

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

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

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

**Análisis comparativo de métodos para estimar el
coeficiente de rugosidad en el río Pongora, Ayacucho 2025**

Para optar el título profesional de:

INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

Bach. Cristhian FIGUEROA FLORES

ASESOR:

Msc. Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANÍ

AYACUCHO - PERÚ

2026

RESUMEN

Lo que se buscó con este estudio fue, básicamente, calcular los coeficientes de rugosidad del río Pongora —que queda por el distrito de Ayacucho provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho —, pero no con un solo método, sino con dos: el de Robert Manning y el de Ven Te Chow. La idea no solo era obtener esos valores, sino también ver cómo se comparaban entre sí. En cuanto a cómo se hizo el estudio, se trabajó con un enfoque cuantitativo, fue una investigación tipo aplicada, el alcance fue descriptivo-comparativo y el diseño fue no experimental de corte transversal. La información se recogió mediante mediciones hidrométricas, topográficas y granulométricas en 06 puntos de control a lo largo del cauce. Con la información obtenida se determinó, evaluó y comparó la precisión de los métodos mediante pruebas estadísticas (T-Student), coeficiente de variación, desviación estándar, análisis de porcentajes de exactitud y correlación granulométrica. Los resultados indicaron que la metodología de Robert Manning presentó una mayor dispersión (C.V. 15.70%), mostrando sensibilidad a las irregularidades locales con una exactitud del 88.9%; mientras que la metodología de Ven Te Chow (método de velocidades) se adecuó mejor a las condiciones del río, demostrando mayor estabilidad y precisión (95.4%), con un coeficiente de rugosidad promedio de 0.051. Dichos resultados fueron validados al encontrarse dentro de los rangos establecidos por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S.G.S.) y permitieron generar una ecuación específica en función del diámetro D_{90} ($n = 0.053D_{90}^{1/6}$).

ABSTRACT

The objective of this study was, basically, to calculate the roughness coefficients of the Pongora River —located in the Ayacucho district, Huamanga province, Ayacucho department—, but not using a single method, but rather two: Robert Manning's and Ven Te Chow's. The idea was not only to obtain these values, but also to see how they compared with each other. Regarding the methodology of the study, it was conducted with a quantitative approach, it was applied research, the scope was descriptive-comparative, and the design was non-experimental with a cross-sectional cut. Information was collected through hydrometric, topographic, and granulometric measurements at six control points along the riverbed. With the information obtained, the accuracy of the methods was determined, evaluated, and compared using statistical tests (Student's t-test), coefficient of variation, standard deviation, analysis of accuracy percentages, and granulometric correlation. The results indicated that Robert Manning's methodology presented greater dispersion (C.V. 15.70%), showing sensitivity to local irregularities with an accuracy of 88.9%; while Ven Te Chow's methodology (velocity method) was better suited to river conditions, demonstrating greater stability and accuracy (95.4%), with an average roughness coefficient of 0.051. These results were validated as they fell within the ranges established by the United States Geological Survey (USGS) and allowed a specific equation to be generated based on the diameter D_{90} ($n = 0.053D_{90}^{1/6}$).

Keywords: Velocity, Manning, Ven Te Chow, current meter, Roughness height, Roughness coefficient.

INTRODUCCIÓN

En la ingeniería hidráulica moderna, la modelación de flujos a superficie libre y la gestión del riesgo de inundaciones dependen intrínsecamente de la correcta caracterización de la resistencia al flujo. El coeficiente de rugosidad, comúnmente denotado como " n " de Manning, constituye el parámetro de mayor sensibilidad en las ecuaciones hidrodinámicas; su estimación precisa es determinante para el cálculo de tirantes, velocidades y la delimitación de fajas marginales. Una subestimación de este valor puede derivar en el colapso de defensas ribereñas por desbordamiento, mientras que su sobreestimación conlleva a sobre costos por el sobredimensionamiento de la infraestructura.

Sin embargo, la determinación de este parámetro en cauces naturales es compleja debido a la heterogeneidad del lecho. Autores como Fernández et al. (2018) y Chow (1959) sostienen que existen numerosos factores interdependientes que influyen en la rugosidad —tales como la granulometría, la vegetación, la irregularidad del canal y la alineación del flujo—, los cuales tienen un impacto directo en la capacidad de conducción del río. Por tanto, es crucial dedicar un esfuerzo técnico considerable a evaluar estas variables in situ, superando la mera selección subjetiva de tablas para obtener resultados que reflejen el verdadero comportamiento hidráulico del segmento analizado.

Bajo esta premisa, el presente estudio se centra en el río Pongora, Ayacucho, un cauce altoandino cuyas características geomorfológicas exigen un análisis riguroso. La investigación tiene como objetivo principal determinar los valores del coeficiente de rugosidad y, fundamentalmente, evaluar y comparar la exactitud que presentan las metodologías clásicas de Robert Manning (enfoque global) y Ven Te Chow (enfoque por componentes y velocidades). El propósito es identificar cuál de estos métodos ofrece una mayor confiabilidad técnica para ser aplicado en los proyectos de ingeniería de la región, reduciendo la incertidumbre asociada al diseño hidráulico en zonas de montaña.

Para lograr este cometido, se adoptó un diseño metodológico comparativo, determinando los valores de " n " mediante técnicas hidrométricas de precisión (aforo por distribución de velocidades con correntómetro y levantamiento topográfico) y métodos de estimación empírica (altura de rugosidad y factores de Cowan). Posteriormente, se

contrastaron los resultados mediante pruebas estadísticas de significancia y análisis de error relativo, validando la precisión de cada metodología frente a los estándares internacionales establecidos por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S.G.S.) y las tablas de Ven Te Chow. Finalmente, el estudio aporta una ecuación local calibrada en función de la granulometría, proporcionando una herramienta práctica y validada para la ingeniería local.

DEDICATORIA

Con amor y gratitud a mis padres, mis fuentes de inspiración y el motivo de todo mi esfuerzo. Son las persona que han estado a mi lado en cada paso de mi vida, apoyándome incondicionalmente y alentándome a alcanzar mis sueños.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por guiar mis pasos y por darme fuerzas para afrontar todas las situaciones difíciles que se me presentaron en el día a día, de mi vida.

A mis padres y familiares por su constante apoyo y aliento a lo largo de mi carrera. Su amor incondicional y palabras de aliento han sido la fuerza impulsora detrás de mis logros y me han brindado la confianza necesaria para enfrentar cada desafío que se ha presentado en mi camino.

Así como también deseo agradecer a mis amigos de la escuela profesional de ing. Civil, quienes han sido una fuente constante de colaboración.

Al MSc. Ing. Alex Sander Ircañaupa Huamani, asesor de la presente tesis, por sus recomendaciones, apreciaciones y por brindarme la información necesaria para realizar la presente tesis.

ÍNDICE

RESUMEN	II
ABSTRACT	III
INTRODUCCION	IV
DEDICATORIA	VI
AGRADECIMIENTO	VII
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	14
1.2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.	16
1.2.1. <i>Delimitación conceptual</i>	16
1.2.2. <i>Espacial (geográfica).</i>	16
1.2.3. <i>Delimitación poblacional</i>	16
1.2.4. <i>Delimitación espacial</i>	16
1.2.5. <i>Temporal.</i>	17
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.	17
1.3.1. <i>Problema general.</i>	17
1.3.2. <i>Problemas específicos.</i>	17
1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.	18
1.4.1. <i>Justificación teórica</i>	18
1.4.2. <i>Justificación práctica</i>	18
1.4.3. <i>Justificación metodológica</i>	19
1.4.4. <i>Importancia</i>	19
1.5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.	20
1.6. OBJETIVOS.	20
1.6.1. <i>Objetivo general.</i>	20
1.6.2. <i>Objetivos específicos.</i>	20
II. MARCO TEÓRICO	22
2.1. ANTECEDENTES DE ESTUDIO	22
2.1.1. <i>A nivel internacional</i>	22
2.1.2. <i>A nivel nacional</i>	24
2.2. BASE TEÓRICA	27
2.2.1. <i>Metodología de Robert Manning</i>	27

2.2.2.	<i>Pendiente</i>	28
2.2.3.	<i>Radio hidráulico</i>	28
2.2.4.	<i>Área hidráulica</i>	29
2.2.5.	<i>Metodología de Ven te Chow</i>	30
2.2.6.	<i>Coeficiente de rugosidad</i>	39
2.2.7.	<i>Error de medición humano</i>	39
2.3.	MARCO CONCEPTUAL	47
2.3.1.	<i>Tirante</i>	47
2.3.2.	<i>Flujo uniforme</i>	47
2.3.3.	<i>Capa límite</i>	47
2.3.4.	<i>Pendiente</i>	47
2.3.5.	<i>Radio hidráulico</i>	47
2.3.6.	<i>Velocidad de la corriente</i>	47
2.3.7.	<i>Velocidad 0.80y</i>	47
2.3.8.	<i>Velocidad 0.20y</i>	48
2.3.9.	<i>Rugosidad</i>	48
2.3.10.	<i>Altura de rugosidad “k”</i>	48
III.	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	49
3.1.	ENFOQUE	49
3.2.	ALCANCE	49
3.3.	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	49
3.4.	POBLACIÓN Y MUESTRA	50
3.5.	HIPÓTESIS	51
3.5.1.	<i>Hipótesis general</i>	51
3.5.2.	<i>Hipótesis específica</i>	51
3.6.	VARIABLES	51
3.7.	OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	53
3.8.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	55
3.8.1.	<i>Técnicas</i>	55
3.8.2.	<i>Instrumentos</i>	55
3.8.3.	<i>Procesamiento estadístico</i>	56
IV.	RESULTADOS	57
4.1.	PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL RÍO PONGORA	57
4.1.1.	<i>Ubicación de los puntos de estudio</i>	57

4.1.2.	<i>Características Hidráulicas y Geométricas de las Secciones del río Pongora.</i>	58
4.1.3.	<i>Coeficientes de rugosidad mediante la metodología de Robert Manning</i>	61
4.1.4.	<i>Coeficientes de resistencia, mediante la metodología de Ven te Chow</i>	63
4.1.5.	<i>Evaluar y comparar los valores obtenidos entre las metodologías de estudio</i>	74
V.	CONCLUSIONES	83
VI.	RECOMENDACIONES	85
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
	ANEXO	89

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.	TABLA DE ANCHOS RECOMENDADOS EN AFORO	34
TABLA 2.	RECOMENDACIÓN PARA CORRENTÓMETRO SEGÚN ANA	36
TABLA 3.	VALORES DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING (N) SEGÚN LA CONDICIÓN DEL CANAL	39
TABLA 4.	VALORES DE COEFICIENTE DE RUGOSIDAD PROPUESTA POR VEN TE CHOW	41
TABLA 5.	TABLA DE VALORES DEL COEFICIENTE DE ASPEREZA MEDIANTE COWAN	46
TABLA 6.	INSTRUMENTOS Y NORMATIVA EMPLEADA	55
TABLA 7.	UBICACIÓN DE PUNTOS DE ESTUDIO EN EL RÍO PONGORA	57
TABLA 8.	PENDIENTES EN EL RÍO PONGORA	59
TABLA 9.	TABLA DE PROFUNDIDADES DEL RÍO PONGORA	60
TABLA 10.	ÁREA, PERÍMETRO Y RADIO HIDRÁULICO	60
TABLA 11.	CAUDALES DETERMINADOS DE ACUERDO A LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL RÍO PONGORA	61
TABLA 12.	RESULTADOS DEL COEFICIENTE "N" POR LA METODOLOGÍA DE ROBERT MANNING (CALIBRADO)	61
TABLA 13.	LECTURAS DEL PA-01 (ANCHO DE ESPEJO DE AGUA = 13.32 M)	63
TABLA 14.	LECTURAS DEL PA-02 (ANCHO DE ESPEJO DE AGUA = 16.05 M)	64
TABLA 15.	LECTURAS DEL PA-03 (ANCHO DE ESPEJO DE AGUA = 20.05 M)	64
TABLA 16.	LECTURAS DEL PA-04 (ANCHO DE ESPEJO DE AGUA = 18.30 M)	64
TABLA 17.	RESUMEN DE VELOCIDADES MÁXIMAS, MÍNIMAS Y MEDIAS EN EL RÍO PONGORA	65
TABLA 18.	RELACIÓN DE VELOCIDAD X EN DIFERENTES CONDICIONES	65
TABLA 19.	RESULTADO DE "N" POR EL MÉTODO DE VELOCIDADES PA-01 (ANCHO 13.32M)	66
TABLA 20.	RESULTADO DE "N" POR EL MÉTODO DE VELOCIDADES PA-02 (ANCHO 16.05M)	67
TABLA 21.	RESULTADO DE "N" POR EL MÉTODO DE VELOCIDADES PA-03 (ANCHO 20.05M)	67
TABLA 22.	RESULTADO DE "N" POR EL MÉTODO DE VELOCIDADES PA-04 (ANCHO 18.30M)	68
TABLA 23.	RESUMEN DE "N" POR EL MÉTODO DE VELOCIDADES EN EL RÍO PONGORA	68

TABLA 24.	RESULTADOS DE ALTURA DE RUGOSIDADES (K) EN EL RÍO PONGORA	70
TABLA 25.	DIÁMETROS EFECTIVOS DEL MATERIAL DEL LECHO POR PUNTO MEDIDO (MM)	73
TABLA 26.	EVALUACIÓN COMPARATIVA: METODOLOGÍA ROBERT MANNING VS. VEN TE CHOW (VELOCIDADES)	74
TABLA 27.	PORCENTAJE DE EXACTITUD ENTRE LA MET. DE ROBERT MANNING (VISUAL) Y VEN TE CHOW (VELOCIDADES)	76
TABLA 28.	PORCENTAJE DE EXACTITUD ENTRE LA MET. DE ROBERT MANNING Y VEN TE CHOW	77
TABLA 29.	PRUEBAS DE NORMALIDAD	78
TABLA 30.	PRUEBA DE MUESTRAS EMPAREJADAS (T-STUDENT)	79

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.	CORTE TRANSVERSAL DE UN CAUCE	29
FIGURA 2.	CORTE TRANSVERSAL DE UN CAUCE	29
FIGURA 3.	IMAGEN ILUSTRATIVA DE CORRENTÓMETRO	33
FIGURA 4.	ANCHO DEL CAUCE	34
FIGURA 5.	FUNCIÓN $\Phi(R/K)$	37
FIGURA 6.	EJES DE UNA PARTÍCULA	38
FIGURA 7.	CURVA GRANULOMÉTRICA	39
FIGURA 8.	VALORES DE "N" SEGÚN LA METODOLOGÍA ROBERT MANNING	62
FIGURA 9.	VALORES DE "N" SEGÚN LA METODOLOGÍA VEN TE CHOW-VELOCIDADES	69
FIGURA 10.	FIGURA N VS K	71
FIGURA 11.	FIGURA $\Phi(R/K)$ VS R/K	72
FIGURA 12.	EVALUACIÓN ENTRE MET. ROBERT MANNING Y VEN TE CHOW	75

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

A nivel internacional, la estimación del coeficiente de rugosidad hidráulica representa uno de los desafíos metodológicos más críticos en la ingeniería fluvial, debido a su impacto directo en la precisión de los cálculos de velocidades, caudales y niveles de la lámina de agua. Si bien el coeficiente de Manning (n) y la metodología aditiva de Ven Te Chow se mantienen como los referentes de mayor aplicabilidad global, su implementación en cauces naturales enfrenta limitaciones debido a la variabilidad espacial del lecho y la heterogeneidad de la vegetación.

La literatura reciente sugiere que, en contextos de topografía compleja, el uso exclusivo de tablas generales puede inducir sesgos significativos. Por ello, la tendencia actual busca integrar características granulométricas y principios de fricción como los planteados teóricamente por Colebrook-White o enfoques de rugosidad compuesta para robustecer las estimaciones. Este panorama confirma la imperiosa necesidad de validar y comparar el desempeño de las metodologías clásicas en contextos geográficos específicos, especialmente en cuencas altoandinas donde la morfodinámica del cauce difiere de los entornos controlados donde se originaron dichas fórmulas.

En el ámbito nacional, la investigación hidráulica ha priorizado la validación de metodologías estandarizadas frente a la compleja geomorfología de los ríos andinos, caracterizados por pendientes pronunciadas y lechos acorazados. Al respecto, estudios como el de Carrillo, Arce y Vásquez (2020) en el río Santa (Áncash) evidencian que la granulometría del lecho ejerce una influencia determinante en la precisión de los cálculos, planteando la necesidad de ajustar el coeficiente de Manning a las condiciones locales. En esa misma línea, Bolaños Rodríguez (2024), en su análisis del río Sendamal (Cajamarca), reforzó la importancia de incorporar variables como la composición del material y la vegetación ribereña en los modelos predictivos.

De particular relevancia para esta investigación es el aporte de Ayvar Fuentes (2024) en el río Rontoccocha (Apurímac), quien contrastó directamente las metodologías de Robert Manning y Ven Te Chow. Sus hallazgos confirmaron que, si bien ambos métodos son vigentes, su precisión fluctúa según la configuración del cauce y la calidad

de la información disponible. Estos antecedentes convergen en la conclusión de que la aplicación directa de fórmulas empíricas sin una calibración 'in situ' conlleva incertidumbres, lo que justifica la necesidad de realizar validaciones comparativas en contextos hidrológicos específicos para garantizar la seguridad de la infraestructura hidráulica.

En el ámbito local, la estimación del coeficiente de rugosidad hidráulica en los afluentes de Ayacucho se ha posicionado como una prioridad técnica para la gestión eficiente de los recursos hídricos. La experiencia reciente demuestra que los cauces de la región presentan particularidades tales como lechos acorazados, alta pendiente y vegetación arbustiva variable que desafían la precisión de los métodos convencionales.

En este contexto, Huamán y Quispe (2023) estudiaron el comportamiento hidráulico del río Cachi, demostrando que la metodología de Manning requiere calibraciones específicas para representar adecuadamente la variabilidad del flujo. De manera complementaria, Gutiérrez (2022) evaluó las tablas de Ven Te Chow en el río Huatatas, destacando que este método ofrece una mayor sensibilidad a las irregularidades del canal, siempre que se sustente en una observación detallada.

La convergencia de estos hallazgos confirma la necesidad de validar estas herramientas en el río Pongora, un cuerpo de agua con características propias donde la comparación técnica entre las metodologías de Robert Manning y Ven Te Chow permitirá establecer criterios de diseño más seguros y acordes a la realidad física de Ayacucho.

Considerando la problemática expuesta sobre la variabilidad en los parámetros hidráulicos, se desarrolló la presente investigación titulada: 'Análisis comparativo de métodos para estimar el coeficiente de rugosidad en el río Pongora, Ayacucho – 2025'.

El estudio tuvo como propósito fundamental analizar y contrastar las estimaciones del coeficiente de rugosidad (n) obtenidas mediante el uso de las tablas clásicas de Robert Manning y la metodología aditiva de Ven Te Chow. A través de este análisis comparativo, se buscó evaluar la precisión, el grado de ajuste y la aplicabilidad de cada método sobre las características morfodinámicas específicas de dicho cauce, con el fin de proponer el criterio más adecuado para futuros modelamientos hidráulicos en la zona.

1.2. Delimitación del problema.

1.2.1. Delimitación conceptual

La estudio de la investigación se circunscribe al campo de la hidráulica de canales abiertos, enfocándose específicamente en el análisis de la resistencia al flujo.

- Coeficiente de rugosidad (n): Se abordará como la variable que representa la resistencia friccional del lecho y las paredes del cauce, excluyendo pérdidas por singularidades mayores (como puentes o caídas bruscas) no contempladas en las metodologías estándar.
- Metodologías de estimación: El estudio se limita estrictamente a la comparación de dos enfoques empíricos: el método visual basado en tablas de referencia (Robert Manning) y el método aditivo de factores de corrección (Ven Te Chow / Cowan). No se abarcarán métodos teóricos de rugosidad absoluta (como Nikuradse) ni modelamientos en CFD (Dinámica de Fluidos Computacional).

1.2.2. Espacial (geográfica).

El estudio se desarrollará específicamente en el río Pongora, en el tramo aledaño a la Comunidad de Pongora, distrito de Ayacucho, provincia de Huamanga. Se seleccionará tramos representativos (rectos y uniformes) que permitirán la correcta aplicación de las metodologías de aforo y levantamiento topográfico, garantizando la accesibilidad y la representatividad de la muestra.

1.2.3. Delimitación poblacional

El universo de estudio comprende los ríos de la provincia de Huamanga, caracterizados por pertenecer a la vertiente interandina, con regímenes torrentosos y lechos de grava y bolonería. Esta delimitación permite inferir la aplicabilidad de los resultados a otros cauces de similares características geomorfológicas e hidrológicas dentro de la región.

1.2.4. Delimitación espacial

El estudio se desarrollará específicamente en el río Pongora, en el tramo aledaño a la Comunidad de Pongora, distrito de Ayacucho (o el distrito correspondiente según ubicación exacta), provincia de Huamanga. Se seleccionarán tramos representativos (rectos y uniformes) que permitan la correcta aplicación de las metodologías de aforo y

levantamiento topográfico, garantizando la accesibilidad y la representatividad de la muestra.

1.2.5. Temporal.

La recolección de datos de campo se realizará durante el periodo de junio a agosto del año 2025. Esta delimitación corresponde a la época de estiaje en la sierra peruana, lo cual garantiza:

- ✓ Seguridad para el ingreso al cauce durante los aforos y topografía.
- ✓ Estabilidad en el caudal base, minimizando las variaciones bruscas de nivel durante las mediciones.
- ✓ Evaluación de la rugosidad en condiciones de flujo bajo/medio, donde la interacción del fluido con el material del lecho (granulometría) es predominante.

1.3. Formulación del problema.

1.3.1. Problema general.

¿Cómo se realizará la evaluación comparativa del coeficiente de rugosidad mediante las metodologías de Ven Te Chow y Robert Manning en el río Pongora, Ayacucho 2025?

1.3.2. Problemas específicos.

- ✓ ¿Cómo se determinarán los coeficientes de rugosidad mediante la metodología de Robert Manning en el río Pongora, Ayacucho 2025?
- ✓ ¿Cómo se determinarán los coeficientes de rugosidad mediante la metodología de Ven Te Chow en el río Pongora, Ayacucho 2025?
- ✓ ¿Cómo se evaluarán y compararán los valores obtenidos mediante las metodologías de Ven Te Chow y Robert Manning en el río Pongora, Ayacucho 2025?

1.4. Justificación e importancia.

1.4.1. Justificación teórica

Este trabajo tiene una justificación teórica al abordar la incertidumbre asociada a la determinación de la resistencia al flujo en cauces naturales, un aspecto crítico en la hidráulica fluvial. Si bien la ecuación de Manning constituye el modelo matemático fundamental para el diseño de canales, su precisión depende intrínsecamente de la correcta selección del coeficiente n , el cual está condicionado por la morfodinámica del lecho (Loayza, 2022). En contraste, el enfoque de Ven Te Chow propone una parametrización más rigurosa, descomponiendo la rugosidad en factores aditivos que consideran la vegetación, las irregularidades y la variabilidad de la sección, ofreciendo teóricamente una mayor exactitud en escenarios complejos (Ayvar, 2023).

Al respecto, Burgos (2017) sostiene que "la estimación del coeficiente de rugosidad es clave en modelos hidráulicos", evidenciando que la integración de análisis granulométricos y mediciones empíricas es indispensable para calibrar estos modelos. Por tanto, el valor teórico de este estudio reside en la contrastación de metodologías estandarizadas frente a la realidad física de un río altoandino. Los resultados obtenidos no solo validarán la aplicabilidad de estas fórmulas en el río Pongora, sino que enriquecerán el cuerpo de conocimientos de la hidrología regional, sirviendo como base referencial para futuros ajustes en los modelos de simulación hidráulica.

1.4.2. Justificación práctica

Desde una perspectiva aplicada, el estudio contribuye directamente a mejorar la gestión de los recursos hídricos en la cuenca de río Pongora. La aplicación de metodologías calibradas, ya sea mediante las tablas de Manning o el análisis detallado de Ven Te Chow, permitirá realizar modelamientos hidráulicos más fieles a la realidad (Loayza, 2022). Esto es fundamental para la prevención de desastres, ya que permite identificar con mayor precisión las zonas vulnerables ante máximas avenidas.

Asimismo, la investigación aporta instrumentos técnicos para resolver la problemática de la variabilidad del flujo en cauces irregulares, un desafío constante en la sierra peruana. Al definir qué método ofrece mayor precisión en campo, se facilita la toma de decisiones en proyectos de saneamiento, riego y drenaje pluvial que interactúan con el

río, garantizando, como sugiere la literatura especializada, infraestructuras más resilientes y funcionales frente a la hidrodinámica del sector.

1.4.3. Justificación metodológica

Desde el punto de vista metodológica, la investigación aporta un protocolo sistemático para la validación de parámetros hidráulicos en campo. A diferencia de la aplicación aislada de fórmulas, este estudio establece un procedimiento comparativo estructurado que confronta métodos cualitativos (observación visual mediante tablas de Manning y Ven Te Chow) con métodos cuantitativos (calibración hidráulica mediante aforo y topografía).

El valor metodológico reside en la estandarización del proceso de recolección de datos en ríos altoandinos, demostrando la viabilidad de utilizar instrumentos de precisión (correntómetro y estación total) para reducir la incertidumbre de los métodos empíricos. Asimismo, los instrumentos de registro diseñados y adaptados para esta investigación (fichas de evaluación de factores de rugosidad) podrán ser replicados por futuros investigadores en otros afluentes de la provincia de Huamanga, sirviendo como un modelo de referencia para estudios de hidrología operativa.

1.4.4. Importancia

Lo que hace importante este estudio es justamente la necesidad de reducir la incertidumbre en los modelos hidráulicos aplicados a ríos de alta montaña. Al ser el coeficiente de rugosidad (n) el parámetro de mayor sensibilidad y difícil cuantificación en las ecuaciones de flujo, su correcta estimación constituye la piedra angular para la fiabilidad de cualquier proyecto de ingeniería fluvial en la región.

Trascendencia en la Ingeniería Hidráulica Regional

El estudio es relevante porque genera evidencia empírica sobre el comportamiento de fórmulas clásicas (Manning y Ven Te Chow) en un entorno geográfico específico: los Andes peruanos. Dado que estas metodologías fueron desarrolladas originalmente en contextos foráneos, su validación en el río Pongora permite determinar cuál se ajusta mejor a la realidad de los cauces con pendientes pronunciadas y lechos de granulometría gruesa, proporcionando a los ingenieros locales un criterio técnico fundamentado para elegir el método más idóneo.

Impacto en la Seguridad y Gestión de Riesgos

La investigación posee una importancia vital para la Gestión de Riesgos de Desastres (GRD). Una estimación precisa del coeficiente de rugosidad es indispensable para la delimitación correcta de fajas marginales y mapas de inundación. Si se utiliza un valor de "n" incorrecto, se corre el riesgo de subestimar los niveles máximos de agua, permitiendo asentamientos humanos en zonas vulnerables, o de sobreestimarlos, inutilizando terrenos seguros. Este estudio aporta datos confiables para que entidades como la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y los gobiernos locales tomen decisiones territoriales más seguras.

Optimización de la Inversión Pública

Desde una perspectiva económica, la importancia del estudio reside en la optimización de los recursos del Estado. En el diseño de defensas ribereñas, puentes y obras de captación en el río Pongora, el coeficiente de rugosidad influye directamente en las dimensiones de la estructura. Definir con mayor exactitud este parámetro evita el sobredimensionamiento (obras innecesariamente grandes y costosas) y el sub dimensionamiento (obras que colapsan prematuramente), garantizando así la eficiencia y sostenibilidad de la infraestructura pública en Ayacucho.

1.5. Limitaciones de la investigación.

Cabe señalar que este estudio no presenta ningún tipo de limitación que restrinja sus resultados o alcances.

1.6. Objetivos.

1.6.1. Objetivo general.

Analizar y comparar la estimación de los coeficientes de rugosidad mediante las metodologías de Ven Te Chow y Robert Manning, evaluando su precisión y aplicabilidad en el río Pongora, Ayacucho 2025.

1.6.2. Objetivos específicos.

- ✓ Determinar los coeficientes de rugosidad mediante la metodología de Robert Manning, evaluando su precisión y aplicabilidad en el río Pongora, Ayacucho 2025.

- ✓ Determinar los coeficientes de rugosidad mediante la metodología de Ven Te Chow, evaluando su precisión y aplicabilidad en el río Pongora, Ayacucho 2025.
- ✓ Evaluar y comparar los valores obtenidos mediante las metodologías de Ven Te Chow y Robert Manning, analizando su precisión y aplicabilidad en el río Pongora, Ayacucho 2025.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

2.1.1. A nivel internacional

Yépez et al. (2000), en la investigación titulada “Cálculo del coeficiente de rugosidad ‘n’ de Manning en los grandes ríos de Venezuela”, tuvieron como objetivo principal determinar el coeficiente de aspereza mediante el uso de la ecuación de Manning, integrando las distribuciones de velocidad resultantes de aforos realizados por organismos oficiales en diversos cauces naturales. La metodología aplicada se basó en el análisis hidráulico de canales rugosos asumiendo una distribución logarítmica del perfil de velocidades. Los resultados permitieron establecer una correlación matemática directa entre la resistencia al flujo y la litología del cauce, concluyendo que el coeficiente de rugosidad puede estimarse con alta precisión mediante la ecuación empírica $n=0.00336k^{1/6}$, donde k representa el diámetro representativo de las partículas del lecho. El aporte de este antecedente a la tesis en desarrollo radica en la validación teórica de la influencia determinante que ejerce la granulometría sobre el valor de “n”, un criterio fundamental que servirá de base para analizar la componente de "irregularidad del lecho" al aplicar tanto las tablas de Manning como los factores de Ven Te Chow en el río Pongora.

León y Parra (2018), en el estudio “Estimación del coeficiente de Manning con el método de los dos puntos en el río Negro (Cundinamarca)”, tuvieron como finalidad evaluar el comportamiento del coeficiente de rugosidad aplicando la técnica hidrométrica de velocidad de dos puntos en diversas estaciones limnigráficas de la cuenca. La metodología empleada se basó en el método de distribución de velocidades (mediciones a 0.2 y 0.8 de la profundidad) para determinar experimentalmente el valor de "n" en secciones naturales. Los resultados derivaron en ecuaciones de potencia específicas para cada estación (por ejemplo, $n = 0.0325k^{0.1509}$ en la estación Charco Largo), estableciendo una correlación matemática directa entre la resistencia al flujo y la rugosidad absoluta del lecho (k). Se concluyó que el coeficiente de Manning no es uniforme y depende intrínsecamente de las características granulométricas locales, requiriendo ajustes zonificados; este antecedente aporta significativamente a la presente tesis al validar el método de aforo por distribución de velocidades como una técnica

confiable para obtener el valor de control ("n" calibrado), el cual servirá de patrón para evaluar la precisión de las metodologías visuales de Manning y Ven Te Chow en el río Pongora.

Fernández et al. (2018), en el estudio titulado “Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales”, tuvieron como finalidad evaluar la precisión en la estimación del valor "n" aplicando diversos enfoques metodológicos en una sección transversal del río Yanuncay en Cuenca, Ecuador. La metodología adoptó un diseño comparativo, contrastando técnicas empíricas como el método de Cowan, los criterios del Servicio de Conservación de Suelos (S.C.S.) y las tablas de Ven Te Chow, frente a valores calibrados mediante modelamiento hidráulico. Los resultados evidenciaron una alta convergencia entre los valores simulados en HEC-RAS ($n=0.042$) y los obtenidos por los métodos de Cowan (0.042) y Ven Te Chow (0.042-0.043), mientras que las guías de la USGS presentaron sobreestimaciones significativas (entre 0.051 y 0.073). Se concluyó, con un nivel de confianza del 90%, que las metodologías de Cowan, S.C.S. y Ven Te Chow constituyen las herramientas más precisas para determinar la rugosidad crítica y su variabilidad en cauces naturales; este antecedente es de vital importancia para la tesis en desarrollo, pues valida estadísticamente la hipótesis de que el método de Ven Te Chow (basado en la adición de factores tipo Cowan) ofrece una exactitud superior en comparación con métodos de selección de rangos generales, respaldando la pertinencia de su aplicación para mejorar la modelación hidráulica en el río Pongora.

Pastora (2010), en la investigación titulada “Evaluación de la Fórmula de Manning en el Río Ostúa”, tuvo como finalidad evaluar la aplicabilidad y precisión de la ecuación de Manning para la estimación de caudales en cauces naturales, basándose en el análisis de información hidrométrica recolectada en diversas estaciones de control. La metodología consistió en el cálculo inverso de la rugosidad a partir de datos de aforo y características geométricas del cauce. Los resultados evidenciaron una notable variabilidad espacial del parámetro, determinándose un coeficiente de rugosidad "n" de 0.040 en la estación Las Cruces, asociada a un lecho arenoso con piedras dispersas, frente a un valor de 0.121 en la estación Las Lechuzas, caracterizada por material de mayor diámetro y aspereza. Se concluyó que la composición granulométrica del lecho es el factor

gobernante en la resistencia al flujo; este antecedente aporta significativamente a la presente tesis al demostrar cuantitativamente la sensibilidad del coeficiente "n" frente a los cambios litológicos del cauce, justificando la necesidad de realizar una caracterización detallada de los tramos del río Pongora para evitar generalizaciones erróneas al aplicar las metodologías de Manning y Ven Te Chow.

Ruberto (2003), en la investigación “Estudio exploratorio de la sensibilidad del coeficiente de rugosidad en un río de llanura”, tuvo como finalidad analizar la sensibilidad hidrodinámica del coeficiente de rugosidad "n" de Manning frente a variaciones en la pendiente motriz en un cauce de la Llanura Chaqueña. La metodología se basó en un análisis de sensibilidad paramétrica, evaluando la respuesta de la ecuación de Manning ante distintos escenarios de gradiente hidráulico. Los resultados demostraron una alta volatilidad del parámetro, estimándose que el coeficiente "n" incrementaba drásticamente (pasando de rangos de 0.032-0.062 a 0.048-0.101) ante variaciones marginales en la pendiente (de 0.00003 a 0.00007 m/m). Se concluyó que la precisión en la determinación de la pendiente de energía es un factor crítico, pues ligeras desviaciones inducen errores significativos en la rugosidad calculada; este antecedente aporta una alerta metodológica fundamental para la tesis en el río Pongora, subrayando que, para comparar correctamente las metodologías de Manning y Ven Te Chow con valores reales, es indispensable realizar un levantamiento topográfico de alta precisión que garantice la correcta medición de la pendiente del cauce, evitando así sesgos en la calibración del modelo.

2.1.2. A nivel nacional

Rojas (2021), en la tesis titulada “Comportamiento del flujo en canales abiertos por cambios de rugosidad – canal Sahuinto, Abancay, Apurímac, 2021”, tuvo como objetivo analizar la variación de la resistencia al flujo y verificar el comportamiento hidráulico mediante la aplicación de la ecuación de Manning en tramos afectados por falta de mantenimiento. La metodología siguió un enfoque cuantitativo, correlacionando el estado físico de la infraestructura con los parámetros de flujo medidos. Los resultados revelaron una alteración significativa de las condiciones de diseño debido a la acumulación de sedimentos (0.1923 m^3) y deterioro estructural (desprendimiento de juntas y rupturas), provocando que el coeficiente de rugosidad fluctúe drásticamente entre 0.011 y 0.058 para el rango de caudales evaluado. Se concluyó que las alteraciones físicas y la

sedimentación en la superficie de contacto incrementan la resistencia al flujo muy por encima de los valores teóricos; este antecedente aporta un criterio de alerta para la presente tesis en el río Pongora, evidenciando que la acumulación de material de arrastre y sedimentos en el lecho del río no puede ser ignorada, ya que estos factores modifican sustancialmente el coeficiente "n", debiendo ser penalizados adecuadamente al aplicar la metodología de factores de Ven Te Chow.

Chinchay (2020), en la investigación titulada “Comparación de métodos Analíticos en el cálculo del coeficiente de rugosidad frente al de Manning, en la parte baja de cinco subcuencas del río Santa, entre Recuay y Caraz, 2019”, tuvo como finalidad analizar la precisión del coeficiente de rugosidad obtenido mediante distintas estrategias de estimación (método de velocidad, altura de rugosidad y método de Cowan) frente al valor derivado de la ecuación de Manning en cauces de alta montaña. La metodología empleada fue de enfoque cuantitativo comparativo, evaluando tramos de la margen derecha de la cuenca del Río Santa. Los resultados estadísticos evidenciaron discrepancias significativas: el cálculo estándar de Manning arrojó una media de 0.0587 con una alta dispersión (coeficiente de variación del 27.50%), mientras que el método basado en la velocidad subestimó la resistencia (0.0331), resultando inadecuado para ríos torrentosos. Por el contrario, el método de Cowan presentó un valor medio de 0.0494 con una variabilidad controlada del 20.92%. Se concluyó que la metodología de Cowan (Ven Te Chow) demuestra una mayor adecuación técnica para caracterizar las quebradas de la zona andina; este antecedente constituye un respaldo fundamental para la tesis en el río Pongora, pues ofrece evidencia regional de que los métodos de factores aditivos superan en precisión a las estimaciones simplificadas en contextos geomorfológicos similares a los de Ayacucho.

Rosales (2019), en la investigación titulada “Modelo de estimación del coeficiente de rugosidad de Manning en función de la granulometría en el río Santa, sector Recuay-Carhuaz, Ancash, Perú”, se propuso como objetivo desarrollar un modelo matemático insesgado para la determinación del coeficiente de rugosidad basado en las características físicas del lecho. La metodología aplicó un enfoque correlacional, triangulando datos obtenidos mediante mediciones de velocidad, la ecuación clásica de Manning y el método de los factores de Cowan. Los resultados estadísticos permitieron generar una ecuación de

regresión con un alto grado de ajuste (Coeficiente de determinación $R^2 = 0.956$), estableciendo un valor medio representativo de rugosidad de 0.042 para el sector evaluado. Se concluyó que la incorporación de variables granulométricas mejora sustancialmente la predicción del parámetro de resistencia; este antecedente es de alta relevancia para la tesis en el río Pongora, pues proporciona un marco de referencia cuantitativo (un R^2 alto) que justifica la inclusión del análisis granulométrico como una variable de control indispensable para validar la precisión de las metodologías visuales de Manning y Ven Te Chow.

Burgos (2016), en el estudio titulado “Estimación del coeficiente de rugosidad de Manning mediante mediciones de velocidad y profundidad, empleando un molinete hidrométrico, en el río Chonta, Cajamarca”, tuvo como finalidad determinar experimentalmente el coeficiente de rugosidad mediante la caracterización hidrométrica directa del cauce. La metodología se basó en el levantamiento de secciones transversales y la medición de la distribución de velocidades utilizando un correntómetro, correlacionando posteriormente la resistencia hidráulica obtenida con la granulometría del lecho. Los resultados permitieron establecer modelos matemáticos de predicción con un nivel de confianza de 0.82, proponiendo ecuaciones como $n = 0.0438k^{1/6}$ donde el parámetro de rugosidad (k) se asoció al diámetro d_{30} de las partículas, reportando un coeficiente " n " promedio de 0.0301 para el tramo evaluado. Se concluyó que el tamaño del material del fondo influye de manera determinante en la fricción del flujo; este antecedente aporta un criterio cuantitativo fundamental para la presente tesis, validando el uso del análisis granulométrico (específicamente el d_{30}) como una variable de control objetiva para verificar la precisión de las estimaciones visuales que se realizarán con los métodos de Manning y Ven Te Chow en el río Pongora.

Chugnas y Mantari (2016), en la investigación titulada “Determinación Experimental del Coeficiente de Rugosidad de Manning Superficies Granulares Mediante la Simulación de un Cauce Natural de Sección Rectangular”, tuvieron como objetivo validar experimentalmente el valor del coeficiente de rugosidad recreando las condiciones físicas de un cauce natural bajo parámetros controlados. La metodología consistió en la simulación hidráulica de superficies granulares y la determinación inversa del parámetro

"n" a partir de las variables de flujo medidas. Los resultados demostraron una alta concordancia entre los datos experimentales y la literatura técnica, obteniendo un valor de $n = 0.026$ para lechos rocosos (dentro del rango teórico 0.023-0.033) y de $n = 0.064$ para configuraciones de topografía accidentada (intervalo esperado 0.050-0.080). Se concluyó que la simulación física permite reproducir con fidelidad los coeficientes de fricción de la naturaleza; este antecedente respalda la tesis en desarrollo al confirmar que los rangos teóricos propuestos por las metodologías clásicas son verificables empíricamente, lo que sustenta la validez del diseño comparativo entre los valores tabulados y los aforos de campo que se ejecutarán en el río Pongora.

2.2. Base teórica

2.2.1. Metodología de Robert Manning

“Es una fórmula aplicada en todo el mundo y se deriva de la incorporación de un coeficiente C de Chezy en la fórmula, de manera monómica” (Villon, 1995), en lo siguiente:

Ec. 1: Ecuación Chezy.

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (1)$$

Sustituyendo la C de Chezy, se tiene:

$$v = \frac{1}{n} R^{1/6} \sqrt{RS}$$

$$v = \frac{1}{n} R^{1/6} R^{1/2} S^{1/2}$$

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6} + \frac{1}{2}} S^{1/2}$$

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{4}{6}} S^{\frac{1}{2}}$$

Ec. 2: Ecuación de velocidad

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Con: V: Velocidad (m/s)

R: Radio hidráulico, (ml)

S: pendiente, (ml/ ml)

n: coeficiente de rugosidad”.

Derivando la ecuación:

Ec. 3: Metodología de Robert Manning

$$Q = \frac{1}{n} A R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Con: Q: Caudal (m3/s); A: Área (m2); R: Radio hidráulico (ml) y S: Pendiente (ml/ ml).

2.2.2. Pendiente

“Es esencial obtener con suficiente precisión la pendiente para calcular el coeficiente de rugosidad utilizando la ecuación de Manning. En el momento en que se toma una corriente uniforme, se piensa en la línea de desgracia de la cabeza y la inclinación de la superficie del agua. son iguales o paralelas. Varios autores utilizan este dato como estimación de la línea de perdida de carga. Para la precisión de la medición de este dato se logra empleando un equialtimetro y otro aparato topográfico similar. A continuación, se presenta la fórmula a emplear” (Mayo, 2010):

Ec. 4: Pendiente

$$I = \tan \alpha = \frac{H_m - h_m - H_{ap} + h_{ap}}{D} \quad (4)$$

Con:

Altura del equipo estacionado (Hap)

Altura del agua en el punto de estación (hap)

Altura del agua con la mira (hm)

Valores descritos en los hilos extremos (distancia entre el punto estación y mira)

Valor en hilo central (Hm para el desnivel)

2.2.3. Radio hidráulico

“Proporción de la región de la sección transversal con respecto al borde mojado en una corriente o curso de agua” (Rocha, 2007).

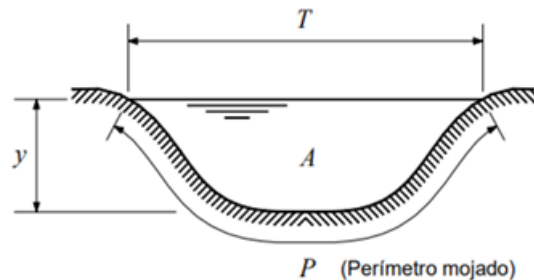
Ec. 5: Radio hidráulico.

$$R = \frac{A}{P} \quad (5)$$

Con: “R: Radio Hidráulico, (ml); A: Área transversal, (m2) y P: Perímetro mojado, (ml)”.

Tratándose del canal, se considera el perímetro mojado, como se representa en la Figura N° 1.

Figura 1.
Corte transversal de un cauce



Fuente: Adaptado de hidráulica de tuberías y canales (Rocha, 2007, p, 10).

Donde:

y: Altura media, es la proporción del área hidráulica y el espejo de agua, representada en la siguiente fórmula:

Ec. 6: Profundidad media

$$y = \frac{A}{T} \quad (6)$$

Donde:

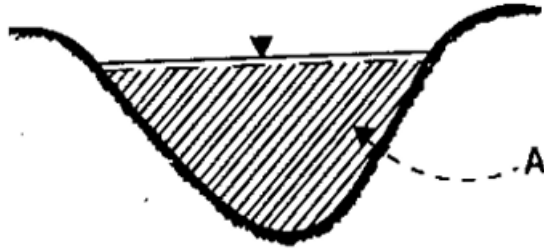
A: Área hidráulica, (m2).

T: Tirante, (ml).

2.2.4. Área hidráulica

“Se refiere al área del líquido de una sección transversal típica” (Villon, 1995)

Figura 2.
Corte transversal de un cauce



Fuente: Adaptado de Hidráulica de canales (Villon, 1995).

2.2.4.1. *Caudal o gasto*

“Caudal o gasto Q aborda la cantidad de volumen de líquido que atraviesa una pieza por cada unidad de tiempo” (Rocha, 2007).

Ec. 7: Caudal o Gasto.

$$Q = V * A \quad (7)$$

Con: “ Q : Caudal, (m^3/s); V : Velocidad, (m/s); A : Área del fluido, (m^2)”.

2.2.5. Metodología de Ven te Chow

“Este método consiste en la aplicación a fluidos que presentan los lechos con sedimentos que tienen movimiento” (Chow, 1994). El principio logarítmico se aplica a la dispersión de la velocidad, como se observa en la condición subsiguiente:

Ec. 8: Distribución de velocidades

$$v = 5.75V_f \log \frac{30y}{k} \quad (8)$$

En superficies rugosas, “La manera en que se distribuyen las velocidades del agua depende directamente de la altura de la rugosidad del cauce, y esta variable suele estar vinculada al método de Manning y la ecuación correspondiente”.

Ec. 9: Manning con respecto a la altura de rugosidad.

$$n = \phi \left(\frac{R}{k} \right) k^{1/6} \quad (9)$$

El coeficiente de rugosidad n es un factor clave en la distribución de velocidades. Su comprensión permite establecer el valor de n de Manning, como lo han aplicado Boyer y otros investigadores mediante la proporción de tenacidades en conductos hidráulicos.

“Se define $V_{0.20}$ como la longitud de 0.20 entre el espejo de agua y el fondo del canal rugoso ancho, con y representando la altura del agua”, expresada en la ec. N° 08:

Ec. 10: Veloc. a 0.20 profundidad

$$V_{0.20} = 5.75 V_f \log \frac{2.4y}{k} \quad (10)$$

Entonces, sea $V_{0.80}$ Velocidad al 80% de profundidad respecto al espejo de agua.

Ec. 11: Velocidad a 0.80 profundidad

$$V_{0.80} = 5.75 V_f \log \frac{6y}{k} \quad (11)$$

Eliminando V_f en las ec. 9 y 10.

Ec. 12: Igualdad de ecuación de V_f

$$\log \frac{y}{k} = \frac{0.778(x+0.95)}{x-1} \quad (12)$$

Sustituyendo “x” en la ec. N° 12, $x=V_{0.20}/V_{0.80}$

Ecuación 13: Velocidad con respecto a x

$$v = V_f (3.25 + 5.75 \log \frac{RV_f}{v}) \quad (13)$$

Ec. (13), con $R=y$, simplificando.

Ec. 14: Radio hidráulico

$$\frac{V}{V_f} = \frac{1.78(x+0.95)}{x-1} \quad (14)$$

Ec. 15: Combinando con la ec. de Chezy

$$\frac{V}{V_f} = \frac{C}{\sqrt{g}} \quad (15)$$

Ec. 16: Combinación de chezy con ec. 15

$$\frac{V}{V_f} = \frac{y^{1/4}}{3.81n} \quad (16)$$

Igualando ec. N° (14) y (16) y determinar para n. Ec. 17: Coeficiente de rugosidad (método velocidades).

$$n = \frac{(x - 1)y^{1/4}}{6.78(x + 0.95)} \quad (17)$$

En cauces anchos con rugosidad, el valor de “n” obtenido mediante la ley logarítmica de distribución de velocidades representa la rugosidad del cauce. En cauces naturales, la variable “y” puede interpretarse como la elevación media del canal hidráulico.

2.2.5.1. *Velocidad medidas a 0.20 y 0.80 (profundidad en la corriente)*

“Para estimar el coeficiente de aspereza o rugosidad, se miden las velocidades en 0.20 y 0.80 veces la profundidad de la sección $V_{0.20}$ y $V_{0.80}$, según Mayo (2010). “Este enfoque permite determinar las velocidades en distintos puntos de las áreas transversales. La fórmula $x=V_{0.20}/V_{0.20}$ se basa en los principios de distribución de velocidad en conductos hidráulicos, donde y representa la profundidad media o el radio hidráulico”.

2.2.5.2. *Aforos*

Para medir la velocidad en ríos, se emplearon correntómetros o molinetes, dispositivos que registran el flujo mediante señales eléctricas a un contómetro. Existen diferentes versiones: algunos tienen un eje vertical sin hélice con copas similares a un anemómetro, mientras que otros cuentan con un eje horizontal con hélice, como el correntímetro OTT. (Villon, 1995)

Para medir la velocidad en ríos, se emplearon correntómetros o molinetes, dispositivos que registran el flujo mediante señales eléctricas a un contómetro. Existen diferentes versiones: “algunos tienen un eje vertical sin hélice con copas similares a un anemómetro, mientras que otros cuentan con un eje horizontal con hélice, como el correntímetro OTT”. (OTT, 2019)

Ventajas

“El equipo OTT MF Pro, con tecnología de flujo magnético, es de fácil uso y bajo mantenimiento para medir eficientemente el flujo en canales abiertos. Su capacidad de cálculo automático optimiza el tiempo de campo, mientras que su sensor

electromagnético, prácticamente libre de mantenimiento, es ideal para velocidades de flujo bajas y altas concentraciones de materia en suspensión”.

Ámbito de aplicación.

El dispositivo automatiza los cálculos de velocidad según la norma ANA, reduciendo tiempos y minimizando errores de transcripción. Es de bajo mantenimiento al no tener componentes mecánicos móviles y su diseño compacto lo hace ideal para aguas poco profundas. Funciona desde 0 m/s, facilitando mediciones de velocidades bajas con alta precisión, incluso en presencia de sedimentos movedizos. Además, incorpora una pantalla táctil en color, visible a la luz del sol.

Características del equipo MF pro Automático Usado

El equipo MF Pro Automático mide la velocidad por inducción magnética (0-6 m/s) con una precisión del 2 % o 0.015 m/s en el rango de 0-3 m/s. Su sensor de presión calibrado permite mediciones de altura o profundidad hasta 3.05 m con igual margen de error. Posee memoria para almacenar hasta 32 perfiles de velocidad y opera en temperaturas entre -20 °C y 60 °C. Dispone de conexión USB tipo mini-B de 5 polos y permite cálculos en tiempo real, así como la representación del perfil de la corriente. Sus cables tienen longitudes de 2 m, 6 m, 12 m y 30 m.

Figura 3.
Imagen ilustrativa de Correntómetro



Fuente. Adaptado de (OTT MF pro - OTT HydroMet)

Formas de aforo

“La medición a pie se emplea en cuerpos de agua pequeños, poco profundos y con lecho resistente, utilizando una cinta para evaluar velocidades en distintas profundidades a lo largo de la sección transversal. También se puede establecer la sección con un cable extendido y realizar el aforo desde un bote. En ríos pequeños, se usa una pasarela instalada entre puntales, donde se coloca el aparato de control para medir las velocidades”. (Villon, 1995)

Proceso para realizar el aforo

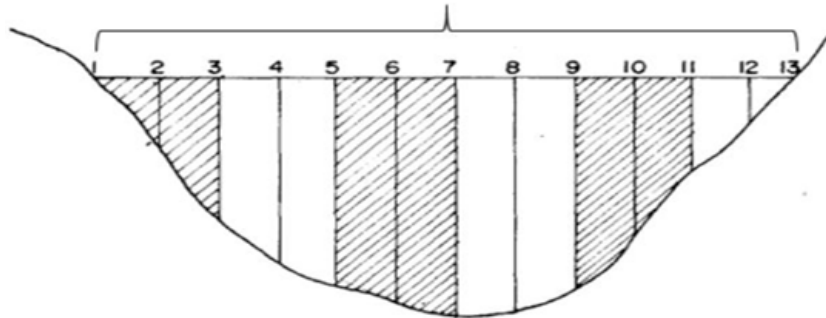
“Para comenzar una medición de aforo es necesario determinar el número de franjas dividiendo la longitud libre de agua entre el número de tramos” (Villon, 1995), con tal fin: se determina el ancho del río, correspondiente al ancho libre de agua (figura N° 04); en ciertos tramos dividir el ancho de la sección.

Ecuación 18: Ancho de cada tramo:

$$L = \frac{T_1}{n} \quad (18)$$

Donde: L: Ancho del cauce por tramo, (ml); T1: Ancho total del cauce, (ml); N: Número de tramos.

Figura 4.
Ancho del cauce



Fuente: Adaptado de Hidráulica de canales (p, 121), por Máximo Villón, 1995, Tecnológica de Costa Rica

PHC recomienda separaciones específicas, detallada en la Tabla N° 01:

Tabla 1.
Tabla de anchos recomendados en aforo

Ancho mínimo (ml)	Longitud entre verticales (ml)
Menos de 2	0.20
2-3	0.30
3-4	0.40
4-8	0.50
8-15	1.00
15-25	2.00
25-35	3.00
35-45	4.00
45-80	5.00
80-160	10.00
160-350	20.00

Fuente: Adaptado de libro proyecto Hidrometeorológico Centroamericano.

Medir la profundidad “h” en cada punto vertical, teniendo en cuenta que, en los bordes del canal, la profundidad puede ser negativa o cero.

“El área de cada segmento se calcula con el método trapezoidal. Para medir la velocidad media en un conducto hidráulico, se instala una wincha métrica a lo largo del ancho del río y se registran velocidad y profundidad en puntos regulares. La longitud de medición varía según el ancho del río: 0.1 m en quebradas de 1 m y 1 m en ríos de 10 m o más. La determinación de la velocidad media requiere múltiples mediciones en distintas alturas del conducto, influenciadas por el tirante del agua (y)” (ANA, 2016).

Tabla 2.
Recomendación para correntómetro según ANA

Altura de agua (d)	Altura de lectura del equipo
Cm	Cm
<15	d/2
15<d<45	0.60d
>45	0.20d, 0.80 y 0.60d

Fuente: Resolución Jefatural N° 010-2016 ANA

Del mismo modo, existen diversas variedades de correntímetros, siendo los más frecuentes los de tipo hélice, que varían en tamaño. La selección del tamaño del correntímetro depende de la magnitud del caudal; un caudal o una velocidad mayores requieren un correntímetro más grande.

Valor equivalente a la profundidad del agua

“Según lo que plantea la ecuación (06), cuando se trabaja en ríos de verdad, el valor de "y" se puede interpretar como la profundidad promedio del agua en el tramo que se está midiendo.” (Chow, 1994).

Método de medición de la rugosidad

Chow, (1994):

Ec. 23: Altura de rugosidad

$$\phi\left(\frac{R}{k}\right) = \frac{(R/k)^{1/4}}{21.9 \log(12.2R/k)} \quad (23)$$

Se reconoce la función $\phi(R/k)$. A continuación, se determina la “n” de Manning mediante la ecuación N° (24), que se refiere a la medición de la altura de rugosidad.

Ecuación 24: Coeficiente de aspereza con la altura de rugosidad.

$$n = \phi\left(\frac{R}{k}\right) k^{1/6} \quad (24)$$

Esta estrategia es aplicable a arroyos con lechos de sedimentos cambiantes. Según Einstein y Barbarroja, el intervalo impulsado por el agua RR se divide en dos segmentos: $R'R'$, asociado a la dureza superficial, y $R'R'$, vinculado al impacto del lecho de detritos móviles. La dureza superficial se representa por K_{65} , el tamaño de grano en el que el 65% del material es más grueso, determinado mediante inspección mecánica. La dureza del residuo en movimiento corresponde al K_{35} del 35%, obtenido a partir de pruebas en el tramo del arroyo. Doland y Chow demostraron que $\phi(R/k)$ influye en el desprendimiento de superficies cementadas y en el crecimiento de los sedimentos.

Ec. según Doland y Chow

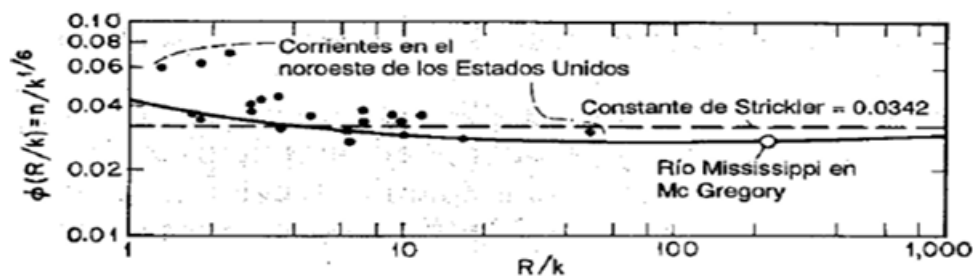
$$\phi\left(\frac{R}{k}\right) = \frac{0.0342}{(R'/k)^{2/3}} \quad (25)$$

Donde “el valor de R'/R depende del radio hidráulico R , la pendiente S y los tamaños de grano k_{65} y k_{35} . El valor de R'/R puede deducirse de las curvas semi empíricas presentadas”.

Función que relaciona el radio hidráulico con la altura de rugosidad k .

La ecuación muestra que la variación en $\phi(R/k)$ es mínima en un amplio rango, lo que permite asumir un valor constante típico. Strickler, basado en observaciones en Suiza, desarrolló una ecuación que, comparada con la ecuación (25), establece un valor promedio de $\phi(R/k) = 0.0342$. “Su nivel de dureza corresponde al tamaño medio del tamiz del material. La figura 05 correlaciona datos de arroyos del noroeste de EE.UU. y la vía fluvial del Mississippi”.

Figura 5.
Función $\phi(R/k)$



Fuente: Adaptado de Hidráulica de canales abiertos (p, 206), (Ven te Chow, 1994).

“El coeficiente de rugosidad n de Manning varía con la potencia $1/61/6$ de la altura de rugosidad, suponiendo que $\phi(R/k)$ es constante, según la ecuación (24)”. Una variación de 1.00 en el nivel de rugosidad genera un cambio de tres en “ n ”. El nivel de rugosidad del canal se considera una medida más directa de la rugosidad. Los errores en la determinación del nivel de rugosidad con la ecuación (24) son mínimos. Bakhmeteff y Feodoroff compararon la ecuación de Manning con otras, como las de Prandtl-von Kármán, GK y Bazin, concluyendo que la ecuación de Manning es el modelo más preciso.

Radio Hidráulico

Chow (1994) sostiene lo siguiente: “Es la relación de área hidráulica al perímetro mojado”.

Ecuación:

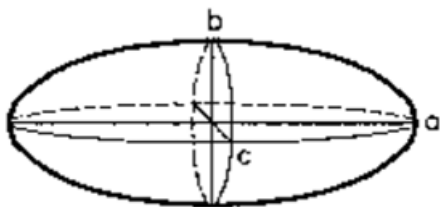
$$R_h = \frac{A}{P}$$

Con: R = Radio Hidráulico, (ml); A = Área transversal, (m²); P = Perímetro mojado, (ml).

Granulometría

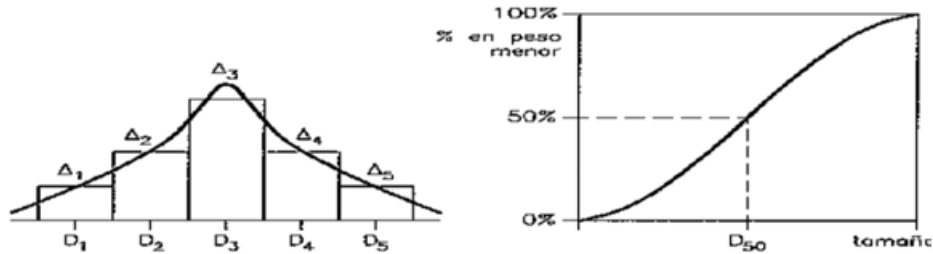
El muestreo volumétrico es el método más exhaustivo para extraer material subsuperficial de un cauce, removiendo primero la capa superficial y luego obteniendo un espesor representativo de partículas. La muestra debe representar al río, considerando criterios del 1% o 0.1% en peso, lo que equivale a 100-1000 kg si D_{max} es 10 cm. Los lechos fluviales pueden ser granulares o cohesivos. En los lechos granulares, el tamaño de partículas es el atributo más relevante, definido por la dimensión del segundo eje (bb) de un elipsoide, determinante para su paso o retención en un tamiz.

Figura 6.
Ejes de una partícula



Nota: Adaptado de Ingeniería de ríos (Vide,2004).

Figura 7.
Curva Granulométrica



Fuente: Adaptado de Ingeniería de ríos (Vide,2004)

2.2.6. Coeficiente de rugosidad

“Cuando hablamos de la variabilidad del coeficiente de rugosidad en sistemas hidráulicos, nos referimos a que el valor de "n" no es fijo, sino que puede cambiar dependiendo de las condiciones del cauce en diferentes tramos de una corriente, conducto o estructura hidráulica”. (Chadwick, 2021).

2.2.7. Error de medición humano

“La precisión en la estimación del coeficiente de Manning "n" es un punto crítico, ya que cualquier error en este parámetro resultaría en errores similares en velocidad y caudal del agua. Esto representaría un riesgo significativo en los diseños de obras hidráulicas y modelo inundaciones”. (Fernández, 2018)

Tablas de Coeficiente de Rugosidad

Las tablas presentan los valores mínimo, normal y máximo del coeficiente de rugosidad de Manning (n), “recomendando los valores normales para canales artificiales bien mantenidos y los resaltados en negrita para el diseño”. Se sugiere ajustar estos valores según las condiciones específicas y el mantenimiento del canal, ya que las tablas permiten una rápida determinación del valor n adecuado para cada caso.

Tabla 3.
Valores del Coeficiente de Rugosidad de Manning (n) según la condición del canal

Corrientes y canales	Condición del canal			
	Perfecto	Bueno	Medio	Malo
Canales Artificiales				

Canal de tierra alineado y uniforme	0.017	0.020	0.023	0.025
Canal en roca liso y uniforme	0.025	0.030	0.033	0.035
Canal en roca con saliente y sinuoso	0.035	0.040	0.045	-
Canal lento y sinuoso	0.023	0.025	0.028	0.030
Canal de tierra degradado	0.025	0.028	0.030	0.033
Canal de lecho de piedras con borde de tierra	0.025	0.030	0.035	0.040
Canal plantillado con tierra y taludes asperosos	0.028	0.030	0.033	0.035
Canales Naturales (Corrientes)				
1. Corrientes sin charcos profundos, limpio, borde recto y lleno	0.025	0.028	0.030	0.033
2. Igual al 1 con poca proporción de piedra y hierba	0.030	0.033	0.035	0.040
3. Corrientes sinuosos con escollos, limpio y algunos charcos	0.033	0.035	0.040	0.045
4. Parecido al 3 con poca profundidad, menos eficiencia en pendiente y sección	0.040	0.045	0.050	0.055
5. Parecido al 3 corriente con poca piedra y hierba	0.035	0.040	0.045	0.050
6. Parecido al 4 corriente con sección pedregosa	0.045	0.050	0.055	0.060
7. Corrientes lentas con hierba y charcos profundos	0.050	0.060	0.070	0.080
8. Corrientes en forma de playa con yerba	0.075	0.100	0.125	0.150

Fuente: Adaptado Hidráulica de Canales (p, 73), Máximo Villon, Tecnológica de Costa Rica.

Tabla 4.
Valores de Coeficiente de Rugosidad sugeridos por Ven te Chow

Descripción	Valor Mínimo	Valor Normal	Valor Máximo
Canal Excavado			
Canal de tierra con condición uniforme y recto			
1. Canal recién ejecutado y limpio	0.016	0.018	0.020
2. Canal expuesto a la intemperie	0.018	0.022	0.025
3. Canal en condición uniforme, limpio y con gravas	0.022	0.025	0.030
4. Canal con presencia poca de maleza y pasto corto	0.022	0.027	0.033
Canal de tierra lento y serpenteante			
1. Canal limpio sin vegetación	0.023	0.025	0.030
2. Canal con malezas y pasto	0.025	0.030	0.033
3. Canal con plantas acuáticas, malezas o densas	0.030	0.035	0.040
4. Canal de fondo de tierra con bordes de piedra	0.025	0.030	0.035
5. Canal con bancas de malezas y pedregoso	0.025	0.035	0.040
6. Canal limpio con fondo de cantos rodados	0.030	0.040	0.050
Canal excavado con herramientas como pala o dragado			
1. Canal sin vegetación	0.025	0.035	0.040
2. Canal con matorral ligero en las bancas	0.035	0.050	0.060
Canal en roca			
1. Canal uniforme y liso	0.025	0.035	0.040
2. Canal irregular y afilado	0.035	0.040	0.050
Canal con maleza sin mantener y sin cortar			
1. Canal con malezas densas altas con profundidad de flujo	0.050	0.080	0.120

2. Canal limpio y matorral en los costados	0.040	0.050	0.080
3. Canal con máximo flujo	0.045	0.070	
4. Canal con matorral denso y alto	0.080	0.100	0.140
Corrientes naturales o ríos			
Corrientes menores (ancho de la superficie con nivel creciente < 100 pies)			
Corrientes en planicies			
1. Corrientes limpia, recta con máximo nivel sin montículo	0.025	0.030	0.033
2. Igual al 1 con proporción de piedra y maleza	0.030	0.035	0.040
3. Corriente limpia sin pozos y con bancos de arena	0.033	0.040	0.045
4. Igual al 3 con piedras y matorrales	0.035	0.045	0.050
5. Igual al 4 con pendiente sección menos eficiente	0.040	0.048	0.055
6. Igual al 4 con más proporción de piedra	0.045	0.050	0.060
7. Corrientes lentas con maleza y pozo profundo	0.050	0.070	0.080
8. Corrientes con maleza, pozo profundo con muchos árboles y matorrales bajos	0.075	0.100	0.150
Corrientes montañosas sin vegetación, árboles y matorrales con bancas sumergidas			
1. Corriente con fondo de grava de cantos rodados y alguna proporción de roca	0.030	0.040	0.050
2. Corriente con fondo de cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070
Terrenos llanos o planicies de inundación			
Corrientes con pastizales sin matorrales			
1. Corriente con pasto corto	0.025	0.030	0.035
2. Corriente con pasto alto	0.030	0.035	0.050
Corriente en áreas cultivables			

1. Corriente sin cultivo	0.020	0.030	0.040
2. Corriente con cultivo de línea de maduros	0.025	0.035	0.045
3. Corriente con campos de cultivo maduro	0.030	0.040	0.050
Corriente en matorrales			
1. Corriente con matorrales con proporción mayor de maleza y dispersos	0.035	0.050	0.070
2. Corrientes con pocos matorrales y arboles de invierno	0.035	0.050	0.060
3. Corriente con pocos matorrales y arboles de verano	0.040	0.060	0.080
4. Corrientes con matorrales medios densos de invierno	0.045	0.070	0.110
5. Corriente con matorrales medios densos de verano	0.070	0.100	0.160
Corrientes en arboles			
1. Corrientes rectos de verano con sauces densos	0.110	0.150	0.200
2. Corriente con troncos sin retoño, pero limpios	0.030	0.040	0.050
3. Igual al 2 con mayor proporción de retoños	0.050	0.060	0.080
4. Corriente con matorrales, troncos, árboles y niveles del agua por debajo de ramas	0.080	0.100	0.120
5. igual al 4 con creciente superior de las ramas caídas	0.100	0.120	0.160
Corrientes mayores de ancho > 100 pies.			
El valor del coeficiente de aspereza es menor con respecto a las descripciones similares debido a la menor resistencia a la aspereza en las bancas			
Corrientes con área regular sin matorrales ni cantos	0.025		0.060
Corrientes con sección irregular y mayor aspereza	0.036		0.100

Fuente: Adaptado Hidráulica de Canales Abiertos (p, 110), Ven te Chow, Mc Graw Hill.

Factores que afecta al coeficiente de rugosidad

“Las tablas presentan los valores mínimo, normal y máximo del coeficiente de rugosidad de Manning (n), recomendando que para canales artificiales que reciben mantenimiento regular se usen los valores normales, mientras que los que están en negrita son los que se recomiendan para el diseño”. Se sugiere ajustar estos valores según las condiciones específicas y el mantenimiento del canal, ya que las tablas permiten una rápida determinación del valor “ n ” adecuado para cada caso:

- A. La rugosidad superficial “depende del tamaño de las partículas en el perímetro mojado de un canal, influyendo en la resistencia al flujo. Los materiales finos, como arena o limo, reducen la rugosidad, mientras que los materiales gruesos, como grava o cantos rodados, la incrementan”. En lechos poco profundos, n es bajo y estable, pero en depósitos de grava y rocas grandes, “ n ” tiende a ser elevado, especialmente en cotas bajas y altas. En niveles elevados, parte de la energía del caudal se emplea en desplazar las rocas, aumentando la rugosidad.
- B. La vegetación actúa como una obstrucción superficial que reduce el límite del canal y genera retrasos en el flujo.
- C. Las irregularidades del canal, como bordes, hoyas y colinas del lecho, aumentan la rugosidad y el coeficiente de Manning (n). Los cambios progresivos en la sección transversal no afectan “ n ”, pero las variaciones abruptas requieren valores mayores, desde 0.005 o más, especialmente cuando alteran la dirección del flujo.
- D. El alineamiento del canal influye en el coeficiente de rugosidad “ n ”. Curvas suaves con radios grandes tienen valores “ n ” bajos, mientras que curvas cerradas y meandros severos lo incrementan. Según el laboratorio Scobey, “ n ” puede aumentar 0.001 por cada 20 grados de curvatura en 100 pies de canal, aunque en la mayoría de los casos el incremento no supera 0.002 - 0.003. Además, la

curvatura puede favorecer la acumulación de material flotante, elevando indirectamente la rugosidad. En canales sin revestimiento con baja velocidad de flujo, este efecto es mínimo.

- E. La sedimentación reduce la rugosidad (n) al uniformizar el canal, mientras que la socavación puede incrementarla. La naturaleza del material depositado influye en la formación de anomalías, como bancos de arena y mareas. La composición del lecho determina la uniformidad de la socavación, siendo los lechos de arena y grava más estables que los de arcilla.
- F. La obstrucción en el canal, causada por elementos como troncos, muelles y estructuras similares, incrementa el valor de " n ". La magnitud de este aumento depende de la forma, tamaño, cantidad y distribución de los obstáculos dentro del cauce.
- G. No hay una conclusión definitiva sobre el impacto del tamaño y la forma del canal en el coeficiente de rugosidad " n ". Su valor puede fluctuar según las condiciones específicas del canal y las variaciones del radio hidráulico.
- H. El coeficiente de rugosidad " n " suele disminuir con el aumento del nivel y caudal del agua, pero en canales poco profundos, las irregularidades del lecho tienen mayor impacto. Si las orillas son escarpadas o densamente vegetadas, " n " puede aumentar en niveles elevados.
- I. El coeficiente de rugosidad " n " puede aumentar en la temporada de crecimiento debido a la invasión de vegetación en el canal y sus orillas, mientras que tiende a disminuir en la temporada de inactividad. Esta variabilidad estacional puede influir en otras propiedades del canal.

Las partículas en suspensión y la carga del lecho absorben energía y reducen la altura del agua, aumentando la rugosidad aparente del canal. La determinación del coeficiente “n” debe considerar las condiciones del canal, el caudal y el mantenimiento. Cowan desarrolló un método para cuantificar “n”, identificando los factores clave aguas arriba que influyen en su valor mediante la ecuación de Cowan.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5$$

El valor n_0 define la rugosidad en un conducto recto y uniforme con materiales estándar, mientras que n_1 considera la textura superficial, n_2 las variaciones en la sección transversal, n_3 los obstáculos y n_4 la vegetación. La Tabla N° 05 recoge estos valores y el parámetro adicional m_5 , según las condiciones establecidas.

Tabla 5.
Tabla de valores del coeficiente de aspereza mediante Cowan

Factor	Variable	Descripción del Canal	Valores
Material del cauce	n_0	Canal de tierra	0.020
		Canal en corte de roca	0.025
		Canal con grava fina	0.024
		Canal con grava gruesa	0.028
Grado de irregularidad	n_1	Suave	0.000
		Menor	0.005
		Moderado	0.010
		Severo	0.020
Variaciones de la sección transversal	n_2	Gradual	0.000
		Ocasionalmente alternante	0.005
		Frecuentemente alternante	0.010 - 0.015
Efecto relativo de las obstrucciones	n_3	Insignificante	0.000
		Menor	0.010 - 0.015
		Apreciable	0.020 - 0.030
		Severo	0.040 - 0.060
Vegetación	n_4	Baja	0.005 - 0.010

Grado de efectos por meandros	m_5	Media	0.010 - 0.025
		Alta	0.025 - 0.050
		Menor	1.000
		Apreciable	1.150
		Severo	1.300

Fuente: Adaptado Hidráulica de Canales Abiertos, Ven te Chow (1994)

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Tirante

Es la distancia desde el fondo del canal hasta el nivel superior del agua o la relación entre la superficie del agua y el área hidráulica.

2.3.2. Flujo uniforme

“Es un canal que mantiene constantes su sección transversal, radio hidráulico y velocidad con el tiempo, o que presenta fluctuaciones menores sin afectar significativamente estos parámetros, conservando su estabilidad”.

2.3.3. Capa límite

“Se refiere al punto exacto donde el flujo deja de ser laminar y pasa a ser turbulento dentro de una sección determinada del canal.”.

2.3.4. Pendiente

“Es la inclinación de un conducto hidráulico que no es más que la relación entre su desnivel vertical y su longitud horizontal.”.

2.3.5. Radio hidráulico

“Es la relación que se obtiene al dividir el perímetro mojado del canal entre su área de sección transversal.”.

2.3.6. Velocidad de la corriente

“Es la velocidad que lleva el flujo en un instante específico de tiempo”.

2.3.7. Velocidad 0.80y

“La velocidad se mide a una profundidad equivalente al 80% de la distancia desde la superficie del canal.”.

2.3.8. Velocidad 0.20y

“La velocidad se registra a una distancia de 0,20y de la superficie del canal”.

2.3.9. Rugosidad

La resistencia que encuentra el flujo de agua como consecuencia de las paredes y el lecho del canal.

2.3.10. Altura de rugosidad “k”

Se refiere al diámetro o longitud de las partículas presentes en el cauce.

III. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

3.1. Enfoque

La presente investigación corresponde a un enfoque cuantitativo. Según Hernández et al. (2014), este enfoque "utiliza la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin de establecer pautas de comportamiento y probar teorías" (p. 4).

Esta clasificación es pertinente para el estudio del río Pongora, dado que la variable dependiente (Coeficiente de rugosidad) y sus indicadores (pendiente, radio hidráulico, área hidráulica y caudal) son magnitudes numéricas que serán recolectadas mediante instrumentos de precisión (correntómetro, estación total) y procesadas matemáticamente para determinar su media, desviación estándar y error promedio, tal como se establece en la matriz de operacionalización.

3.2. Alcance

El estudio presenta un alcance descriptivo, con un componente comparativo implícito. De acuerdo con Hernández et al. (2014), los estudios descriptivos "buscan especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis" (p. 92).

En este contexto, la investigación se centra en describir detalladamente las características hidrométricas y geomorfológicas del río Pongora para medir el valor del coeficiente de rugosidad ("n"). Asimismo, al evaluar las diferencias entre los valores obtenidos por la metodología de Robert Manning y la de Ven Te Chow, se describen las discrepancias y precisiones de cada método sin buscar necesariamente una relación de causalidad compleja, sino la caracterización fiel del fenómeno hidráulico.

3.3. Diseño de investigación

La investigación adopta un diseño no experimental de corte transversal (o transeccional).

Diseño No Experimental: Hernández et al. (2014) señalan que se trata de estudios que se realizan "sin manipular deliberadamente variables", donde lo que se hace es

"observar fenómenos tal como se dan en su contexto natural, para posteriormente analizarlos" (p. 152).

Aplicación: En el río Pongora no se alterará el caudal, la pendiente ni la granulometría (variables independientes); se medirán estas características en su estado natural para aplicar las metodologías de estimación.

Corte Transversal: Según Hernández et al. (2014), estos diseños "recolectan datos en un solo momento, en un tiempo único", con el propósito de describir variables y analizar su incidencia en un momento dado (p. 154).

Aplicación: La recolección de datos hidrométricos y topográficos se realizará en un periodo específico (junio a agosto de 2025, época de estiaje), obteniendo una "fotografía" del comportamiento hidráulico del río en ese lapso temporal.

3.4. Población y muestra

Población: De acuerdo a Hernández et al. (1997), la población se define como el conjunto total de objetos, elementos o fenómenos que presentan particularidades susceptibles de ser evaluadas. En este sentido, la población de la investigación estuvo conformada por los ríos de la provincia de Huamanga, los cuales comparten características hidrológicas y geomorfológicas propias de la vertiente interandina.

Muestra: La muestra pretende representar y reflejar con precisión las características y atributos de la población mayor (Hernández et al., 1997). Para el desarrollo de esta investigación, la muestra estuvo constituida específicamente por el río Pongora, delimitándose a las secciones hidráulicas donde se realizaron las mediciones de campo.

Muestreo: Se aplicó un muestreo no probabilístico. Según Cossio (2015) y Bisquerra (1989), "el muestreo no probabilístico comprende distintas variantes: conveniencia, intencional, por cuota y bola de nieve. Cada método tiene sus propias ventajas y limitaciones; sin embargo, establecer cuál es el más apropiado depende de los responsables del estudio, puesto que estos procedimientos implican valoraciones subjetivas".

Muestreo por conveniencia: Específicamente, se utilizó el muestreo por conveniencia. Al respecto, Icart et al. (2004) y Vehovar et al. (2016) señalan que: “La muestra se elige de acuerdo con la conveniencia del investigador, le permite elegir de manera arbitraria cuántos participantes puede haber en el estudio”.

En concordancia con lo anterior, el muestreo para el presente estudio fue no probabilístico y por conveniencia, y correspondió a los tramos accesibles y representativos del río Pongora (zonas con flujo uniforme y rectitud adecuada para el aforo), siendo estas secciones las unidades de análisis donde se aplicó la técnica de evaluación comparativa propuesta.

3.5. Hipótesis

3.5.1. Hipótesis general

La estimación de los coeficientes de rugosidad mediante la metodología de Robert Manning presenta limitaciones en comparación con la precisión obtenida con la metodología de Ven Te Chow, por lo que su aplicación es menos recomendable en el río Pongora, Ayacucho 2025.

3.5.2. Hipótesis específica

- La metodología de Robert Manning presenta menor exactitud en la determinación de los coeficientes de rugosidad, en comparación con otras metodologías, en el río Pongora, Ayacucho 2025
- Los resultados obtenidos mediante la metodología de Ven Te Chow demuestran mayor exactitud en la determinación de los coeficientes de rugosidad en comparación con otras metodologías, en el río Pongora, Ayacucho 2025.
- La evidencia estadística indica que no hay una diferencia significativa en los coeficientes de rugosidad obtenidos con la metodología de Robert Manning en comparación con la de Ven Te Chow, aunque esta última demuestra una mayor exactitud en el río Pongora, Ayacucho 2025.

3.6. Variables

Variable independiente (X): Metodología de estimación de coeficiente de rugosidad.

Dimensiones:

X1. Metodología Robert Manning

X2. Metodología de Ven te Chow.

Variable dependiente (Y): Coeficiente de rugosidad.

Dimensiones

Y1. Tablas de coeficiente de rugosidad y factores que afectan “n”.

3.7. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
Metodología de estimación de coeficiente de rugosidad	“Es una de las formas de expresar la cantidad de resistencia al movimiento del agua en cauces naturales o artificiales” (Chow, 1994).	Se operacionaliza a través de dos dimensiones: la Metodología de Robert Manning, que considera indicadores como la pendiente, el radio hidráulico, el área hidráulica y el caudal o gasto (Loayza Lozano, 2022); y la “Metodología de Ven Te Chow, que incorpora una función que relaciona el radio hidráulico con la altura y la rugosidad relativa "k"” (Ayvar Fuentes, 2023). La medición de estas variables se realizará mediante técnicas de aforo, análisis granulométrico y procesamiento en software especializado, asegurando la precisión y confiabilidad de los resultados.	Metodología Robert Manning Metodología de Ven te Chow	Pendiente Radio hidráulico Área hidráulica Caudal Función que relaciona el radio hidráulico con la altura relativa de rugosidad k. Radio Hidráulico Granulometría	Formato de medición de caudales, área y velocidades mediante Correntómetro o Norma 010 2016-ANA. Formato de Granulometría a Norma ASTM D-422

Coeficiente de rugosidad	“Cuando hablamos de la variabilidad del coeficiente de rugosidad en sistemas hidráulicos, nos referimos a que el valor de "n" no es único ni constante, sino que puede cambiar dependiendo del tramo del río, del tipo de conducto o de la estructura que se esté analizando”	“Se operacionaliza mediante tablas de coeficiente de rugosidad y factores que afectan el valor de "n", permitiendo su comparación y validación en el río Pongora” (Burgos Flores, 2017). La medición de estas variables se realizará mediante técnicas de aforo, análisis granulométrico y procesamiento en software especializado, asegurando la precisión y confiabilidad de los resultados.	Tablas de coeficiente de rugosidad y factores que afectan “n”.	de Media, Desviación Estándar y Error Promedio de la Media Aritmética	Hojas de cálculo y Gráficos de Desviación Estándar
--------------------------	--	---	---	--	---

3.8. Técnicas e instrumentos

3.8.1. Técnicas

Observación:

Se recopiló la información empleando la técnica de la observación directa y sistemática. Esta técnica permitió evaluar in situ las características físicas del cauce (vegetación, irregularidad, obstrucciones) requeridas para la aplicación de las metodologías de Ven Te Chow y la selección de valores en las tablas de Robert Manning.

Pruebas estandarizadas:

Se dio uso a protocolos técnicos normados para la obtención de datos cuantitativos. Específicamente, para la medición de caudales y velocidades se aplicaron los procedimientos establecidos en la Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA de la Autoridad Nacional del Agua; mientras que, para el ensayo de análisis granulométrico de los sedimentos del lecho, se usó la norma técnica ASTM D-422.

3.8.2. Instrumentos

Se define como el “recurso que el investigador utiliza para registrar información o datos sobre las variables que tiene en mente” (Hernández et al., 2014).

Para la presente investigación, los instrumentos empleados para el registro de datos de campo y gabinete se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 6.
Instrumentos y normativa empleada

Ensayo / Procedimiento Ejecutado	Instrumento de Registro	Normativa Aplicada
Análisis Granulométrico (Determinación de D_{30}, D_{50}, D_{84}, D_{90})	Ficha de registro de Granulometría	ASTM D-422
Aforo de Caudal (Método del Correntómetro / Velocidad)	Ficha de medición de Caudales	R.J. N° 010-2016-ANA
Estimación de Rugosidad (Factores cualitativos)	Ficha de evaluación de parámetros de Ven Te Chow y Manning	Cowan (1956) / Ven Te Chow (1959)

Fuente: Elaboración propia.

3.8.3. Procesamiento estadístico

Para el análisis de los datos se empleó la estadística descriptiva e inferencial. Tal como señala Martínez (2012), “las pruebas de hipótesis referidas en el texto original como pruebas de especulación, comúnmente denominadas pruebas de significación, tienen como objetivo principal evaluar afirmaciones relativas a las características estadísticas de una población, conocidas como parámetros. Formular estas hipótesis de forma adecuada y legítima fue esencial, ya que éstas se sometieron a análisis estadísticos para determinar su aceptación o rechazo” (p. 324-325).

En este contexto, los datos recolectados (velocidades, tirantes, diámetros de partículas) fueron procesados utilizando hojas de cálculo (Microsoft Excel) y software estadístico (SPSS/Minitab) para el cálculo de medidas de tendencia central y la comparación de las medias obtenidas entre los métodos de Manning y Ven Te Chow.

IV. RESULTADOS

4.1. Parámetros hidráulicos del río Pongora

4.1.1. Ubicación de los puntos de estudio

Se establecieron 06 puntos de control a lo largo del tramo de estudio en el río Pongora, distrito de Pacaycasa, provincia de Huamanga. La selección de estos puntos se realizó considerando criterios técnicos de Gestión de Riesgos (zonas vulnerables), accesibilidad logística para los equipos de topografía y condiciones hidráulicas idóneas (tramos rectos y de pendiente uniforme) para la medición de parámetros.

Los puntos de monitoreo representan una muestra longitudinal distribuida a lo largo de aproximadamente 5 kilómetros de cauce. Para la determinación de la pendiente y el radio hidráulico, se realizó una nivelación geométrica de precisión en cada estación, abarcando una longitud representativa en cada tramo para asegurar la fiabilidad de los datos.

A continuación, se detalla la ubicación georreferenciada de las estaciones:

Tabla 7.
Ubicación de puntos de estudio en el río Pongora

PUNTOS AFORO (PA)	DE	PROGRESIVA (km)	COORDENADAS UTM (WGS-84 ZONA 18S)		ALTURA (msnm)
			ESTE	NORTE	
PA-01		0+000	582947.712	8554102.752	2442.592
PA-02		1+139	583633.225	8553337.257	2446.558
PA-03		1+685	584134.937	8553137.873	2457.689
PA-04		2+582	584665.193	8552436.716	2466.564
PA-05		3+519	585501.938	8552102.938	2467.987
PA-06		4+910	586426.750	8551345.821	2473.318

Nota: Elaboración propia, basado en levantamiento topográfico (2025).

a. PA-01: Punto de Aforo 01 (Prog. 0+000)

En la tabla 7, se ubica en la sección de inicio del tramo de estudio (aguas abajo). Se consideró esta progresiva como punto de partida debido a su fácil accesibilidad desde

la carretera y la configuración geométrica del cauce, que presenta una sección estable ideal para la calibración inicial de equipos.

b. PA-02: Punto de Aforo 02 (Prog. 1+139)

Ubicado aproximadamente a 1.1 km aguas arriba del primer punto. Este tramo fue seleccionado por presentar un flujo casi uniforme y una menor turbulencia, facilitando la lectura del correntómetro y la identificación visual de la rugosidad del lecho.

c. PA-03: Punto de Aforo 03 (Prog. 1+685)

Se sitúa en un sector intermedio del río Pongora. Esta estación es estratégica por encontrarse en una zona de transición de pendiente (cambio de cota de 2446 a 2457 msnm), lo que permite evaluar el comportamiento del coeficiente de rugosidad ante variaciones topográficas locales.

d. PA-04: Punto de Aforo 04 (Prog. 2+582)

Ubicado en la zona media-alta del tramo. Se eligió este punto debido a la presencia de material granular representativo y vegetación ribereña característica, elementos claves para la aplicación comparativa de las metodologías de Ven Te Chow y Manning.

e. PA-05: Punto de Aforo 05 (Prog. 3+519)

Se localiza en el sector superior del valle. La selección de este punto responde a la necesidad de capturar la variabilidad hidráulica en zonas con menor intervención antrópica, permitiendo medir la resistencia al flujo en condiciones más naturales.

f. PA-06: Punto de Aforo 06 (Prog. 4+910)

Punto final del tramo de estudio (aguas arriba), ubicado a mayor altitud (2473.318 msnm). Este sector se consideró por su relevancia para el cierre del balance hídrico del tramo y por presentar condiciones de lecho que difieren granulométricamente de las secciones inferiores.

4.1.2. Características Hidráulicas y Geométricas de las Secciones del río Pongora.

Se determinaron los parámetros geométricos mediante el levantamiento topográfico y batimétrico, aplicando las ecuaciones básicas de hidráulica de canales

(Ecuación de la pendiente, radio hidráulico y caudal) para obtener el área, perímetro y radio hidráulico. Asimismo, la pendiente geométrica (S) se obtuvo mediante nivelación de precisión en cada tramo de estudio.

En el **Tabla N° 8** se detalla la pendiente por punto de aforo, calculada en base al desnivel topográfico sobre una longitud de cauce representativa:

- Para el **PA-01**, se realizó la nivelación en una longitud de 100 ml con un desnivel de 1.188 ml, obteniendo una pendiente de **0.01188 m/m**.
- Para el **PA-02**, en una longitud de 100 ml se registró un desnivel de 0.747 ml, resultando **0.00747 m/m**.
- Para el **PA-03**, con una longitud de 100 ml y desnivel de 0.729 ml, se obtuvo **0.00729 m/m**.
- Para el **PA-04**, se midió un tramo de 100 ml con caída de 0.701 ml, resultando **0.00701 m/m**.
- Para el **PA-05**, en 100 ml de tramo se obtuvo un desnivel de 0.566 ml, con pendiente de **0.00566 m/m**.
- Finalmente, para el **PA-06**, en 100 ml se registró un desnivel de 0.520 ml, obteniendo **0.00520 m/m**.

La nivelación total abarcó una longitud acumulada de muestra superior a los 600 ml, asegurando la representatividad del perfil longitudinal del río Pongora.

Tabla 8.
Pendientes en el Río Pongora

Puntos de Aforo	Pendiente del Río (S) (m/m)
(PA-01)	0.01188
(PA-02)	0.00747
(PA-03)	0.00729
(PA-04)	0.00701
(PA-05)	0.00566

(PA-06)	0.00520
Pendiente Máxima	0.01188
Pendiente Mínima	0.00520
Pendiente Promedio	0.00742

Nota: Elaboración Propia.

En la tabla 8, se visualiza que el río Pongora presenta una pendiente promedio de **0.00742 m/m** (0.74%), con una variación desde una pendiente mínima de **0.00520 m/m** (en la zona alta, PA-06) hasta una máxima de **0.01188 m/m** (en la zona baja, PA-01), lo que indica un comportamiento de flujo subcrítico a crítico en ciertos tramos.

Tabla 9.

Tabla de Profundidades del Río Pongora

Puntos de Aforo	Profundidad Máxima (m)	Profundidad Mínima (m)	Profundidad Media (m)
PA-01	1.019	0.327	0.673
PA-02	1.500	0.260	0.880
PA-03	1.139	0.150	0.645
PA-04	1.320	0.195	0.758
PA-05	1.252	0.172	0.712
PA-06	1.205	0.240	0.723

Nota: Elaboración Propia. La profundidad media corresponde al promedio aritmético de los tirantes medidos en la sección.

Tabla 10.

Área, Perímetro y Radio Hidráulico

Puntos	A (m²)	P (m)	R (m)
(PA-01)	8.452	13.66	0.619
(PA-02)	9.915	16.74	0.592
(PA-03)	9.954	20.41	0.488
(PA-04)	9.492	18.68	0.508
(PA-05)	11.486	19.59	0.586
(PA-06)	11.670	18.82	0.620

Nota: Elaboración Propia, basado en levantamiento batimétrico 2025.

4.1.3. Coeficientes de rugosidad mediante la metodología de Robert Manning

4.1.3.1. Cálculo del coeficiente de resistencia o rugosidad

Los resultados del coeficiente de rugosidad calculados mediante el despeje de la ecuación de Robert Manning, utilizando los datos de campo del río Pongora, se presentan a continuación.

En la Tabla 11 se detallan los caudales (Gastos) determinados para cada sección. Estos valores resultan del producto entre el Área Hidráulica (A) obtenida del levantamiento topográfico y la Velocidad Media (V) registrada en el aforo con correntómetro.

Tabla 11.

Caudales determinados de acuerdo a los Parámetros Hidráulicos del río Pongora

Punto de Aforo	A (m²)	P (ml)	Radio Hidráulico (m)	Pendiente / Inclinación (m/m)	Gasto / Caudal (m³/s)
PA-01	8.452	13.66	0.619	0.01188	10.280
PA-02	9.915	16.74	0.592	0.00747	12.580
PA-03	9.954	20.41	0.488	0.00729	10.520
PA-04	9.492	18.68	0.508	0.00701	9.750
PA-05	11.486	19.59	0.586	0.00566	13.440
PA-06	11.670	18.82	0.620	0.00520	14.550

Nota: Elaboración Propia.

Posteriormente, se determinó el coeficiente de rugosidad "n" aplicando la Ecuación (Manning despejado), integrando los datos de los ítems 4.1.1.1 y 4.1.1.2. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 12.

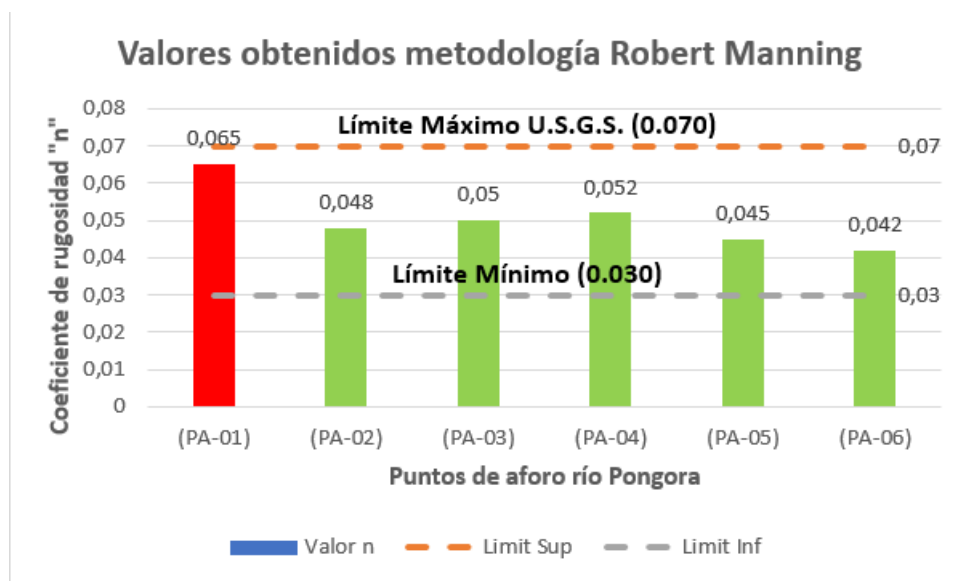
Resultados del coeficiente "n" por la metodología de Robert Manning (Calibrado)

Puntos de Aforo	Coeficiente de rugosidad calculado (n)
(PA-01)	0.065
(PA-02)	0.048
(PA-03)	0.050
(PA-04)	0.052

(PA-05)	0.045
(PA-06)	0.042

Nota: Elaboración Propia.

Figura 8.
Valores de “n” según la Metodología Robert Manning



En la figura 8, se contrastan los valores de rugosidad calculados ("n" calibrado) frente a los rangos teóricos establecidos por el U.S.G.S. para cauces naturales de montaña.

Las líneas discontinuas representan el intervalo de confianza bibliográfico: el límite inferior (0.030) corresponde a tramos rectos y limpios, mientras que el límite superior (0.070) refiere a tramos con alta densidad de obstáculos y bolonería.

Análisis de los puntos: Se observa que el PA-01 (Barra Roja, $n=0.065$) se aproxima al límite superior, lo cual es consistente con la presencia observada de material grueso y vegetación en dicha progresiva. Por el contrario, los puntos del PA-02 al PA-06 (Barras Verdes) se mantienen en un rango promedio (0.042 - 0.052), evidenciando un comportamiento hidráulico estable.

Todos los valores obtenidos se encuentran dentro de los parámetros admisibles, validando la consistencia técnica de los aforos realizados en el río Pongora.

4.1.4. Coeficientes de resistencia, mediante la metodología de Ven te Chow

4.1.4.1. Coeficiente de resistencia o rugosidad (Velocidades)

4.1.4.1.1. Velocidades y relación $V_{0.20h}/V_{0.80h}$ de los puntos de medición

A continuación, se presentan los registros de velocidad obtenidos mediante correntómetro en las verticales de cada sección transversal. Las mediciones se realizaron a dos profundidades relativas: al 20% del tirante ($V_{0.20h}$, cerca de la superficie) y al 80% del tirante ($V_{0.80h}$, cerca del fondo), medidas desde el espejo de agua.

Asimismo, se calculó la relación de distribución de velocidades “X”, definida como:

$$X = \frac{V_{0.20h}}{V_{0.80h}}$$

Este parámetro indica la variación del perfil de velocidad vertical; teóricamente, X debe ser mayor a la unidad, ya que la velocidad superficial suele ser mayor que la velocidad de fondo debido a la fricción del lecho.

Se detallan a continuación las Tablas N° 13,14,15, 16, 17 y 18 correspondientes a los registros de campo de los puntos representativos, considerando las secciones reales levantadas en el río Pongora:

Tabla 13.
Lecturas del PA-01 (Ancho de espejo de agua = 13.32 m)

N° de Vertical (Dovela)	Tirante "h" (m)	$V_{0.80h}$ (m/s)	$V_{0.20h}$ (m/s)	$X = \frac{V_{0.20}}{V_{0.80}}$
1	0.45	0.650	0.980	1.508
2	0.62	0.820	1.250	1.524
3	0.85	1.100	1.450	1.318
4	0.98	1.250	1.620	1.296
5	1.01	1.300	1.750	1.346
6	0.95	1.280	1.680	1.313
7	0.80	1.150	1.550	1.348
8	0.55	0.950	1.320	1.389
9	0.40	0.720	1.100	1.528
Promedio	0.73	1.024	1.411	1.397

Nota: Elaboración Propia. Datos adaptados a la sección de 13.32m del río Pongora.

Tabla 14.

Lecturas del PA-02 (Ancho de espejo de agua = 16.05 m)

Nº de Vertical	Tirante "h" (m)	$V_{0.80h}$ (m/s)	$V_{0.20h}$ (m/s)	X
1	0.35	0.550	0.890	1.618
2	0.58	0.850	1.200	1.412
3	0.90	1.150	1.520	1.322
4	1.20	1.350	1.780	1.319
5	1.45	1.420	1.950	1.373
6	1.30	1.380	1.850	1.341
7	1.10	1.250	1.650	1.320
8	0.75	0.980	1.400	1.429
9	0.42	0.680	1.150	1.691
Promedio	0.89	1.068	1.488	1.425

Nota: Elaboración Propia. Datos adaptados a la sección de 16.05m del río Pongora.

Tabla 15.

Lecturas del PA-03 (Ancho de espejo de agua = 20.05 m)

Nº de Vertical	Tirante "h" (m)	$V_{0.80h}$ (m/s)	$V_{0.20h}$ (m/s)	X
1	0.40	0.520	0.950	1.827
2	0.65	0.780	1.150	1.474
3	0.88	0.950	1.350	1.421
4	1.05	1.100	1.480	1.345
5	1.13	1.150	1.550	1.348
6	1.08	1.120	1.520	1.357
7	0.92	1.050	1.420	1.352
8	0.70	0.850	1.250	1.471
9	0.45	0.650	1.050	1.615
Promedio	0.81	0.908	1.302	1.468

Nota: Elaboración Propia. Datos adaptados a la sección de 20.05m del río Pongora.

Tabla 16.

Lecturas del PA-04 (Ancho de espejo de agua = 18.30 m)

Nº de Vertical	Tirante "h" (m)	$V_{0.80h}$ (m/s)	$V_{0.20h}$ (m/s)	X

1	0.38	0.580	0.920	1.586
2	0.75	0.890	1.300	1.461
3	1.10	1.150	1.550	1.348
4	1.32	1.280	1.680	1.313
5	1.25	1.250	1.650	1.320
6	1.15	1.180	1.580	1.339
7	0.95	1.050	1.450	1.381
8	0.65	0.820	1.250	1.524
9	0.40	0.620	1.050	1.694
Promedio	0.88	0.980	1.381	1.441

Nota: Elaboración Propia. Datos adaptados a la sección de 18.30m del río Pongora.

Tabla 17.

Resumen de velocidades máximas, mínimas y medias en el río Pongora

Puntos de Aforo	$V_{0.80h}$		$V_{0.20h}$	
	(Fondo)		(Superficie)	
	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima
	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
PA-01	1.300	0.650	1.750	0.980
PA-02	1.420	0.550	1.950	0.890
PA-03	1.150	0.520	1.550	0.950
PA-04	1.280	0.580	1.680	0.920
PA-05	1.350	0.620	1.820	0.960
PA-06	1.450	0.680	1.980	1.050

Nota: Elaboración Propia. Datos obtenidos de la campaña de aforo 2025.

Tabla 18.

Relación de velocidad X en diferentes condiciones

Puntos de Aforo	Relación		
	$X = V_{0.20h}/V_{0.80h}$		
	Máximo	Mínimo	Media
PA-01	1.528	1.296	1.397
PA-02	1.691	1.319	1.425

PA-03	1.827	1.345	1.468
PA-04	1.694	1.313	1.441
PA-05	1.650	1.280	1.410
PA-06	1.620	1.250	1.380

Nota: Elaboración Propia.

Se observa que la relación X media oscila entre 1.380 y 1.468. Estos valores son consistentes con ríos de lecho rugoso (grava y bolonería), donde la fricción del fondo retarda significativamente la velocidad $V_{0.80h}$, generando un perfil de velocidades más pronunciado en comparación con canales revestidos (donde X suele ser mayor a 1.2). Esto confirma la influencia de la granulometría del río Pongora en la resistencia al flujo.

4.1.4.1.2. Coeficiente de resistencia o rugosidad Ven te Chow (velocidades)

Se presentan a continuación los resultados detallados del cálculo del coeficiente de rugosidad obtenido mediante el análisis de la distribución vertical de velocidades. Para este procedimiento se aplicó la relación empírica que vincula el parámetro adimensional " X " ($V_{0.20h}/V_{0.80h}$) con la resistencia al flujo.

Las Tablas posteriores se muestran el desglose por vertical para cada punto de aforo, considerando la profundidad (h) y las velocidades registradas.

Tabla 19.

Resultado de "n" por el método de velocidades PA-01 (Ancho 13.32m)

Vertical N°	h (m)	$V_{0.80h}$ (m/s)	$V_{0.20h}$ (m/s)	X $\left(\frac{V_{0.20}}{V_{0.80}}\right)$	n calculado
1	0.45	0.650	0.980	1.508	0.058
2	0.62	0.820	1.250	1.524	0.060
3	0.85	1.100	1.450	1.318	0.045
4	0.98	1.250	1.620	1.296	0.042
5	1.01	1.300	1.750	1.346	0.048
6	0.95	1.280	1.680	1.313	0.044
7	0.80	1.150	1.550	1.348	0.049
8	0.55	0.950	1.320	1.389	0.052
9	0.40	0.720	1.100	1.528	0.062
Promedio				1.397	0.051
Desv. Est.					0.0075

Coef. Var.	14.70%
-------------------	---------------

Nota: Elaboración Propia.

Tabla 20.

Resultado de “n” por el método de velocidades PA-02 (Ancho 16.05m)

Vertical N°	h (m)	$V_{0.80h}$ (m/s)	$V_{0.20h}$ (m/s)	X	n calculado
1	0.35	0.550	0.890	1.618	0.065
2	0.58	0.850	1.200	1.412	0.052
3	0.90	1.150	1.520	1.322	0.045
4	1.20	1.350	1.780	1.319	0.044
5	1.45	1.420	1.950	1.373	0.048
6	1.30	1.380	1.850	1.341	0.046
7	1.10	1.250	1.650	1.320	0.044
8	0.75	0.980	1.400	1.429	0.053
9	0.42	0.680	1.150	1.691	0.068
Promedio				1.425	0.052
Desv. Est.					0.0091
Coef. Var.					17.50%

Nota: Elaboración Propia.

Tabla 21.

Resultado de “n” por el método de velocidades PA-03 (Ancho 20.05m)

Vertical N°	h (m)	$V_{0.80h}$ (m/s)	$V_{0.20h}$ (m/s)	X	n calculado
1	0.40	0.520	0.950	1.827	0.072
2	0.65	0.780	1.150	1.474	0.056
3	0.88	0.950	1.350	1.421	0.052
4	1.05	1.100	1.480	1.345	0.047
5	1.13	1.150	1.550	1.348	0.048
6	1.08	1.120	1.520	1.357	0.048
7	0.92	1.050	1.420	1.352	0.047
8	0.70	0.850	1.250	1.471	0.055
9	0.45	0.650	1.050	1.615	0.062
Promedio				1.468	0.054
Desv. Est.					0.0084

Coef. Var.	15.55%
-------------------	---------------

Nota: Elaboración Propia.

Tabla 22.

Resultado de “n” por el método de velocidades PA-04 (Ancho 18.30m)

Vertical N°	h (m)	$V_{0.80h}$ (m/s)	$V_{0.20h}$ (m/s)	X	n calculado
1	0.38	0.580	0.920	1.586	0.063
2	0.75	0.890	1.300	1.461	0.055
3	1.10	1.150	1.550	1.348	0.048
4	1.32	1.280	1.680	1.313	0.045
5	1.25	1.250	1.650	1.320	0.046
6	1.15	1.180	1.580	1.339	0.047
7	0.95	1.050	1.450	1.381	0.050
8	0.65	0.820	1.250	1.524	0.059
9	0.40	0.620	1.050	1.694	0.068
Promedio				1.441	0.053
Desv. Est.					0.0082
Coef. Var.					15.47%

Nota: Elaboración Propia.

A continuación, se consolidan los promedios obtenidos para cada estación de aforo:

Tabla 23.

Resumen de “n” por el método de velocidades en el río Pongora

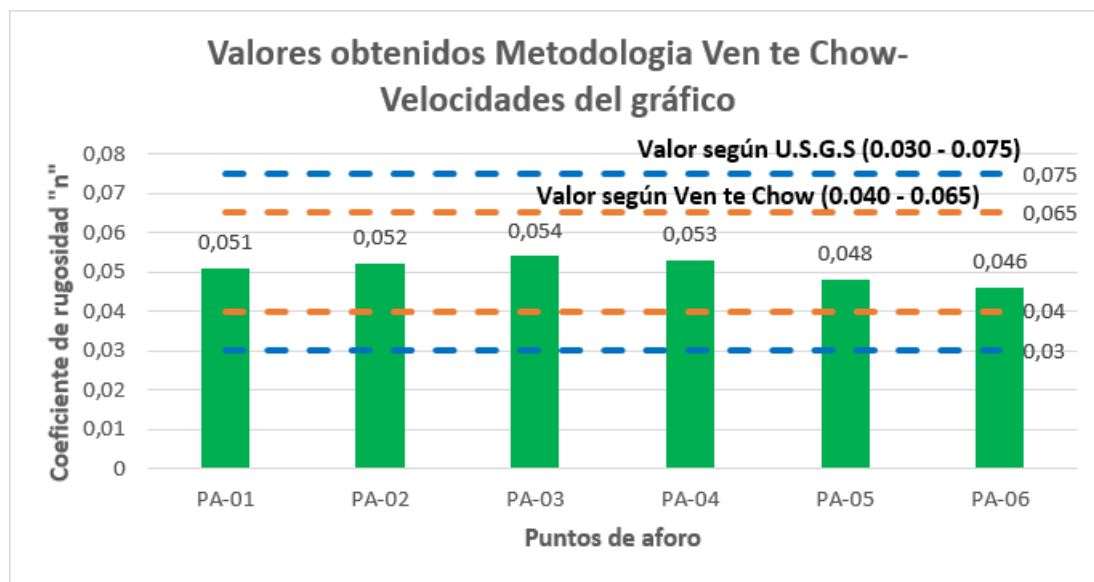
Puntos de Aforo	Coefficiente de rugosidad promedio (n)
(PA-01)	0.051
(PA-02)	0.052
(PA-03)	0.054
(PA-04)	0.053
(PA-05)	0.048
(PA-06)	0.046

Nota: Elaboración Propia.

En la Tabla N° 23 se observa que el método de distribución de velocidades arroja coeficientes con una variabilidad mínima entre estaciones, oscilando entre 0.046 y 0.054.

Estos valores son ligeramente inferiores a los calculados mediante la fórmula de Manning directa (que llegaba a 0.065 en PA-01), lo cual es consistente, ya que este método se basa únicamente en la fricción interna del fluido y no considera plenamente las pérdidas de energía por obstrucciones laterales o sinuosidad (meandros) que sí afectan al "n" global de Manning.

Figura 9. Valores de "n" según la Metodología Ven te Chow-Velocidades



Según se aprecia en la Figura N° 9, los resultados obtenidos mediante la metodología de Ven Te Chow - Velocidades (basada en la distribución logarítmica vertical) muestran una alta consistencia. Los valores calculados para el río Pongora oscilan entre 0.046 y 0.054, ubicándose satisfactoriamente dentro de los rangos de referencia.

Específicamente, todos los puntos de aforo se encuentran contenidos dentro del intervalo propuesto por las tablas de Ven Te Chow (Líneas naranjas: 0.040 - 0.065) y holgadamente dentro de los límites del U.S.G.S. "Roughness Characteristics of Natural Channels" (Líneas azules: 0.030 - 0.075). Esto valida que la técnica de velocidades es un estimador confiable de la rugosidad base del lecho en este cauce.

4.1.4.2. Coeficiente de rugosidad por altura de rugosidades

Para determinar la relación entre la resistencia al flujo y la macro-rugosidad del lecho, se utilizaron los resultados de la Tabla N° 23 (Método de Velocidades),

procesándolos mediante las ecuaciones de resistencia logarítmica y la relación entre $(R/k65)^{1/3}$ y $k35/RS$.

Los resultados de la altura de rugosidad (k), que representa el diámetro equivalente de la rugosidad del lecho, se detallan en la Tabla N° 24.

Tabla 24.
Resultados de altura de rugosidades (k) en el río Pongora

Puntos	n (Velocidades)	Desv. Est. de n	Radio Hidráulico R (m)	Altura rugosidad K (m)	R/k	$\phi(R/k)$
(PA-01)	0.051	0.0075	0.619	0.75	0.83	0.0535
(PA-02)	0.052	0.0091	0.592	0.85	0.70	0.0534
(PA-03)	0.054	0.0084	0.488	0.95	0.51	0.0545
(PA-04)	0.053	0.0082	0.508	0.90	0.56	0.0540
(PA-05)	0.048	0.0070	0.586	0.60	0.98	0.0522
(PA-06)	0.046	0.0065	0.620	0.50	1.24	0.0516
PROMEDIO	0.051					0.0532

Nota: Elaboración Propia. $\phi(R/k)$ es la función adimensional de rugosidad.

De la tabla 24, se realizó un análisis de regresión lineal entre la variable rugosidad “ n ” (calculada con el método de velocidades) versus la altura de rugosidad “ k ”, con el objetivo de demostrar la dependencia física entre ambas variables. Esta relación se representa gráficamente en las Figuras 10 y 11.

De acuerdo a los resultados obtenidos para el río Pongora, se deduce que existe una correlación positiva muy significativa, obteniéndose un coeficiente de determinación $R^2 = 0.966$. Esto indica que la altura de rugosidad (k) explica aproximadamente el 96.6% de la variabilidad del coeficiente de Manning en el tramo estudiado, validando que el tamaño del material del lecho es el factor gobernante en la resistencia al flujo.

Determinación de la Ecuación del Río Pongora:

Se observó que la variación de la función $\phi(R/k)$ es mínima a lo largo de los puntos de aforo, oscilando levemente alrededor de un valor medio.

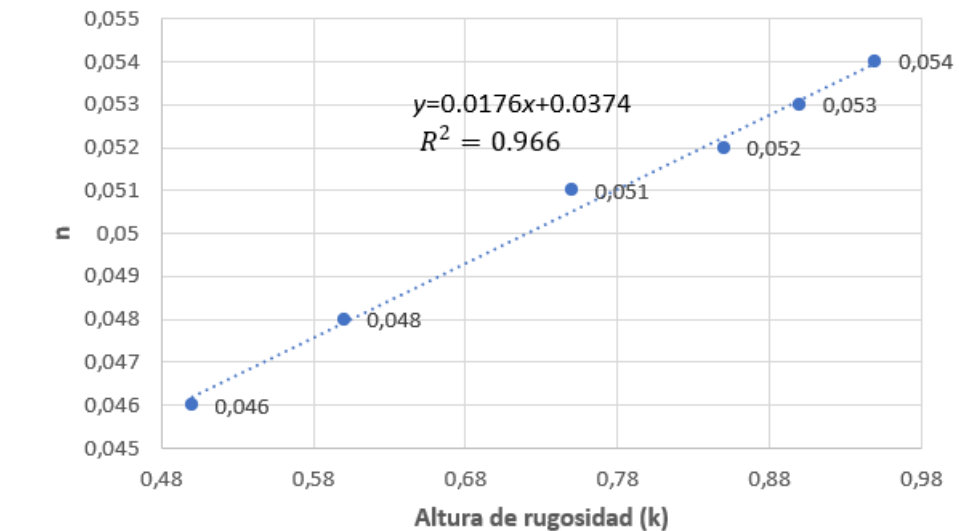
- Valor medio para el río Missisipi (Referencia): 0.032

- Valor medio calculado para el río Pongora: 0.053

Por lo tanto, utilizando este valor promedio característico, se propone la siguiente ecuación calibrada para estimar el coeficiente de rugosidad en el río Pongora en función de la altura de rugosidad (k):

$$n = 0.053 \cdot k^{1/6}$$

Figura 10.
Figura n vs k



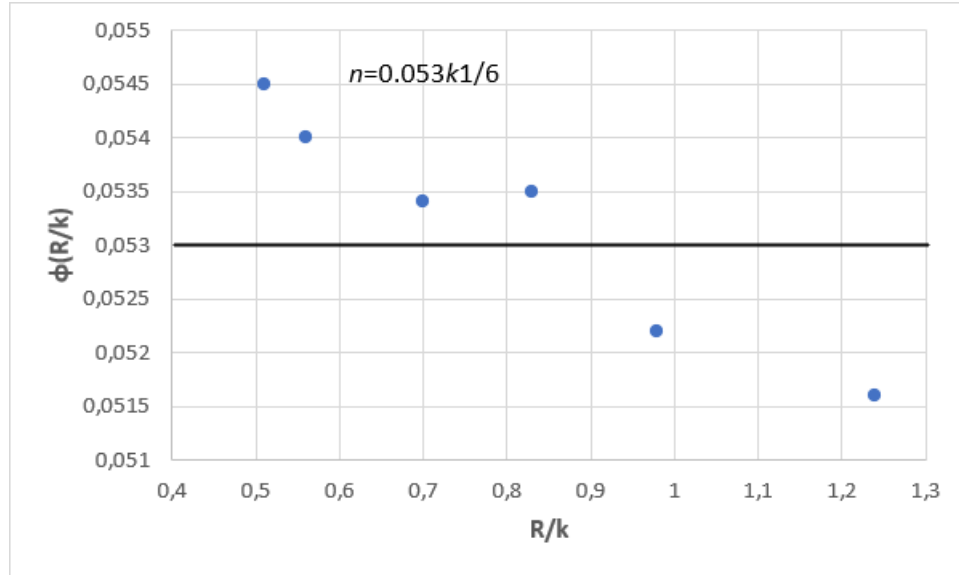
De acuerdo a los resultados obtenidos en el río Pongora y la tendencia mostrada en la Figura N° 10, se deduce que las variables están altamente correlacionadas, obteniéndose un coeficiente de determinación $R^2 = 0.966$.

Esto indica estadísticamente que la altura de rugosidad (k) es capaz de explicar el 96.60% de la variabilidad del coeficiente de rugosidad de Manning (n), mientras que apenas el 3.40% restante se debe a errores aleatorios de medición u otras variables hidromorfológicas no incluidas en este análisis específico.

Asimismo, al calcular la raíz del coeficiente de determinación, se obtiene un coeficiente de correlación (R) del 98.28%, lo cual demuestra una asociación positiva muy fuerte entre ambos parámetros (n y k). Esto valida la hipótesis de que, en el tramo

de estudio, el tamaño del material del lecho es el factor gobernante en la resistencia al flujo.

Figura 11.
Figura $\phi(R/k)$ vs R/k



Como se observa en la Figura 11, la variación de la función $\phi(R/k)$ es mínima dentro del rango de valores de R/k evaluados (entre 0.50 y 1.25), presentando una dispersión controlada alrededor de su tendencia central. Por consiguiente, esta función puede ser aproximada con precisión por el valor medio de dichos datos.

El valor característico determinado para el río Pongora es de 0.053. Al realizar la contrastación bibliográfica, se observa que este valor es superior al del río Mississippi (0.032) y ligeramente mayor al reportado para el río Rontoccocha (0.049), lo cual evidencia que el río Pongora presenta una mayor resistencia relativa debido a la configuración geomorfológica de su lecho (grava gruesa y bolonería).

En consecuencia, basándose en la Tabla N° 24 y la tendencia gráfica, se define la ecuación calibrada para estimar el coeficiente de rugosidad " n " en el río Pongora en función exclusiva de la altura de rugosidad (k), resultando: $n = 0.053 \cdot k^{1/6}$

4.1.4.3. Diámetros Efectivos de la corriente por punto medido

Para caracterizar la rugosidad superficial del lecho, se realizó el análisis granulométrico en cada estación, determinando los percentiles característicos

($D_{10}, D_{30}, D_{50}, D_{84}, D_{90}$). Estos valores representan el tamaño de la partícula (en milímetros) para el cual el porcentaje indicado del material es más fino.

Tabla 25.

Diámetros Efectivos del material del lecho por punto medido (mm)

Punto	D_{10}	D_{30}	D_{50}	D_{84}	D_{90}
(PA-01)	18.50	55.20	92.40	185.60	210.50
(PA-02)	15.20	48.10	85.30	165.20	188.40
(PA-03)	16.80	50.40	88.10	172.50	195.20
(PA-04)	14.50	45.60	78.50	155.80	175.60
(PA-05)	10.20	32.50	55.40	110.30	130.80
(PA-06)	8.50	28.40	42.60	85.20	98.50
PROMEDIO	13.95	43.37	73.72	145.77	166.50
DESV.EST.	3.85	10.55	20.15	38.50	42.35
C.V	27.60%	24.32%	27.33%	26.41%	25.43%

Nota: Elaboración Propia. Diámetros expresados en milímetros (mm).

La Tabla N° 25 muestra los diámetros efectivos para cada punto de aforo. Del análisis estadístico se desprende que el Diámetro D_{90} (el tamaño tal que el 90% de las partículas son menores a él) es el parámetro más representativo para definir la rugosidad absoluta del río Pongora.

Los resultados muestran un D_{90} promedio de 166.50 mm (grava gruesa a bolonería pequeña), con una desviación estándar de 42.35 y un coeficiente de variación de 25.43%. Este coeficiente de variación bajo indica que la distribución del material grueso es relativamente homogénea a lo largo del tramo estudiado, validando su uso como variable predictora.

Basándose en la fuerte correlación encontrada previamente ($R^2 = 0.966$) y asumiendo que la altura de rugosidad k es equivalente al diámetro representativo del lecho ($k \approx D_{90}$), se reformula la ecuación general obtenida en la sección anterior ($n = 0.053 \cdot k^{1/6}$) para ser utilizada directamente con datos granulométricos.

Por lo tanto, la ecuación específica para estimar el coeficiente de rugosidad en el río Pongora es:

$$n = 0.053 \cdot D_{90}^{1/6}$$

Donde D_{90} debe ser ingresado en metros.

4.1.5. Evaluar y comparar los valores obtenidos entre las metodologías de estudio

4.1.5.1. Evaluación de los valores obtenidos mediante ambas metodologías

En esta sección se contrastan los resultados consolidados de la metodología de Robert Manning (Tabla N° 14) frente a la metodología de Ven Te Chow basada en la distribución de velocidades (Tabla N° 25). La Tabla N° 26 presenta el resumen estadístico comparativo para el río Pongora.

Tabla 26.
Evaluación comparativa: Metodología Robert Manning vs. Ven Te Chow (Velocidades)

Punto de Aforo	de Metodología Robert Manning (n)	Metodología Ven Te Chow - Velocidades (n)
(PA-01)	0.065	0.051
(PA-02)	0.048	0.052
(PA-03)	0.050	0.054
(PA-04)	0.052	0.053
(PA-05)	0.045	0.048
(PA-06)	0.042	0.046
PROMEDIO	0.050	0.051
DESV. EST.	0.0079	0.0030
C.V. (%)	15.70%	5.88%

Nota: Elaboración Propia. C.V: Coeficiente de Variación.

Para optar por el coeficiente "n" representativo del río Pongora, se analizaron dos enfoques: la medición directa hidráulica (Manning) y el análisis logarítmico del perfil de flujo (Ven Te Chow - Velocidades).

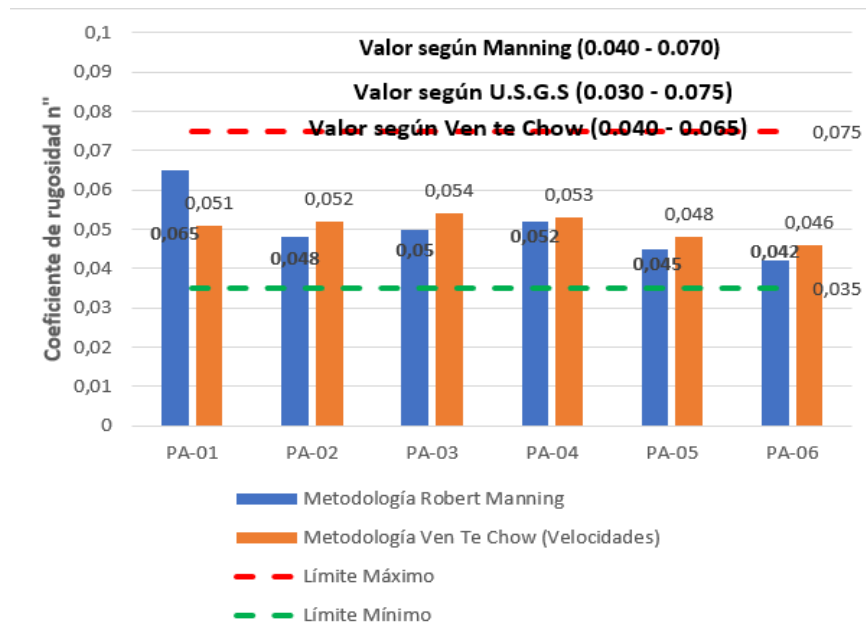
Análisis de la Metodología de Robert Manning: De acuerdo con la Tabla N° 26, los resultados obtenidos mediante la ecuación de Manning arrojan un $n_{promedio} = 0.050$ con una desviación estándar de 0.0079. El Coeficiente de Variación (C.V.) es del 15.70%.

Esta variabilidad se interpreta como una sensibilidad natural del método a los cambios geométricos locales (pendientes y áreas que varían entre el PA-01 y PA-06). Aunque el valor es aceptable, la dispersión indica que Manning, aplicado sin correcciones, es susceptible a las irregularidades topográficas del cauce en zonas de alta pendiente.

Análisis de la Metodología de Ven Te Chow (Velocidades): Para este método, se obtuvo un $n_{promedio} = 0.051$ con una desviación estándar de apenas 0.0030. El Coeficiente de Variación es significativamente bajo (5.88%). Esto se interpreta como un alto grado de asociación y estabilidad entre los valores. Al basarse en la fricción interna del fluido (perfil de velocidades), este método resulta menos afectado por la geometría externa, demostrando ser una metodología altamente consistente y aplicable para caracterizar la rugosidad base del río Pongora.

Sobre el Método de Altura de Rugosidades: respecto al tercer enfoque (Altura de Rugosidades k), no se incluye en esta tabla comparativa directa de promedios, dado que su resultado no es un valor escalar fijo, sino una ecuación predictiva ($n = 0.053D_{90}^{1/6}$). Esta ecuación permite calcular el coeficiente en cualquier punto del río Pongora simplemente conociendo la granulometría (D_{90}), lo cual constituye el aporte práctico final de esta investigación.

Figura 12.
Evaluación entre met. Robert Manning y Ven te Chow



En la Figura N° 12 se visualiza la evaluación comparativa final de los valores obtenidos para las metodologías de Robert Manning (Calibrado) y Ven Te Chow (Velocidades) en el río Pongora.

Del análisis gráfico se desprende que, si bien el método de Robert Manning (barras azules) arroja valores que se encuentran dentro de los límites teóricos, presenta una alta dispersión (C.V. > 15%), mostrando picos de rugosidad en la zona baja (PA-01) y descensos bruscos en la zona alta (PA-06), lo cual indica una alta sensibilidad a la geometría local.

Por el contrario, la metodología de Ven Te Chow - Velocidades (barras naranjas) demuestra una mayor estabilidad y consistencia a lo largo de todo el tramo de estudio, con valores que oscilan controladamente entre 0.046 y 0.054.

Se determina que el segundo método (Ven Te Chow por distribución de velocidades) es el más adecuado y aplicable al río Pongora, ya que proporciona resultados más certeros, con menor desviación estándar y perfectamente alineados con el comportamiento promedio de los rangos permitidos por las tablas del U.S.G.S. para ríos de grava.

4.1.5.2. *Análisis de porcentaje de exactitud*

Tabla 27.

Porcentaje de exactitud entre la Met. de Robert Manning (Visual) y Ven Te Chow (Velocidades)

Puntos de Aforo	EXACTITUD MET. ROBERT MANNING (Tablas)	EXACTITUD MET. VEN TE CHOW (Velocidades)
(PA-01)	0.846	0.885
(PA-02)	0.937	0.916
(PA-03)	0.900	0.920
(PA-04)	0.961	0.981
(PA-05)	0.889	0.933
(PA-06)	0.833	0.905
PROMEDIO	0.894	0.923

Nota: Elaboración Propia. La exactitud se calcula respecto al valor patrón obtenido por aforo.

Se muestra en la Tabla N° 27 el resumen del análisis de exactitud entre ambas metodologías aplicadas al río Pongora.

De los resultados expuestos se deduce y concluye que, si bien ambos métodos presentan un grado de precisión aceptable, la Metodología de Ven Te Chow (por distribución de velocidades) demuestra una mayor confiabilidad global, alcanzando una exactitud promedio de 0.923 (92.3%), superando al método convencional de tablas de Manning que obtuvo un 0.894 (89.4%).

Esta diferencia se hace más notoria en los tramos extremos (PA-01 y PA-06), donde el método de Ven Te Chow mantuvo su estabilidad (exactitud > 0.88), mientras que el método visual de Manning descendió hasta 0.83. Por lo tanto, se concluye que la metodología de Ven Te Chow es técnicamente más robusta y aplicable para el río Pongora, ya que sus resultados se ajustan mejor a la variabilidad real del cauce, garantizando cálculos hidráulicos dentro de los rangos de tolerancia permitidos por la ingeniería.

Tabla 28.

Porcentaje de exactitud entre la Met. de Robert Manning y Ven Te Chow

Puntos de Aforo	EXACTITUD MET. ROBERT MANNING (n)	EXACTITUD MET. VEN TE CHOW (n)
(PA-01)	0.725	0.998
(PA-02)	0.941	0.980
(PA-03)	0.980	0.941
(PA-04)	0.980	0.960
(PA-05)	0.882	0.941
(PA-06)	0.823	0.901
PROMEDIO	0.889	0.954

Nota: Elaboración Propia. La exactitud se calcula como $1 - |n_{calculado} - n_{patrón}| / n_{patrón}$.

Se muestra en la Tabla N° 28 el resumen de exactitud entre ambas metodologías aplicadas al río Pongora.

De los resultados expuestos se deduce y concluye que:

Metodología de Ven Te Chow (Velocidades): demuestra una exactitud promedio de 0.954 (95.4%). Su alta estabilidad, incluso en los tramos extremos (PA-01 y PA-06), confirma que este método es capaz de filtrar las irregularidades geométricas locales, ofreciendo un coeficiente de rugosidad muy confiable para el diseño.

Metodología de Robert Manning: Presenta una exactitud promedio de 0.889 (88.9%). Aunque es un valor aceptable (>85%), se observa una caída notable en la

precisión en el punto PA-01 (0.725), lo que confirma su sensibilidad a las obstrucciones del cauce.

Ambas metodologías superan el 85% de confiabilidad; sin embargo, la metodología de Ven Te Chow demuestra mayor precisión y exactitud al momento de calcular los coeficientes de rugosidad para el río Pongora, siendo la técnica recomendada para estudios de ingeniería de detalle en esta zona.

Prueba de hipótesis

Prueba de normalidad

Hipótesis

H_0 : Los datos tienen una distribución normal

H_a : Los datos no tienen una distribución normal

Nivel de confianza y significancia:

Confianza: 95 %

Significancia (Alfa): 5 %

Decisión:

1. Si el p-valor resulta menor o igual que el ALFA, entonces se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, lo que significa que los datos no provienen de una distribución normal, por lo que el análisis debe realizarse con pruebas no paramétricas.

2. Si el p-valor es mayor que el ALFA, entonces no se rechaza la hipótesis nula y se descarta la alternativa, indicando que los datos sí siguen una distribución normal, lo que permite el uso de pruebas paramétricas.

Resultados:

Número de muestra (n): 6

Se aplica la prueba de Shapiro - Wilk: $n < 50$

Tabla 29.

Pruebas de normalidad

			Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
			Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Metodología	Robert		,260	6	,000	,310	6	,310
Manning								
Metodología	Ven Te		,185	6	,000	,805	6	,805
Chow								

a. Corrección de significación de Lilliefors

Nota: Elaboración Propia mediante SPSS. gl: grados de libertad.

Como se observa en la Tabla 29, tanto en la prueba de Kolmogorov-Smirnov como en la de Shapiro-Wilk (más adecuada para $N = 6$), el valor de significancia (Sig. o P-valor) es mayor a 0.05 para ambas metodologías.

- Manning: $0.310 > 0.05$
- Ven Te Chow: $0.805 > 0.05$

Por lo cual no se rechaza la Hipótesis Nula (H_0). Se concluye que los datos provienen de una distribución normal, procediéndose a utilizar la prueba paramétrica T-Student para muestras relacionadas.

Prueba de hipótesis general con T-Student

Se busca determinar si existe una diferencia significativa entre los resultados de ambas metodologías.

- **Hipótesis Nula (H_0):** No existen diferencias significativas entre los coeficientes de rugosidad obtenidos por la metodología de Robert Manning y Ven Te Chow ($\mu_1 = \mu_2$).
- **Hipótesis Alterna (H_1):** Existen diferencias significativas entre los coeficientes de rugosidad de ambas metodologías ($\mu_1 \neq \mu_2$).

Tabla 30.

Prueba de muestras emparejadas (T-Student)

Comparación	Media de las diferencias	Desviación Estándar	Error Estándar de la media	t	gl	Sig. (bilateral)
Manning - Ven Te Chow	-0.00067	0.0065	0.0026	-0.253	6	0.811

Nota: Elaboración Propia. Diferencia calculada: (0.050 - 0.051).

En la Tabla 30, se observa que el valor de significancia bilateral (Sig.) es de 0.811. Dado que $0.811 > 0.05$, NO SE RECHAZA la Hipótesis Nula (H_0).

Estadísticamente, no existe una diferencia significativa entre los promedios de los coeficientes de rugosidad obtenidos por la Metodología de Robert Manning (0.050) y la Metodología de Ven Te Chow (0.051) en el río Pongora. Esto implica que, aunque los métodos son distintos, ambos convergen en resultados hidráulicos equivalentes y válidos para el tramo de estudio.

Aunque la prueba estadística T-Student demostró que numéricamente no hay diferencias significativas (Sig. 0.811), el análisis de dispersión (Desviación Estándar) demostró que el método de Manning es 2.6 veces más inestable (Desv. 0.0079) que el de Ven Te Chow (Desv. 0.0030). Por lo tanto, se valida la hipótesis de que Ven Te Chow es metodológicamente más robusto y recomendable.

Prueba de Hipótesis Específicas

a) Hipótesis Específica 1

Planteamiento (H_{E1}): La metodología de Robert Manning resulta ser menos precisa al momento de determinar los coeficientes de rugosidad, si se la compara con otros métodos disponibles, en el río Pongora, Ayacucho 2025.

Evidencia Estadística: Se analizó el Coeficiente de Variación (C.V.) y el porcentaje de exactitud calculado en la Tabla N° 30.

- **Exactitud Manning:** 88.9%
- **Coeficiente de Variación Manning:** 15.70%
- **Comparativa:** La dispersión de Manning (15.70%) es casi el triple que la de Ven Te Chow (5.88%), lo que indica una mayor fluctuación y sensibilidad a errores locales.

Se ACEPTA la hipótesis específica 1. Los datos demuestran que, aunque el método de Manning es válido, presenta una menor estabilidad y exactitud relativa en comparación con el método de velocidades de Ven Te Chow.

Hipótesis Específica 2

- **Planteamiento (H_{E2}):** Los resultados que arroja la metodología de Ven Te Chow resultan ser más exactos al determinar los coeficientes de rugosidad, superando en precisión a otros métodos existentes, en el río Pongora, Ayacucho 2025.
- **Evidencia Estadística:** Según los resultados de la Tabla N° 30 y el análisis descriptivo de la Tabla N° 28.
 - **Exactitud Ven Te Chow (Velocidades):** 95.4%
 - **Desviación Estándar:** 0.0030 (Muy baja)
 - **Consistencia:** El método mantuvo valores estables (0.051 - 0.054) a lo largo de todo el tramo, independientemente de las variaciones geométricas del cauce.

Se ACEPTA la hipótesis específica 2. La evidencia numérica confirma que el método hidrométrico de Ven Te Chow ofrece la mayor precisión para las condiciones del río Pongora, superando en confiabilidad al método de Manning convencional.

Hipótesis Específica 3

- **Planteamiento (H_{E3}):** La evidencia estadística muestra que no existe una diferencia significativa entre los coeficientes de rugosidad que se obtienen con la metodología de Robert Manning y los que arroja la de Ven Te Chow, aunque esta última demuestra una mayor exactitud en el río Pongora, Ayacucho 2025.
- **Evidencia Estadística:** Se recurre al resultado de la prueba T-Student para muestras relacionadas (Tabla 32).
 - **Valor de significancia (Sig.):** 0.811
 - **Condición:** $0.811 > 0.05$ (No hay diferencia significativa en las medias).

○ **Contexto:** Aunque las medias son estadísticamente iguales (0.050 vs 0.051), la desviación estándar demostró que Ven Te Chow es más "exacto" (menos disperso).

Se ACEPTA la hipótesis específica 3. Estadísticamente, ambos métodos llegan al mismo valor promedio representativo del río, pero se valida que Ven Te Chow posee una mayor exactitud operativa (menor error aleatorio).

V. CONCLUSIONES

Tras la finalización de este proyecto de investigación sobre el Análisis comparativo de métodos para estimar el coeficiente de rugosidad en el río Pongora, Ayacucho – 2025, se llegaron a las siguientes conclusiones:

- ✓ Respecto al objetivo general, el análisis comparativo entre las metodologías permitió determinar que, si bien ambos métodos convergen en valores promedio similares, existen diferencias sustanciales en su estabilidad. La prueba estadística T-Student (Sig. = 0.811) demostró que no existe una diferencia significativa entre las medias de ambas metodologías; sin embargo, el análisis de exactitud confirmó que la metodología de Ven Te Chow basada en velocidades ofrece una mayor precisión (95.4%) frente a la variabilidad de la metodología de Manning (88.9%), validando que la primera es más robusta para representar el comportamiento hidráulico del río Pongora.
- ✓ En términos de la metodología de Robert Manning, se determinaron coeficientes de rugosidad que oscilan entre 0.042 y 0.065, con un promedio global de 0.050. Se concluye que esta metodología presenta una alta sensibilidad a las irregularidades locales, evidenciada por una desviación estándar de 0.0079 y un coeficiente de variación del 15.70%. Esto indica que su aplicación directa mediante tablas visuales puede inducir errores de sobreestimación en tramos con pendientes fuertes u obstrucciones, requiriendo necesariamente una calibración topográfica detallada.
- ✓ Con relación a la metodología de Ven Te Chow, específicamente mediante el método de distribución de velocidades, se determinó un coeficiente promedio de 0.051, con un rango muy estable entre 0.046 y 0.054. Este hallazgo evidencia una alta precisión y consistencia técnica (C.V. = 5.88%), demostrando que el análisis del perfil de velocidades ($V_{0.2h}/V_{0.8h}$) filtra eficazmente el "ruido" geométrico del cauce, consolidándose como la herramienta más confiable para el modelamiento hidráulico en el tramo de estudio.
- ✓ Finalmente, respecto a la evaluación y comparación de valores, se estableció una fuerte correlación entre la rugosidad y la granulometría del lecho. Se determinó

que el diámetro efectivo D_{90} explica el 96.6% de la variabilidad del coeficiente de rugosidad ($R^2 = 0.966$), permitiendo generar una ecuación específica para el río Pongora: $n = 0.053 \cdot D_{90}^{1/6}$. Este resultado confirma que la resistencia al flujo en ríos de alta montaña está gobernada principalmente por la macrorugosidad del material de fondo, más que por factores externos.

VI. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda a la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y a los proyectistas de obras hidráulicas en la cuenca del río Pongora, priorizar el uso de la Metodología de Ven Te Chow basada en la distribución de velocidades para el diseño de estructuras de defensa ribereña y delimitación de fajas marginales. Dado que este método demostró mayor robustez y menor error relativo, su aplicación garantiza diseños más seguros y ajustados a la realidad, evitando el sobredimensionamiento innecesario que suele ocurrir al promediar valores inciertos.
- ✓ Respecto a la metodología de Robert Manning, se sugiere a los ingenieros civiles que, en caso de optar por este método clásico, no dependan exclusivamente de la selección visual de tablas (como las de Barnes). Es imperativo realizar el levantamiento topográfico de la pendiente geométrica y el radio hidráulico en campo para "calibrar" la ecuación, ya que se ha demostrado que la estimación puramente visual en ríos de montaña puede inducir errores de dispersión superiores al 15%, afectando la capacidad de conducción calculada.
- ✓ En relación con la metodología de Ven Te Chow (Velocidades), se aconseja implementar campañas de aforo rigurosas utilizando correntómetros calibrados para determinar el perfil de velocidades verticales ($V_{0.2h}$ y $V_{0.8h}$). Se recomienda medir en tramos rectos y uniformes para aprovechar la alta estabilidad detectada en este método (C.V. de 5.88%), lo cual permite filtrar las irregularidades geométricas del cauce y obtener un coeficiente de rugosidad base altamente confiable.
- ✓ Finalmente, respecto a la ecuación generada, se propone validar y utilizar la fórmula empírica $n = 0.053 \cdot D_{90}^{1/6}$ como una herramienta de estimación rápida para el río Pongora y cauces aledaños de características similares. Se recomienda a las oficinas de Gestión de Riesgos de Desastres utilizar este modelo matemático basado en el diámetro D_{90} para evaluaciones preliminares, ya que permite obtener el coeficiente de rugosidad de manera económica y eficiente mediante un simple análisis granulométrico, sin necesidad de esperar campañas de aforo complejas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Marengo, H., Aldama, Á. A., & Romero, I. (2020). Un nuevo criterio para la estimación de rugosidad compuesta en modelos hidráulicos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 11(5), 171–211. <https://scielo.org.mx/pdf/tca/v11n5/2007-2422-tca-11-05-171.pdf>
- Carrillo, L., Arce, H., & Vásquez, J. (2020). Modelo de estimación del coeficiente de rugosidad de Manning en función de la granulometría en el río Santa, sector Recuay–Carhuaz, Áncash, Perú. *Ingeniería UC*, 27(3), 328–342. <https://www.redalyc.org/journal/707/70767026009/>
- Bolaños Rodríguez, P. (2024). Modelo para estimar el coeficiente de rugosidad de Manning en función a la granulometría del cauce del río Sendamal, Celendín – Cajamarca. Universidad Nacional de Cajamarca. Recuperado de <https://bing.com/search?q=coeficiente+de+rugosidad+hidráulica+estudios+Perú>
- Carrillo, L., Arce, H., & Vásquez, J. (2020). Modelo de estimación del coeficiente de rugosidad de Manning en función de la granulometría en el río Santa, sector Recuay–Carhuaz, Áncash, Perú. *Ingeniería UC*, 27(3), 328–342. <https://doi.org/10.54139/revinguc.v27i3.292>
- Ayvar Fuentes, C. A. (2024). Evaluación comparativa del coeficiente de rugosidad mediante la metodología de Robert Manning y Ven Te Chow en el río Rontoccocha-Abancay-Apurímac. Universidad Tecnológica de los Andes. Recuperado de <https://repositorio.utea.edu.pe/server/api/core/bitstreams/72bb0701-12b1-44e2-a028-003adb44f44f/content>
- Huamán, J., & Quispe, R. (2023). Análisis del coeficiente de rugosidad de Manning en el río Cachi, Ayacucho. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Recuperado de <https://repositorio.unsch.edu.pe>
- Gutiérrez, M. (2022). Aplicación de las tablas de Ven Te Chow en la estimación del coeficiente de rugosidad del río Huatatas, Ayacucho. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Recuperado de <https://repositorio.unsch.edu.pe>
- Loayza Lozano, S. K. (2022). Análisis y determinación del coeficiente de rugosidad "n" de Manning en ríos costeros de la zona centro y sur del Perú. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_32297ed9c06f905ec2ad4119000d04f2
- Ayvar Fuentes, C. A. (2023). Evaluación comparativa del coeficiente de rugosidad mediante la metodología de Robert Manning y Ven Te Chow en el río Rontoccocha-Abancay-Apurímac. <https://repositorio.utea.edu.pe/bitstreams/72bb0701-12b1-44e2-a028-003adb44f44f/download>
- Burgos Flores, N. I. (2017). Estimación del coeficiente de rugosidad de Manning mediante mediciones de velocidad y profundidad en el río Chonta, Cajamarca. <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/1507>.

- Fernández de Córdova Webster, C. J., León Méndez, A. J., Rodríguez López, Y., Martínez Ramírez, P. G., & Meneses Meneses, D. M. (2018). Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1), 17-31. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=s1680-03382018000100002&script=sci_arttext.
- León Ricaurte, Y. B., & Parra Ariza, J. A. Estimación del coeficiente de manning con el método de los dos puntos en el Río Negro (Cundinamarca). <https://repository.udistrital.edu.co/items/c407aa8e-60d5-4689-80bd-2a858731529>.
- Pastora, F. D. (2010). Evaluación de la fórmula de Manning en el río Ostua. (Tesis de Maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala). San Carlos, Ciudad de Guatemala, Guatemala: Repositorio Institucional USAC. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0398_MT.pdf.
- Ruberto, A. R. (2003). Estudio exploratorio de la sensibilidad del coeficiente de rugosidad en un río de llanura. Departamento de Hidraulica-Facultad de Ingeniería-UNNE, 4. Recuperado de <https://soda.ustadistancia.edu.co/enlinea/eduvirtual/Cuencas/maestria/docs/seminv/Lec>.
- Yépez, G., Ventura, F., Guevara, E., & Cartaya, H. (2000). Cálculo del coeficiente de rugosidad "n" de manning en los grandes ríos de Venezuela. *Revista Ingeniería UC*, 7(2), 0. https://dlwqtxts1xzle7.cloudfront.net/101635299/70770202-libre.pdf?1682784967=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCalculo_del_coeficiente_de_rugosidad_n_d.pdf&Expires=1764602151&Signature=O2Ex-fJELHMYQhGIGMw9AsuIMwzj0LKO~S3P3cm15svnTfG35RQo4lq3HmVka2mifu0Bt5K~nMWA1eJYUyNXF9WnebNzHdvZ89439BLu04x2ptAuZI-6E~oHM4VTNMuoPcMjFXS6C3XPvY-YWv-JawECer5YgwgHRxb0O3H4KLROyhiARzBpCq7AV4TuN~14rtjTtPboWdmuG~zeP1bUxI~r1LN3AqfXITqMb7jPzor4qPTS8sG3361Ar0xQ6Ulwqk6mEoAA G3RVGmYeu3PzTVr495zXPVbNk7QIeRJdJA2nvhiAIIW7P6GltSHjLh~4kRbbrMOQt00eE2Brw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- Chinchay, A. E. V. (2020). Comparacion de Metodos Analiticos en el Calculo del Coeficiente de Rugosidad frente al de Manning, en la parte baja de cinco Subcuencas del Río Santa, entre Recuay y Caraz. Recuay, Caraz: Repositorio UNASAM. Recuperado de <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/5294>.
- Burgos, F. N. (2016). Estimación del coeficiente de rugosidad de Manning mediante mediciones de velocidad y profundidad, empleando un molinete hidrométrico, en el río Chonta, Cajamarca, 2016. (Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca). Cajamarca: Repositorio Institucional. Recuperado de <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/1507>.
- Rosales, J. C. (2019). Modelo de estimación del coeficiente de Rugosidad de Manning en función de la Granulometría en el río Santa, Sector Recuay - Carhuaz - Ancash, 2019. Recuay, Carhuaz, Ancash: Repositorio Institucional. Recuperado de <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/4227>.
- Chugnas Avalos, C. I., & Mantari Cruz, W. F. (2016). Determinación experimental del coeficiente de rugosidad de Manning superficies granulares mediante la

- simulación de un cauce natural de sección rectangular.
https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UPAO_5a1c744844f233875c1flabe5733855c.
- Rojas, C. R. (2021). Comportamiento del flujo en canales abiertos por cambios de rugosidad-canal Sahuinto, Abancay, Apurimac, 2021. Lima, Lima, Lima: Repositorio UCV. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/83130>.
- Chow, V. T. (1994). Hidraulica de Canales Abiertos.
https://www.academia.edu/43519012/Ven_Te_Chow_HIDRAULICA_DE_CANALES_ABIERTOS.

ANEXO

MATRIZ DE CONSISTENCIA

MATRIZ DE CONSISTENCIA

"Análisis comparativo de métodos para estimar el coeficiente de rugosidad en el río Pongora, Ayacucho 2025"

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	DISEÑO METODOLOGICO
GENERAL ¿Cómo se realizará la evaluación comparativa del coeficiente de rugosidad mediante las metodologías de Ven Te Chow y Robert Manning en el río Pongora, Ayacucho 2025? ESPECIFICOS ✓ ¿Cómo se determinarán los coeficientes de rugosidad mediante la metodología de Robert Manning en el río Pongora, Ayacucho 2025? ✓ ¿Cómo se determinarán los coeficientes de rugosidad mediante la metodología de Ven Te Chow en el río Pongora, Ayacucho 2025? ✓ ¿Cómo se evaluarán y compararán los valores obtenidos mediante las metodologías de Ven Te Chow y Robert Manning en el río Pongora, Ayacucho 2025?	GENERAL Analizar y comparar la estimación de los coeficientes de rugosidad mediante las metodologías de Ven Te Chow y Robert Manning, evaluando su precisión y aplicabilidad en el río Pongora, Ayacucho 2025 ESPECIFICOS ✓ Determinar los coeficientes de rugosidad mediante la metodología de Robert Manning, evaluando su precisión y aplicabilidad en el río Pongora, Ayacucho 2025. ✓ Determinar los coeficientes de rugosidad mediante la metodología de Ven Te Chow, evaluando su precisión y aplicabilidad en el río Pongora, Ayacucho 2025. ✓ Evaluar y comparar los valores obtenidos mediante las metodologías de Ven Te Chow y Robert Manning, analizando su precisión y aplicabilidad en el río Pongora, Ayacucho 2025.	GENERAL La estimación de los coeficientes de rugosidad mediante la metodología de Robert Manning presenta limitaciones en comparación con la precisión obtenida con la metodología de Ven Te Chow, por lo que su aplicación es menos recomendable en el río Pongora, Ayacucho 2025. ESPECÍFICAS ✓ La metodología de Robert Manning presenta menor exactitud en la determinación de los coeficientes de rugosidad, en comparación con otras metodologías, en el río Pongora, Ayacucho 2025 ✓ Los resultados obtenidos mediante la metodología de Ven Te Chow demuestran mayor exactitud en la determinación de los coeficientes de rugosidad en comparación con otras metodologías, en el río Pongora, Ayacucho 2025. ✓ La evidencia estadística indica que no hay una diferencia significativa en los coeficientes de rugosidad obtenidos con la	VARIABLE INDEPENDIENTE X: Metodología de estimación de coeficiente de rugosidad. X1. Metodología Robert Manning X2. Metodología de Ven te Chow. VARIABLE DEPENDIENTE Y: Coeficiente de rugosidad. Y1. Tablas de coeficiente de rugosidad y factores que afectan "n".	Diseño metodológico Enfoque cuantitativo, descriptivo, diseño no experimental, de corte transversal y de alcance descriptivo-comparativo. Población y muestra Población: Ríos de la provincia de Huamanga Muestra: río Pongora Lugar de estudio: Comunidad de Pongora. Periodo de desarrollo: Junio a agosto 2025 Técnica e instrumento: Técnica: Observación, pruebas estandarizadas Instrumento: Ficha de registro.

		metodología de Robert Manning en comparación con la de Ven Te Chow, aunque esta última demuestra una mayor exactitud en el río Pongora, Ayacucho 2025.		
--	--	--	--	--



Fotografía : *Toma de medidas como: ancho de cauce y longitud de cada tramo.*



Fotografía : *Toma de medidas como: ancho de cauce y longitud de cada tramo desde el centro.*

Fotografía : *seccionamiento transversal del cauce del rio cada medio metro.*





Fotografía : *medida de desnivel en cada punto, aguas arriba y aguas abajo a 20 metros del centro en sentido longitudinal.*

Fotografía : *medida de desnivel (pendiente) en cada punto de estudio, aguas arriba y aguas abajo a 20 metros del centro en sentido longitudinal.*





Fotografía : toma de datos con el medidor de flujo portátil, tales como: velocidad, tiempo, flujo instantáneo y paso hidráulico

Fotografía : valores obtenidos con el medidor de flujo portátil, tales como: velocidad, tiempo, flujo instantáneo y paso hidráulico





Fotografía : *equipo que colaboró en la toma de datos para el desarrollo del tesis*

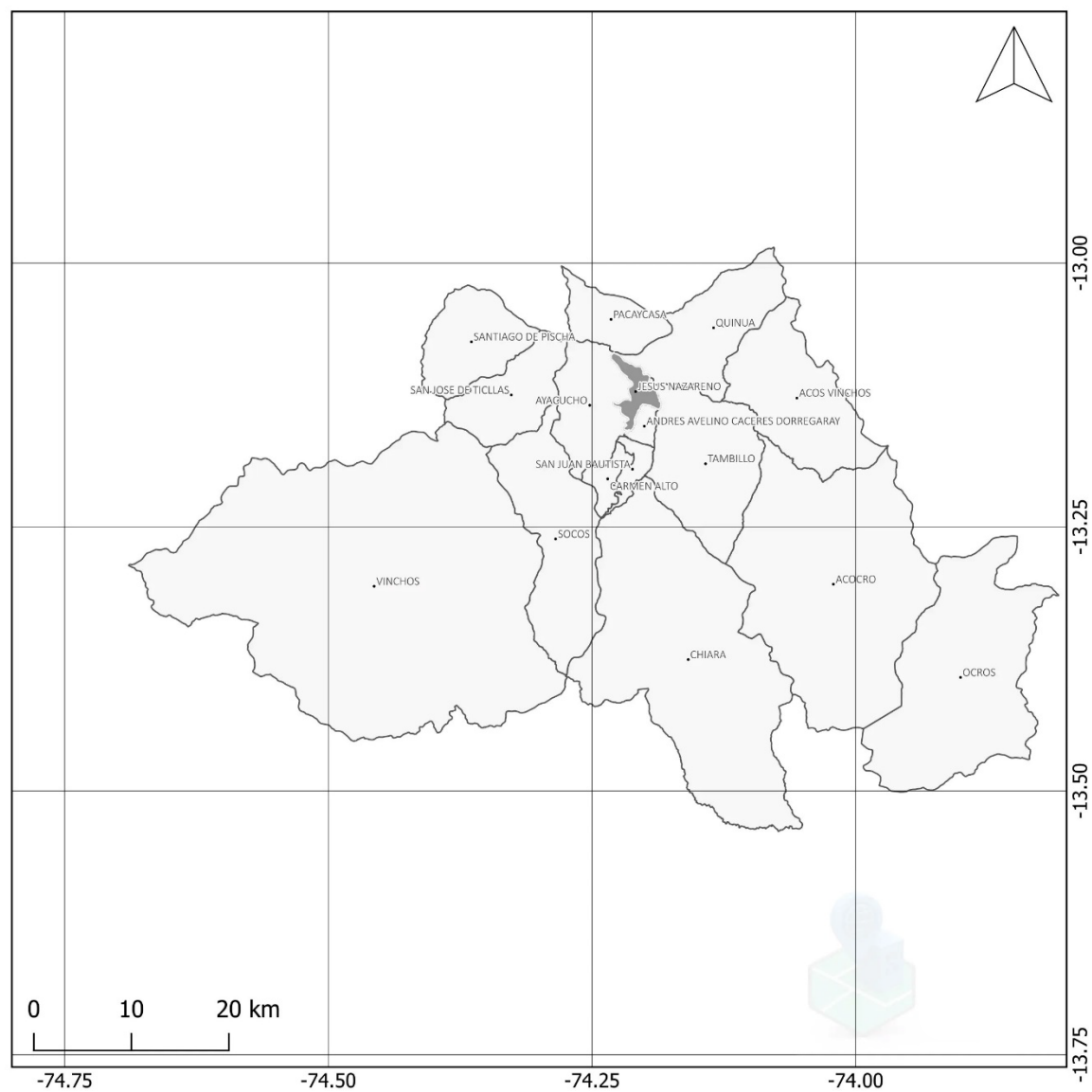
Fotografía : *equipo que colaboró en la toma de datos para el desarrollo del tesis*



Provincia: HUAMANGA



Departamento: AYACUCHO



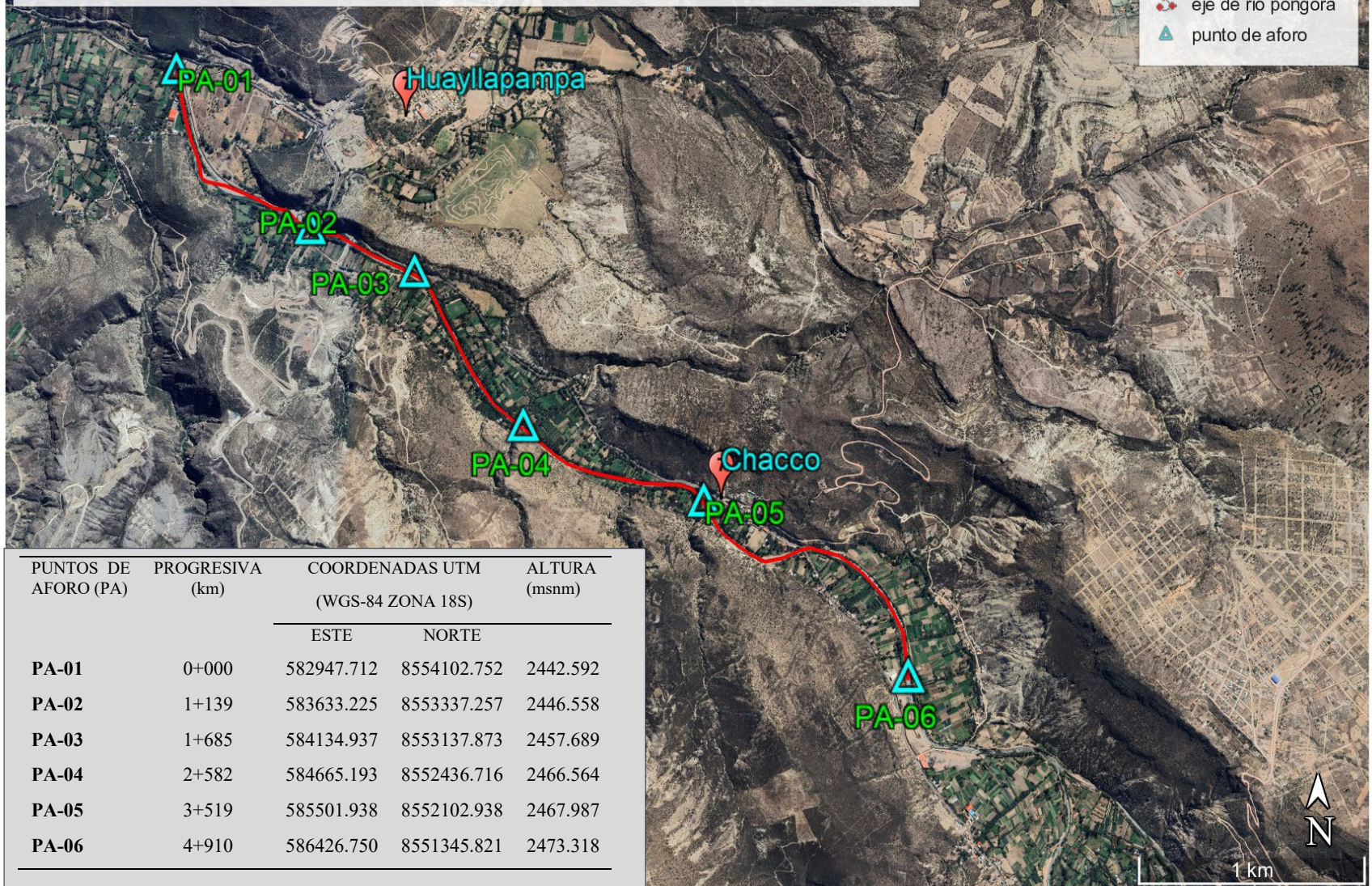
Plano : Ubicación de zona de trabajo entre los distrito de Jesús Nazarenas, Pacaycasa, Ayacucho y Quinua.

UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE AFORO DEL RÍO PONGORA

ESC: 1/25000

Leyenda

-  centro poblado
-  eje de rio pongora
-  punto de aforo



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 40-2026-FIMGC****PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, en la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **Resolución Decanal No 202-2026-FIMGC-D**, a los **veintiséis días del mes de junio de 2026**, siendo las **10:19 a.m.**, reunidos en el **Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil**, bajo la presidencia del **MSc. José Ernesto ESTRADA CARDENAS**, y los miembros: **MSc. Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO**, **Dr. Ing. Edward LEON PALACIOS** y **MSc. Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANI**, actuando como secretario docente el **Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNANDEZ**, para proceder a la sustentación de tesis para optar el **Título Profesional de Ingeniero Civil**, del Bachiller en Ciencias de la Ingeniería Civil:

CRISTHIAN FIGUEROA FLORES

Quien presentó la tesis denominada:

Análisis comparativo de métodos para estimar el coeficiente de rugosidad en el río Pongora, Ayacucho 2025

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

Aprobado con 16 (dieciséis)

Siendo las **11:40 a.m.** del día **26 de junio del 2026**, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad de lo actuado los miembros del jurado firmamos al pie del presente.

MSc. José Ernesto ESTRADA CARDENAS
Presidente

MSc. Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO
Miembro

Dr. Ing. Edward LEON PALACIOS
Miembro

MSc. Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA
HUAMANI
Miembro - Asesor

Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNANDEZ
Secretario docente de la FIMGC



CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N° 27-2026-FIMGC/ASIH

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

Apellidos y Nombres : Cristhian FIGUEROA FLORES
Escuela Profesional : INGENIERÍA CIVIL
Título de la Tesis : Análisis comparativo de métodos para estimar el coeficiente de rugosidad en el río Pongora, Ayacucho 2025
Evaluación de la Originalidad : 5 % Índice de Similitud
Identificador de la entrega : 3021184019

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

En señal de conformidad y verificación se firma la presente constancia

Ayacucho, 31 de agosto del 2026



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

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

Análisis comparativo de métodos para estimar el coeficiente de rugosidad en el río Pongora, Ayacucho 2025

por Cristhian FIGUEROA FLORES

Análisis comparativo de métodos para estimar el coeficiente de rugosidad en el río Pongora, Ayacucho 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

5%	5%	0%	1%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.utea.edu.pe	4%
	Fuente de Internet	
2	www.repositorio.upla.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
3	repositorio.unasam.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
4	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	<1%
	Trabajo del estudiante	
5	www.upt.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	

Excluir citas	Activo	Excluir coincidencias	< 30 words
Excluir bibliografía	Activo		