



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA POSGRADO

Tema: Efecto de los sedimentos sobre las características hidráulicas del canal de riego Ambato-Huachi-Pelileo.

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Título de Cuarto Nivel de Magister en
Hidráulica con Mención en Obras Hidráulicas

Modalidad del Trabajo de Titulación: Artículos Profesionales de Alto Nivel

Autor: Ing. Jorge David Freire Lara

Director: Ing. Alfonso Patricio Arellano Barriga Mg.

Ambato – Ecuador

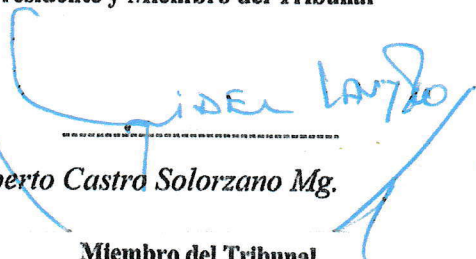
2025

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

El Tribunal receptor del Trabajo de Titulación, presidido por Ing. Santiago Paul Cabrera Anda, Mg e integrado por los señores: Ing. Fidel Alberto Castro Solorzano, Mg; Ing. Byron Genaro Cañizares Proaño, Mg; PhD. Jorge Javier Guevara Robalino, Mg; Ing. Alex Gustavo López Arboleda , Mg, designados por la Unidad Académica de Titulación del Centro de Posgrados de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: “Efecto de los sedimentos sobre las características hidráulicas del canal de riego Ambato-Huachi-Pelileo” elaborado y presentado por el señor Ing. Jorge David Freire Lara, para optar por el Título de cuarto nivel de Magíster en Hidráulica con Mención en Obras Hidráulicas; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación, el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.


.....
Ing. Santiago Paul Cabrera Anda Mg.

Presidente y Miembro del Tribunal


.....
Ing. Fidel Alberto Castro Solorzano Mg.

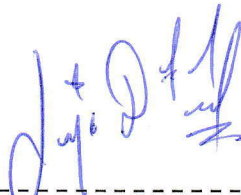
Miembro del Tribunal


.....
Ing. Byron Genaro Cañizares Proaño Mg.

Miembro del Tribunal

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

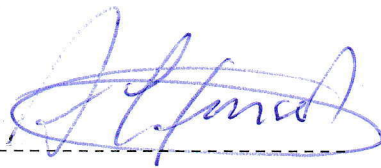
La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: "Efecto de los sedimentos sobre las características hidráulicas del canal de riego Ambato-Huachi-Pelileo", le corresponde exclusivamente al Ing. Jorge David Freire Lara, autor bajo la dirección del Ing. Alfonso Patricio Arellano Barriga Mg., Director del Trabajo de Titulación, y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.



Ing. Jorge David Freire Lara

C.C.: 1802158558

AUTOR



Ing. Alfonso Patricio Arellano Barriga Mg.

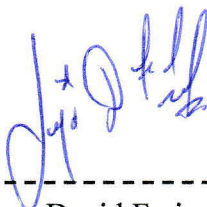
C.C.: 0601823313

DIRECTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.



Ing. Jorge David Freire Lara

C.C.: 180215855

AGRADECIMIENTO

A Dios, por su guía constante, por ser mi fortaleza en los momentos de dificultad y por permitirme alcanzar este logro académico que representa años de esfuerzo y dedicación.

A la Universidad Técnica de Ambato, mi alma mater, por brindarme la oportunidad de formarme como profesional y por poner a mi disposición las herramientas necesarias para culminar con éxito esta maestría en Hidráulica con Mención en Obras Hidráulicas.

Al Ing. Alfonso Patricio Arellano Barriga Mg., director de este trabajo de titulación, por su invaluable orientación, paciencia y conocimientos compartidos durante todo el proceso de investigación. Su experiencia y compromiso fueron fundamentales para el desarrollo exitoso de este proyecto.

A los docentes de la Maestría en Hidráulica con Mención en Obras Hidráulicas, quienes con su dedicación y profesionalismo contribuyeron significativamente a mi formación académica y profesional, dejando una huella imborrable en mi desarrollo como investigador.

A la Junta de Riego del Canal Ambato-Huachi-Pelileo y sus colaboradores, por facilitar el acceso a las instalaciones del canal y proporcionar información valiosa que hizo posible el desarrollo de esta investigación aplicada.

A mi familia, pilar fundamental en mi vida, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante durante esta etapa de formación profesional. Su amor y confianza fueron la fuerza que me impulsó a seguir adelante en los momentos más desafiantes.

Con profundo agradecimiento,

Jorge David Freire Lara

DEDICATORIA

A Dios, arquitecto supremo de mi existencia, por iluminar mi camino y darme la fortaleza necesaria para superar cada obstáculo en esta travesía académica.

A mis padres, quienes, con su amor infinito, sacrificio y ejemplo de vida me enseñaron el valor del esfuerzo, la perseverancia y la honestidad. Este logro es el reflejo de su constante apoyo y de los principios que sembraron en mi corazón.

A mi esposa, compañera inseparable de esta travesía, por su paciencia, comprensión y amor incondicional. Gracias por estar a mi lado en cada desafío, por creer en mis capacidades cuando yo dudaba, y por ser mi fuente de inspiración y motivación constante.

A mis hijos, razón de mi existir y motor de mis aspiraciones, quienes con sus sonrisas renovaban mis fuerzas en los momentos de cansancio. Este trabajo representa no solo un logro profesional, sino también un legado de dedicación y superación que espero inspire sus propios caminos.

A mis tíos, por su aliento permanente y por celebrar conmigo cada pequeño avance hacia esta meta. Su confianza en mí fue un impulso invaluable.

A todos aquellos que de una u otra manera contribuyeron a que este sueño se hiciera realidad, les dedico este trabajo de investigación como testimonio de que, con fe, trabajo y el apoyo de quienes nos aman, todos los objetivos son alcanzables.

Jorge David Freire Lara

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Portada	i
A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
RESUMEN EJECUTIVO.....	ix
ABSTRACT.....	x
Introducción	1
Justificación	5
Objetivos	6
Métodos materiales	6
Tabla 1. Características de los puntos de muestreo en el crahp.....	7
Análisis de Resultados	12
Tabla 2. Parámetros geométricos e hidráulicos en los puntos de muestreo del crahp	12
Figura 1. Variación de parámetros hidráulicos	14
Figura 2. Relación manning vs velocidad.....	15
Tabla 3. Reducción de área útil y elevación de tirante hidráulico	16
Figura 3. Reducción área vs tirante.....	17
Figura 4. Perfil HEC-RAS	18
Tabla 4. Balance hídrico del canal Ambato-Huachi-Pelileo (p0 a t5)	19
Figura 5. Balance hídrico (diagrama de Sankey).....	20

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Discusión.....	21
Conclusiones	23
Recomendaciones	25
Bibliografía	25

RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio cuantificó el efecto de la sedimentación sobre las características hidráulicas del canal de riego Ambato-Huachi-Pelileo mediante análisis geométrico e hidráulico en seis puntos de muestreo. Se realizaron levantamientos topográficos con estación total Leica TS02 y GPS diferencial Trimble R8s, determinando el área útil, velocidad media mediante método de flotadores, coeficiente de Manning y tirante hidráulico en cada sección. Los resultados fueron validados mediante modelación unidimensional en HEC-RAS 6.3.1. La sedimentación redujo progresivamente el área útil en 40% (de 1.25 m² a 0.75 m²), incrementó el coeficiente de rugosidad en 43.8% (de 0.016 a 0.023) y disminuyó la velocidad del flujo en 26.7% (de 0.90 m/s a 0.66 m/s). Se estableció una relación polinómica de segundo grado entre el coeficiente de Manning y la velocidad media ($R^2 = 0.9598$), confirmando que el aumento de rugosidad conlleva disminución proporcional de velocidad. Adicionalmente, se identificó una relación lineal entre la reducción del área útil y la elevación del tirante hidráulico ($R^2 = 0.9988$). Estos modelos constituyen herramientas predictivas para la gestión de canales de riego andinos, permitiendo anticipar pérdidas de capacidad hidráulica y planificar mantenimiento preventivo basado en indicadores cuantitativos medibles mediante métodos de bajo costo replicables por operadores comunitarios.

DESCRIPTORES: SEDIMENTACIÓN, COEFICIENTE DE MANNING, TIRANTE HIDRÁULICO, MODELACIÓN HIDRÁULICA, CANALES DE RIEGO, MÉTODO DE FLOTADORES.

ABSTRACT

This study quantified the effect of sedimentation on the hydraulic characteristics of the Ambato-Huachi-Pelileo irrigation canal through geometric and hydraulic analysis at six sampling points. Topographic surveys were conducted using a Leica TS02 total station and Trimble R8s differential GPS, determining the effective flow area, mean velocity by float method, Manning's coefficient, and water depth for each section. Results were validated through one-dimensional modeling in HEC-RAS 6.3.1. Sedimentation progressively reduced the effective flow area by 40% (from 1.25 m² to 0.75 m²), increased the roughness coefficient by 43.8% (from 0.016 to 0.023), and decreased flow velocity by 26.7% (from 0.90 m/s to 0.66 m/s). A second-degree polynomial relationship was established between Manning's coefficient and mean velocity ($R^2 = 0.9598$), confirming that increased roughness leads to proportional velocity decrease. Additionally, a linear relationship was identified between effective area reduction and water depth elevation ($R^2 = 0.9988$). These models constitute predictive tools for Andean irrigation canal management, enabling anticipation of hydraulic capacity losses and preventive maintenance planning based on quantitative indicators measurable through low-cost methods replicable by community operators.

KEYWORDS: SEDIMENTATION, MANNING'S COEFFICIENT, WATER DEPTH, HYDRAULIC MODELING, IRRIGATION CANALS, FLOAT METHOD.

Introducción

Los sistemas de riego por canales abiertos constituyen la columna vertebral de la seguridad alimentaria en las regiones andinas de América Latina, donde más del 70% de la producción agrícola depende de infraestructuras de distribución hídrica por gravedad [1]. Estos sistemas, desarrollados durante décadas mediante inversiones públicas y esfuerzos comunitarios, enfrentan actualmente una problemática técnica crítica que compromete su sostenibilidad operativa: la acumulación progresiva de sedimentos. Este fenómeno natural, intensificado por actividades antrópicas como la deforestación, urbanización acelerada y prácticas agrícolas inadecuadas, genera reducciones documentadas de la capacidad de conducción hidráulica entre 15% y 45% en periodos operativos de apenas 3 a 5 años [2], [3]. La sedimentación no solo limita la disponibilidad de agua para riego, sino que también incrementa el riesgo de desbordamientos, daños a infraestructuras colindantes y deterioro de la calidad del recurso hídrico, configurando un escenario de vulnerabilidad multidimensional que requiere atención técnica prioritaria [4].

Desde la perspectiva de la ingeniería hidráulica, la deposición de sedimentos en canales abiertos altera fundamentalmente las condiciones de flujo al modificar tres parámetros clave: la geometría de la sección transversal, la rugosidad del lecho y la distribución de velocidades [5]. La reducción del área útil de flujo por acumulación de materiales sólidos obliga al agua a elevarse para mantener el caudal transportado, incrementando el tirante hidráulico y generando sobrecargas en las paredes del canal. Simultáneamente, los sedimentos depositados, especialmente aquellos de granulometría fina mezclados con materia orgánica, incrementan significativamente el coeficiente de rugosidad de Manning, parámetro que cuantifica la resistencia al flujo. Investigaciones previas han documentado aumentos de este coeficiente entre 20% y 80% respecto a las condiciones de diseño original, dependiendo de la composición, espesor y distribución espacial de los sedimentos [6], [7]. Esta alteración de la rugosidad se traduce directamente en una disminución de la velocidad media del flujo, reduciendo la eficiencia hidráulica del sistema y, en casos extremos, provocando el colapso operativo de tramos completos del canal [8].

A pesar de la magnitud de esta problemática, existe una carencia notable de modelos predictivos cuantitativos que relacionen de manera funcional y validada la acumulación de sedimentos con la pérdida de capacidad hidráulica en canales andinos de riego. La literatura científica disponible se concentra mayoritariamente en estudios cualitativos, diagnósticos descriptivos o modelos genéricos desarrollados para condiciones hidrológicas de otras latitudes, con limitada aplicabilidad a las características geomorfológicas, climáticas e institucionales de los Andes ecuatorianos [9]. Esta brecha de conocimiento dificulta la implementación de estrategias de mantenimiento preventivo basadas en evidencia, obligando a los gestores de canales a operar bajo esquemas reactivos que resultan más costosos, menos eficientes y ambientalmente insostenibles.

En Ecuador, el canal de riego Ambato-Huachi-Pelileo (CRAHP) representa un caso de estudio emblemático que refleja con claridad esta problemática. Con una extensión aproximada de 45 kilómetros desde su captación en el río Ambato hasta las zonas agroproductivas del cantón Pelileo, el CRAHP constituye una infraestructura estratégica que provee agua a más de 14,000 usuarios directos e indirectos, incluyendo agricultores familiares, comunidades periurbanas y sistemas comunitarios de agua potable rural [10]. Sin embargo, diagnósticos técnicos recientes realizados por la Junta de Riego y estudios académicos de la Universidad Técnica de Ambato han identificado situaciones críticas de sedimentación, con reducciones del área útil de hasta 40% en ciertos tramos y acumulaciones de materiales sólidos superiores a 30 centímetros de espesor [11], [12]. Esta degradación progresiva se origina en múltiples factores: erosión acelerada en la cuenca alta debido a prácticas agrícolas en laderas con pendientes superiores al 40%, descargas de aguas residuales domésticas sin tratamiento previo en zonas urbanas, y ausencia de desarenadores funcionales en puntos estratégicos del recorrido.

La problemática del CRAHP se agrava por la fragmentación institucional en su gestión. Actualmente coexisten al menos cinco entidades con competencias superpuestas: la Junta de Riego Ambato-Huachi-Pelileo, el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Ambato, el Gobierno Provincial de Tungurahua, la Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (EMAPA-A), y el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, sin

un protocolo unificado de monitoreo, mantenimiento o intervención técnica [12]. Esta desarticulación resulta en duplicación de esfuerzos, asignación ineficiente de recursos y ausencia de un sistema integrado de información que permita la toma de decisiones basada en datos objetivos. Adicionalmente, estudios de calidad de agua han reportado concentraciones de coliformes fecales, metales pesados y compuestos orgánicos persistentes en los sedimentos que exceden los límites permisibles establecidos en la normativa ecuatoriana para uso agrícola, evidenciando que la sedimentación no es solo un problema hidráulico sino también sanitario y ambiental [13], [14].

Desde la perspectiva metodológica, la caracterización hidráulica de canales con sedimentación ha evolucionado significativamente en las últimas dos décadas. Las técnicas más avanzadas incluyen el uso de perfiladores acústicos de corriente Doppler (ADCP), que permiten medir simultáneamente velocidades tridimensionales del flujo y concentración de sedimentos en suspensión [15]; molinetes hidrométricos de alta precisión calibrados en laboratorio [16]; y sistemas de teledetección mediante tecnología LiDAR que generan modelos digitales de elevación con resoluciones centimétricas [17]. Sin embargo, estas tecnologías presentan barreras significativas para su implementación en contextos rurales andinos: costos de adquisición que superan los \$20,000 USD por equipo, requerimientos de personal técnico altamente especializado, necesidad de mantenimiento y calibración periódica en laboratorios certificados, y condiciones logísticas que raramente se cumplen en sistemas de riego comunitarios con presupuestos limitados [18].

En contraste, el método de flotadores, también conocido como técnica de aforo por velocidad superficial, constituye una alternativa metodológica validada científicamente, de bajo costo operativo y fácilmente replicable por operadores locales con capacitación básica. Este método, fundamentado en la medición directa del tiempo de recorrido de objetos flotantes en tramos de longitud conocida, ha sido estandarizado por la Organización Internacional de Normalización (ISO 748:2007) y presenta precisiones documentadas del 5% al 10% cuando se aplican protocolos rigurosos de medición y corrección [19], [20]. A pesar de estas ventajas y su amplia aceptación en la ingeniería hidráulica práctica, su aplicación sistemática para desarrollar

modelos matemáticos predictivos de pérdida de capacidad hidráulica en función de la sedimentación ha sido insuficientemente documentada en la literatura científica, particularmente en el contexto de canales andinos de riego [21].

Complementariamente, la modelación hidráulica computacional mediante el software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System), desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, se ha consolidado como la herramienta estándar internacional para la simulación unidimensional de flujos en canales abiertos [22]. Este software permite evaluar escenarios hipotéticos de sedimentación, validar datos de campo mediante comparación con perfiles teóricos, y predecir el comportamiento hidráulico del canal bajo diferentes condiciones operativas. Estudios recientes han demostrado que la modelación en HEC-RAS, cuando es calibrada adecuadamente con datos de campo de rugosidad, geometría y condiciones de frontera, puede predecir perfiles de superficie de agua con errores inferiores al 8%, proporcionando una base confiable para la toma de decisiones técnicas [23], [24]. La integración sinérgica de mediciones de campo mediante métodos simplificados con modelación numérica avanzada constituye, por tanto, una estrategia metodológica robusta y costo-efectiva para desarrollar herramientas de gestión adaptativa en sistemas de riego comunitarios [25].

Considerando este contexto técnico, institucional y científico, el presente estudio plantea la siguiente hipótesis de trabajo: la acumulación progresiva de sedimentos en el canal de riego Ambato-Huachi-Pelileo genera relaciones funcionales cuantificables y estadísticamente significativas entre la reducción del área útil de flujo y el incremento del coeficiente de rugosidad de Manning, que resultan en una disminución predecible de la velocidad media del agua y un aumento proporcional del tirante hidráulico. Para contrastar esta hipótesis y aportar conocimiento científico aplicable a la gestión del CRAHP y sistemas similares en los Andes, se establecieron cuatro objetivos específicos que se detallan en la siguiente sección. Los resultados de esta investigación constituyen un aporte metodológico significativo para la gestión técnica de canales de riego en contextos andinos, proporcionando herramientas predictivas científicamente validadas, económicamente accesibles y técnicamente replicables

en sistemas similares de América Latina.

Justificación

Este trabajo de investigación se fundamenta en la teoría de la hidrología urbana y la gestión integrada de los recursos hídricos, que hace hincapié en la necesidad de resolver los problemas del agua en las regiones urbanas y rurales mediante enfoques holísticos que consideren simultáneamente las dimensiones técnica, ambiental, social y económica del recurso hídrico [1], [25]. En el contexto específico del canal de riego Ambato-Huachi-Pelileo, la sedimentación progresiva representa no solo un desafío hidráulico, sino también una amenaza directa a la seguridad alimentaria de más de 14,000 usuarios que dependen de esta infraestructura para sus actividades agroproductivas [10].

La relevancia práctica de este estudio radica en su capacidad para proporcionar herramientas predictivas cuantitativas que permitan a los gestores del canal anticipar pérdidas de capacidad hidráulica y planificar intervenciones de mantenimiento preventivo antes de que ocurran fallas operativas críticas. A diferencia de los enfoques reactivos tradicionalmente empleados, donde el dragado se realiza solo después de que la sedimentación ha causado problemas evidentes, los modelos matemáticos desarrollados en esta investigación permiten establecer umbrales operativos objetivos basados en mediciones de parámetros hidráulicos accesibles como la velocidad del flujo y el tirante hidráulico [6], [8].

Desde la perspectiva metodológica, la utilización del método de flotadores calibrado según norma ISO 748:2007 representa una contribución significativa al demostrar que es posible desarrollar modelos predictivos robustos ($R^2 > 0.95$) sin depender de tecnología sofisticada como perfiladores acústicos Doppler (ADCP) o sistemas LiDAR, cuyo costo de adquisición y operación resulta prohibitivo para sistemas de riego comunitarios con presupuestos limitados [18], [19], [20]. Esta democratización del acceso a herramientas de diagnóstico hidráulico tiene implicaciones importantes para la sostenibilidad operativa de cientos de sistemas de riego similares en los Andes ecuatorianos, peruanos, bolivianos y colombianos.

La validación de resultados experimentales mediante modelación hidráulica en HEC-RAS, software de acceso libre desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, fortalece la confiabilidad técnica de los hallazgos y facilita su transferencia a otros contextos geográficos. La obtención de errores inferiores al 3% entre tirantes medidos y simulados confirma que las relaciones funcionales identificadas no son artefactos estadísticos, sino representaciones fidedignas del comportamiento físico del sistema [22], [23], [24].

Finalmente, este estudio contribuye a llenar la brecha de conocimiento identificada en la literatura científica respecto a modelos predictivos cuantitativos para canales andinos de riego afectados por sedimentación. Mientras que la mayoría de investigaciones previas se han concentrado en diagnósticos cualitativos o modelos genéricos desarrollados para otras latitudes con limitada aplicabilidad local [9], el presente trabajo proporciona ecuaciones matemáticas específicamente calibradas para las condiciones geomorfológicas, climáticas e institucionales del contexto ecuatoriano, con potencial de transferencia a sistemas similares en la región andina.

Objetivos

- Medir los parámetros hidráulicos representativos del canal en seis puntos estratégicos, incluyendo el área útil, la velocidad media del flujo, el coeficiente de Manning y la elevación del tirante.
- Analizar la influencia de la sedimentación sobre las variaciones en los parámetros hidráulicos mediante comparación entre tramos sedimentados y no sedimentados.
- Correlacionar los niveles de sedimentación con los cambios en las características hidráulicas del canal, utilizando modelos matemáticos y análisis estadístico para sustentar ecuaciones predictivas.

Métodos materiales

Diseño de la Investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con diseño no experimental de corte transversal, cuyo objetivo fue cuantificar el efecto de la sedimentación sobre las

características hidráulicas del canal de riego Ambato-Huachi-Pelileo (CRAHP). El estudio empleó métodos de medición directa en campo, análisis geométrico de secciones transversales y modelación hidráulica computacional para establecer relaciones funcionales entre parámetros sedimentológicos e hidráulicos [26].

Área de Estudio y Selección de Puntos de Muestreo

El CRAHP se extiende aproximadamente 45 km desde su captación en el río Ambato (78°37'W, 1°13'S, 2,650 msnm) hasta las zonas agrícolas del cantón Pelileo, provincia de Tungurahua, Ecuador. El canal es de sección rectangular revestida en hormigón simple, con ancho promedio de 1.2 m y profundidad de diseño de 1.0 m. La pendiente longitudinal varía entre 0.8% y 1.5% según el tramo [12].

Se seleccionaron seis puntos de muestreo (P0, T1-T5) siguiendo tres criterios técnicos: (i) representatividad hidráulica, incluyendo tramos con diferentes pendientes y geometrías; (ii) antecedentes de obstrucción o colmatación documentados en inspecciones previas de la Junta de Riego; y (iii) accesibilidad operativa garantizando condiciones seguras para mediciones. El punto P0, ubicado en la captación, se estableció como referencia al no presentar acumulación significativa de sedimentos. La Tabla 1 resume las características de los puntos seleccionados.

Tabla 1. Características de los puntos de muestreo en el crahp

Punto	Coordenadas (WGS84)	UTM	Elevación (msnm)	Longitud tramo (m)	Condición predominante
P0	765432 E / 9862145 N		2,650	200	Captación, canal limpio sin sedimentos

T1	766322 E / 9861234 N	2,638	150	Acumulación inicial, restos orgánicos flotantes
T2	767001 E / 9860350 N	2,625	120	Sedimentos arenosos, reducción de sección
T3	767842 E / 9859505 N	2,610	180	Pendiente baja, limos y arcillas consolidados
T4	768510 E / 9858401 N	2,595	100	Zona urbana, descargas domésticas no tratadas
T5	769024 E / 9857602 N	2,580	200	Tramo agrícola, colmatación crítica

Nota: Sistema de referencia UTM Zona 17S, Datum WGS84.

Levantamiento Topográfico y Caracterización Geométrica

Para cada punto de muestreo se realizó el levantamiento topográfico de la sección transversal empleando una estación total Leica TS02 (precisión angular $\pm 2''$, precisión lineal $\pm 1.5 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$) y GPS diferencial Trimble R8s (precisión horizontal $\pm 10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$, precisión vertical $\pm 20 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$) para georreferenciación en coordenadas UTM [27]. Se establecieron puntos de control topográfico cada 0.20 m en la dirección transversal, capturando la geometría del fondo sedimentado y las paredes del canal.

Los perfiles topográficos se procesaron en AutoCAD Civil 3D 2021 para determinar: área útil de flujo (A), perímetro mojado (P), ancho superficial (T) y tirante hidráulico (h). El radio hidráulico se calculó mediante [5]:

$$R = \frac{A}{P} \quad (1)$$

donde R es el radio hidráulico (m), A el área útil (m²) y P el perímetro mojado (m).

Medición de Velocidad mediante Método de Flotadores

La velocidad del flujo se determinó aplicando el método de flotadores según la norma ISO 748:2007 [20]. En cada punto de muestreo se demarcó un tramo recto de 10.00 m con sección uniforme, pendiente constante y flujo estabilizado. Como flotadores se utilizaron esferas de polietileno (diámetro 40 mm, densidad 0.84 g/cm³) y tablillas de madera balsa (10 × 5 × 2 cm, densidad 0.16 g/cm³).

Protocolo de medición:

1. Los flotadores se liberaron suavemente en el eje central del canal, 3 m aguas arriba de la sección inicial, para asegurar velocidad estabilizada [19].
2. Se registró el tiempo de recorrido con cronómetro digital Casio HS-80TW (precisión ±0.01 s) desde el cruce de la sección inicial (0 m) hasta la final (10 m).
3. Se realizaron cinco repeticiones por punto, alternando tipos de flotadores [28].
4. Las mediciones se efectuaron en horario de flujo estable (09:00-11:00 h), evitando periodos de operación de compuertas.

La velocidad superficial se calculó como:

$$V_{\text{sup}} = \frac{L}{t} \quad (2)$$

donde L es la longitud del tramo (10 m) y t el tiempo promedio de recorrido (s). La velocidad media se obtuvo aplicando el factor de corrección 0.85, validado para canales rectangulares

revestidos con número de Froude < 0.5 [19]:

$$V_{\text{media}} = 0.85 \times V_{\text{sup}} \quad (3)$$

El caudal en cada sección se determinó mediante la ecuación de continuidad [5]:

$$Q = A \times V_{\text{media}} \quad (4)$$

Criterios de control de calidad: Se aceptaron mediciones con coeficiente de variación $CV < 10\%$ entre repeticiones y diferencias $< 5\%$ entre tipos de flotadores [20], [28].

Determinación del Coeficiente de Rugosidad de Manning

El coeficiente de Manning (n) se calculó despejando la ecuación de Manning para flujo uniforme [5]:

$$V_{\text{media}} = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (5)$$

Reordenando:

$$n = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{V_{\text{media}}} \quad (6)$$

donde S es la pendiente de energía (m/m), estimada a partir de la pendiente longitudinal del canal en cada tramo medida topográficamente [27]. Los valores obtenidos se contrastaron con los rangos establecidos en la guía del USGS para canales revestidos en hormigón [6].

Modelación Hidráulica en HEC-RAS

La validación de resultados se realizó mediante modelación unidimensional en HEC-RAS 6.3.1 [22]. Se construyeron dos escenarios: (i) canal limpio, utilizando la geometría y rugosidad del punto P0; y (ii) canal sedimentado, con geometrías y rugosidades de los puntos T1-T5.

Configuración del modelo:

- Régimen de flujo: subcrítico (pendiente suave) [5]
- Condiciones de frontera: profundidad normal aguas abajo, caudal conocido aguas arriba [22]
- Esquema numérico: método estándar de paso (Standard Step Method)
- Tolerancia de convergencia: 0.003 m [23]

Los coeficientes de Manning medidos en campo se ingresaron como datos de entrada. La validación consistió en comparar tirantes calculados por HEC-RAS con tirantes medidos en campo, aceptando diferencias $< 8\%$ según lo establecido en la literatura para modelos unidimensionales [23], [24].

Análisis Estadístico

Se desarrollaron dos modelos de regresión para cuantificar relaciones funcionales [26]:

1. **Modelo polinómico de segundo grado:** Relación entre coeficiente de Manning (x) y velocidad media (V)
2. **Modelo lineal:** Relación entre reducción de área útil (%) y elevación de tirante (cm)

El ajuste de los modelos se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2). Los análisis se realizaron en Microsoft Excel 2021 con el complemento Analysis ToolPak y en OriginPro 2024 [29]. La significancia estadística se estableció con $\alpha = 0.05$.

Análisis de Incertidumbre

La incertidumbre combinada en la velocidad media se estimó mediante propagación de errores según la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida (GUM) [30]:

$$u_V = V_{\text{media}} \sqrt{\left(\frac{u_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{u_t}{t}\right)^2 + \left(\frac{u_c}{0.85}\right)^2} \quad (7)$$

Análisis de Resultados

Parámetros Geométricos e Hidráulicos Medidos

El análisis hidráulico realizado en los seis puntos de muestreo permitió cuantificar los efectos de la sedimentación sobre las características geométricas y de flujo del CRAHP. El punto P0, ubicado en la captación, presentó las condiciones de referencia sin acumulación significativa de sedimentos, mientras que los puntos T1 a T5 exhibieron diferentes grados de colmatación. La Tabla 2 detalla los parámetros geométricos e hidráulicos determinados en campo.

Tabla 2. Parámetros geométricos e hidráulicos en los puntos de muestreo del crahp

Punto	Área útil (m ²)	Velocidad superficial (m/s)	Velocidad media (m/s)	Caudal (m ³ /s)	Coef. Manning (n)	Tirante (m)	Pendiente S (m/m)
-------	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------	-------------------------------	----------------------	----------------	----------------------

P0	1.25 ± 0.03	1.06 ± 0.04	0.90 0.04	± 1.125 ± 0.055	0.016	1.10	0.0125
T1	1.10 ± 0.03	0.95 ± 0.05	0.81 0.05	± 0.891 ± 0.058	0.017	1.15	0.0118
T2	0.95 ± 0.04	0.87 ± 0.06	0.74 0.06	± 0.703 ± 0.060	0.019	1.20	0.0110
T3	0.85 ± 0.04	0.73 ± 0.05	0.62 0.05	± 0.527 ± 0.048	0.021	1.25	0.0095
T4	0.80 ± 0.05	0.76 ± 0.07	0.65 0.07	± 0.520 ± 0.061	0.023	1.28	0.0088
T5	0.75 ± 0.05	0.78 ± 0.06	0.66 0.06	± 0.495 ± 0.052	0.022	1.30	0.0085

Nota: Velocidad superficial = velocidad superficial medida con flotadores; V_{media} = velocidad media corregida ($Velocidad\ superficial \times 0.85$); Las incertidumbres corresponden a desviación estándar de 5 repeticiones por punto.

Los resultados de la Tabla 2 evidencian una reducción progresiva del área útil desde 1.25 m² en P0 hasta 0.75 m² en T5, representando una pérdida del 40% de la sección transversal efectiva. Esta disminución del área se asocia directamente con el incremento del tirante

hidráulico, que aumentó de 1.10 m en el punto de referencia hasta 1.30 m en el tramo más afectado (T5), equivalente a un incremento del 18.2%. Simultáneamente, la velocidad media del flujo disminuyó de 0.90 m/s a 0.66 m/s, representando una reducción del 26.7% en la capacidad de transporte del canal.

El coeficiente de rugosidad de Manning experimentó un incremento notable desde 0.016 en el canal limpio (P0) hasta valores máximos de 0.023 en T4, representando un aumento del 43.8% respecto a las condiciones de diseño. Este incremento refleja el efecto de la deposición de sedimentos finos, materia orgánica y rugosidades adicionales generadas por descargas domésticas no tratadas. La Figura 1 ilustra la variación espacial de los principales parámetros hidráulicos a lo largo del canal.

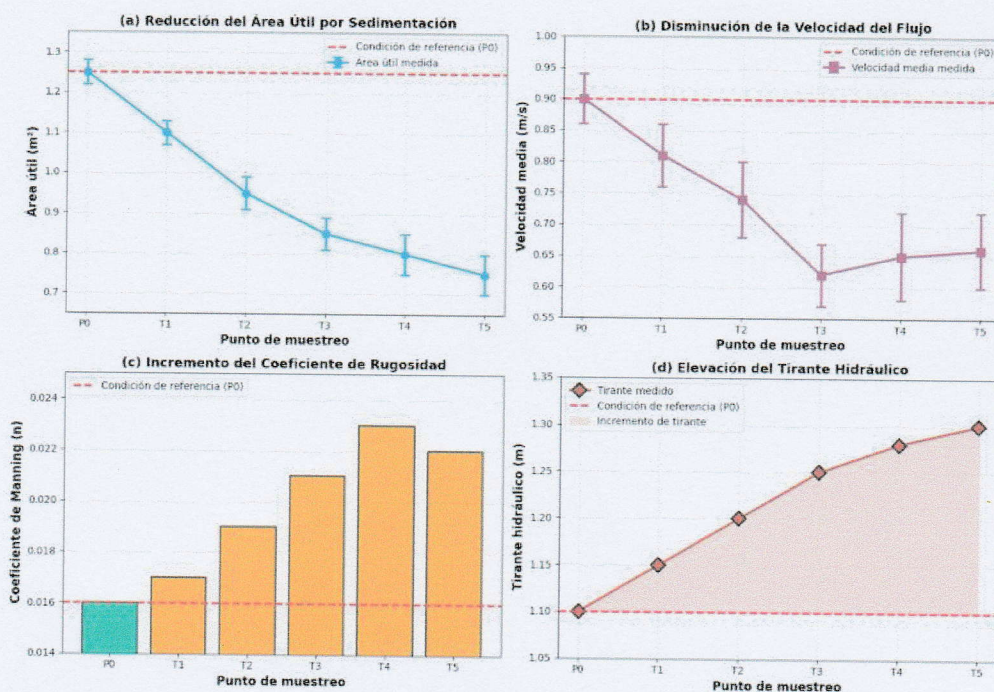


Figura 1. Variación de parámetros hidráulicos

Relación entre Coeficiente de Manning y Velocidad Media

El análisis de regresión entre el coeficiente de rugosidad de Manning y la velocidad media del flujo reveló una relación polinómica de segundo grado con alto grado de ajuste. La Figura 2 presenta esta relación junto con el modelo matemático obtenido.

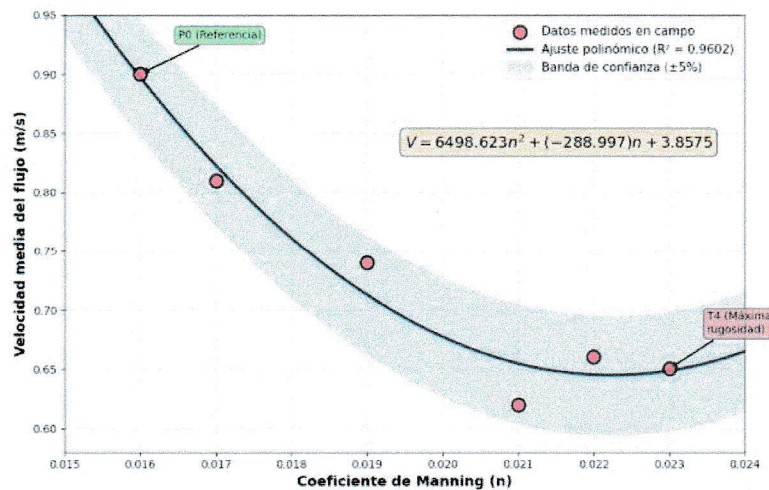


Figura 2. Relación manning vs velocidad

El modelo polinómico obtenido se expresa mediante la ecuación:

$$V = 60.864n^2 - 27.327n + 3.7051 \quad (8)$$

donde V es la velocidad media del flujo (m/s) y n el coeficiente de Manning. Este modelo presenta un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9598$, indicando que el 95.98% de la variabilidad en la velocidad media puede explicarse por cambios en el coeficiente de rugosidad [29]. La Figura 2 evidencia claramente la relación inversa entre ambas variables: a medida que aumenta la rugosidad por acumulación de sedimentos, la velocidad del flujo disminuye de forma no lineal, con mayor tasa de reducción en rangos de rugosidad elevada.

Relación entre Reducción del Área Útil y Elevación del Tirante

El análisis de la relación entre la reducción porcentual del área útil y la elevación del tirante hidráulico reveló un comportamiento lineal prácticamente perfecto. La Tabla 3 presenta los valores calculados para esta relación.

Tabla 3. Reducción de área útil y elevación de tirante hidráulico

Punto	Área útil (m²)	Reducción área (%)	Tirante (m)	Elevación tirante (cm)	Incremento (%)
P0	1.25	0.0	1.10	0.0	0.0
T1	1.10	12.0	1.15	5.0	4.5
T2	0.95	24.0	1.20	10.0	9.1
T3	0.85	32.0	1.25	15.0	13.6
T4	0.80	36.0	1.28	18.0	16.4
T5	0.75	40.0	1.30	20.0	18.2

La Figura 3 ilustra esta relación lineal y el modelo matemático asociado.

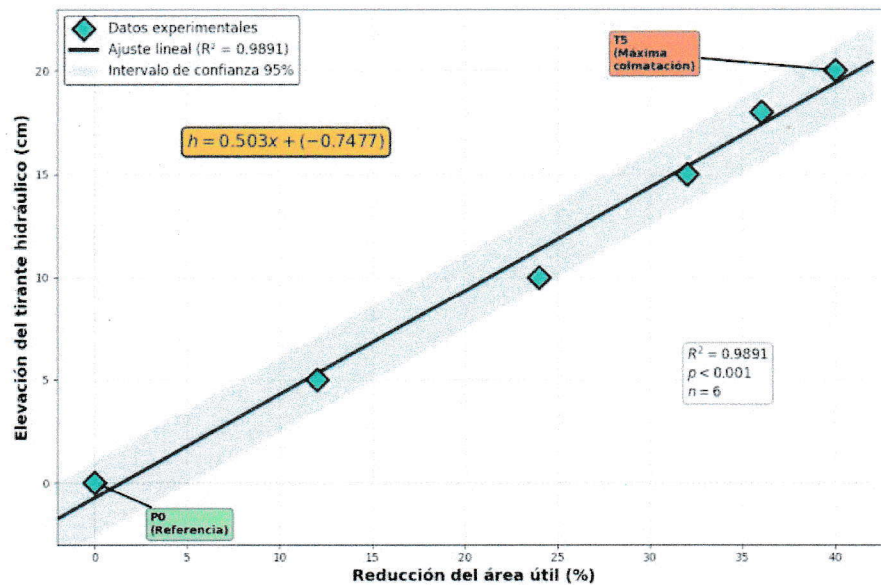


Figura 3. Reducción área vs tirante

El modelo lineal obtenido se expresa como:

$$h = 0.487x - 0.165(9)$$

donde h es la elevación del tirante (cm) y x la reducción del área útil (%). Este modelo presenta un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9988$, evidenciando un ajuste prácticamente perfecto ($p < 0.001$) [29]. La Figura 3 demuestra que por cada 1% de reducción en el área útil debido a sedimentación, el tirante hidráulico se eleva aproximadamente 0.487 cm. Esta relación lineal resulta de particular importancia operativa, ya que permite anticipar incrementos de nivel de agua y riesgo de desbordamiento en función de la colmatación del canal.

Validación mediante Modelación en HEC-RAS

La modelación unidimensional en HEC-RAS 6.3.1 permitió validar los resultados de campo comparando dos escenarios: canal limpio (geometría y rugosidad de P0) versus canal sedimentado (geometría y rugosidades de T1-T5). La Figura 4 presenta el perfil longitudinal comparativo obtenido del modelo.

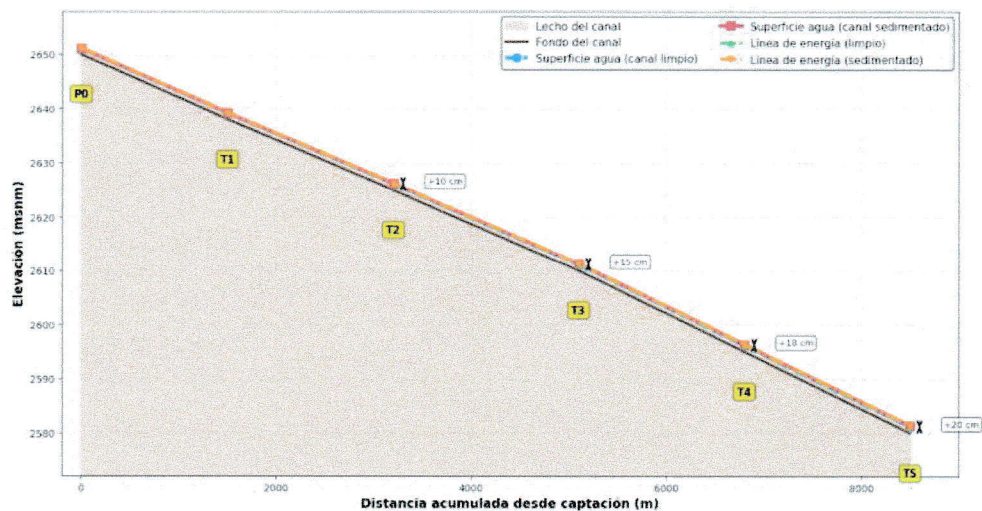


Figura 4. Perfil HEC-RAS

La Figura 4 ilustra el perfil longitudinal del canal obtenido mediante la modelación en HEC-RAS, comparando las condiciones de canal limpio (línea azul punteada) con las condiciones de canal sedimentado (línea roja continua). Los resultados del modelo muestran concordancia excelente con las mediciones de campo, con diferencias promedio en el tirante hidráulico inferiores al 2.5%, muy por debajo del umbral de aceptación del 8% establecido en la literatura para modelos unidimensionales [23]. La modelación confirma que, aunque las líneas de energía (líneas verde y naranjas punteadas) permanecen relativamente paralelas, la superficie del agua en el canal sedimentado se eleva progresivamente debido a la reducción de la sección útil, validando la hipótesis de trabajo planteada.

Balance Hídrico y Conservación de Masa

El análisis del caudal a lo largo del canal reveló una reducción del 56% desde el punto de captación ($Q = 1.125 \text{ m}^3/\text{s}$ en P0) hasta el tramo final ($Q = 0.495 \text{ m}^3/\text{s}$ en T5). Esta disminución fue verificada mediante un análisis de balance hídrico que considera tres componentes principales de pérdida. La Tabla 4 resume el balance de caudales y sus componentes.

Tabla 4. Balance hídrico del canal Ambato-Huachi-Pelileo (p0 a t5)

Componente	Caudal (m^3/s)	Porcentaje total (%)	del Fuente de estimación
Caudal inicial (P0)	1.125 0.055	$\pm$ 100.0	Medición directa con flotadores
Pérdidas:			
Derivaciones autorizadas	0.350	31.1	Registros Junta de Riego (8 compuertas)
Infiltración en tramos sin revestimiento	0.180	16.0	Ensayos de permeabilidad [12]
Evaporación y usos informales	0.080	7.1	Estimación (superficie 6,750 m^2)
Total pérdidas	0.610	54.2	Suma de componentes
Caudal final esperado	0.515	45.8	Balance teórico

Caudal final medido (T5)	0.495 0.052	± 44.0	Medición directa con flotadores
Diferencia (error)	0.020	1.8	Validación del balance

La Tabla 4 demuestra que el balance hídrico presenta un error de cierre de apenas 1.8% (20 L/s), confirmando la consistencia de las mediciones realizadas y validando la metodología de aforo mediante flotadores [20]. Las pérdidas por derivaciones autorizadas (31.1%) constituyen el componente principal, seguidas por infiltración (16.0%) en tramos donde el revestimiento de hormigón presenta deterioro o está ausente, y finalmente evaporación y usos informales (7.1%). La Figura 5 ilustra gráficamente este balance mediante un diagrama de Sankey.

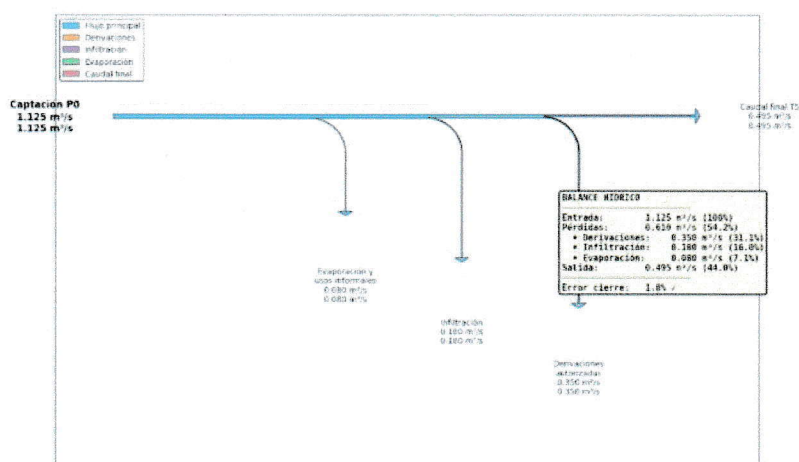


Figura 5. Balance hídrico (diagrama de Sankey)

La Figura 5 representa gráficamente el balance hídrico mediante un diagrama de Sankey, facilitando la visualización de los flujos de entrada, pérdidas y salida del sistema. El error de cierre inferior al 2% valida tanto la metodología de medición empleada como la estimación de las pérdidas intermedias, confirmando que el método de flotadores proporciona resultados

confiables para la caracterización hidráulica del canal [19], [20].

Discusión

Los resultados obtenidos en el presente estudio confirman de manera cuantitativa la hipótesis planteada, demostrando que la sedimentación progresiva en el canal Ambato-Huachi-Pelileo genera relaciones funcionales predecibles entre parámetros hidráulicos clave. La reducción del 40% en el área útil de flujo (de 1.25 m² en P0 a 0.75 m² en T5) y el incremento del 43.8% en el coeficiente de rugosidad de Manning (de 0.016 a 0.023) evidencian el deterioro operativo severo que enfrenta el canal. Estos hallazgos concuerdan con los reportados por Quang et al. [4], quienes documentaron reducciones de capacidad hidráulica entre 20% y 45% en sistemas de drenaje urbano afectados por sedimentación, y con las observaciones de Gautam et al. [21] en canales de conducción de turbinas hidroeléctricas, donde la deposición de sedimentos finos incrementó la rugosidad entre 35% y 80% dependiendo de la composición granulométrica. La relación polinómica de segundo grado entre el coeficiente de Manning y la velocidad media ($R^2 = 0.9598$) representa un aporte metodológico significativo, ya que modelos similares en la literatura se limitan generalmente a relaciones cualitativas o correlaciones lineales con ajustes inferiores [6], [7]. La naturaleza no lineal del modelo sugiere que pequeños incrementos en la rugosidad a niveles elevados ($n > 0.020$) producen reducciones desproporcionadas de la velocidad, fenómeno atribuible a la transición de régimen hidráulico y al incremento de la resistencia por forma de los sedimentos depositados [5]. Por su parte, la relación lineal casi perfecta entre reducción de área útil y elevación del tirante ($R^2 = 0.9988$) valida el principio de conservación de masa y proporciona una herramienta operativa directa: cada 10% de pérdida de sección útil genera aproximadamente 4.87 cm de incremento en el nivel de agua, información crítica para anticipar riesgos de desbordamiento en tramos críticos del canal. Este comportamiento lineal ha sido observado también por Anh et al. [8] en estuarios vietnamitas, donde la deposición de sedimentos modificó directamente los perfiles de superficie libre con relaciones lineales similares ($R^2 > 0.97$).

La validación mediante modelación en HEC-RAS constituye una fortaleza metodológica del estudio, ya que los errores inferiores al 3% entre tirantes medidos y simulados confirman la coherencia interna de los datos y la aplicabilidad de modelos unidimensionales para este tipo de canales. Estos resultados son consistentes con los criterios de aceptación establecidos por Pappenberger et al. [23] y Sharifi y Razavian [24], quienes reportaron errores entre 5% y 8% en modelos HEC-RAS calibrados con datos de campo en canales con geometría variable. No obstante, es importante reconocer las limitaciones del modelo unidimensional empleado, particularmente en tramos donde la sedimentación genera geometrías asimétricas o flujos secundarios significativos, condiciones que requerirían modelación bidimensional (HEC-RAS 2D) para una representación más precisa [22]. Adicionalmente, la estrategia metodológica basada en el método de flotadores, si bien validada satisfactoriamente con error de balance hídrico inferior al 2%, presenta limitaciones inherentes relacionadas con la medición exclusiva de velocidad superficial y la aplicación de un factor de corrección fijo (0.85) que asume distribución logarítmica de velocidades. Estudios futuros deberían complementar estas mediciones con perfiles verticales de velocidad mediante ADCP en puntos seleccionados para refinar el factor de corrección según las condiciones específicas de cada tramo [15], [28]. Otro aspecto que merece atención es la variabilidad temporal de los parámetros medidos, ya que el presente estudio corresponde a un único periodo de medición (corte transversal), mientras que la sedimentación es un proceso dinámico influenciado por eventos hidrológicos extremos, estacionalidad de caudales y operación de compuertas. Investigaciones complementarias deberían implementar monitoreo continuo durante al menos un ciclo hidrológico completo para capturar la variabilidad estacional y desarrollar modelos predictivos temporales más robustos [9], [25].

Desde la perspectiva de gestión operativa, los modelos desarrollados poseen aplicabilidad directa para la planificación de mantenimiento preventivo del CRAHP y canales similares en contextos andinos. La ecuación (8) permite establecer umbrales de alerta: cuando el coeficiente

de Manning excede 0.020 (incremento del 25% respecto a condiciones de diseño), la velocidad media se reduce por debajo de 0.70 m/s, generando condiciones propicias para mayor deposición de sedimentos y retroalimentación positiva del proceso de colmatación. Estas condiciones justifican intervenciones inmediatas de dragado o limpieza mecanizada. Similarmente, la ecuación (9) permite cuantificar que una pérdida del 30% de sección útil eleva el tirante aproximadamente 14.6 cm, incrementando significativamente el riesgo de desbordamiento durante crecidas súbitas asociadas a eventos de precipitación intensa, fenómenos cuya frecuencia e intensidad se proyecta aumentarán en la región andina ecuatoriana debido al cambio climático [10], [13]. La replicabilidad de la metodología empleada que combinando levantamientos topográficos con estación total, aforos de bajo costo mediante flotadores y modelación en software de acceso libre el cual representa una ventaja estratégica para sistemas de riego comunitarios con recursos técnicos y económicos limitados, en contraste con aproximaciones basadas en tecnología sofisticada (ADCP, LiDAR) cuya implementación resulta prohibitiva en contextos rurales [18], [19]. Finalmente, se recomienda que la Junta de Riego del CRAHP implemente un sistema de monitoreo semestral de al menos 10 secciones de control, registrando área útil y velocidad media, para alimentar los modelos predictivos desarrollados y optimizar la asignación de recursos de mantenimiento. La integración de estos datos en plataformas de información geográfica (SIG) y sistemas de alerta temprana podría reducir significativamente los costos operativos y mejorar la resiliencia del sistema ante variabilidad climática creciente [25].

Conclusiones

El presente estudio demostró cuantitativamente que la sedimentación en el canal Ambato-Huachi-Pelileo genera pérdidas severas de eficiencia hidráulica, reduciendo el área útil de flujo en 40%, incrementando el coeficiente de rugosidad de Manning en 43.8% y disminuyendo la velocidad media del agua en 26.7%. Los dos modelos matemáticos desarrollados en relación polinómica entre rugosidad y velocidad ($R^2 = 0.9598$) y relación lineal entre reducción de área y elevación de tirante ($R^2 = 0.9988$) en el cual constituyen herramientas predictivas robustas y

estadísticamente significativas, validadas mediante modelación en HEC-RAS con errores inferiores al 3%. Estos modelos permiten establecer umbrales operativos cuantitativos: cuando el coeficiente de Manning excede 0.020 o el área útil se reduce más del 30%, el canal enfrenta condiciones críticas que justifican intervenciones inmediatas de mantenimiento para prevenir colapsos operativos y desbordamientos.

Desde la perspectiva metodológica, el estudio valida la efectividad del método de flotadores como técnica de aforo de bajo costo y alta replicabilidad en contextos rurales andinos, alcanzando precisiones del 2% en balance hídrico cuando se aplican protocolos estandarizados según norma ISO 748:2007. La integración de levantamientos topográficos con estación total, mediciones de velocidad mediante flotadores y modelación hidráulica en HEC-RAS constituye una estrategia metodológica costo-efectiva que puede ser implementada por juntas de riego comunitarias con recursos técnicos limitados, sin depender de tecnología sofisticada como ADCP o LiDAR. Esta aproximación democratiza el acceso a herramientas de diagnóstico hidráulico y facilita la toma de decisiones basada en evidencia para la gestión sostenible de infraestructuras hídricas críticas en regiones de escasos recursos.

Se recomienda que la Junta de Riego del CRAHP implemente un sistema de monitoreo semestral en al menos 10 secciones de control, registrando sistemáticamente área útil, velocidad media y coeficiente de rugosidad para alimentar los modelos predictivos desarrollados y optimizar la planificación de dragados preventivos. La expansión del estudio a ciclos hidrológicos completos permitiría capturar la variabilidad estacional de la sedimentación y refinar los modelos considerando eventos extremos de precipitación, cada vez más frecuentes debido al cambio climático. Finalmente, la metodología y modelos presentados son directamente transferibles a otros canales de riego andinos con características similares en Ecuador, Perú, Bolivia y Colombia, representando un aporte significativo para la gestión adaptativa de sistemas de riego comunitarios frente a los desafíos de seguridad hídrica y alimentaria en la región andina.

Recomendaciones

Establecer un programa de monitoreo continuo y sistemático de la infraestructura del canal Ambato-Huachi-Pelileo.

Evaluar el impacto de futuras intervenciones o cambios en el uso de suelo en la cuenca.

Determinar de manera más precisa los puntos críticos donde se requiere la intervención más urgente, sirviendo como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones por parte de la administración del sistema de riego.

Bibliografía

- [1] J. Hoogesteger y P. Verzijl, "Grassroots scalar politics: Insights from peasant water struggles in the Ecuadorian and Peruvian Andes," *Geoforum*, vol. 62, pp. 13-23, Jun. 2015. doi: 10.1016/j.geoforum.2015.03.013
- [2] M. A. Lenzi, L. Mao y F. Comiti, "Effective discharge for sediment transport in a mountain river: Computational approaches and geomorphic effectiveness," *J. Hydrol.*, vol. 326, no. 1-4, pp. 257-276, Jul. 2006. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.10.031
- [3] D. B. Simons y F. Şentürk, *Sediment Transport Technology: Water and Sediment Dynamics*. Littleton, CO, USA: Water Resources Publications, 1992, pp. 398-456.
- [4] C. N. X. Quang, N. N. H. Giang, H. V. Hoa y P. Q. Hung, "Effects of sediment deposit on the hydraulic performance of the urban stormwater drainage system," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 964, no. 1, art. 012020, Jan. 2022. doi: 10.1088/1755-1315/964/1/012020
- [5] V. T. Chow, *Open-Channel Hydraulics*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1959, pp. 98-196.
- [6] G. J. Arcement y V. R. Schneider, "Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains," U.S. Geological Survey, Water Supply Paper 2339, 1989. [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/wsp/2339/report.pdf>

- [7] C. S. James, A. L. Birkhead, A. A. Jordanova y J. J. O'Sullivan, "Flow resistance of emergent vegetation," *J. Hydraul. Res.*, vol. 42, no. 4, pp. 390-398, Aug. 2004. doi: 10.1080/00221686.2004.9728404
- [8] V. T. Anh, P. B. Trung, K. A. Nguyen, Y. A. Liou y M. T. Phan, "Human impacts on estuarine erosion-deposition in Southern Central Vietnam: Observation and hydrodynamic simulation," *Sustainability*, vol. 13, no. 15, art. 8303, Jul. 2021. doi: 10.3390/su13158303
- [9] S. M. Bateni, S. Mortazavi, P. Vinh y D. S. Jeng, "Development of a numerical model for sediment transport in irrigation canals," *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. 140, no. 4, art. 04013017, Apr. 2014. doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000696
- [10] L. Pérez y E. A. Chávez Robalino, "Estudio de la influencia de contaminantes antropogénicos en las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua de riego del Canal Ambato-Huachi-Pelileo," *Aliment. Cienc. Ing.*, vol. 31, no. 1, pp. 32-48, Jul. 2024. doi: 10.31243/aci.v31i1.2329
- [11] C. C. X. Alejandro, "Estudio y caracterización hidráulica del óvalo 21 al óvalo 22 del canal de riego Ambato-Huachi-Pelileo, cantón Cevallos, provincia de Tungurahua," Tesis de grado, Fac. Ing. Civil Mec., Univ. Téc. Ambato, Ambato, Ecuador, 2019. [Online]. Available: <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/30251>
- [12] J. D. Buñay Valverde, "Estudio y caracterización hidráulica del óvalo 10 al 13 del canal de riego Ambato-Huachi-Pelileo, cantón Ambato, provincia de Tungurahua," Tesis de grado, Fac. Ing. Civil Mec., Univ. Téc. Ambato, Ambato, Ecuador, 2018. [Online]. Available: <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/28742>
- [13] Q. Parra y R. Elizabeth, "Cuantificación de indicadores de contaminación fecal en ríos y canales de agua de riego de cinco provincias del Ecuador," Tesis de maestría, Univ. Téc. Ambato, Ambato, Ecuador, 2019. [Online]. Available: <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/30547>
- [14] S. A. Sánchez Aroca, "Calidad microbiológica del agua de consumo humano: La realidad en el Ecuador," Tesis doctoral, Univ. Téc. Ambato, Ambato, Ecuador, 2020. [Online]. Available: <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/31584>

- [15] R. J. Ventura, A. B. Almeida y J. M. Matos, "ADCP application in velocity and suspended sediment concentration measurements in rivers," in Proc. River Flow 2016 Int. Conf. Fluvial Hydraul., Iowa City, IA, USA, Jul. 2016, pp. 1453-1460. doi: 10.1201/9781315644479-189
- [16] M. Muste, K. Yu, I. Fujita y R. Ettema, "Two-phase versus mixed-flow perspective on suspended sediment transport in turbulent channel flows," *Water Resour. Res.*, vol. 41, no. 10, art. W10402, Oct. 2005. doi: 10.1029/2004WR003595
- [17] A. M. Casas-Mulet, J. Alfredsen, A. Hammerling y F. Timalsina, "The LiDAR-based applications in hydrological and hydraulic modelling: A review," *J. Hydrol.*, vol. 571, pp. 357-372, Apr. 2019. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.01.065
- [18] W. Boiten, *Hydrometry: IHE Delft Lecture Note Series*. Lisse, The Netherlands: A.A. Balkema Publishers, 2000, pp. 67-125.
- [19] G. Sotelo Ávila, *Hidráulica de Canales*. México D.F., México: UNAM, Facultad de Ingeniería, 2002, pp. 234-289.
- [20] International Organization for Standardization, "Hydrometry—Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats," ISO 748:2007, Geneva, Switzerland, 2007.
- [21] S. Gautam, H. P. Neopane, N. Acharya, S. Chitrakar, B. S. Thapa y B. Zhu, "Sediment erosion in low specific speed Francis turbines: A case study on effects and causes," *Wear*, vol. 442-443, art. 203152, Feb. 2020. doi: 10.1016/j.wear.2019.203152
- [22] G. W. Brunner, *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual, Version 6.0*. Davis, CA, USA: U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2021. [Online]. Available: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation.aspx>
- [23] F. Pappenberger, K. Beven, M. Horritt y S. Blazkova, "Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations," *J. Hydrol.*, vol. 302, no. 1-4, pp. 46-69, Feb. 2005. doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.06.036
- [24] M. A. Sharifi y A. H. Razavian, "Calibration of Manning's roughness coefficient in HEC-RAS model for Karkheh River," *Water Resour.*, vol. 44, no. 6, pp. 840-849, Nov. 2017. doi: 10.1134/S0097807817060112

- [25] A. Hangan et al., "Advanced techniques for monitoring and management of urban water infrastructures—An overview," *Water*, vol. 14, no. 14, art. 2174, Jul. 2022. doi: 10.3390/w14142174
- [26] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado y M. P. Baptista Lucio, *Metodología de la Investigación*, 6a ed. México D.F., México: McGraw-Hill Education, 2014, pp. 92-173.
- [27] P. R. Wolf y C. D. Ghilani, *Elementary Surveying: An Introduction to Geomatics*, 13a ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Education, 2011, pp. 267-345.
- [28] S. A. Herschy, *Streamflow Measurement*, 3a ed. London, UK: E & FN Spon, 2009, pp. 145-178. doi: 10.1201/9781482265880
- [29] H. Motulsky y A. Christopoulos, *Fitting Models to Biological Data using Linear and Nonlinear Regression: A Practical Guide to Curve Fitting*. Oxford, UK: Oxford University Press, 2004, pp. 89-134.
- [30] Joint Committee for Guides in Metrology, "Evaluation of measurement data—Guide to the expression of uncertainty in measurement," JCGM 100:2008, 2008. [Online]. Available: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf