 | 3.22 | 4.36 | 4.65 | 4.96 | 5.29 | 6.72 |
| 960 | 16.00 | 2.15 | 2.91 | 3.95 | 4.22 | 4.50 | 4.79 | 6.09 |
| 1080 | 18.00 | 1.97 | 2.67 | 3.62 | 3.87 | 4.12 | 4.39 | 5.59 |
| 1200 | 20.00 | 1.83 | 2.47 | 3.35 | 3.58 | 3.82 | 4.07 | 5.17 |
| 1320 | 22.00 | 1.70 | 2.31 | 3.12 | 3.34 | 3.56 | 3.79 | 4.82 |
| 1440 | 24.00 | 1.60 | 2.16 | 2.93 | 3.13 | 3.34 | 3.56 | 4.52 |

De las intensidades determinadas para los diferentes períodos de retorno, se puede obtener la gráfica de las curvas intensidad – duración – frecuencia (IDF).

**Figura 15:**

*Curva Intensidad – Duración – Frecuencia, Estación Puno*




### *4.1.3.6.2. Tiempo de concentración*

Mediante los métodos estipulados por el MTC, aplicable a este estudio, se tiene:

Por el método de kirpich:

$$t_c = 0.01947 * L^{0.77} * S^{-0.385}$$

L: Longitud del canal desde aguas arriba hasta el punto de aforo.

S: Pendiente promedio de la cuenca, m/m.

$$t_c = 0.01947\ x\ \frac{21660^{0.77}}{0.0292^{0.385}} = 165.39\ min = 2.76\ hr$$

Por el método de California Culverts Practice:

$$t_c = 0.0195 * \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$$

L: Longitud del curso de agua más largo en metros.

H: Diferencia del nivel entre la divisoria de aguas y la salida, m.

$$t_c = 0.0195\ x\ \left(\frac{21660^3}{633}\right)^{0.385} = 165.65\ \text{min} = 2.76\ hr$$

Por el método racional modificado o de Témez:

$$t_c = 0.3 * \left(\frac{L}{S^{0.25}}\right)^{0.76}$$

L: Longitud del cauce mayor (km).

S: Pendiente promedio del cauce mayor (m/m)

$$t_c = 0.3\ x\ \left(\frac{21.66}{2.92^{0.25}}\right)^{0.76} = 152.01\ \text{min} = 2.53\ hr$$

Por la Ecuación de Retardo SCS: Para el presente método, es indispensable tener el Número de curva (CN) el cual se considerará para el presente proyecto igual a 46, dato que será sustentado más adelante.

$$t_c = \frac{0.0136 * L^{0.8} * \left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0.7}}{S^{0.5}}$$

L: Longitud Hidráulica de la cuenca (mayor trayecto del flujo), m.

CN: Número de curva SCS.

S: Pendiente promedio de la cuenca, m/m.

$$t_C = \frac{0.0136 * 21660^{0.8} * \left(\frac{1000}{46} - 9\right)^{0.7}}{0.1147^{0.5}} = 0.1168\ hr = 701.26\ min$$

Según los cálculos realizados el tiempo de concentración a considerar es el promedio de todos los resultados, aduciendo a la mayor rapidez de concentración del

flujo hasta el punto de interés, pero de la Ecuación de Retardo, se tiene un tiempo de concentración muy alto, por tal motivo, para la obtención del tiempo de concentración se realizará un promedio entre los valores arrojados por las tres primeras ecuaciones, teniendo: tc=2.68 horas = 161.01 minutos, para efectos de estimación de tormentas se considerará 160 minutos, así mismo el tiempo de retardo el 60% del tiempo de concentración, es decir, 96.6 minutos o 1.61 horas.

#### *4.1.3.6.3. Hietogramas.*

Los hietogramas obtenidos a partir de las curvas IDF se hicieron para los periodos de retorno de 140 y 500 años de retorno por ser los que se usarán para el cálculo de caudales mediante la metodología del Servicio de Conservación de Suelos de los estados Unidos SCS-USA.

**Tabla 20:**

*Hietograma para Tr=140 años*

| METODO DEL BLOQUE ALTERNO | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| DURACION min | INTENSIDAD mm/hr | PROFUNDIDAD ACUMULADA mm | PROFUNDIDAD INCREMENTAL mm | TIEMPO min | PRECIPITACION mm |
| 10 | 137.69 | 22.95 | 22.95 | 0-10 | 0.81 |
| 20 | 82.69 | 27.56 | 4.61 | 10-20 | 0.89 |
| 30 | 61.36 | 30.68 | 3.12 | 20-30 | 1.01 |
| 40 | 49.66 | 33.10 | 2.42 | 30-40 | 1.16 |
| 50 | 42.14 | 35.12 | 2.01 | 40-50 | 1.38 |
| 60 | 36.85 | 36.85 | 1.73 | 50-60 | 1.73 |
| 70 | 32.90 | 38.38 | 1.53 | 60-70 | 2.42 |
| 80 | 29.82 | 39.76 | 1.38 | 70-80 | 4.61 |
| 90 | 27.35 | 41.02 | 1.26 | 80-90 | 22.95 |
| 100 | 25.31 | 42.18 | 1.16 | 90-100 | 3.12 |
| 110 | 23.59 | 43.25 | 1.08 | 100-110 | 2.01 |
| 120 | 22.13 | 44.26 | 1.01 | 110-120 | 1.53 |
| 130 | 20.86 | 45.20 | 0.95 | 120-130 | 1.26 |
| 140 | 19.76 | 46.10 | 0.89 | 130-140 | 1.08 |
| 150 | 18.78 | 46.95 | 0.85 | 140-150 | 0.95 |
| 160 | 17.91 | 47.76 | 0.81 | 150-160 | 0.85 |

**Figura 16:**

*Hietograma para Tr=140 años*

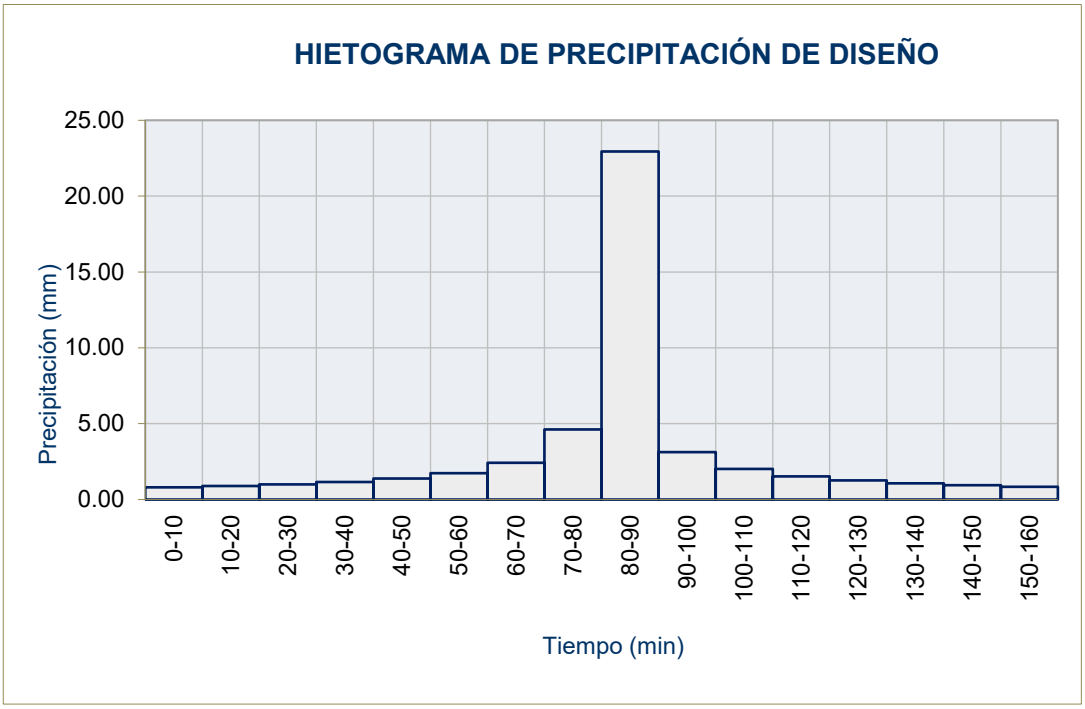


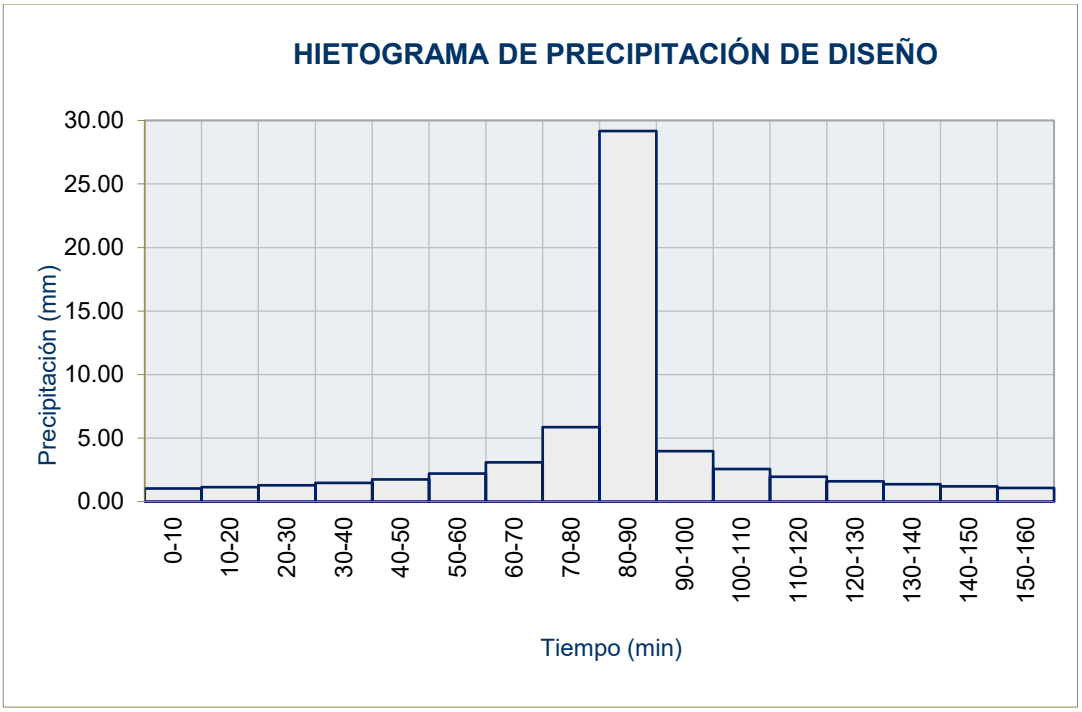

**Tabla 21:**

*Hietograma para Tr=500 años*

| DURACION min | INTENSIDAD mm/hr | PROFUNDIDAD ACUMULADA Mm | PROFUNDIDAD INCREMENTAL mm | TIEMPO min | PRECIPITACION mm |
|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 175.01 | 29.17 | 29.17 | 0-10 | 1.03 |
| 20 | 105.10 | 35.03 | 5.86 | 10-20 | 1.14 |
| 30 | 77.99 | 39.00 | 3.96 | 20-30 | 1.28 |
| 40 | 63.12 | 42.08 | 3.08 | 30-40 | 1.47 |
| 50 | 53.56 | 44.63 | 2.56 | 40-50 | 1.75 |
| 60 | 46.84 | 46.84 | 2.20 | 50-60 | 2.20 |
| 70 | 41.82 | 48.78 | 1.95 | 60-70 | 3.08 |
| 80 | 37.90 | 50.54 | 1.75 | 70-80 | 5.86 |
| 90 | 34.76 | 52.14 | 1.60 | 80-90 | 29.17 |
| 100 | 32.16 | 53.61 | 1.47 | 90-100 | 3.96 |
| 110 | 29.99 | 54.98 | 1.37 | 100-110 | 2.56 |
| 120 | 28.13 | 56.25 | 1.28 | 110-120 | 1.95 |
| 130 | 26.52 | 57.46 | 1.20 | 120-130 | 1.60 |
| 140 | 25.11 | 58.59 | 1.14 | 130-140 | 1.37 |
| 150 | 23.87 | 59.67 | 1.08 | 140-150 | 1.20 |
| 160 | 22.76 | 60.70 | 1.03 | 150-160 | 1.08 |

**Figura 17:**

*Hietograma para Tr=500 años*


HIETOGRAMA DE PRECIPITACIÓN DE DISEÑO
30.00
25.00
20.00
15.00
10.00
5.00
0.00
Precipitación (mm)
0-10
10-20
20-30
30-40
40-50
50-60
60-70
70-80
80-90
90-100
100-110
110-120
120-130
130-140
140-150
150-160
Tiempo (min)

### 4.1.3.7. Estimación de Caudales

#### *4.1.3.7.1. Modelo HEC-HMS*

Para la determinación del número de curva (CN) en la cuenca de análisis se hizo una primera estimación conforme a las características de la cuenca, según las siguientes tablas:

**Tabla 22:**

*Texturas del suelo para determinar el número de curva.*

| TIPO DE SUELO | TEXTURA DE SUELO |
|---|---|
| A | Arenas con poco limo y arcilla. Suelos muy permeables. |
| B | Arenas finas y limos. |
| C | Arenas muy finas, limos, suelos con alto contenido de arcilla. |
| D | Arcillas en grandes cantidades |
| | Suelos poco profundos con subhorizontes de roca sana. |
| | Suelos muy impermeables. |

**Tabla 23:**

**Tablas para los números de curva SCS**

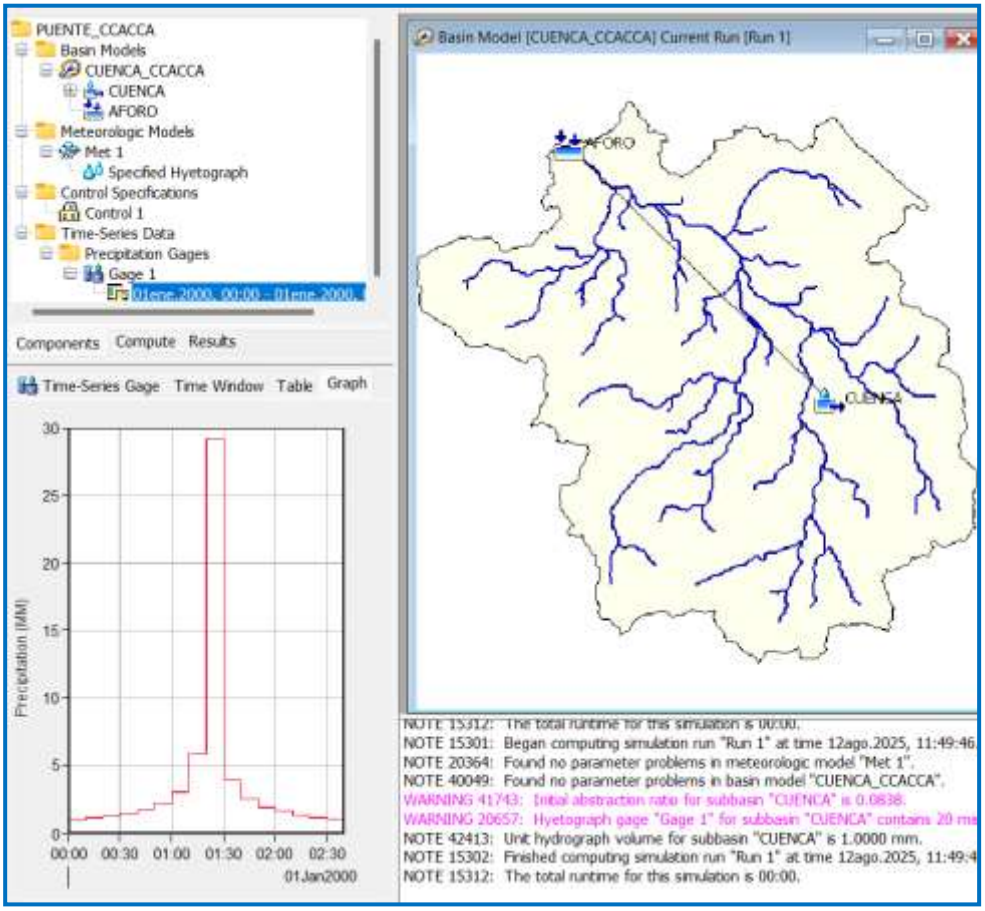
| DESCRIPCIÓN DEL USO DEL SUELO | | GRUPO HIDROLÓGICO DEL SUELO | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | A | B | C | D |
| Tierra cultivada: | Sin tratamiento de conservación | 72 | 81 | 88 | 91 |
| | Con tratamiento de conservación | | 71 | 78 | 81 |
| Pastizales: | Condiciones pobres | 68 | 79 | 86 | 89 |
| | Condiciones óptimas | 39 | 61 | 74 | 80 |
| Vegas de ríos: | Condiciones óptimas | 30 | 58 | 71 | 78 |
| Bosques: | Troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas | 45 | 66 | 77 | 83 |
| | Cubierta buena | 25 | 55 | 70 | 77 |

De acuerdo a las características de la cuenca de la zona de estudio, el valor de CN se considerará como 46, teniendo como tipo de suelo el tipo A generalmente compuesto por arenas con poco limos y arcillas o suelos muy permeables, caracterizados por la presencia de alta cantidad de pastizales entre condiciones pobres (en su mayoría) y óptima, solo un poco porcentaje tiene tratamiento.

Ahora contando con los datos suficientemente confiables, los cuales son Hietograma de precipitaciones para Tr=140 años y 500 años (Dyck y Peschke), tiempos de concentración, número de curva y los parámetros geomorfológicos ya calculados, se procede a realizar la modelación en el software HEC-HMS.

**Figura 18:**

*Vista de la modelación en el programa HEC-HMS*



**a) Resultados para Tr=140 Años**

**Tabla 24:**

*Caudales instantáneos generados para Tr = 140 años*

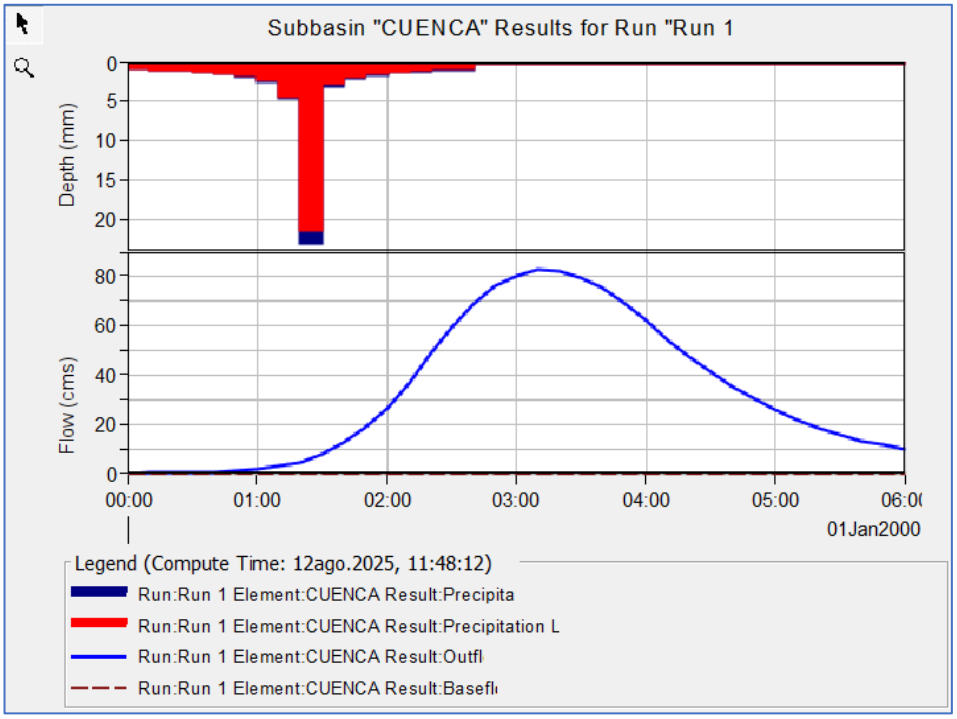
Project: PUENTE_CCACCA Simulation Run: Run 1
Subbasin: CUENCA

Start of Run: 01ene.2000, 00:00 Basin Model: CUENCA_CCACCA
End of Run: 01ene.2000, 06:00 Meteorologic Model: Met 1
Compute Time: 12ago.2025, 11:48:12 Control Specifications: Control 1

| Date | Time | Precip (MM) | Loss (MM) | Excess (MM) | Direct Flow (M3/S) | Baseflow (M3/S) | Total Flow (M3/S) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 01ene.2000 | 01:30 | 22.95 | 21.36 | 1.59 | 7.5 | 0.0 | 7.5 |
| 01ene.2000 | 01:40 | 3.12 | 2.71 | 0.41 | 12.4 | 0.0 | 12.4 |
| 01ene.2000 | 01:50 | 2.01 | 1.72 | 0.29 | 18.7 | 0.0 | 18.7 |
| 01ene.2000 | 02:00 | 1.53 | 1.29 | 0.24 | 26.7 | 0.0 | 26.7 |
| 01ene.2000 | 02:10 | 1.26 | 1.06 | 0.20 | 36.8 | 0.0 | 36.8 |
| 01ene.2000 | 02:20 | 1.08 | 0.90 | 0.18 | 48.5 | 0.0 | 48.5 |
| 01ene.2000 | 02:30 | 0.95 | 0.79 | 0.16 | 59.6 | 0.0 | 59.6 |
| 01ene.2000 | 02:40 | 0.85 | 0.70 | 0.15 | 69.0 | 0.0 | 69.0 |
| 01ene.2000 | 02:50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 76.0 | 0.0 | 76.0 |
| 01ene.2000 | 03:00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 80.3 | 0.0 | 80.3 |
| 01ene.2000 | 03:10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 82.7 | 0.0 | 82.7 |
| 01ene.2000 | 03:20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 82.2 | 0.0 | 82.2 |
| 01ene.2000 | 03:30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 79.8 | 0.0 | 79.8 |
| 01ene.2000 | 03:40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 75.7 | 0.0 | 75.7 |
| 01ene.2000 | 03:50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 69.7 | 0.0 | 69.7 |
| 01ene.2000 | 04:00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 62.1 | 0.0 | 62.1 |

**Figura 19:**

*Gráfico de la precipitaciones totales, efectivas y caudales para un Tr=140 años*



**b) Resultados para Tr=500 Años**

**Tabla 25:**

***Caudales instantáneos generados para Tr = 500 años***

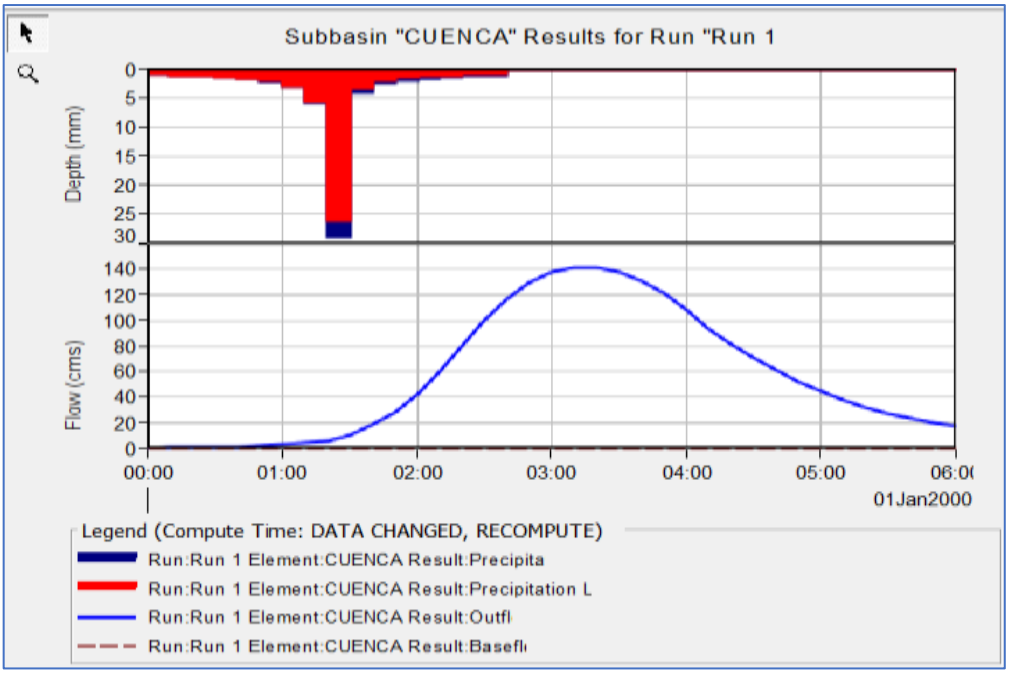
Project: PUENTE_CCACCA Simulation Run: Run 1
Subbasin: CUENCA

Start of Run: 01ene.2000, 00:00 Basin Model: CUENCA_CCACCA
End of Run: 01ene.2000, 06:00 Meteorologic Model: Met 1
Compute Time: DATA CHANGED, RECOMPUTE Control Specifications: Control 1

| Date | Time | Precip (MM) | Loss (MM) | Excess (MM) | Direct Flow (M3/S) | Baseflow (M3/S) | Total Flow (M3/S) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 01ene.2000 | 02:00 | 1.95 | 1.53 | 0.42 | 41.8 | 0.0 | 41.8 |
| 01ene.2000 | 02:10 | 1.60 | 1.25 | 0.35 | 59.1 | 0.0 | 59.1 |
| 01ene.2000 | 02:20 | 1.37 | 1.06 | 0.31 | 79.7 | 0.0 | 79.7 |
| 01ene.2000 | 02:30 | 1.20 | 0.92 | 0.28 | 99.6 | 0.0 | 99.6 |
| 01ene.2000 | 02:40 | 1.08 | 0.82 | 0.26 | 116.5 | 0.0 | 116.5 |
| 01ene.2000 | 02:50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 129.3 | 0.0 | 129.3 |
| 01ene.2000 | 03:00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 137.4 | 0.0 | 137.4 |
| 01ene.2000 | 03:10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 142.1 | 0.0 | 142.1 |
| 01ene.2000 | 03:20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 141.6 | 0.0 | 141.6 |
| 01ene.2000 | 03:30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 137.8 | 0.0 | 137.8 |
| 01ene.2000 | 03:40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 130.9 | 0.0 | 130.9 |
| 01ene.2000 | 03:50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 120.8 | 0.0 | 120.8 |
| 01ene.2000 | 04:00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 107.7 | 0.0 | 107.7 |

**Figura 20:**

*Gráfico de la precipitaciones totales, efectivas y caudales para un Tr=500 años*



Los caudales generados para un periodo de retorno de 140 y 500 años es de 82.7 m3/s y de 142.1 m3/s respectivamente.

#### *4.1.3.7.2. Método racional modificado*

Se procede al cálculo conforme a las ecuaciones brindadas, considerando que el número de curva CN usado en este método es el mismo que para el método del número de curva SCS, equivalente a 46 y teniendo el mismo tiempo de concentración obtenido líneas arriba como el promedio de Kirpich, California Culvert Practice y Racional Modificado de Temez, se tiene:

$$Tc = 2.684\ hor <> 161.01\ min$$

**Cálculo de parámetros en común:**

Siendo tc=2.684horas, entonces:

$$\mathrm{K} = 1 + \frac{2.684^{1.25}}{2.648^{1.25} + 14} = 1.197$$

Siendo A= 195.65 km$^2$, entonces:

$$\mathrm{K_A} = 1 - \log_{10}\frac{195.65}{15} = 0.84723$$

Siendo CN = 46, entonces:

$$\mathrm{P_0} = \frac{5000}{46} - 50 = 58.70$$

**Tabla 26:**

*Parámetros en común para MRM*

| Factores | Item | Valor | Unidad |
|---|---|---|---|
| Tiempo de concentración | Tc | 2.684 | Horas |
| Coeficiente de Uniformidad | K | 1.1970 | - |
| Coeficiente de simultaneidad o Factor reductor | Ka | 0.84723 | - |
| Umbral de escorrentía | Po | 58.70 | mm |

**a) Para un periodo de retorno de 140 años**

Siendo P=87.99 mm, entonces:

$$P_{140} = 0.84723 \times 87.99 = 74.55$$

Luego se calcula la intensidad

$$I_{140} = \left(\frac{74.55}{24}\right) \times (11)^{\frac{28^{0.1} - 2.684^{0.1}}{28^{0.1} - 1}} = 18.21$$

Con los valores de precipitación dados, se tiene:

$$C_{140} = \frac{(87.99 - 58.70) \times (87.99 + 23 \times 58.70)}{(87.99 + 11 \times 58.70)^2} = 0.0783$$

Con lo cual se estima el caudal en:

$Q_{140}$ =0.278*195.65*1.1970*18.21*0.0783= 92.8$m3/s$

En resumen:

**Tabla 27:**

*Estimación de Caudal para Tr=140 Años mediante MRM*

| Parámetros para Tr=140 años | Item | Valor | Unidad |
|---|---|---|---|
| Precipitación sobre la cuenca | $Pd_{140}$ | 87.99 | mm |
| Precipitación máxima corregida sobre la cuenca | $P_{140}$ | 74.55 | mm |
| Intensidad de precipitación sobre la cuenca | $I_{140}$ | 18.21 | mm/hr |
| Coeficiente de escorrentía | $C_{140}$ | 0.0783 | - |
| Caudal estimado | $Q_{140}$ | 92.8 | m3/s |

**b) Para un periodo de retorno de 500 años**

Siendo P=103.13 mm, entonces:

$$P_{500} = 103.13 * 0.84723 = 87.376$$

Luego se calcula la intensidad

$$I_{500} = \left(\frac{87.376}{24}\right) \times (11)^{\frac{28^{0.1} - 2.684^{0.1}}{28^{0.1} - 1}} = 21.35$$

Con los valores de precipitación dados, se tiene:

$$C_{500} = \frac{(103.13 - 58.70) \times (103.13 + 23 \times 58.70)}{(103.13 + 11 \times 58.70)^2} = 0.1152$$

Con lo cual se estima el caudal en:

$$Q_{500} = 0.278 * 195.65 * 0.84723 * 21.35 * 0.1152 = 113.3\, {}^{m^3}/_{s}$$

En resumen:

**Tabla 28:**

*Estimación de Caudal para Tr=500 Años mediante MRM*

| Parámetros para Tr=500 años | Item | Valor | Unidad |
|---|---|---|---|
| Precipitación sobre la cuenca | $Pd_{500}$ | 103.13 | mm |
| Precipitación máxima corregida sobre la cuenca | $P_{500}$ | 87.376 | mm |
| Intensidad de precipitación sobre la cuenca | $I_{500}$ | 21.35 | mm/hr |
| Coeficiente de escorrentía | $C_{500}$ | 0.1152 | - |
| Caudal estimado | $Q_{500}$ | 113.3 | m3/s |

#### *4.1.3.7.3. Comparación de resultados de estimación de caudales*

Según los métodos utilizados se tiene:

**Tabla 29:**

*Comparación de resultados de estimación de caudales*

| Período de retorno | Método | | Caudal Propuesto |
|---|---|---|---|
| | SCS | MRM | |
| Tr = 140 años | 82.7 | 92.8 | 93.0 |
| Tr = 500 años | 142.1 | 113.3 | 113.0 |

De acuerdo a los métodos realizados, para la obtención de caudales en el cálculo hidráulico se usarán los valores máximos y valores propuestos de ambas metodologías, para lo cual se tiene: Tr=140 años un caudal de 93.0 m3/s y para un Tr=500 años un caudal de 113m3/s.

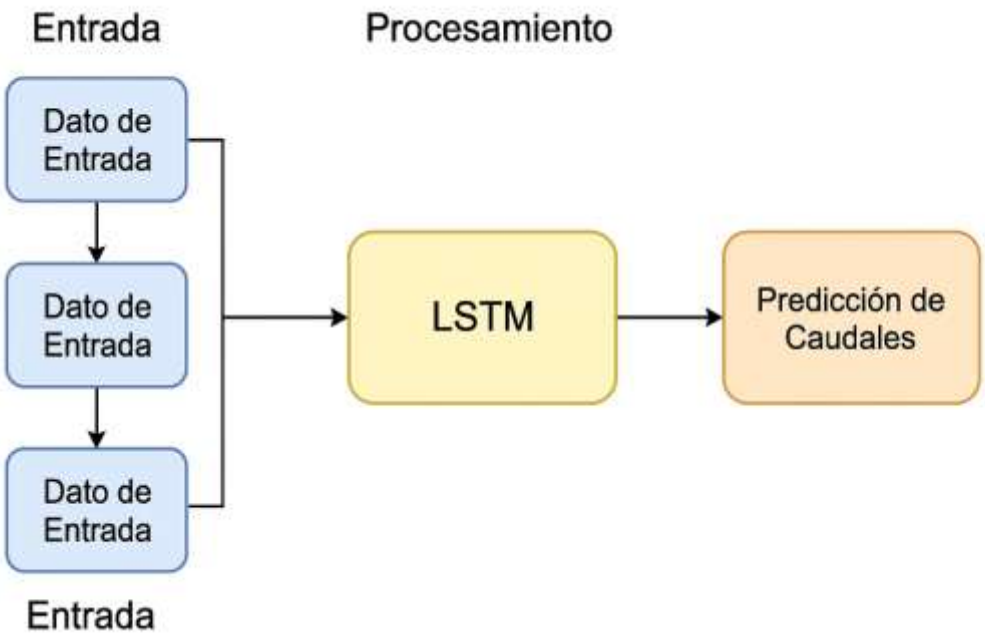
### *4.1.4. Modelos de Inteligencia Artificial*

#### 4.1.4.1. Modelo General

El modelo general está basado en una red neuronal recurrente tipo LSTM (Long Short-Term Memory), entrenada con series temporales de precipitación, temperatura, humedad y caudales históricos (1999–2023). Este modelo procesa secuencias temporales para predecir el caudal máximo esperado y optimizar el dimensionamiento hidráulico de puentes.

**Figura 21:**

*Arquitectura del modelo LSTM*




*Nota:* Elaboración propia

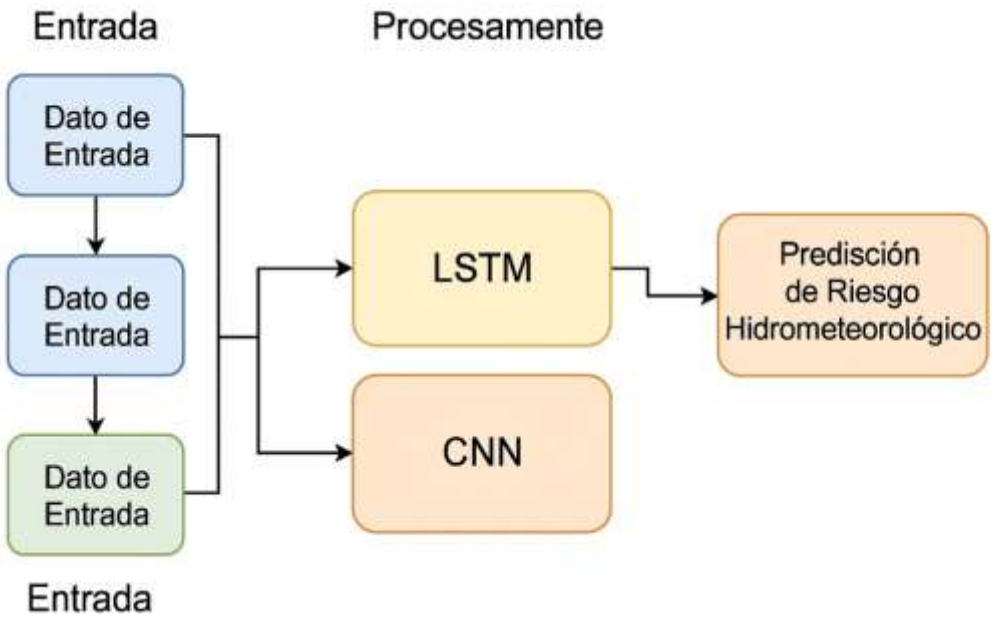
Figura 21. Modelo LSTM para predicción secuencial de caudales a partir de series temporales.

#### 4.1.4.2. Modelo Híbrido (MRM + IA)

El modelo híbrido combina el Método Racional Modificado (MRM) con una red neuronal densa. Este sistema utiliza los resultados hidrológicos tradicionales como insumo para la IA, permitiendo un ajuste dinámico y aprendizaje de patrones no lineales. El objetivo es mejorar la precisión de las estimaciones de caudal en eventos de retorno de 140 y 500 años.

**Figura 22:**

*Modelo Híbrido (MRM + IA)*




*Nota:* Elaboración propia

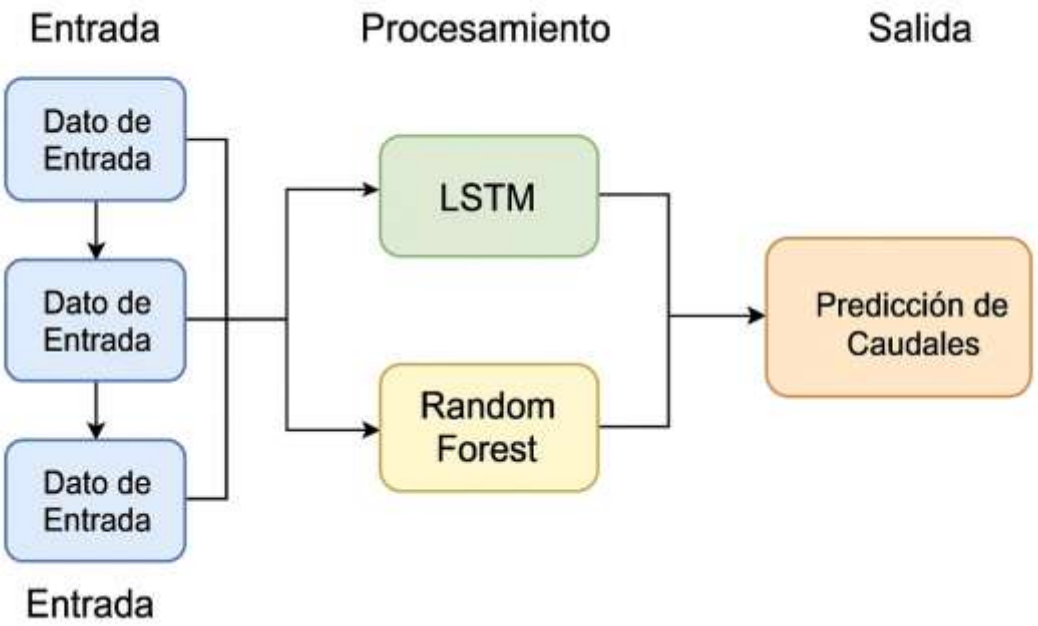
Figura 22. Integración del Método Racional Modificado con red neuronal para la estimación de caudales.

#### 4.1.4.3. Modelo CNN-LSTM

El modelo CNN-LSTM integra redes convolucionales (CNN) para la extracción de características espaciales e hidrológicas, y redes LSTM para analizar dependencias temporales. Esta arquitectura predice el comportamiento del nivel de agua, el gálibo y la socavación bajo condiciones variables de caudal, temperatura y precipitación. Se aplica para determinar el impacto del caudal en el dimensionamiento estructural de los puentes en Platería.

**Figura 23:**

*Modelo CNN-LSTM*




*Nota:* Elaboración propia

Figura 23. Modelo CNN-LSTM aplicado al análisis del impacto del caudal en el diseño estructural de puentes.

**Figura 24:**

*Modelos de IA detallados para la predicción de caudales en puentes*

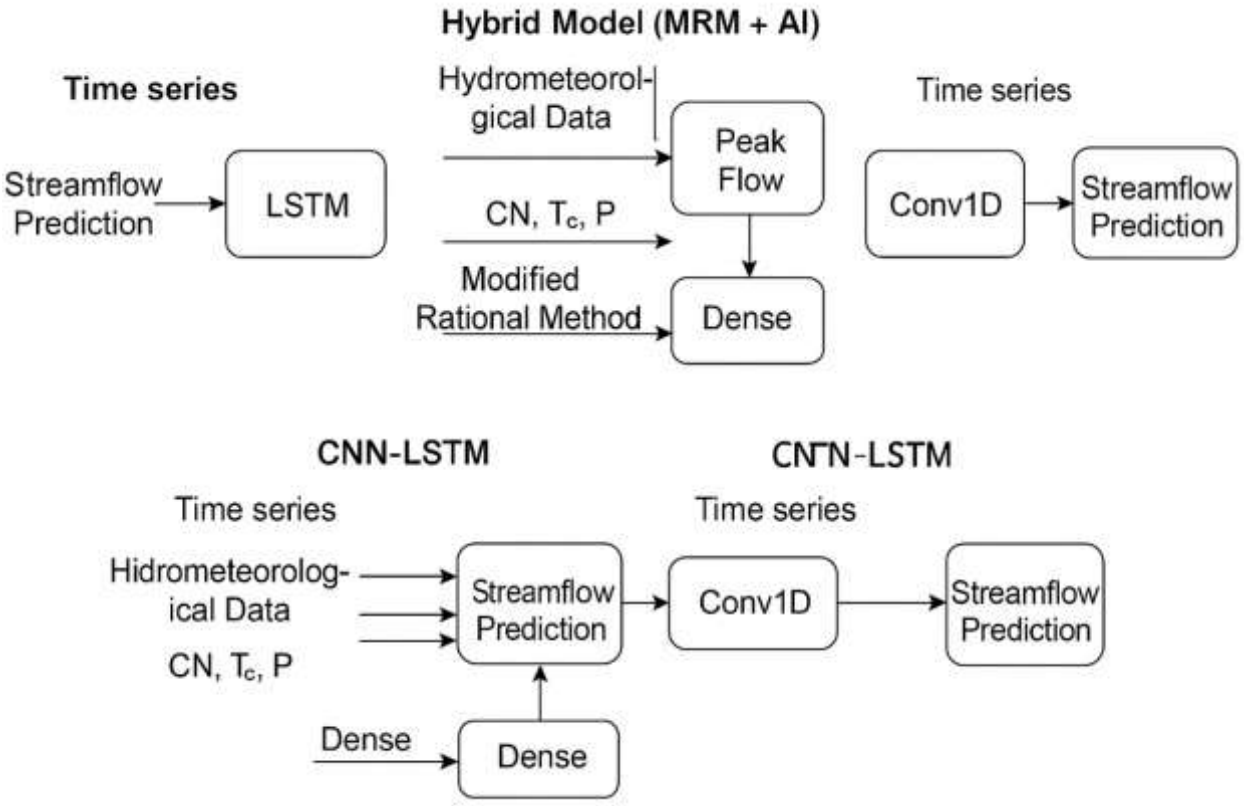



Figura 24. Representación integrada de los modelos LSTM, Híbrido y CNN-LSTM aplicados a la predicción de caudales. Cada arquitectura combina datos hidrometeorológicos y topográficos para proyectar el comportamiento hidráulico en el distrito de Platería.

## 4.2. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

**En lo que respecta al Objetivo general: Determinar de qué manera la integración de la inteligencia artificial permite la predicción de caudales en el diseño de puentes en el distrito de Platería, 2025.**

El análisis hidrológico e hidráulico del proyecto en el distrito de Platería evidenció que el diseño del Puente Ccacca se sustenta en una sólida metodología cuantitativa que combina criterios estadísticos de riesgo y modelamiento hidráulico. Con base en una vida útil proyectada de 40 años y un riesgo de falla admisible del 25 %, se determinó un período de retorno de aproximadamente 140 años, lo cual garantiza un equilibrio adecuado entre seguridad estructural y eficiencia económica en el diseño. Para la estimación de caudales, los métodos MRM (Témez) y SCS/HEC-HMS arrojaron valores de 92.8 y 82.7 m³/s respectivamente para Tr = 140 años, y de 113.3 y 142.1 m³/s para Tr = 500 años, adoptándose 93 y 113 m³/s como valores de referencia en el cálculo hidráulico. La modelación hidráulica mediante HEC-RAS permitió validar la estabilidad del flujo, mostrando predominio de régimen crítico-subcrítico y un gálibo de aproximadamente 1.21 m, lo cual asegura la no obstrucción del cauce incluso bajo eventos extremos. La socavación general se estimó en 0.77 m, adoptándose 0.80 m como valor de diseño, siendo mínima la socavación local debido a la ubicación estratégica de los estribos fuera del cauce principal. La integración de inteligencia artificial en este contexto permitiría fortalecer la precisión predictiva de los modelos hidrológicos, ajustando en tiempo real las estimaciones de caudal a partir de redes neuronales LSTM o modelos *ensemble*, que procesan grandes volúmenes de datos hidrometeorológicos para anticipar variaciones en la escorrentía. Estos modelos, según

Kratzert et al. (2019), mejoran la eficiencia y reducen la incertidumbre frente a eventos extremos, ofreciendo una herramienta complementaria de gran valor en la planificación de obras civiles.

**En lo que respecta al Objetivo específico 1: Analizar de qué manera la integración de la inteligencia artificial utiliza los métodos de Estimación de Caudales en el distrito de Platería, 2025.**

El objetivo específico 1 se centró en analizar cómo la integración de la inteligencia artificial (IA) puede aplicarse a los métodos de estimación de caudales utilizados en el distrito de Platería. La tesis base muestra que la estimación tradicional se realizó mediante dos enfoques contrastantes: el Método Racional Modificado (MRM) y el modelo HEC-HMS con base en el método SCS-USA. Ambos métodos emplean parámetros hidrológicos derivados de datos de precipitación máxima, intensidad, coeficiente de escorrentía y número de curva (CN) del suelo, obtenidos de una cuenca con pendiente media del 11.47 %, textura arenosa (tipo A) y número de curva CN = 46. Los resultados señalan que, para períodos de retorno de 140 y 500 años, se alcanzaron caudales de 93.0 $m^3/s$ y 113.3 $m^3/s$ respectivamente, lo que constituye la base de diseño hidráulico y de socavación del puente. Desde la perspectiva de la IA, la incorporación de modelos de *machine learning* —como redes neuronales recurrentes (LSTM) o *random forests*— permitiría aprender la relación no lineal entre las variables que intervienen en la lluvia-escorrentía (intensidad, duración, retardo y CN). A diferencia de los métodos empíricos, los algoritmos de IA pueden procesar datos históricos, ajustar coeficientes de escorrentía según la humedad antecedente o la variación temporal de la cobertura vegetal y recalibrar los modelos con series actualizadas. Así, la IA podría reemplazar o

complementar la calibración manual de parámetros en HEC-HMS, reduciendo el margen de error y ofreciendo estimaciones dinámicas de caudal en tiempo real. Esto resulta especialmente útil en Platería, donde la disponibilidad de datos hidrométricos es limitada y la variabilidad climática alta, factores que incrementan la incertidumbre del MRM y del SCS tradicional.

**En lo que respecta al Objetivo específico 2: Determinar de qué manera la integración de la inteligencia artificial permite el cálculo del Impacto del Caudal en el Dimensionamiento de Puentes en el distrito de Platería, 2025.**

El análisis hidráulico efectuado mediante HEC-RAS demuestra que los caudales de diseño de 93 $m^3/s$ (Tr = 140 años) y 113 $m^3/s$ (Tr = 500 años) determinan de forma directa el dimensionamiento del puente sobre el Río Ccacca. Los resultados obtenidos en la tesis indican que para el evento de 500 años el nivel de agua máximo extraordinario (NAME) alcanza aproximadamente 3815.80 m s.n.m., frente a un fondo de viga de 3817.01 m, generando un gálibo efectivo de 1.21 m, valor que cumple con los criterios de seguridad hidráulica del *Manual de Puentes* (≥ 1.50 m). Asimismo, el flujo presenta comportamiento crítico-subcrítico, con posibles resaltos hidráulicos localizados, pero la estructura mantiene capacidad de evacuación sin estrangulamientos, lo que asegura la estabilidad frente a avenidas extremas. En este contexto, la integración de inteligencia artificial (IA) puede mejorar el cálculo del impacto del caudal en el dimensionamiento estructural al permitir simulaciones hidrodinámicas adaptativas que incorporen aprendizaje de datos reales de nivel y velocidad del agua. Por ejemplo, modelos de *Deep Learning* (LSTM o CNN-LSTM) pueden predecir en tiempo real la evolución de perfiles de energía, tirantes y presiones sobre los elementos del puente, optimizando el diseño

de gálibo y cimentación. Este enfoque híbrido reduciría incertidumbres en las variables hidráulicas, mejorando la precisión de los cálculos frente a eventos no lineales y a la variabilidad climática propia del altiplano puneño.

**En lo que respecta al Objetivo específico 3: Identificar de qué manera la integración de la inteligencia artificial permite la evaluación de la Variabilidad Hidrológica y Riesgo en el distrito de Platería, 2025.**

El análisis de la variabilidad hidrológica y el riesgo en el distrito de Platería se basó en el registro histórico de precipitaciones de las estaciones de Puno, Ilave y Juli, durante el periodo 1999–2023, donde se aplicaron métodos de consistencia y homogeneidad, como el análisis de doble masa y las pruebas estadísticas t de Student y F de Fisher. Los resultados mostraron que el tramo 1999–2010 presentó anomalías o periodos dudosos, mientras que el intervalo 2011–2023 fue considerado confiable y representativo de la tendencia hidrológica local. Este comportamiento refleja una alta variabilidad interanual de la precipitación, probablemente asociada a la influencia de fenómenos climáticos globales como El Niño y La Niña, los cuales alteran el régimen pluvial en la cuenca del Titicaca. En este escenario, la integración de inteligencia artificial (IA) permite ampliar las capacidades de análisis al modelar la variabilidad temporal y espacial de la lluvia mediante algoritmos de aprendizaje automático (p. ej., *Long Short-Term Memory* o *Support Vector Regression*), los cuales pueden identificar patrones no lineales, detectar anomalías pluviométricas y predecir eventos extremos con mayor precisión que los métodos estadísticos clásicos. Esto posibilita una evaluación del riesgo hidrológico más dinámica, basada en proyecciones predictivas que permiten ajustar los parámetros de diseño de las obras hidráulicas y de drenaje en Platería.

**En lo que respecta al Objetivo específico 4: Analizar de qué manera la integración de la inteligencia artificial utiliza la Integración de Datos Hidrometeorológicos en el distrito de Platería, 2025.**

El estudio hidrológico en Platería integra una amplia variedad de datos hidrometeorológicos, como precipitaciones máximas de 24 horas, series mensuales, intensidades de lluvia, temperatura, topografía, texturas de suelo y uso del terreno. Estos datos, recolectados por el SENAMHI entre 1999 y 2023, fueron empleados para generar las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia), estimar el número de curva (CN = 46) según las condiciones de suelo tipo A y modelar los hietogramas de diseño utilizados en el HEC-HMS para calcular los caudales de diseño. Este proceso revela la importancia de consolidar y depurar los datos hidrometeorológicos, pues la dispersión espacial de estaciones y la irregularidad de los registros pueden introducir incertidumbre en las simulaciones. La integración de inteligencia artificial (IA) ofrece una mejora sustancial al permitir el tratamiento de datos multivariables mediante técnicas de interpolación inteligente, imputación de datos faltantes y detección automática de valores atípicos. Algoritmos como *Random Forest Regressor* o *Autoencoders* pueden optimizar la homogeneización de series, mientras que redes neuronales LSTM son capaces de identificar patrones temporales complejos y predecir precipitaciones futuras con mayor exactitud. Así, la IA no solo automatiza el procesamiento de los datos hidrometeorológicos, sino que fortalece la calidad de las entradas empleadas en los modelos hidrológicos, reduciendo errores sistemáticos y mejorando la coherencia espacial y temporal de las estimaciones.

## CONCLUSIONES

**PRIMERA:** En conclusión, La integración de inteligencia artificial en la predicción de caudales constituye un aporte significativo a la ingeniería hidráulica aplicada al diseño de puentes en Platería. A partir de los resultados obtenidos, se concluye que el modelo tradicional hidrológico-hidráulico garantiza la estabilidad estructural del puente frente a caudales máximos de 93 $m^3/s$ (Tr = 140 años) y 113 $m^3/s$ (Tr = 500 años), cumpliendo con las exigencias de seguridad y desempeño hidráulico. Sin embargo, la incorporación de sistemas inteligentes basados en aprendizaje automático puede optimizar las estimaciones de caudal y tiempo de concentración mediante el análisis dinámico de precipitaciones, morfología y cobertura de suelo, permitiendo una respuesta más precisa ante el cambio climático y la variabilidad hidrológica. De esta manera, la IA se convierte en una herramienta complementaria que amplía las capacidades de predicción y refuerza la resiliencia de las infraestructuras hidráulicas, garantizando su adaptabilidad y seguridad a largo plazo en entornos como el altiplano puneño, donde las condiciones meteorológicas son complejas y altamente variables.

**SEGUNDA:** La integración de la inteligencia artificial en los métodos de estimación de caudales como el MRM y el SCS representa un avance significativo hacia la modernización de los estudios hidrológicos en Platería. Los resultados obtenidos en la tesis evidencian coherencia entre ambos modelos y permiten validar su consistencia; sin embargo, la IA ofrece un valor añadido al introducir predicciones adaptativas y autoajustables, capaces de mejorar la

precisión de los caudales estimados en eventos extremos. De este modo, la IA no solo complementa el criterio técnico, sino que actúa como un instrumento de calibración continua que puede optimizar la estimación de caudales ante escenarios de cambio climático y transformaciones en el uso del suelo, fortaleciendo la resiliencia del diseño de puentes e infraestructura vial.

**TERCERA:** Se concluye la integración de la IA en el cálculo del impacto del caudal sobre el dimensionamiento de puentes posibilita una evaluación más precisa y dinámica de los efectos hidrodinámicos sobre la estructura. Los resultados obtenidos por los métodos convencionales y el modelado en HEC-RAS confirman la idoneidad del diseño adoptado, pero la IA ofrece una ampliación de capacidades al permitir predicciones continuas de comportamiento del flujo (nivel, velocidad, socavación) a partir de datos meteorológicos y topográficos actualizados. En consecuencia, la IA no sustituye la modelación hidráulica tradicional, sino que actúa como un complemento analítico que refuerza la toma de decisiones en la fase de diseño y operación, garantizando una mayor seguridad estructural y resiliencia ante crecidas excepcionales. La aplicación de algoritmos inteligentes permitiría, además, recalibrar los parámetros de Manning, pendientes y coeficientes de contracción según condiciones reales, ajustando el diseño a escenarios de cambio climático y sedimentación progresiva del cauce.

**CUARTA:** La incorporación de la IA en la evaluación de la variabilidad hidrológica y del riesgo en Platería aporta un enfoque predictivo y adaptativo, que mejora la

interpretación de los registros históricos y fortalece la planificación hidráulica. Los resultados del análisis estadístico tradicional son adecuados para describir la tendencia media, pero insuficientes para anticipar la magnitud e impacto de eventos extremos en un contexto de cambio climático. En contraste, los modelos inteligentes permiten integrar variables adicionales como humedad del suelo, temperatura o presión atmosférica y ofrecer pronósticos a corto y mediano plazo sobre la intensidad y frecuencia de las precipitaciones.

**QUINTA:** En conclusión, La integración de la IA en el manejo de datos hidrometeorológicos constituye un avance decisivo para la gestión técnica de proyectos hidráulicos en Platería. Mientras los métodos tradicionales dependen de interpolaciones lineales o ajustes polinómicos, la IA incorpora capacidades de aprendizaje no lineal que permiten fusionar información de distintas fuentes (pluviómetros, estaciones automáticas, sensores satelitales) para obtener un conjunto de datos unificado y altamente representativo. Este enfoque no solo mejora la estimación de variables como la intensidad de lluvia o el tiempo de concentración, sino que también incrementa la capacidad predictiva del sistema, al anticipar escenarios de déficit o exceso hídrico. De este modo, la IA se convierte en una herramienta estratégica para fortalecer la resiliencia hídrica e infraestructura sostenible, contribuyendo a un diseño de puentes más seguro, adaptable y basado en evidencia científica.

## RECOMENDACIONES

**PRIMERA:** Se recomienda Se recomienda que futuras investigaciones y proyectos de infraestructura hidráulica en Platería y zonas similares implementen modelos de inteligencia artificial como complemento a las metodologías deterministas utilizadas (HEC-HMS y Témez). Para ello, se sugiere consolidar una base de datos hidrometeorológica histórica y en tiempo real, que incluya registros de precipitación, temperatura, humedad del suelo y caudales. Asimismo, es aconsejable desarrollar un sistema de monitoreo telemétrico que permita alimentar periódicamente dichos modelos y actualizar los caudales de diseño con base en escenarios predictivos.

**SEGUNDA:** Se recomienda incorporar un sistema híbrido que combine los resultados de los modelos hidrológicos clásicos con algoritmos de IA entrenados en datos locales. En la práctica, esto implicaría utilizar los caudales calculados por el HEC-HMS y el MRM como datos base para alimentar redes LSTM o modelos de regresión no lineal que aprendan patrones entre variables como intensidad de precipitación, duración, número de curva y caudal pico. Además, es necesario establecer una base de datos digital que consolide series históricas de lluvia y caudal, con registros horarios y diarios, que sirva de insumo para la actualización y recalibración de los modelos inteligentes.

**TERCERA:** Para consolidar la integración de IA en el cálculo del impacto del caudal, se recomienda desarrollar un modelo híbrido físico-inteligente que combine la simulación de HEC-RAS con un módulo de predicción IA alimentado por sensores de nivel y caudal instalados en el río. Este modelo permitiría

recalcular automáticamente el NAME, el gálibo y la socavación en función de nuevos eventos de lluvia y caudal observados, generando alertas tempranas para mantenimiento y evaluación estructural.

**CUARTA:** Se recomienda implementar un sistema de monitoreo hidrometeorológico inteligente en el distrito de Platería que combine sensores pluviométricos, telemetría y modelos de IA entrenados con los registros locales del SENAMHI y los resultados del análisis histórico realizado. Este sistema debe permitir el seguimiento en tiempo real de la precipitación y el caudal, así como la emisión de alertas tempranas ante anomalías hidrológicas.

**QUINTA:** Se recomienda implementar un sistema de integración digital de datos hidrometeorológicos sustentado en IA, que combine las bases de datos del SENAMHI con sensores locales y fuentes satelitales abiertas (como ERA5 o TRMM). Este sistema debe incluir módulos de validación automática, interpolación espacial y análisis de correlación temporal, utilizando modelos de aprendizaje automático para garantizar la consistencia de los datos antes de su uso en simulaciones hidráulicas. Asimismo, se aconseja el desarrollo de un repositorio geoespacial centralizado, administrado por la municipalidad de Platería, que permita actualizar los datos de precipitación, caudal y temperatura en tiempo real.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguirre, M. A., et al. (2024). *Predicción del caudal del río Torata utilizando algoritmos de Machine Learning para el aprovisionamiento de agua a la población del distrito* [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad ESAN]. ESAN Repositorio. Recuperado de https://repositorio.esan.edu.pe

Alvarez Villanueva, J. I., & Huamán Vidaurre, J. F. (2023). *Aplicación de métodos hidrológicos para estimar caudal ecológico del río Tres Ríos, Cajamarca – Perú*. https://files.abrhidro.org/Eventos/Trabalhos/191/XXV-SBRH0131-1-20230530-062215.pdf

Álvarez, L. (2022). *Generación de caudales con modelos de redes neuronales artificiales a partir de las características de una cuenca* [Tesis profesional, UNCP]. http://hdl.handle.net/20.500.12894/427

Álvarez, A. (2022). *análisis de caudales con modelos de inteligencia artificiales a partir de las características de una cuenca fluvial* [Tesis profesional, Universidad nacional del altiplano Puno]. http://hdl.handle.net/20.500.12894/427

Arocutipa, Walter., & Huaynapata, F. (2021). *Aplicación web basada en redes neuronales artificiales para pronosticar demanda de agua potable en EMSA Puno S.A.* [Tesis profesional, Universidad Nacional del Altiplano]. https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/24474

Cayetano, O. (2020). *Predicción de caudales mediante redes neuronales artificiales NARX en la cuenca del río Ichu* [Tesis de pregrado]. Repositorio UNH. https://repositorio.unh.edu.pe/items/50016a96-287c-4d9e-ba7b-5a72c822f904

Cisterna-García, A., González-Vidal, A., Martínez-Ibarra, A., Ye, Y., Guillén-Teruel, A., Bernal-Escobedo, L. & Skarmeta, A. F. (2025). *Artificial intelligence for streamflow prediction in river basins: a use case in Mar Menor*. *Scientific Reports*. https://www.nature.com/articles/s41598-025-04524-0 link.springer.com+2nature.com+2arxiv.org+2

Cunha, A., et al. (2025). *Deep Learning-Based River Flow Forecasting with MLPs*. Sensors, 25(7). https://doi.org/10.3390/1424-8220/25/7/2154

Delgado Caballero, F. E. (2024). *Redes neuronales artificiales para la estimación de la socavación en pilares de puentes en el Perú*. [Tesis de maestría, UNALM]. https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/6411

El-Hady Rady, R. (2020). *Prediction of local scour around bridge piers: artificial-intelligence-based modeling versus conventional regression methods*. Applied Water Science, 10, 57. https://doi.org/10.1007/s13201-020-1140-4 arxiv.org+15link.springer.com+15besjournals.onlinelibrary.wiley.com+15

Forghani, M., Qian, Y., Lee, J., Farthing, M. W., Hesser, T., Kitanidis, P. K., & Darve, E. F. (2020). *Application of deep learning to large scale riverine flow velocity estimation*. arXiv. https://arxiv.org/abs/2012.02620

Guo, Y., Yu, X., Xu, Y.-P., Chen, H., Gu, H. & Xie, J. (2020). AI-based techniques for multi-step streamflow forecasts: Application for multi-objective reservoir operation optimization and performance assessment. *Hydrology and Earth System Sciences*, preprint. https://hess.copernicus.org/preprints/hess-2020-617/hess-2020-617-manuscript-version6.pdf arxiv.org+3hess.copernicus.org+3mdpi.com+3

Guzmán Prado, M. R. (2021). *Redes neuronales artificiales como herramienta de validación de la precipitación obtenida mediante percepción remota en la cuenca del río Cachi* [Tesis profesional, UNSCH]. http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/2410

Hashem, T., & Yousefpour, N. (2024). *Application of Long-Short Term Memory and Convolutional Neural Networks for Real-Time Bridge Scour Prediction*. arXiv. https://arxiv.org/abs/2404.16549?utm_source=

Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo del Agua (INIDA). (2022). *Evaluación de redes hidrometeorológicas optimizadas con IA para los ríos Chira y Piura*. IVAI–CONCYTEC. Recuperado de https://ivai.concytec.gob.pe

Jimeno, P., & Senent, J. (2024). *Nuevas técnicas de IA para estimar el caudal de las cuencas mediante SWAT e IA*. UCAM Investigación. Recuperado de https://investigacion.ucam.edu

Ledesma, A. (2022). *Generación de caudales con modelos de redes neuronales artificiales a partir de las características de una cuenca* [Tesis profesional, UNCP]. http://hdl.handle.net/20.500.12894/427

Lima, M., Paredes, R., & Tito, A. (2021). *Análisis de los tipos de caudal y su aplicación en el diseño hidráulico en cuencas altoandinas peruanas* [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Altiplano]. https://repositorio.una.edu.pe/handle/UNA/1234

Liu, M., et al. (2023). *Estimación de caudal ecológico usando modelos IA supervisada en cuencas peruanas*. Revista Peruana Geo-Atmosférica, 44(2), 30–44. Recuperado de https://www.scielo.org.pe

Lujano Laura, E., et al. (2023). *Modelado hidrológico basado en el algoritmo KNN: aplicación para el pronóstico de caudales diarios del río Ramis, Perú*. Tecnología y Ciencias del Agua, 14(2), 169–203. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8836193

Maguiña, M. P. P., & Pascacio Zarzosa, L. F. (2021). *Desarrollo de una herramienta digital web con CNN para la inspección de puentes vehiculares*. [Tesis, UPC]. https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/658460

MDPI Water. (2024). *Advanced Prediction Models for Scouring Around Bridge Abutments: A Comparative Study of AI Techniques*. Water, 16(21), 3082. https://doi.org/10.3390/w16213082

Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC. (2019). *Manual de diseño hidráulico: puentes y obras complementarias* (RD-19-2018-MTC/14). https://www.mtc.gob.pe/transportes/publicaciones/Manual_Puentes_Hidraulicos.pdf

Neciosup Liza, J. R. (2022). *Estudio de inundación en el distrito de Sandia, Puno* [Tesis de pregrado, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. Repositorio USAT. https://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/3865

Ordoñez, L (2022). *Aplicación de redes neuronales artificiales al modelamiento lluvia-escorrentía en la cuenca del río Chancay – Lambayeque*. Universidad Señor de Sipán. https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/10786

Ordoñez, S. (2022). *Aplicación de redes neuronales artificiales al modelamiento de lluvia-escorrentía en la cuenca del río Chancay.* [Tesis de ingeniería civil, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. USAT. https://hdl.handle.net/20.500.12423/5246

Oré, R. (2019). *Predicción de caudales mediante redes neuronales artificiales empleando información de sensores remotos en la cuenca del río Ichu* [Tesis de ingeniería civil, Universidad Nacional del Centro del Perú]. https://repositorio.unh.edu.pe/items/50016a96-287c-4d9e-ba7b-5a72c822f904

Palomino Huaman, J. B., & Steiner Sandoval, C. S. (2023). *Implementación del uso de redes neuronales artificiales para el cálculo predictivo de la resistencia del concreto* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. UCV. https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/141860

Paredes, R. (2022). *Determinación de caudales máximos de diseño mediante métodos convencionales probabilísticos en la cuenca Ilave, Puno*. Tesis de Ingeniería Civil. Recuperado de https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/120301

Paredes, L. (2023). *Disponibilidad hídrica del río Crisnejas en la estación Puente Crisnejas mediante redes neuronales artificiales* [Tesis profesional, UNCP]. https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/3317

Ramos, C. (2021). *Evaluación de eventos extremos en el río Virú mediante modelación hidráulica* [Tesis de ingeniería, PUCP]. https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/18196

Reynoso, C. (2023). *Disponibilidad hídrica del río Crisnejas en la estación Puente Crisnejas: generación de caudales mediante redes neuronales artificiales*. Tesis de Ingeniería Hidráulica, Universidad Nacional del Centro del Perú. Recuperado de http://hdl.handle.net/20.500.14074/3317

Sánchez, E., & Huanca, F. (2020). *Impacto del retroceso glacial en la variabilidad de caudales en cuencas altoandinas del Perú* [Tesis de licenciatura, Universidad Católica de Santa María]. https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/UCSM/5678

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (2024). *Modelación hidrológica subdiaria utilizando LSTM en la cuenca del río Rímac*. SENAMHI. Recuperado de https://www.gob.pe

SENAMHI. (2024). *Modelación hidrológica subdiaria utilizando LSTM para prevenir crecidas rápidas en la cuenca del río Rímac*. https://www.gob.pe/es/n/1024179

Sinche Yupanqui, M. (2024). *Las redes neuronales en la predicción de caudales de las cuencas hidrográficas de la región Junín*. Universidad Peruana Los Andes. https://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/4352

Shiri, N., Karimi, S., & Shiri, J. (2023). *Machine Learning Approaches for Prediction of Daily River Flow*. World Journal of Environmental Biosciences, 12(4), 33–39. https://doi.org/10.51847/U72sgqfYRZ

Ticona Atehortua, M. E. (2025). *Implementación de un modelo hidrológico para completación de datos faltantes mediante RNA en Secocha – Arequipa* [Trabajo Profesional, Universidad San Martín de Porres]. USMP. https://repositorio.usmp.edu.pe/handle/20.500.12727/16064

Yousefpour, N. & Correa, O. (2022). Towards an AI-based Early Warning System for Bridge Scour [Preprint]. *arXiv*. https://arxiv.org/abs/2208.10500 arxiv.org+1arxiv.org+1

Vásquez, L. (2023). *Disponibilidad hídrica del río Crisnejas en la estación Puente Crisnejas mediante redes neuronales artificiales* [Tesis profesional, UNCP]. https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/3317

Vidaurre Siadén, Y. A. (2022). *Aplicación de redes neuronales artificiales para el pronóstico de la demanda de agua potable en la Empresa Epsel S.A., Lambayeque* [Tesis profesional, USAT]. http://hdl.handle.net/20.500.12423/525

Wan Norsyuhada Che Wan Zanial, M. B. A. M., Mohd Nadzri Md Reba, N. Z., Ali Najah Ahmed, M. S., Sherif, M., & Elshafie, A. (2022). *River flow prediction based on improved machine learning method: Cuckoo Search-Artificial Neural Network*. Applied Water Science, 13, 28. https://doi.org/10.1007/s13201-022-01830-0

Zeballos, M., & Ticona, J. (2022). *Impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica del río Chili* [Tesis, UNSA]. https://repositorio.unsa.edu.pe/handle/20.500.12773/13892

Zárate Torres, C. (2021). *Información hidrométrica aplicando el método Lutz-Scholz y redes neuronales artificiales en la microcuenca Huajuiri-Oropesa-Antabamba*

*(Apurímac)* [Tesis profesional, UPC]. https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/656781/Z%C3%A1rate_TC.pdf

# ANEXOS

## Anexo 01: Matriz de consistencia

| Problema | Objetivos | Hipótesis | Variables | Dimensiones | Indicadores | Metodología |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Problema general**<br>¿De qué manera la integración de la inteligencia artificial permite predecir caudales en el diseño de puentes en el distrito de Platería, 2025?<br>**Problemas específicos**<br>¿De qué manera la integración de la inteligencia artificial permite utilizar Métodos de Estimación de Caudales en el distrito de Platería, 2025?<br>¿De qué manera la integración de la inteligencia artificial permite calcular el Impacto del Caudal en el Dimensionamiento de Puentes en el distrito de Platería, 2025?<br>¿De qué manera la integración de la inteligencia artificial permite evaluar la Variabilidad Hidrológica y Riesgo en el distrito de Platería, 2025?<br>¿De qué manera la integración de la inteligencia artificial | **Objetivo general**<br>Determinar de qué manera la integración de la inteligencia artificial permite la predicción de caudales en el diseño de puentes en el distrito de Platería, 2025.<br>**Objetivos específicos**<br>Analizar de qué manera la integración de la inteligencia artificial utiliza los métodos de Estimación de Caudales en el distrito de Platería, 2025.<br>Determinar de qué manera la integración de la inteligencia artificial permite el cálculo del Impacto del Caudal en el Dimensionamiento de Puentes en el distrito de Platería, 2025.<br>Identificar de qué manera la integración de la inteligencia artificial permite la evaluación de la Variabilidad | **Hipótesis general**<br>La integración de la inteligencia artificial permite la predicción de caudales en el diseño de puentes en el distrito de Platería, 2025.<br>**Hipótesis específicas**<br>La integración de la inteligencia artificial utiliza de manera eficiente los métodos de Estimación de Caudales en el distrito de Platería, 2025.<br>La integración de la inteligencia artificial permite el cálculo eficiente del Impacto del Caudal en el Dimensionamiento de Puentes en el distrito de Platería, 2025.<br>La integración de la inteligencia artificial permite la evaluación eficiente de la Variabilidad Hidrológica y Riesgo en el distrito de Platería, 2025. | **Variable 1**<br>Integración de la Inteligencia Artificial | 1.1. Tecnologías de IA Utilizadas<br>1.2. Grado de Automatización en el Proceso de Cálculo<br>1.3. Precisión y Fiabilidad del Modelo de IA<br>1.4. Interacción Humano–IA en el Diseño | 1.1.1. Tipo de algoritmo empleado<br>1.1.2. Nivel de complejidad del modelo IA<br>1.1.3. Grado de innovación tecnológica<br>1.2.1. Porcentaje del proceso automatizado por IA<br>1.2.2. Frecuencia de intervención humana en el cálculo<br>1.2.3. Tiempo promedio de ejecución automatizada<br>1.3.1. Error cuadrático medio (RMSE) del modelo<br>1.3.2. Coeficiente de correlación ($R^2$)<br>1.3.3. Número de veces que el modelo acierta dentro de un margen de tolerancia<br>1.4.1. Nivel de autonomía del sistema en la toma de decisiones<br>1.4.2. Porcentaje de decisiones ajustadas manualmente<br>1.4.3. Satisfacción del usuario con la interfaz IA | **Enfoque:**<br>Cuantitativo<br>**Nivel:**<br>Aplicativo<br>**Diseño de la investigación**<br>Experimental<br>**Tipo de investigación**<br>Básica<br>**Población y muestra**<br>**Población**<br>Registros hidrométricos (caudales, precipitaciones, niveles del agua) de los últimos 10 a 20 años.<br>**Muestra**<br>Puentes ubicados en zonas con historial de crecidas o vulnerabilidad hidráulica.<br>Registros de caudales con al menos 10 años de datos continuos.<br>**Técnica** |
| | | | **Variable 2**<br>Caudales en el Diseño de Puentes | 2.1. Métodos de Estimación de Caudales<br>2.2. Impacto del Caudal en el Dimensionamiento de Puentes<br>2.3. Variabilidad Hidrológica y Riesgo<br>2.4. Integración de Datos Hidrometeorológicos | 2.1.1. Tipo de método aplicado para la estimación<br>2.1.2. Frecuencia de uso de métodos comparativos | |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| permite analizar la Integración de Datos Hidrometeorológicos en el distrito de Platería, 2025? | Hidrológica y Riesgo en el distrito de Platería, 2025.<br><br>Analizar de que manera la integración de la inteligencia artificial utiliza la Integración de Datos Hidrometeorológicos en el distrito de Platería, 2025. | La integración de la inteligencia artificial utiliza de manera eficiente la Integración de Datos Hidrometeorológicos en el distrito de Platería, 2025. | | | 2.1.3. Grado de coincidencia entre métodos tradicionales y basados en IA<br>2.2.1. Variación en la luz del puente según caudal máximo esperado<br>2.2.2. Relación entre caudal y altura mínima sobre el cauce (altura libre)<br>2.2.3. Influencia del caudal en la elección del tipo de cimentación<br>2.3.1. Coeficiente de variación del caudal anual<br>2.3.2. Número de eventos extremos registrados en los últimos 10 años<br>2.3.3. Índice de riesgo hídrico en la zona de estudio<br>2.4.1. Cantidad de variables climáticas integradas en el modelo<br>2.4.2. Frecuencia de actualización de los datos hidrometeorológicos<br>2.4.3. Cobertura espacial de las estaciones meteorológicas utilizadas | **Análisis Documental**<br><br>**Instrumento**<br><br>**Registro Documental y Base de Datos** |

*Nota:* Elaboración propia

**ANEXO 02: INSTRUMENTO N° 01**

**Ficha de Registro Documental y Base de Datos**

1. Ficha de Registro Documental

Instrumento diseñado para recolectar información técnica hidrometeorológica y estructural relevante para el modelado de caudales y diseño de puentes en el distrito de Platería.

| Código | Variable | Fuente de datos | Unidad de medida | Periodo de registro | Observaciones |
|---|---|---|---|---|---|
| 001 | Caudal promedio mensual | SENAMHI | $m^3/s$ | 2010-2024 | Estación Platería - Río local |
| 002 | Precipitación acumulada | SENAMHI | mm | 2010-2024 | Promedio mensual |
| 003 | Área de cuenca | SIG/QGIS | $km^2$ | Dato fijo | Delimitación geográfica |
| 004 | Pendiente del cauce | SIG/QGIS | % | Dato fijo | Cálculo topográfico |
| 005 | Altura máxima del puente | MTC/expediente | m | 2020 | Diseño estructural |

**2. Base de Datos (estructurada para procesamiento en IA)**

se estructura una tabla representativa para el almacenamiento digital de variables claves en el análisis predictivo:

Variables: Fecha, Caudal (m³/s), Precipitación (mm), Temperatura (°C), Área de Cuenca (km²), Pendiente (%)

*Nota:* Elaboración propia.

## ANEXO 03: PANEL FOTOGRÁFICO:

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Senamhi

**DIRECCION DE REDES DE OBSERVACION Y DATOS**

ESTACION : PUNO / 100110 / 02-13
PARAMETRO : PRECIPITACION MAXIMA EN 24 HORAS (mm)

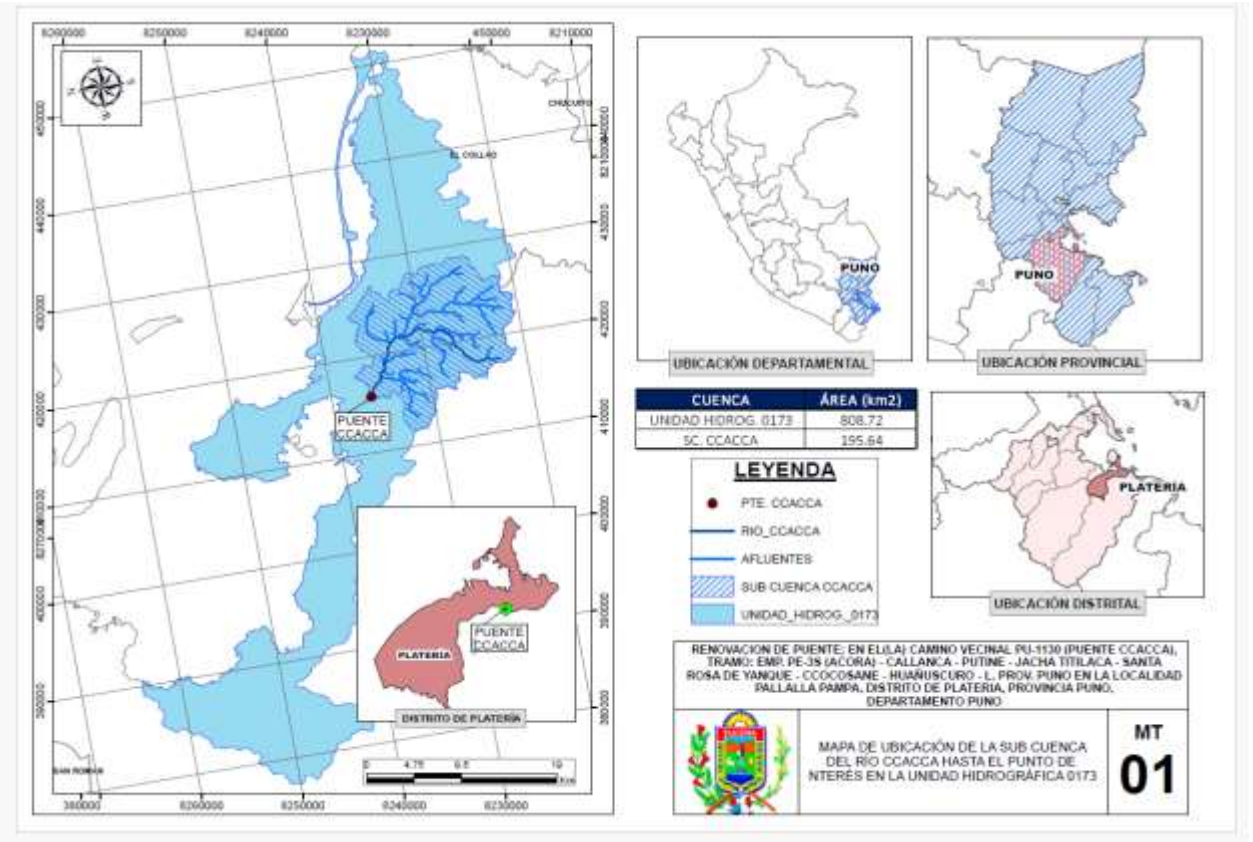
LAT. : 15° 49' "S"
LONG. : 70° 0' "W"
ALT. : 3825 msnm

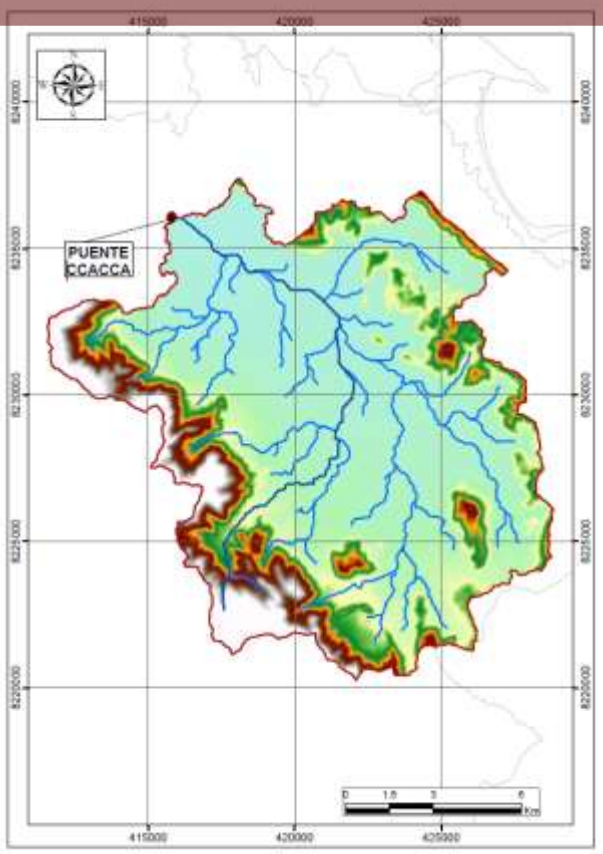
DPTO. : PUNO
PROV. : PUNO
DIST. : PUNO

| AÑO | ENE. | FEB. | MAR. | ABR. | MAY. | JUN. | JUL. | AGO. | SET. | OCT. | NOV. | DIC. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2013 | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D |
| 2014 | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D |
| 2015 | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D |
| 2016 | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D |
| 2017 | 55.5 | 25.6 | 38.4 | 11.4 | 10.5 | 0.0 | 1.6 | 0.0 | 20.4 | 29.4 | 11.0 | 25.0 |
| 2018 | 42.7 | 22.8 | 22.5 | 18.9 | 7.1 | 10.6 | 18.7 | 0.0 | 2.6 | 24.3 | S/D | 25.0 |
| 2019 | 22.2 | 15.9 | 8.1 | 29.2 | 7.6 | 1.1 | 6.3 | S/D | S/D | S/D | S/D | 15.4 |
| 2020 | 19.6 | 57.2 | 13.5 | S/D | S/D | S/D | 0.0 | 0.0 | 5.6 | 11.5 | 7.2 | 19.3 |
| 2021 | 37.2 | 0.0 | 51.5 | 17.4 | 8.0 | 0.0 | 0.1 | 2.8 | 11.2 | 12.5 | 6.0 | 27.1 |
| 2022 | 25.6 | 20.8 | 19.7 | 7.0 | 4.0 | 0.0 | 2.6 | 6.4 | 1.0 | S/D | 2.8 | 12.8 |
| 2023 | 0.0 | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | 1.7 | 0.0 | 4.0 | 37.8 | 15.1 |

S/D= Sin Dato

INFORMACIÓN PREPARADA PARA: MDP
LIMA, 16 de Julio de 2025






PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS DE LA SUB CUENCA DEL RÍO CCACCA HASTA EL PUNTO DE INTERÉS

| DESCRIPCIÓN | VALOR | UND. |
|---|---|---|
| Área | 195.65 | Km2 |
| Perímetro | 80.68 | Km |
| Longitud de cauce principal | 21.66 | Km |
| Longitud total de los cursos de aguaa | 139.50 | Km |
| Longitud Axial | 16.65 | Km |
| Diámetro de círculo de área equivalente | 15.78 | Km |
| Coeficiente de compacidad | 1.62 | - |
| Factor de forma | 0.42 | - |
| Ancho | 11.75 | Km |

**LEYENDA**

- PTE. CCACCA
- RIO_CCACCA
- SUB CUENCA CCACCA

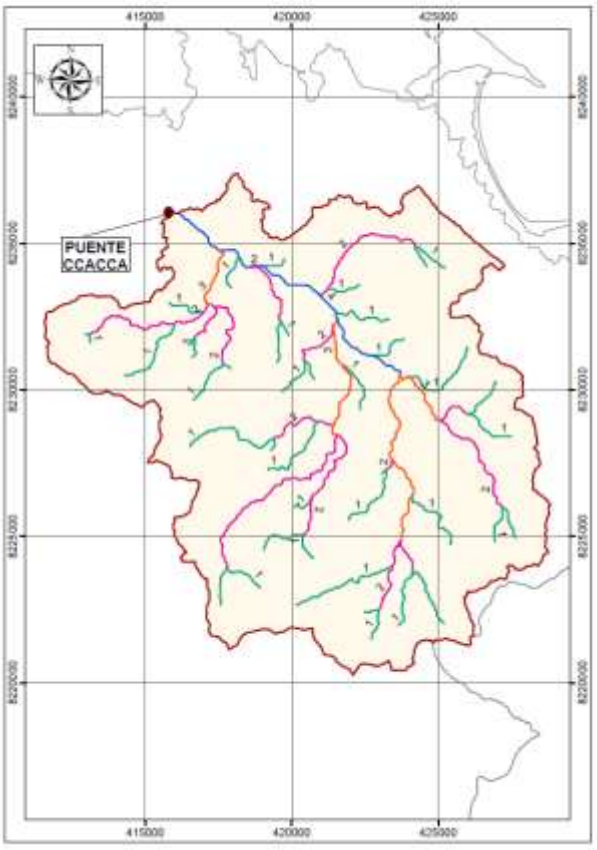
ALTITUD
- Más alto : 4455
- Más bajo : 3822

ESCALA 1 / 100 000

RENOVACION DE PUENTE; EN EL(LA) CAMINO VECINAL PU-1130 (PUENTE CCACCA), TRAMO: EMP. PE-3S (ACORA) - CALLANCA - PUTINE - JACHA TITILACA - SANTA ROSA DE YANQUE - CCOCOSANE - HUAÑUSCURO - L. PROV. PUNO EN LA LOCALIDAD PALLALLA PAMPA, DISTRITO DE PLATERIA, PROVINCIA PUNO, DEPARTAMENTO PUNO

MAPA DE LA SUB CUENCA DEL RÍO CCACCA HASTA EL PUNTO DE INTERÉS Y PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS

MT 02




ORDEN DE LOS RÍOS DE LA SUB CUENCA DEL RÍO CCACCA, HASTA EL PUNTO DE INTERÉS (PUENTE) (MÉTODO DE STRHALER)

| DESCRIPCIÓN | VALOR |
|---|---|
| NÚMERO DE ORDEN | 4 |
| CANTIDAD DE RÍOS DE 1er ORDEN | 41 |
| CANTIDAD DE RÍOS DE 2do ORDEN | 14 |
| CANTIDAD DE RÍOS DE 3er ORDEN | 4 |
| CANTIDAD DE RÍOS DE 4to ORDEN | 1 |
| RAZÓN DE BIFURCACIÓN 1 | 2.93 |
| RAZÓN DE BIFURCACIÓN 2 | 3.50 |
| RAZÓN DE BIFURCACIÓN 3 | 4.00 |
| RAZÓN DE BIFURCACIÓN MEDIA | 3.45 |

**LEYENDA**

- PTE. CCACCA
- SUB CUENCA CCACCA

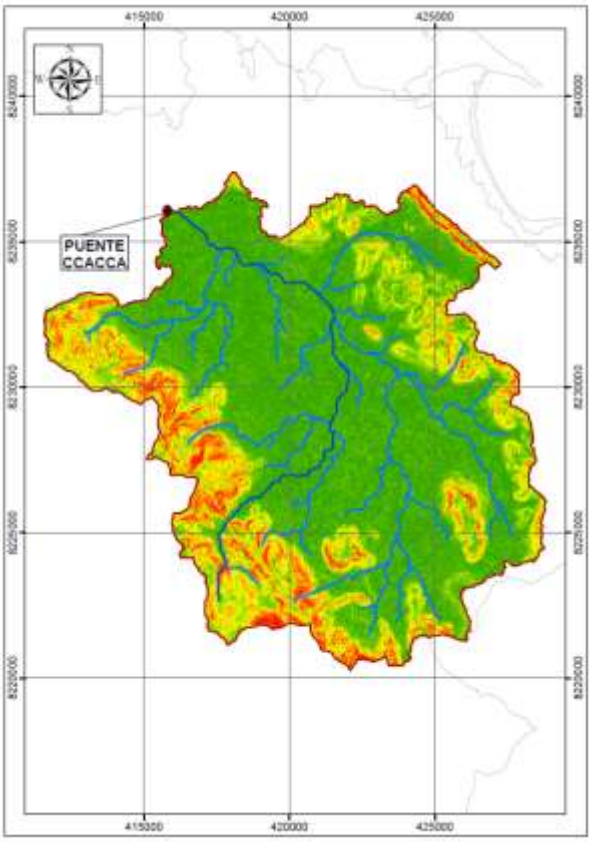
ORDEN_RIOS
- ORDEN 1
- ORDEN 2
- ORDEN 3
- ORDEN 4

ESCALA 1 / 100 000

RENOVACION DE PUENTE; EN EL(LA) CAMINO VECINAL PU-1130 (PUENTE CCACCA), TRAMO: EMP. PE-3S (ACORA) - CALLANCA - PUTINE - JACHA TITILACA - SANTA ROSA DE YANQUE - CCOCOSANE - HUAÑUSCURO - L. PROV. PUNO EN LA LOCALIDAD PALLALLA PAMPA, DISTRITO DE PLATERIA, PROVINCIA PUNO, DEPARTAMENTO PUNO

ORDEN DE LOS RÍOS DE LA SUB CUENCA DEL RÍO CCACCA HASTA EL PUNTO DE INTERÉS

MT 03




**PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA**

11.47 % <> 6.38° - baja pendiente - llana

**LEYENDA**

- PTE_CCACCA
- SUB CUENCA CCACCA
- RIO_CCACCA
- AFLUENTES

**PENDIENTES**

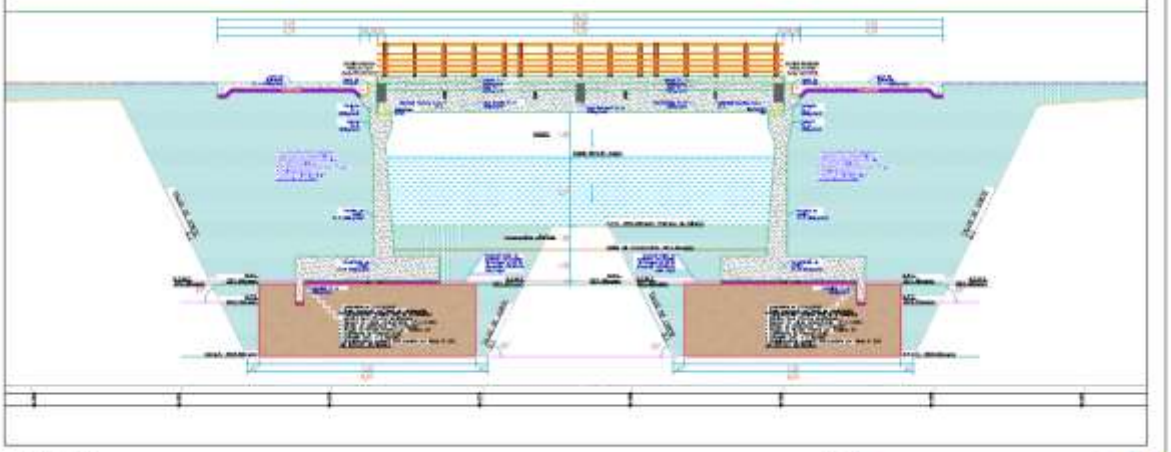
- 0% - 3.15%
- 3.16% - 9.05%
- 9.06% - 16.93%
- 16.94% - 24.41%
- 24.42% - 31.5%
- 31.51% - 38.98%
- 38.99% - 47.64%
- 47.65% - 59.05%
- 59.06% - 100.39%

ESCALA 1 / 100 000

RENOVACION DE PUENTE: EN EL(LA) CAMINO VECINAL PU-1130 (PUENTE CCACCA), TRAMO: EMP. PE-3S (ACORA) - CALLANCA - PUTINE - JACHA TITILACA - SANTA ROSA DE YANQUE - CCOCOSANE - HUAÑUSCURO - L. PROV. PUNO EN LA LOCALIDAD PALLALLA PAMPA, DISTRITO DE PLATERIA, PROVINCIA PUNO, DEPARTAMENTO PUNO

MAPA DE PENDIENTES DE LA SUB CUENCA DEL RÍO CCACCA HASTA EL PUNTO DE INTERÉS

MT 04



ESC: 1 / 100

MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE PLATERÍA

LÁMINA HIDRÁULICA

HIDRÁULICA

INDICADA

LH-01

TESIS UANCV
TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

# ANEXO 1
## FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN

## AUTORIZACIÓN PARA LA INCORPORACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UANCV

Formato digital ☑ Fecha de entrega: 12-02-2026

**1. Datos del autor (es):**

Nombres y Apellidos: ROGELIO TITO APAZA
Dirección: JR. AZANGARO 559 - JULIACA
DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: 02435775
Teléfono: 988008402 email: rogertito1@gmail.com
Nombres y Apellidos:
Dirección:
DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°:
Teléfono: email:
Facultad y/o Escuela de Posgrado: MESTRÍA EN INGENIERIA CIVIL
Escuela Profesional o Mención: HIDRÁULICA
Título o Grado Académico a optar: MAESTRO EN INGENERIA CIVIL
Asesor: Dr. ARNALDO YANA TORRES
Esta obra se encuentra dentro de las siguientes denominaciones:
Trabajo de Investigación ☐ Tesis ☑ Trabajo de Suficiencia Profesional ☐ Trabajo Académico ☐
Título: INTEGRACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA PREDICCIÓN DE CAUDALES EN EL DISEÑO DE PUENTES EN EL DISTRITO DE PLATERIA, 2025
Palabras claves, (3 a 5 términos): Caudales, inteligencia artificial, LSTM, puentes, predicción.
**¿Esta obra se desarrolló en la UANCV [1,2]?**
2

[1] Indicar si su producción intelectual ha empleado recursos tales como, instalaciones, laboratorios, insumos, equipos, bases de datos, asesoría técnica por parte del personal de la UANCV, financiamiento, entré otros relacionados.
[2] Si su producción intelectual se desarrolló en la UANCV totalmente o parcialmente, deberá autorizar el depósito en el Repositorio de manera obligatoria.



OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

**2. Referencia de tesis:**

☐ Bachiller ☐ Titulo ☐ 2da Especialidad ☑ Maestría ☐ Doctorado

**3. Licencias:**

**a) Licencia estándar:**

**Bajo los siguientes términos, autorizo el depósito de mi tesis en el Repositorio Digital de la UANCV.**

Con la autorización de depósito de mi producción Intelectual, otorgo a la Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" una licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi producción intelectual (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Digital de tesis UANCV, colección de producción intelectual, entre otros, en el Perú y en el extranjero por el tiempo y veces que considere necesarias, y libres de remuneraciones.

En virtud de dicha licencia, la Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" podrá reproducir mi producción intelectual en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con propósitos de seguridad, respaldo y preservación.

Declaro que la producción intelectual es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicha producción intelectual no infringe derechos de autor de terceras personas.

La Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" consignará el nombre del y/o los autor(es) de la producción intelectual, y no le hará ninguna modificación más que la permitida en la licencia.

**Autorizo su publicación (marque con una X)**

☑ Sí, autorizo que se deposite inmediatamente.

☐ Sí, autorizo que se deposite a partir de la fecha (d/m/a): _____

☐ No autorizo.

**b) Licencia CREATIVE COMMONS 4.0 INTERNACIONAL:**

Si usted concede una licencia CREATIVE COMMONS sobre su producción intelectual, mantiene la titularidad de los derechos de autor de esta y, a la vez, permite que otras personas puedan reproducirla, comunicarla al público y distribuir ejemplares de esta, bajo las condiciones siguientes:

**¿Quiere permitir usos comérciales de su producción intelectual?**

**Sí:** significa que usted permite la reproducción, distribución y comunicación pública de la producción intelectual incluso con fines comerciales.

**No:** significa que usted permite la reproducción, y comunicación pública de la producción intelectual, pero sin fines comerciales.

☐ Sí autorizo

☑ No autorizo



OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

**Jurisdicción de su Licencia**

Todas las licencias CREATIVE COMMONS son de ámbito mundial, sin embargo, usted puede elegir entre la opción "internacional" o una adaptada a su jurisdicción, como para el caso peruano.

La opción "internacional" emplea el lenguaje y la terminología de los tratados internacionales; en cambio, la adaptada a su jurisdicción, recoge las particularidades de la legislación peruana.

En consecuencia, **la opción "internacional" goza de una mayor eficacia a nivel mundial, gracias a que tiene jurisdicción neutral**. Mientras que la opción adaptada a la jurisdicción del Perú goza de una mayor eficacia ante los tribunales peruanos.

☑ Internacional

☐ Nacional

Línea de investigación: TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN - P51



Firma de Autor | huella digital | 12-03-2026 Fecha



OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/