

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA POSGRADO

Tema: “Modelación hidrodinámica bidimensional para el diagnóstico espacial de la dispersión del contaminante en el río Anzu, cantón Carlos Julio Arosemena Tola, provincia de Napo.”

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Título de Cuarto Nivel de Magíster en Hidráulica con mención en Obras Hidráulicas.

Modalidad del Trabajo de Titulación: con componente investigación aplicada y desarrollo

Autor(a): Ing. Lilian Lourdes Aules Ojeda

Director: Ph.D. Eduardo Paredes Beltrán, Mg.

Ambato – Ecuador

2026

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad/Centro

El Tribunal receptor del Trabajo de Titulación, presidido por: el presidente Ing. Santiago Paúl Cabrera Anda, Mg, e integrado por los señores: Ing. Fabian Rodrigo Morales Fiallos, Mg.; Ing. Santiago Andrés Ortiz Montero, Mg. designados por la Unidad Académica de Titulación del Centro de Posgrados de la Universidad Técnica de Ambato, para receptar el Trabajo de Titulación con el tema: “Modelación hidrodinámica bidimensional para el diagnóstico espacial de la dispersión del contaminante en el río Anzu, cantón Carlos Julio Arosemena Tola, provincia de Napo.” elaborado y presentado por la Ing. *Lilian Lourdes Aules Ojeda*, 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 Paúl Cabrera Anda*, Mg.
Presidente y Miembro del Tribunal



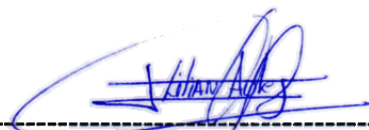
Ing. *Fabián Rodrigo Morales Fiallos*, Mg.
Miembro del Tribunal



Ing. *Santiago Andrés Ortiz Montero*, 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: “Modelación hidrodinámica bidimensional para el diagnóstico espacial de la dispersión del contaminante en el río Anzu, cantón Carlos Julio Arosemena Tola, provincia de Napo.”, le corresponde exclusivamente a: Ing. Lilian Lourdes Aules Ojeda, Autora bajo la Dirección de Ph.D. Eduardo Paredes Beltrán, Mg., Director del Trabajo de Titulación, y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.



Ing. Lilian Lourdes Aules Ojeda

c.c.:180379850-1

AUTORA



Ph.D. Eduardo Paredes Beltrán, Mg.

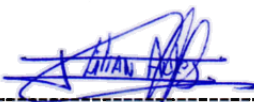
c.c.: 180404164-6

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. Lilian Lourdes Aules Ojeda

c.c.: 180379850-1

INDICE GENERAL DE CONTENIDOS

1. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	15
1.1 Introducción.....	15
1.2 Justificación	16
1.3 Objetivos.....	18
1.3.1 General.....	18
1.3.2 Específicos	18
2. MARCO TEÓRICO	19
2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	19
2.1.1 Modelación numérica del transporte de contaminantes	19
2.1.2 Acoplamiento hidrodinámico y modelación del transporte	20
2.1.3 Modelación hidrodinámica aplicada y parámetros de dispersión	20
2.1.4 Contaminación por minería aurífera y metales pesados.....	21
2.2 FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICA	23
3. MARCO METODOLÓGICO.....	29
3.1 Tipo de investigación	29
3.2 Población o muestra:.....	29
3.3 Prueba de Hipótesis - pregunta científica – idea a defender.....	31
3.4 Recolección de información:	31
3.4.1 Información del área de estudio	31
3.4.1 Información topográfica y batimétrica	34
3.4.2 Información hidrometeorológica	40
3.4.3 Muestreo de agua y sedimentos	41
3.5 Procesamiento de la información y análisis estadístico:	43
3.5.1 Procesamiento de información geoespacial	43
3.5.2 Procesamiento de Información hidrológica mediante HEC-HMS	45
3.5.3 Procesamiento de información hidrodinámico bidimensional en HEC- RAS 2D	47

3.5.4	Procesamiento del transporte de plomo (Advection-Dispersion) en Wasp.	51
3.5.4.1	Determinación del coeficiente de dispersión longitudinal	51
3.5.5	Síntesis del procedimiento metodológico	53
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
4.1	Resultados de la modelación hidrológica, hidráulica y del transporte de plomo (Pb).....	55
4.1.1	Resultados del procesamiento hidrológico	55
4.1.2	Resultados de la modelación hidrodinámica en HEC-RAS 2D.....	59
4.1.3	Resultados de la modelación del transporte de plomo.....	66
4.2	Discusión de resultados y análisis del comportamiento espacial del contaminante	74
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA, ANEXOS.	79
5.1	Conclusiones	79
5.1.1	Caracterización hidrológica e hidráulica del tramo de estudio	79
5.1.2	Simulación de la dispersión espacial del plomo (Pb).....	79
5.1.3	Zonificación espacial de la dispersión del contaminante	80
5.1.4	Persistencia de la contaminación por plomo en el sistema hídrico	80
5.1.5	Evaluación del riesgo ambiental asociado a la presencia de plomo	81
5.2	Recomendaciones	81
5.3	Bibliografía	82
5.4	Anexos	84
6.	PROPUESTA	85
6.1	Título.....	85
6.2	Descripción.....	85
6.3	Desarrollo de la propuesta	85

6.3.1	Fase I: Consolidación del sistema de monitoreo hidrológico e hidráulico	85
6.3.2	Fase II: Monitoreo periódico de calidad de agua y sedimentos....	86
6.3.3	Fase III: Actualización de los modelos HEC-HMS, HEC-RAS y WASP	87
6.3.4	Fase IV: Sistema de gestión y alerta ambiental.....	87
6.3.5	Cronograma de implementación.....	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Antecedentes de investigaciones sobre contaminación por metales pesados en sistemas acuáticos del Ecuador	25
Tabla 2.	Antecedentes de investigaciones sobre contaminación por metales pesados en sistemas acuáticos Internacionales.	26
Tabla 3.	Serie histórica de precipitaciones máximas anuales en 24 horas.....	40
Tabla 4.	Coeficientes de rugosidad de Manning asignados según la cobertura del suelo	49
Tabla 5.	Parámetros hidrológicos en el tramo de estudio (A-B).....	55
Tabla 6.	Resultados hidrológicos obtenidos para los diferentes períodos de retorno .	59
Tabla 7.	Determinación de la velocidad promedio para el modelo de dispersión	61
Tabla 8.	Determinación de la profundidad hidráulica promedio para el modelo de dispersión	62
Tabla 9.	Determinación del ancho hidráulica promedio para el modelo de dispersión	65
Tabla 10.	Condiciones hidráulicas del escenario seleccionado para la modelación hidrodinámica bidimensional.....	66
Tabla 11.	Parámetros hidráulicos utilizados para la estimación del coeficiente de dispersión longitudinal.....	67
Tabla 12.	Concentración de plomo en agua en los puntos de monitoreo.....	68
Tabla 13.	Concentración de plomo (Pb) en los puntos de monitoreo del río Anzu	69
Tabla 14.	Resultados de concentración de plomo en sedimentos	69
Tabla 15.	Comparación de parámetros de calidad de agua del río Anzu entre los estudios de 2021 (IKIAM) y 2026 (AQLAB).....	75
Tabla 16.	Cronograma general de implementación de la propuesta.	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema conceptual del proceso de modelación hidrológica, hidrodinámica y de transporte del plomo (Pb) en sistemas fluviales	28
Figura 2. Cobertura del área de estudio	32
Figura 3. Cobertura de ortofotografía aérea utilizada como insumo topográfico para la generación del modelo topo batimétrico del área de estudio.	36
Figura 4. Modelo Digital de Elevación (DEM) de la cuenca del río Anzu.	37
Figura 5. Clasificación de pendientes de la cuenca hidrográfica del río Anzu.	38
Figura 6. Red de drenaje y acumulación de flujo de la cuenca del río Anzu.	38
Figura 7. Delimitación de la cuenca aportante al tramo de estudio del río Anzu.	39
Figura 8. Cobertura y uso de la tierra en la subcuenca del río Anzu y ubicación del tramo de estudio.	39
Figura 9. Esquema metodológico para la evaluación y modelación del transporte de plomo (Pb) en el sistema hídrico Yurasyacu–Anzu.	43
Figura 10. Configuración geoespacial en QGIS	45
Figura 11. Generación de hietogramas de diseño de precipitación.	46
Figura 12. Configuración del modelo hidrológico implementado en HEC-HMS para la cuenca del río Anzu.	47
Figura 13. Configuración del modelo hidráulico implementado el HEC-RAS para el tramo de estudio A-B	48
Figura 14. Flujo metodológico aplicado para la modelación hidrológica, hidráulica y del transporte de plomo (Pb) en el río Anzu.	54
Figura 15. Distribución espacial de la velocidad del flujo en el tramo A-B del río Anzu, para el caudal de diseño TR25 ($Q=159.4 \text{ m}^3/\text{s}$).....	60
Figura 16. Distribución espacial de la profundidad del flujo en el tramo A–B del río Anzu, para el caudal de diseño TR25 ($Q=159.4 \text{ m}^3/\text{s}$).....	61
Figura 17. Sección transversal hidráulica aguas arriba del tramo A–B del río Anzu (Abscisa 0+440m).	63
Figura 18. Sección transversal hidráulica aguas arriba del tramo A–B del río Anzu (Abscisa 0+890m).	64
Figura 19. Sección transversal hidráulica aguas arriba del tramo A–B del río Anzu (Abscisa 1+330 m).	64
Figura 20. Ubicación de las secciones transversales analizadas en el tramo de estudio	65
Figura 21. Concentración de plomo en agua (mg/L) para un TR=25 años.....	72
Figura 24. Zonificación espacial de la contaminación (Pb) en agua.....	74
Figura 25. Ubicación espacial de los puntos de muestreo y fuente de contaminación en el río Anzu (Estudio IKIAM, 2021)	76
Figura 26. Distribución comparativa de puntos de muestreo (2021 vs 2026)	78

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Evolución de la actividad minera en la provincia de Napo (2015–2021)..	22
Gráfico 2. Expansión de la actividad minera en la cuenca del río Anzu durante el período 2017–2024.....	22
Gráfico 3. Hietogramas de lluvia efectiva para los períodos de retorno de 25, 50 y 100 años generados mediante la distribución temporal SCS Tipo II.	56
Gráfico 4. Hidrograma de salida en el Punto B para un período de retorno de 25 años (TR25).....	57
Gráfico 5. Hidrograma de salida en el Punto B para un período de retorno de 50 años (TR50).....	57
Gráfico 6. Hidrograma de salida en el Punto B para un período de retorno de 100 años (TR100).....	58
Gráfico 7. Comparación de los hidrogramas correspondientes a los tres escenarios de simulación	59
Gráfico 8. Resultados de concentración de plomo en agua en puntos de monitoreo..	68
Gráfico 9. Resultados de concentración de plomo en sedimentos	70

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía. 1. Punto 0 de monitoreo: Afectación por actividad minera.....	33
Fotografía. 2. Punto A del tramo de estudio del río Anzu. (Inicio)	33
Fotografía. 3. Punto B del tramo de estudio del río Anzu. (Final).....	34

AGRADECIMIENTO

Mi eterna gratitud a la Santísima Virgen María y a mi familia, quienes han acompañado cada paso de mi vida con amor, fe y fortaleza. De manera muy especial, a mi mami y a mi papi, por su entrega incondicional, sus enseñanzas y el apoyo que siempre me han brindado. A ustedes les debo más que la vida; les debo los valores que me guían, la fuerza para superar los desafíos y el impulso para alcanzar este logro.

Expreso mi agradecimiento sincero a mi director de trabajo de titulación, PhD. Eduardo Paredes Beltrán, por su valiosa orientación, dedicación, paciencia y acompañamiento académico durante el desarrollo de esta investigación. Sus conocimientos, observaciones y recomendaciones fueron fundamentales para fortalecer este trabajo y culminarlo con éxito.

Asimismo, agradezco profundamente a todas las personas que, de manera directa o indirecta, formaron parte de este camino y contribuyeron al desarrollo de la presente investigación. Aunque no sea posible nombrarlas a todas, deseo expresarles mi sincera gratitud, la cual permanecerá siempre como reconocimiento a su apoyo, confianza y acompañamiento durante esta etapa.

Lily Cules

DEDICATORIA

"Todo cuanto hagan, háganlo de corazón, como para el Señor y no para los hombres".
Colosenses 3:23

A ti, Señor mío, dedico este esfuerzo y este logro, porque has fortalecido mi corazón en los momentos de dificultad y nunca me has dejado caminar sola.

A mis chiquitos Aby, Vivi y Jesús, quienes con su amor, compañía y alegría fueron la inspiración para cumplir este bello sueño. Este logro también es de ustedes.

Lily Aules

RESUMEN EJECUTIVO

La contaminación por metales pesados constituye una de las principales amenazas para la calidad de los recursos hídricos en zonas de influencia minera, debido a su persistencia, movilidad y efectos sobre los ecosistemas acuáticos y la salud humana. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo analizar el comportamiento hidrodinámico y la dispersión espacial del plomo (Pb) en un tramo de 1,78 km del río Anzu, con el propósito de evaluar la influencia de la dinámica hidráulica en el transporte del contaminante y aportar información para la gestión ambiental del recurso hídrico.

La investigación integró la modelación hidrológica mediante HEC-HMS y la modelación hidráulica bidimensional con HEC-RAS 2D, acopladas a un modelo advectivo-dispersivo para simular el transporte del plomo. Se determinaron caudales de diseño para períodos de retorno de 25, 50 y 100 años, obteniéndose valores de 159,4 m³/s, 188,6 m³/s y 216,8 m³/s, respectivamente. Asimismo, se evaluaron las variaciones espaciales de velocidad, profundidad y concentración del contaminante, complementadas con una zonificación de los niveles de afectación ambiental.

Los resultados evidenciaron una disminución progresiva de la concentración de Pb en dirección aguas abajo, controlada por procesos de advección, dispersión, dilución y sedimentación. La concentración simulada en el punto de ingreso del modelo fue de 0,000159 mg/L, equivalente a una reducción aproximada del 99,12 % respecto al valor reportado en 2021 (0,018 mg/L). La zonificación permitió identificar sectores con diferente nivel de afectación ambiental, concluyéndose que la dinámica hidrodinámica del río condiciona el transporte del contaminante y que la suspensión de las actividades mineras no garantiza una recuperación inmediata de la calidad del agua debido a la persistencia del plomo en el sistema fluvial.

Con base en estos hallazgos, se propone implementar una herramienta de gestión hidrológica, hidráulica y de calidad del agua basada en HEC-HMS y HEC-RAS para fortalecer el monitoreo y la gestión de la contaminación por plomo (Pb) en el sistema hídrico Yurasyacu–Anzu.

DESCRIPTORES

- ❖ ADVECCIÓN
- ❖ ANÁLISIS HIDRÁULICO
- ❖ DISPERSIÓN LONGITUDINAL
- ❖ MODELACIÓN HIDROLÓGICA
- ❖ PLOMO (PB)
- ❖ RÍO ANZU
- ❖ ZONIFICACIÓN ESPACIAL

ABSTRACT

Heavy metal contamination is one of the major threats to water resource quality in mining-influenced watersheds due to its persistence, mobility, and adverse effects on aquatic ecosystems and human health. In this context, this research aimed to analyze the hydrodynamic behavior and spatial dispersion of lead (Pb) along a 1.78 km reach of the Anzu River to evaluate the influence of hydraulic dynamics on contaminant transport and to provide scientific information for water resource management.

The study integrated hydrological modeling using HEC-HMS and two-dimensional hydraulic modeling with HEC-RAS 2D, coupled with an advection–dispersion model to simulate lead transport. Design discharges were estimated for return periods of 25, 50, and 100 years, yielding flow rates of 159.4 m³/s, 188.6 m³/s, and 216.8 m³/s, respectively. Spatial variations in flow velocity, water depth, and lead concentration were evaluated and complemented by an environmental impact zoning analysis.

The results demonstrated a progressive decrease in Pb concentration in the downstream direction, governed by advection, dispersion, dilution, and sedimentation processes. The simulated lead concentration at the model inflow point was 0.000159 mg/L, representing an approximate 99.12% reduction compared with the value reported in 2021 (0.018 mg/L). The spatial zoning identified river sections with different levels of environmental impact, leading to the conclusion that river hydrodynamics control contaminant transport and that the cessation of mining activities does not ensure the immediate recovery of water quality due to the persistence of lead within the fluvial system.

Based on these findings, the implementation of an integrated hydrological, hydraulic, and water quality management tool based on HEC-HMS and HEC-RAS is proposed to strengthen the monitoring and management of lead (Pb) contamination in the Yurasyacu–Anzu river system.

KEYWORDS

- ❖ ADVECTIVE–DISPERSIVE TRANSPORT
- ❖ HYDRAULIC MODELING
- ❖ HYDROLOGICAL MODELING
- ❖ LEAD (PB)
- ❖ RIVER ANZU
- ❖ SPATIAL ZONING
- ❖ TWO-DIMENSIONAL HYDRAULIC MODEL

CAPÍTULO I

1. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

La contaminación de los sistemas fluviales por metales pesados constituye una de las principales problemáticas ambientales asociadas a las actividades extractivas en regiones amazónicas. En la provincia de Napo, diversos estudios han evidenciado la presencia de metales potencialmente tóxicos en cuerpos de agua influenciados por actividades mineras auríferas ilegales, destacándose el plomo (Pb) por su persistencia ambiental, capacidad de bioacumulación y efectos adversos sobre los ecosistemas acuáticos y la salud humana. Investigaciones desarrolladas en la cuenca de los ríos Anzu, Jatunyacu y Napo reportaron concentraciones de plomo que superan los límites establecidos por los estándares de calidad ambiental para la protección de la vida acuática, evidenciando la necesidad de comprender no solo la presencia del contaminante, sino también los mecanismos hidráulicos que controlan su transporte y dispersión espacial [1], [2]

La presente investigación se enmarca en el campo de la hidráulica fluvial y aborda el análisis del transporte y dispersión del plomo (Pb) en el sistema fluvial del río Anzu, ubicado en el cantón Carlos Julio Arosemena Tola, provincia de Napo. El estudio se enfoca en comprender cómo el campo hidrodinámico, definido por la distribución espacial de velocidades, profundidades y geometría del cauce, controla la propagación del plomo (Pb) como contaminante en el río, permitiendo identificar patrones de dispersión y zonas de mayor afectación dentro de un tramo de estudio definido. La metodología empleada se basa en un enfoque de modelación hidrodinámica bidimensional mediante la integración de información primaria y secundaria. Por un lado, se utilizan datos hidrológicos, levantamientos geométricos del cauce y observaciones de campo; por otro, fundamentos teóricos provenientes de la hidráulica de canales abiertos y del transporte advectivo-dispersivo. A partir de estos insumos, se desarrolla un modelo numérico hidrológico–hidrodinámico bidimensional, implementado mediante HEC-HMS, HEC-RAS 2D y WASP (Water Quality Analysis Simulation Program) [3], acoplado a un modelo advectivo–dispersivo de transporte de contaminantes, que permite simular el comportamiento del flujo y la evolución espacial del plomo (Pb) bajo el caudal asociado al período de retorno de 25 años. Este enfoque facilita un diagnóstico hidráulico y ambiental del sistema fluvial con un mayor nivel de detalle espacial, al integrar las condiciones hidrológicas, las variables hidráulicas y los procesos de transporte y dispersión del contaminante.[4]

El trabajo se estructura en varios capítulos organizados de manera lógica y progresiva. Inicialmente, se presentan la justificación y los antecedentes investigativos que fundamentan la problemática y evidencian la necesidad del estudio. Posteriormente, se desarrolla el marco metodológico, en el cual se describen la ubicación del área de

estudio, los materiales y equipos utilizados, el tipo de investigación, así como los procedimientos de recolección y procesamiento de la información. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos a partir de la modelación, incluyendo la simulación de la dispersión del contaminante y la zonificación espacial de las áreas de mayor influencia, seguidos de las conclusiones, recomendaciones derivadas del análisis y una propuesta sugerida.

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentran la disponibilidad y resolución de la información hidrológica y topográfica, la ausencia de registros hidrométricos continuos del río Anzu y la limitada cobertura de las series pluviométricas disponibles[5],[6] por lo que fue necesario estimar los caudales mediante procedimientos hidrológicos basados en la relación precipitación–escorrentía. Asimismo, la investigación se desarrolló a partir de una única campaña de muestreo, debido a limitaciones de tiempo y recursos, por lo que las concentraciones de plomo (Pb) obtenidas representan las condiciones existentes al momento del muestreo y no la variabilidad estacional del río. Estas limitaciones delimitan el alcance de la investigación, sin comprometer la validez del enfoque metodológico adoptado para la evaluación hidrodinámica y del transporte del contaminante[3].

1.2 Justificación

La presente investigación surge ante la necesidad de comprender el comportamiento del plomo (Pb) dentro del sistema fluvial del río Anzu, considerando la existencia de una fuente potencial de contaminación asociada a actividades de minería aurífera ilegal desarrolladas en la cuenca alta. Aunque en los últimos meses la actividad minera ha sido suspendida por las autoridades competentes, las evidencias observadas en campo muestran que el río continúa presentando altos niveles de turbidez y una coloración característica asociada a la remoción de sedimentos, lo que hace presumir que los materiales contaminados permanecen almacenados en el cauce y continúan siendo transportados durante los eventos de escorrentía. Esta situación plantea la necesidad de conocer no solamente la presencia del contaminante, sino también su comportamiento hidráulico una vez que ingresa al sistema fluvial.

Existen estudios realizados en la provincia de Napo que han confirmado la presencia de metales pesados como plomo (Pb), cadmio (Cd), arsénico (As), hierro (Fe) y manganeso (Mn) superiores a los límites establecidos por la normativa ambiental ecuatoriana en cuerpos de agua influenciados por actividades mineras, evidenciando que la minería aurífera ilegal representa una de las principales fuentes de deterioro de los ecosistemas acuáticos. Si bien estas investigaciones previas se han limitado a identificar la presencia de plomo en la cuenca del río Napo asociada a este tipo de actividades mineras, aún se desconoce cuál es el comportamiento hidráulico de este contaminante una vez que ingresa al río Anzu, cómo se dispersa, hasta dónde puede ser transportado y qué sectores podrían verse potencialmente afectados bajo diferentes

condiciones hidrológicas. Esta incertidumbre constituye el principal problema científico que motiva el desarrollo de la presente investigación. El modelo considera el punto 0 de descarga como origen del contaminante y evalúa su propagación desde el punto A, correspondiente al inicio del tramo de análisis en el río Anzu, hasta el punto B, localizado aguas abajo, donde se encuentra la cabecera parroquial del cantón Carlos Julio Arosemena Tola. Este enfoque permite representar la trayectoria del contaminante bajo condiciones hidráulicas reales e identificar las zonas donde podrían producirse procesos de mezcla, dispersión, acumulación o atenuación a lo largo del cauce.

La importancia de la investigación radica en que proporciona información técnica para comprender la influencia del campo hidrodinámico sobre el transporte del plomo, permitiendo estimar el alcance espacial del contaminante y evaluar cómo las variaciones del caudal modifican su comportamiento dentro del río. Para ello, se desarrollan simulaciones hidrodinámicas correspondientes al período de retorno de 25, años, lo que posibilita analizar diferentes escenarios de flujo y determinar la influencia de cada uno sobre la velocidad de transporte, la dispersión y la posible permanencia del contaminante en el sistema fluvial. Los resultados contribuirán a identificar sectores potencialmente vulnerables antes de que el contaminante alcance áreas pobladas, constituyendo una herramienta de apoyo para la gestión del recurso hídrico, la planificación territorial y la toma de decisiones por parte de las instituciones responsables del control ambiental. Asimismo, permitirán establecer una base técnica para futuros programas de monitoreo y seguimiento de la calidad del agua en la cuenca del río Anzu.

Los principales beneficiarios serán las instituciones públicas encargadas de la administración del recurso hídrico, los organismos de control ambiental, los gobiernos autónomos descentralizados, la comunidad científica y la población asentada en el área de influencia del río Anzu, quienes dispondrán de información técnica sobre la posible evolución espacial del contaminante y los riesgos asociados a su transporte.

La originalidad del trabajo radica en que no se limita a identificar la presencia del plomo en el río en puntos específicos, sino que incorpora la modelación hidrodinámica bidimensional para simular su comportamiento espacial bajo diferentes condiciones hidrológicas, integrando la hidráulica fluvial con el análisis del transporte advectivo-dispersivo. Este enfoque permite generar una representación dinámica del desplazamiento del plomo (Pb), constituyendo un aporte metodológico aplicable a otros sistemas fluviales afectados por actividades mineras. Si bien la investigación no pretende formular una nueva teoría, sí aporta evidencia técnica sobre la estrecha relación existente entre las características hidráulicas del cauce y los procesos de transporte y dispersión de metales pesados en ríos amazónicos, fortaleciendo el uso de herramientas de modelación numérica como soporte para la gestión y conservación de los recursos hídricos. Finalmente, los resultados serán difundidos mediante el presente trabajo de titulación, con el propósito de contribuir al desarrollo de nuevas investigaciones en el campo de la hidráulica fluvial y del transporte de contaminantes.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Realizar la modelación hidrodinámica bidimensional para el diagnóstico espacial de la dispersión del contaminante en el río Anzu, cantón Carlos Julio Arosemena Tola, provincia de Napo.

1.3.2 Específicos

- Caracterizar las condiciones hidrológicas e hidráulicas del tramo de 1 km del río Anzu (caudal, velocidad, profundidad y geometría del cauce), con el fin de sustentar la modelación hidrodinámica bidimensional e identificar la zona de mayor influencia de la contaminación dentro del área de estudio.
- Simular la dispersión espacial del contaminante en un tramo definido del río Anzu mediante un modelo advectivo–dispersivo, acoplado al campo hidrodinámico bidimensional, utilizando el plomo (Pb) como indicador puntual en secciones de control representativas.
- Elaborar una zonificación espacial de la dispersión del contaminante, como insumo técnico para identificar tramos con mayor nivel de afectación.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

El presente capítulo constituye el sustento científico de la investigación, mediante una revisión sistemática de literatura especializada relacionada con la modelación hidrodinámica, el transporte y la dispersión de contaminantes en sistemas fluviales, así como con los efectos de la minería aurífera ilegal sobre la calidad del agua. Para su desarrollo se analizaron más de veinte artículos científicos publicados durante los últimos cinco años, obtenidos de bases de datos académicas de alto impacto y bibliotecas virtuales especializadas. Estas investigaciones presentan metodologías, enfoques y resultados aplicados en contextos similares al río Anzu, proporcionando referentes teóricos y metodológicos para el desarrollo del presente estudio. La revisión se organiza en ejes temáticos que permiten comprender los procesos hidrológicos, hidráulicos y de transporte de contaminantes, integrando fundamentos conceptuales y evidencia científica reciente que respaldan la metodología empleada y la interpretación de los resultados obtenidos.

2.1.1 Modelación numérica del transporte de contaminantes

La modelación numérica del transporte de contaminantes en sistemas fluviales se ha consolidado como una herramienta fundamental para comprender la dinámica de dispersión en medios naturales complejos. Diversas investigaciones han demostrado que estos procesos están gobernados por ecuaciones de advección-difusiones acopladas al comportamiento hidrodinámico del flujo, lo cual dificulta la obtención de soluciones analíticas en condiciones reales. En este contexto, el uso de modelos numéricos permite representar de manera adecuada la evolución espaciotemporal de los contaminantes. Estudios basados en métodos como Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) han evidenciado que la integración de las ecuaciones de aguas someras con modelos de difusión permite simular de forma estable y precisa la distribución de contaminantes, evitando problemas numéricos como oscilaciones o concentraciones negativas[7]

De manera complementaria, modelos basados en diferencias finitas han demostrado que el incremento en la velocidad del flujo intensifica el transporte longitudinal del contaminante, mientras que los coeficientes de difusión controlan su dispersión lateral, evidenciando la interacción entre los procesos advectivos y difusivos[8]. Asimismo, investigaciones en zonas de confluencia fluvial han demostrado que variables como la relación de caudales y la geometría del cauce generan patrones complejos de mezcla y distribución del contaminante, lo que resalta la importancia de considerar la variabilidad espacial del flujo en la modelación. Desde una perspectiva más avanzada, modelos espaciotemporales han incorporado el concepto de distancia hidrológica,

permitiendo representar de manera más realista el transporte en redes fluviales. Adicionalmente, enfoques basados en aprendizaje automático han identificado variables hidráulicas como factores dominantes en la distribución del contaminante [9]. En este sentido, la comprensión del transporte de contaminantes requiere no solo el análisis del campo hidrodinámico, sino también la integración de modelos que permitan simular de manera conjunta los procesos físicos involucrados.

2.1.2 Acoplamiento hidrodinámico y modelación del transporte

La modelación del transporte de contaminantes ha evolucionado hacia enfoques integrados que combinan la hidrodinámica del flujo con modelos de calidad de agua, permitiendo representar de forma más realista los procesos físicos del sistema. Diversas investigaciones coinciden en que la simulación de contaminantes se encuentra condicionada por la estructura espacial del flujo y sus gradientes hidráulicos. En este sentido, herramientas como HEC-RAS permiten representar el campo hidrodinámico, mientras que otros programas como WASP (Water Quality Analysis Simulation Program) permiten simular procesos advectivos y dispersivos,[10] logrando una representación integral del sistema. Estos enfoques permiten incorporar procesos adicionales como reacciones químicas, intercambio de masa y dinámica de calidad de agua, destacando la importancia de contar con una base hidráulica confiable[11].

Desde el punto de vista matemático, el transporte de contaminantes en ríos se representa mediante el acoplamiento de las ecuaciones de aguas someras con la ecuación de advección–dispersión en dos dimensiones, lo que permite describir simultáneamente la dinámica del flujo y la evolución de la concentración [12]. Métodos numéricos avanzados, como elementos finitos y esquemas implícitos, han demostrado una alta capacidad para representar la interacción entre el campo de velocidades y la dispersión del contaminante, especialmente en sistemas con múltiples fuentes y condiciones variables [13] En conjunto, estos enfoques evidencian que la modelación del transporte requiere integrar hidrodinámica y procesos de dispersión para representar adecuadamente la dinámica de los sistemas fluviales.

2.1.3 Modelación hidrodinámica aplicada y parámetros de dispersión

En continuidad con los enfoques teóricos descritos, los modelos hidrodinámicos bidimensionales han sido ampliamente aplicados en sistemas reales para representar de manera espacialmente distribuida el transporte de contaminantes. Modelos distribuidos permiten integrar variables hidrológicas, hidráulicas y de calidad de agua, facilitando el análisis del comportamiento del contaminante en función de condiciones espaciales como topografía, uso del suelo y características del cauce.[12]

El uso de modelos bidimensionales permite obtener resultados en forma de mapas, lo que facilita la identificación de zonas críticas, áreas de acumulación y patrones de

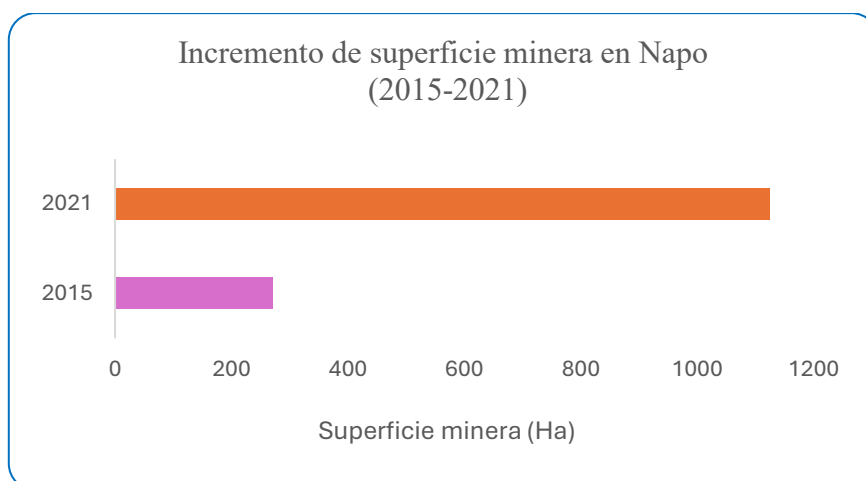
dispersión dentro del sistema fluvial. Asimismo, se ha evidenciado que la simulación para un período de retorno de 25 años permitiendo analizar la influencia de factores como el caudal, la geometría del cauce y la estacionalidad en la distribución del contaminante. Desde el punto de vista físico, el transporte en ríos se basa en la ecuación de advección–dispersión, donde el coeficiente de dispersión constituye un parámetro clave que controla la propagación de la pluma contaminante. Este parámetro depende de condiciones hidráulicas, geomorfológicas y turbulentas del flujo [14] Una estimación adecuada de estos coeficientes es fundamental para reproducir correctamente la evolución de la concentración, ya que errores en su determinación pueden afectar significativamente los resultados del modelo. En este contexto, la presente investigación adopta un enfoque de modelación hidrodinámica bidimensional como herramienta para analizar la dispersión de contaminantes en un sistema fluvial amazónico, priorizando la representación espacial del campo hidráulico como factor determinante en el transporte del contaminante.

2.1.4 Contaminación por minería aurífera y metales pesados

La minería aurífera, especialmente en su modalidad informal e ilegal, constituye una de las principales fuentes de contaminación en ecosistemas fluviales amazónicos, debido a la liberación de metales pesados y sedimentos en los cuerpos de agua. Estudios recientes han evidenciado concentraciones elevadas de metales como mercurio (Hg), plomo (Pb), cadmio (Cd) y arsénico (As), tanto en agua como en sedimentos, superando los límites establecidos por normativas ambientales y generando riesgos significativos para los ecosistemas y la salud humana [1]

En la provincia de Napo, ríos como el Anzu y el Jatunyacu concentran una alta actividad minera, lo que incrementa la presión sobre los ecosistemas acuáticos y favorece la dispersión de contaminantes a lo largo del sistema fluvial, debido a la conectividad hidrológica de la cuenca amazónica [15]. La actividad minera aurífera ilegal genera no solo contaminación química, sino también alteraciones físicas del sistema fluvial, como el incremento de sólidos suspendidos, cambios en la morfología del cauce y procesos de sedimentación, los cuales modifican las condiciones hidráulicas del flujo. En la provincia de Napo, esta problemática se ha intensificado durante la última década como consecuencia de la expansión progresiva de las áreas destinadas a la explotación minera. De acuerdo con la información oficial [15], la superficie ocupada por actividades mineras ha experimentado un crecimiento sostenido tanto a escala provincial como en la cuenca del río Anzu, evidenciando una mayor presión sobre los ecosistemas fluviales. Las gráficas 1 y 2 muestran la evolución de la superficie minera en la provincia de Napo entre 2015 y 2021, así como la expansión de las áreas afectadas por la minería en la cuenca del río Anzu durante el período 2017–2024, constituyendo un antecedente que justifica el análisis de la dispersión de contaminantes y la modelación hidrodinámica desarrollados en la presente investigación.

Gráfico 1. Evolución de la actividad minera en la provincia de Napo (2015–2021)



Elaboración: Autor. **Fuente:** Reyes Córdova et al. (2024)[16].

Gráfico 2. Expansión de la actividad minera en la cuenca del río Anzu durante el período 2017–2024.



Elaboración: Autor. **Fuente:** Reyes Córdova et al. (2024)[16].

Adicionalmente, se han registrado concentraciones preocupantes de metales pesados en la Amazonía ecuatoriana, con efectos de bioacumulación y biomagnificación que afectan la biodiversidad acuática y la salud de las comunidades. En particular, el plomo (Pb) presenta alta persistencia ambiental y afinidad por los sedimentos, lo que condiciona su transporte y redistribución en función de las condiciones hidráulicas del sistema. El avance de la minería aurífera ilegal ha sido evidenciado mediante monitoreo satelital, registrando un incremento significativo de áreas intervenidas en los últimos años, incluyendo la duplicación de superficies afectadas en periodos recientes [17]

Este escenario genera procesos de deforestación, alteración del ciclo hidrológico y aumento de la carga contaminante en los ríos, configurando un sistema donde los procesos hidráulicos condicionan la distribución espacial del contaminante. Finalmente, la minería ilegal en la Amazonía ecuatoriana representa un problema ambiental, social y legal de gran magnitud, asociado a la degradación de ecosistemas, pérdida de biodiversidad y afectación a comunidades locales.[17]. Esto justifica la necesidad de aplicar herramientas de modelación hidrodinámica que permitan analizar la dispersión de contaminantes en función de las condiciones reales del flujo, como se desarrolla en la presente investigación.

2.2 FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICA

Esta investigación se fundamenta en los principios de la hidráulica fluvial, disciplina que estudia el comportamiento del flujo en cauces naturales y la interacción entre las características hidráulicas del río y los procesos físicos que ocurren en el medio acuático. Desde este enfoque, el transporte y la dispersión de un contaminante dependen directamente de las condiciones del flujo, ya que variables como la caudal, velocidad, profundidad y geometría del cauce controlan la capacidad del río para transportar, mezclar y redistribuir las sustancias presentes en el agua. En consecuencia, el análisis del comportamiento de un contaminante requiere comprender previamente la dinámica hidráulica del sistema fluvial, la cual constituye la base para representar su evolución espacial mediante herramientas de modelación numérica [13]

En este contexto, la variable independiente corresponde al campo hidrodinámico del río, definido por parámetros como caudal, velocidad, profundidad y geometría del cauce. Estas variables describen el comportamiento físico del flujo y representan los principales factores que condicionan el transporte del contaminante dentro del cauce. A medida que cambian las condiciones hidráulicas, también varían los procesos de mezcla, dispersión y redistribución del metal pesado, modificando su comportamiento a lo largo del sistema fluvial [14]

La variable dependiente está representada por la dispersión espacial del plomo (Pb), expresada mediante la distribución de su concentración a lo largo del tramo de estudio [18] Este comportamiento responde a la interacción entre el movimiento del flujo y las características hidráulicas del cauce, permitiendo identificar sectores donde el contaminante puede desplazarse con mayor rapidez, permanecer durante más tiempo o concentrarse debido a las condiciones del río. En este sentido, la dispersión del plomo constituye la respuesta del sistema frente a las condiciones hidrodinámicas existentes [19]

Adicionalmente, intervienen otros factores como la pendiente, la rugosidad hidráulica y la morfología del lecho, los cuales modifican el comportamiento del flujo y favorecen la formación de zonas de mezcla, recirculación o acumulación del contaminante[20]. Debido a que estas características presentan una distribución espacial variable, resulta

necesario utilizar herramientas que permitan representar el comportamiento del sistema de manera integral y no únicamente mediante observaciones puntuales. Dado que la fuente potencial de contaminación se localiza aguas arriba del tramo analizado, el comportamiento del plomo no depende únicamente de su concentración inicial, sino también de las condiciones hidráulicas que gobiernan su transporte desde el punto de ingreso hasta los sectores poblados ubicados aguas abajo[21]. Por esta razón, la investigación adopta la modelación hidrodinámica bidimensional como herramienta para representar espacialmente la interacción entre el flujo y la dispersión del metal pesado, permitiendo evaluar su comportamiento a lo largo del río Anzu para el período de retorno de 25 años. Este enfoque proporciona una representación espacial del fenómeno y constituye una herramienta técnica para comprender la influencia del régimen hidráulico sobre la dispersión del plomo sin recurrir al desarrollo matemático directo de las ecuaciones que el software implementa internamente [11]

La contaminación por metales pesados en sistemas acuáticos ha sido objeto de múltiples investigaciones a nivel nacional e internacional, las cuales han evidenciado los efectos de estos contaminantes sobre la calidad del agua, los ecosistemas acuáticos y la salud humana. En el contexto ecuatoriano, diversos estudios han evaluado la presencia de metales pesados en ríos influenciados por actividades mineras, identificando concentraciones variables y diferentes enfoques metodológicos para su análisis [16]. Con el propósito de sintetizar los antecedentes científicos más relevantes y establecer el marco de referencia de la investigación, en la Tabla 1 se presenta una comparación de estudios sobre contaminación por metales pesados en sistemas acuáticos, tanto a nivel nacional. Particular importancia reviste el estudio desarrollado por Capparelli et al. (2021), al constituir el antecedente más cercano al presente trabajo, ya que fue realizado en el río Anzu, aguas abajo del tramo comprendido entre los puntos A y B analizados en esta investigación. Sus hallazgos confirman la presencia de contaminación por metales pesados derivada de la minería aurífera ilegal y aportan una base científica para la selección del área de estudio, la definición del escenario de modelación y la interpretación de los resultados obtenidos.

Tabla 1. Antecedentes de investigaciones sobre contaminación por metales pesados en sistemas acuáticos del Ecuador

Estudio	Región	Matriz evaluada	Metales reportados	Principales hallazgos	Relevancia para la presente investigación
Mora et al. (2016)	Río Puyango	Sedimentos	Hg, Pb, Cu, Zn	Se identificaron concentraciones elevadas de mercurio y otros metales pesados asociadas a actividades mineras, superando los límites establecidos por la normativa ambiental.	Evidencia el impacto directo de la minería sobre la calidad de los sedimentos fluviales, constituyendo un antecedente para el estudio del transporte de metales pesados.
Velásquez-López et al. (2020)	Río Siete	Sedimentos	Hg	Se registraron concentraciones de mercurio de hasta 2,0 mg/kg , superiores a los valores guía internacionales.	Demuestra la persistencia del mercurio en sedimentos de sistemas fluviales ecuatorianos afectados por actividades mineras.
Pinedo et al. (2019)	Río Napo	Agua y peces	Hg	Se detectaron concentraciones de mercurio superiores a los límites establecidos por la normativa ecuatoriana, evidenciando riesgo para el consumo humano.	Constituye uno de los principales antecedentes de contaminación por metales pesados en la cuenca del río Napo, cercana al área de estudio del río Anzu.
Capparelli et al. (2021)	Ríos Anzu, Jatunyacu y Napo (Provincia de Napo)	Agua y sedimentos	Ag, Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn, Cr, V, B	Se detectaron concentraciones de Pb, Cd, As, Cu, Fe, Mn y otros metales superiores a los estándares nacionales e internacionales de calidad ambiental. Además, se evidenció deterioro de la calidad ecológica mediante bioensayos y macroinvertebrados, asociado a la actividad minera aurífera.	Constituye el antecedente más cercano al área de estudio, demostrando que la minería aurífera genera contaminación por metales pesados en la cuenca del río Anzu y justificando la modelación de la dispersión del plomo propuesta en esta investigación.
Pernía et al. (2018)	Estero Salado	Agua, sedimentos y biota	Cd, Pb	Se registraron concentraciones de cadmio y plomo que exceden los límites permisibles en todas las matrices analizadas, comprobándose procesos de bioacumulación.	Evidencia que el plomo presenta capacidad de persistencia y bioacumulación en ecosistemas acuáticos ecuatorianos.
Alvarado et al. (2023)	Aguas influenciadas por minería	Agua superficial	Hg	Se identificó una dispersión generalizada del mercurio en cuerpos de agua afectados por actividades mineras, indicando contaminación crónica.	Demuestra la capacidad de dispersión de los metales pesados en sistemas hídricos sometidos a presión minera.
Mero et al. (2024)	Puerto El Morro	Moluscos bivalvos	Cd, Pb	Se detectó la presencia de cadmio y plomo en tejidos de organismos marinos, evidenciando riesgo para la cadena alimenticia.	Confirma la capacidad de bioacumulación del plomo y su potencial impacto sobre la salud humana y los ecosistemas acuáticos.

Elaboración: Autor. Fuente: Reyes Córdova et al. (2025). Pollution from illegal gold mining in Ecuadorian rivers and its socio-environmental consequences in the Ecuadorian Amazon[16].

Estos estudios evidencian que la actividad minera constituye una de las principales fuentes de incorporación de metales pesados a los sistemas acuáticos. En la mayoría de las investigaciones se reportan concentraciones elevadas de mercurio, plomo, cadmio y arsénico en agua, sedimentos y organismos acuáticos, superando en varios casos los límites establecidos por la normativa ambiental nacional.

De manera similar, investigaciones desarrolladas en Perú y Colombia confirman que la contaminación por metales pesados derivada de la minería, la cual constituye una

problemática común en los sistemas fluviales andino-amazónicos. Estos estudios evidencian procesos de transporte, acumulación y bioacumulación de metales pesados en agua, sedimentos y organismos acuáticos, lo que demuestra que los impactos ambientales asociados a la minería trascienden el ámbito local y representan un problema regional.

Tabla 2. Antecedentes de investigaciones sobre contaminación por metales pesados en sistemas acuáticos Internacionales.

Estudio	Región	Matriz evaluada	Metales reportados	Principales hallazgos	Relevancia para la presente investigación
Condori-Apaza et al. (2023)	Río Locumba, Perú	Sedimentos	Cd, Pb	Se identificaron concentraciones críticas de cadmio y plomo asociadas a actividades mineras, evidenciando contaminación persistente en los sedimentos fluviales.	Presenta un contexto geológico y minero similar al de la cuenca del río Anzu, constituyendo un referente para el análisis del transporte del Pb.
Yana et al. (2019)	Río Coata, Perú	Sedimentos	Cr, Cd, Pb	Se registraron concentraciones que superan los límites permisibles para sedimentos, demostrando la acumulación de metales pesados en el sistema fluvial.	Evidencia regional de contaminación por minería que respalda la necesidad de estudiar la dispersión de metales pesados en ríos andino-amazónicos.
Hernández-Morales et al. (2020)	Antioquia, Colombia	Sedimentos y peces	Hg, Pb, Cd	Se comprobó la bioacumulación de metales pesados en peces, evidenciando riesgos para la cadena alimenticia y la salud humana.	Demuestra que la contaminación fluvial trasciende el agua y los sedimentos, afectando la biota acuática, aspecto relevante para la interpretación de los impactos del Pb.
Luna-Pacompea et al. (2022)	Matarani, Perú	Organismos bioindicadores	Pb, Cd	Se determinó la acumulación de plomo y cadmio en moluscos utilizados como bioindicadores de contaminación ambiental.	Resalta la utilidad del biomonitoreo como herramienta complementaria para evaluar la contaminación por metales pesados.
Paredes et al. (2017)	Madre de Dios, Perú	Arenas negras provenientes de minería	Hg	Se confirmó la elevada toxicidad del mercurio asociado a la minería aurífera artesanal, así como su persistencia en los materiales sedimentarios.	Presenta similitudes con la minería aurífera desarrollada en la Amazonia ecuatoriana y evidencia los efectos de las actividades extractivas sobre los ecosistemas fluviales.
Mariana V. Capparelli. (2021)	Río Anzu, Ecuador	Arenas negras provenientes de minería	Hg	Se confirmó la elevada toxicidad del mercurio asociado a la minería aurífera artesanal, así como su persistencia en los materiales sedimentarios.	Presenta similitudes con la minería aurífera desarrollada en la Amazonia ecuatoriana y evidencia los efectos de las actividades extractivas sobre los ecosistemas fluviales.

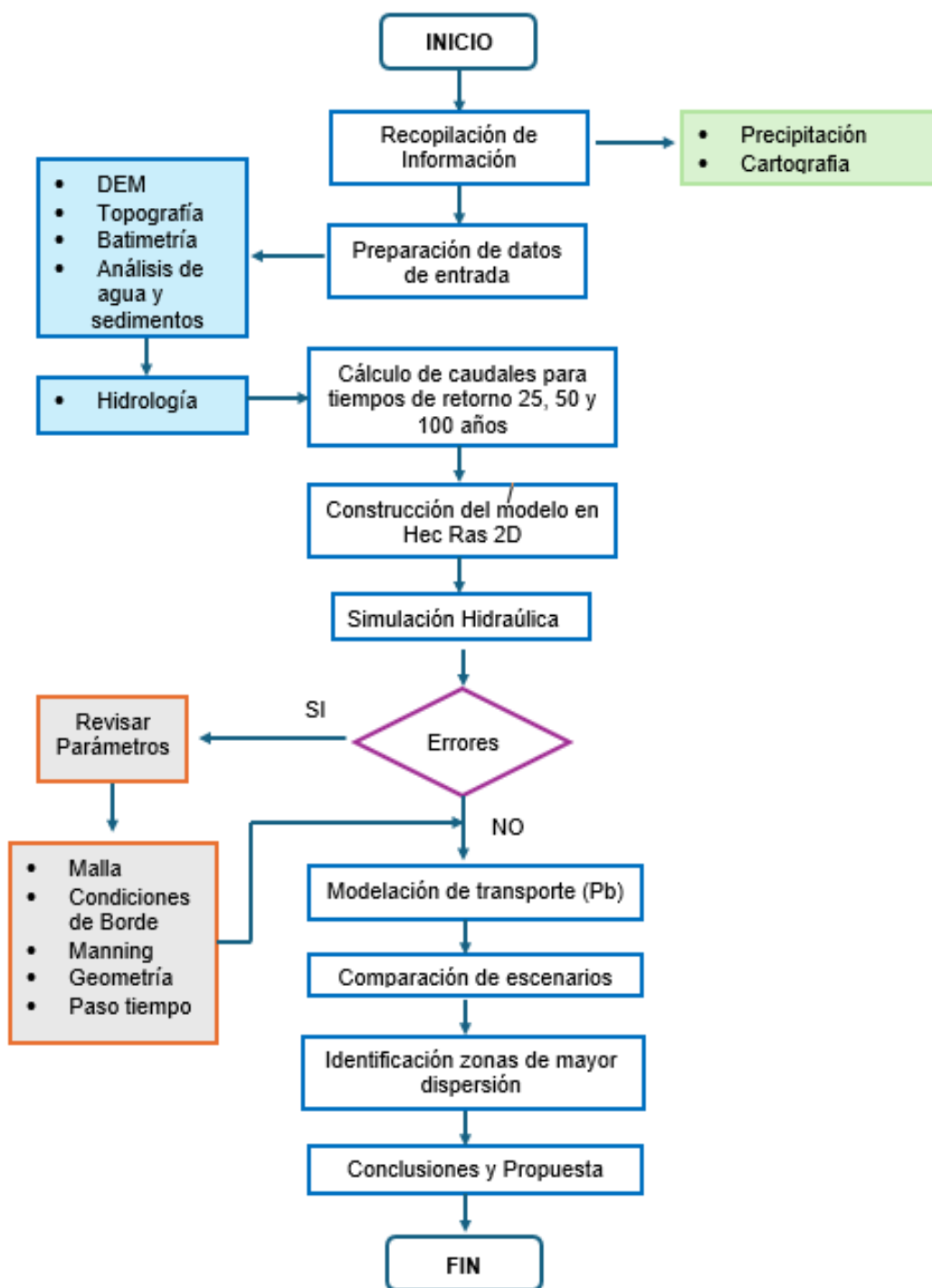
Elaboración: Autor. Fuente: Reyes Córdova et al. (2025). Pollution from illegal gold mining in Ecuadorian rivers and its socio-environmental consequences in the Ecuadorian Amazon [16].

A pesar de la existencia de numerosos estudios orientados a determinar concentraciones de metales pesados y evaluar sus impactos ambientales, se evidencia una limitada aplicación de modelos hidrodinámicos para analizar la dispersión espacial de estos contaminantes en sistemas fluviales amazónicos. En particular, no se identificaron investigaciones que integren el análisis de concentraciones de plomo con modelación bidimensional mediante HEC-RAS 2D y WASP en la cuenca del río Anzu.

En este contexto, la presente investigación busca cubrir dicho vacío mediante la simulación del transporte y dispersión del plomo bajo condiciones hidráulicas representativas del área de estudio. En síntesis, los fundamentos teóricos expuestos permiten comprender los procesos hidrológicos, hidrodinámicos y de transporte de contaminantes en sistemas fluviales, los cuales constituyen la base conceptual para la evaluación de la calidad del agua en ríos amazónicos. A partir de estos fundamentos, en el siguiente capítulo se presenta la metodología empleada para la modelación hidrodinámica y del transporte de plomo (Pb) en el río Anzu, considerando que la dinámica de dispersión del contaminante está condicionada por los parámetros hidráulicos del cauce, tales como el caudal, la velocidad del flujo y la profundidad del agua.

Con base en los fundamentos expuestos, la Figura 1 presenta de manera esquemática la integración de los procesos considerados en la modelación desarrollada en la presente investigación. A partir de este esquema conceptual, en el presente capítulo se describe de forma detallada la metodología empleada para la simulación hidrológica, hidrodinámica y del transporte de plomo (Pb), incluyendo la caracterización del área de estudio, la definición del escenario de caudal y la configuración del modelo numérico utilizado para representar el comportamiento hidráulico y la dispersión del contaminante en el río Anzu.

Figura 1. Esquema conceptual del proceso de modelación hidrológica, hidrodinámica y de transporte del plomo (Pb) en sistemas fluviales



Fuente: Elaboración del autor (2026)

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, debido a que utiliza variables físicas medibles del sistema hídrico, tales como precipitación, caudal, velocidad, profundidad y concentración de plomo (Pb), las cuales son procesadas mediante herramientas de análisis geoespacial, modelación hidrológica e hidráulica y métodos numéricos.

En cuanto a su diseño, corresponde a una investigación no experimental, ya que las variables objeto de estudio no son manipuladas por el investigador, sino observadas y analizadas a partir de información obtenida en campo y de la simulación del escenario mediante modelos computacionales.

Por su alcance, la investigación es descriptiva, correlacional y analítica. Es descriptiva porque caracteriza las condiciones hidrológicas, hidráulicas y de calidad del agua del tramo de estudio, incluyendo la concentración de plomo (Pb) presente en el sistema hídrico. Es correlacional porque analiza la relación existente entre las variables hidráulicas del cauce, tales como velocidad, profundidad del flujo, procesos de transporte, dispersión y acumulación del contaminante. Finalmente, es analítica porque interpreta la influencia de variables como la velocidad, la profundidad y la geometría del cauce sobre el comportamiento espacial del plomo dentro del área de estudio.

Este enfoque metodológico permite evaluar de manera objetiva la dinámica del sistema hídrico Yurasyacu–Anzu y comprender los procesos que controlan el transporte y dispersión del plomo dentro del área de estudio correspondiente al río Anzu.

3.2 Población o muestra:

La población de estudio corresponde al río Anzu, perteneciente a la subcuenca del río Napo, dentro de la cuenca amazónica ecuatoriana. Este sistema fluvial constituye el ámbito espacial donde se desarrollan los procesos hidrológicos, hidráulicos y de transporte de contaminantes analizados en la presente investigación. Debido a la extensión del río Anzu y a la naturaleza del estudio, se seleccionó como muestra un tramo representativo de aproximadamente 1,78 km de longitud, ubicado en un sector de interés ambiental influenciado por actividades mineras auríferas ilegales y caracterizado por presentar condiciones hidráulicas adecuadas para la evaluación de los procesos de transporte y dispersión del plomo (Pb).

La selección del tramo de estudio se fundamentó en criterios de representatividad hidráulica, accesibilidad, disponibilidad de información topográfica y presencia de fuentes potenciales de contaminación. Asimismo, como contaminante indicador se seleccionó el plomo (Pb), debido a que es uno de los metales pesados de mayor preocupación ambiental por su elevada toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación en los ecosistemas acuáticos. Esta selección se sustenta, además, en investigaciones previas desarrolladas en el río Anzu, las cuales reportan concentraciones significativas de Pb asociadas principalmente a las actividades de minería aurífera presentes en la cuenca. Aunque durante la extracción de oro también se emplea mercurio (Hg), este presenta un comportamiento ambiental diferente, ya que parte del metal puede volatilizarse hacia la atmósfera en su forma elemental durante los procesos de amalgamación. En contraste, el plomo tiende a permanecer en el medio acuático y en los sedimentos debido a su baja movilidad y elevada persistencia, lo que incrementa su permanencia en el sistema fluvial y su potencial impacto ambiental. En consecuencia, el Pb fue adoptado como variable representativa para evaluar el transporte advectivo-dispersivo del contaminante a lo largo del tramo de estudio.

Para el monitoreo y análisis de calidad de agua y sedimentos se establecieron tres puntos de control georreferenciados: P0, PA y PB. El punto P0 se localiza sobre el río Yurasyacu, aguas arriba de su confluencia con el río Anzu, y fue definido como punto de referencia para caracterizar la calidad del agua proveniente de la zona influenciada por actividades mineras y determinar las concentraciones iniciales de plomo (Pb) que ingresan al sistema de estudio.

El tramo analizado mediante la modelación hidráulica y de transporte de contaminantes corresponde al río Anzu, comprendido entre los puntos PA y PB, con una longitud de 1,78 km. El punto PA se ubica inmediatamente aguas abajo de la confluencia entre los ríos Yurasyacu y Anzu, constituyendo la condición inicial del tramo modelado, mientras que el punto PB se localiza aguas abajo en el río Anzu, en las proximidades del cantón Carlos Julio Arosemena Tola.

Las concentraciones medidas de Pb obtenidas durante la campaña de monitoreo constituyeron la condición inicial para la simulación del transporte de contaminantes. Posteriormente, estas concentraciones fueron incorporadas al modelo de calidad del agua WASP, donde se simuló el transporte advectivo-dispersivo del plomo utilizando como condiciones hidrodinámicas los resultados previamente obtenidos en HEC-RAS para el escenario correspondientes a un período de retorno de 25 años. Esta configuración permitió evaluar la influencia de las concentraciones de plomo provenientes del río Yurasyacu sobre el río Anzu, así como analizar los procesos de transporte, dispersión y atenuación del metal pesado a lo largo del tramo comprendido entre PA y PB.

Considerando que la investigación se fundamenta en la modelación hidrológica, hidráulica y de transporte de plomo en un sistema fluvial natural, la selección del tramo de estudio y de los puntos de monitoreo no responde a un procedimiento estadístico

probabilístico, sino a criterios técnicos de representatividad espacial, influencia de actividades mineras, accesibilidad y condiciones hidráulicas características del cauce, garantizando que los resultados obtenidos reflejen adecuadamente el comportamiento del contaminante dentro del área de estudio.

3.3 Prueba de Hipótesis - pregunta científica – idea a defender

Esta investigación se desarrolla a partir de la siguiente pregunta científica:

¿De qué manera las condiciones hidrodinámicas del río Anzu influyen en el transporte y la dispersión espacial del plomo (Pb) dentro del tramo de estudio?

En función de esta interrogante, se plantea como idea a defender la siguiente:

La dispersión y distribución espacial del plomo (Pb) en el río Anzu está controlada principalmente por las condiciones hidrodinámicas del flujo, representadas por variables como el caudal, la velocidad y la profundidad, las cuales determinan los procesos de transporte, mezcla, dispersión y acumulación del contaminante dentro del sistema fluvial.

Considerando que la investigación corresponde a un estudio cuantitativo, no experimental y basado en modelación numérica, no se aplican pruebas estadísticas de hipótesis en sentido inferencial. La comprobación de la idea a defender se realiza mediante la integración de los resultados obtenidos en la modelación hidrológica desarrollada en HEC-HMS, la modelación hidráulica bidimensional realizada en HEC-RAS 2D y la simulación del transporte del contaminante en WASP. Para ello, se analizará la relación existente entre las variables hidráulicas del cauce, tales como caudal, velocidad y profundidad, así como la distribución espacial de las concentraciones del plomo dentro del tramo de estudio.

3.4 Recolección de información:

La recolección de información se realizó mediante técnicas documentales, trabajo de campo, análisis de laboratorio y procesamiento geoespacial, con la finalidad de obtener los insumos necesarios para la caracterización hidrológica, hidráulica y ambiental del tramo de estudio del río Anzu. La información obtenida fue validada mediante fuentes oficiales, procedimientos estandarizados y software ampliamente utilizados en estudios hidrológicos e hidráulicos.

3.4.1 Información del área de estudio

El área de estudio comprende un tramo de 1,78 km del río Anzu. El tramo analizado se extiende desde el punto A, localizado en las coordenadas X: 180261,20; Y: 9870564,87, hasta el punto B, ubicado en las coordenadas X: 181968,23; Y: 9871006,49. La elevación del cauce varía entre 487 y 479 m s.n.m., lo que representa

Durante el levantamiento de información en campo y el proceso de delimitación técnica del área de estudio, se precisó que la longitud definitiva del tramo operativo entre los puntos PA y PB corresponde a 1,78 km. Esta delimitación se estableció en función de la continuidad hidráulica del cauce, la ubicación de los puntos de control definidos para el análisis y la necesidad de representar adecuadamente los procesos de transporte del contaminante en el sistema fluvial. Cabe señalar que esta precisión no modifica el tema ni los objetivos de la investigación aprobada, sino que constituye un ajuste técnico necesario para mejorar la representatividad del modelo hidráulico e hidrodinámico desarrollado. En el entorno del río predomina un uso del suelo conformado por áreas de bosque, zonas agropecuarias y sectores con intervención antrópica. Adicionalmente, en la zona se evidencia la presencia de actividades de explotación minera ilegal de oro, las cuales han generado importantes pasivos ambientales que afectan las condiciones físicas y ambientales del cauce. Esta situación constituye un aspecto relevante para el análisis de las condiciones hidrológicas e hidráulicas del río Anzu.

32

Fotografía. 1. Punto 0 de monitoreo: Afectación por actividad minera.



***Fuente:** Registro fotográfico de campo (2026)*

Fotografía. 2. Punto A del tramo de estudio del río Anzu. (Inicio)



***Fuente:** Registro fotográfico de campo (2026)*

Fotografía. 3. Punto B del tramo de estudio del río Anzu. (Final)



Fuente: Registro fotográfico de campo (2026)

3.4.1 Información topográfica y batimétrica

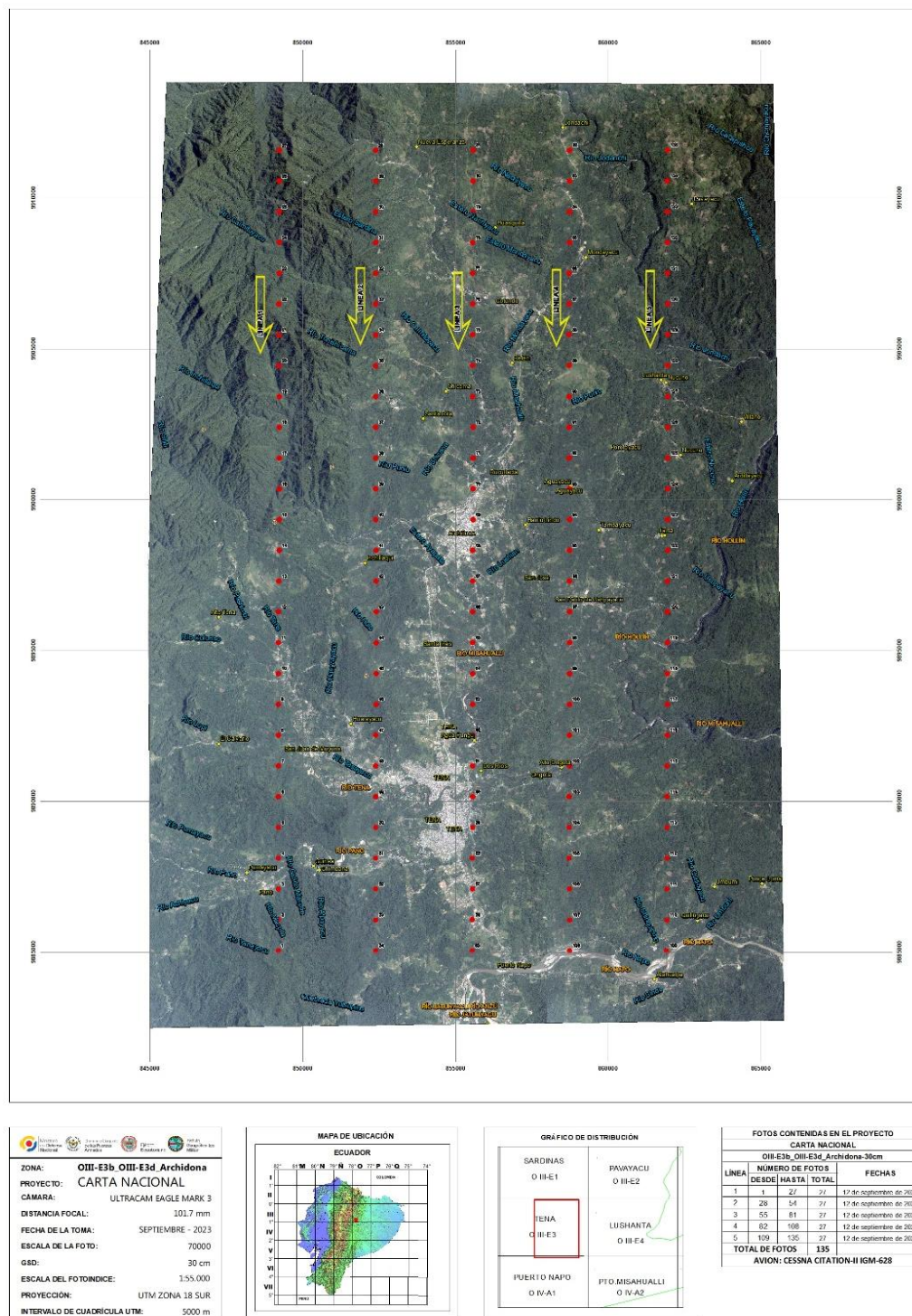
La información topográfica utilizada en la presente investigación fue obtenida a partir de productos geoespaciales de alta resolución disponibles para el área de estudio, específicamente mediante ortofotografía aérea georreferenciada y cartografía digital generada dentro del Proyecto Carta Nacional. La ortofotografía empleada corresponde a un levantamiento aerofotogramétrico realizado en septiembre de 2023, con una resolución espacial (GSD) de 30 cm, constituyendo una fuente confiable para la caracterización espacial del entorno fluvial. Para garantizar la compatibilidad espacial con la información recopilada durante la investigación y con las herramientas de modelación utilizadas, toda la información geográfica fue procesada y consolidada en el sistema de referencia WGS 84 / UTM Zona 17 Sur (EPSG:32717). Complementariamente, se realizó el levantamiento batimétrico del cauce mediante secciones transversales distribuidas a lo largo del tramo analizado del río Anzu, las cuales fueron georreferenciadas y procesadas con la finalidad de representar la geometría sumergida del cauce. Esta información permitió complementar la topografía superficial y obtener una representación más precisa de las condiciones geométricas reales del sistema fluvial.

Técnica: Levantamiento batimétrico de campo y procesamiento topográfico digital.

Instrumentos: Ortofotografía aérea georreferenciada de alta resolución, cartografía digital, Modelo Digital del Terreno (MDT), equipos GNSS, levantamiento batimétrico del cauce, Autodesk Civil 3D, QGIS.

Validez y confiabilidad: La información topográfica utilizada proviene de productos geoespaciales de alta resolución obtenidos mediante aerofotogrametría, complementados con mediciones batimétricas levantadas directamente en campo. La integración y procesamiento de estos insumos permitió generar una representación geométrica consistente y técnicamente confiable del cauce y su entorno, garantizando la precisión espacial requerida para la modelación hidráulica bidimensional y el análisis del transporte de contaminantes. En la figura 3 se muestra la cartografía digital generada dentro del Proyecto Carta Nacional

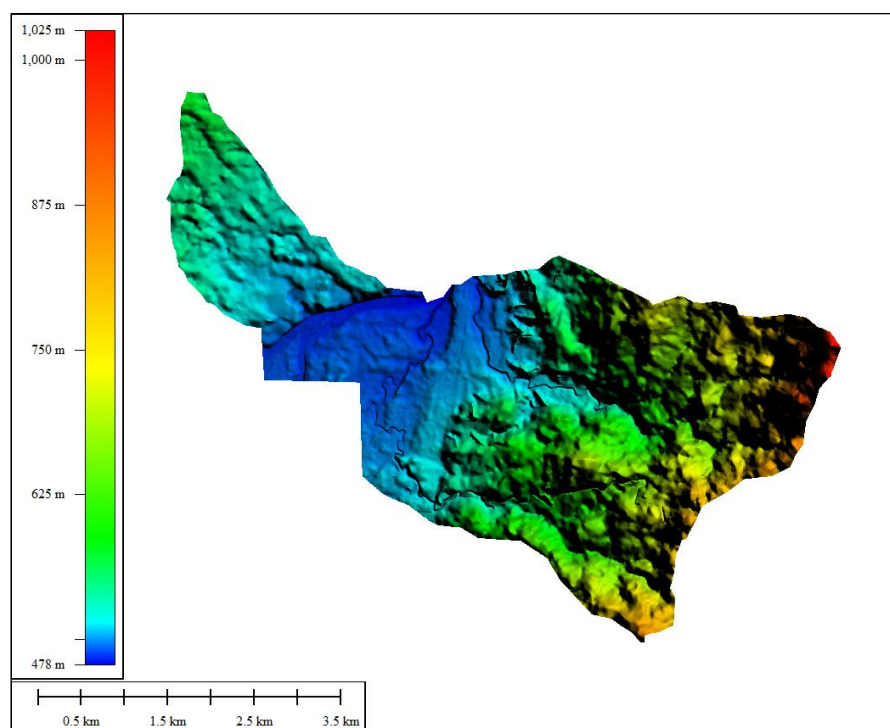
Figura 3. Cobertura de ortofotografía aérea utilizada como insumo topográfico para la generación del modelo topo batimétrico del área de estudio.



Elaboración: Autor. **Fuente:** Proyecto Carta Nacional, Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Tena (2023)

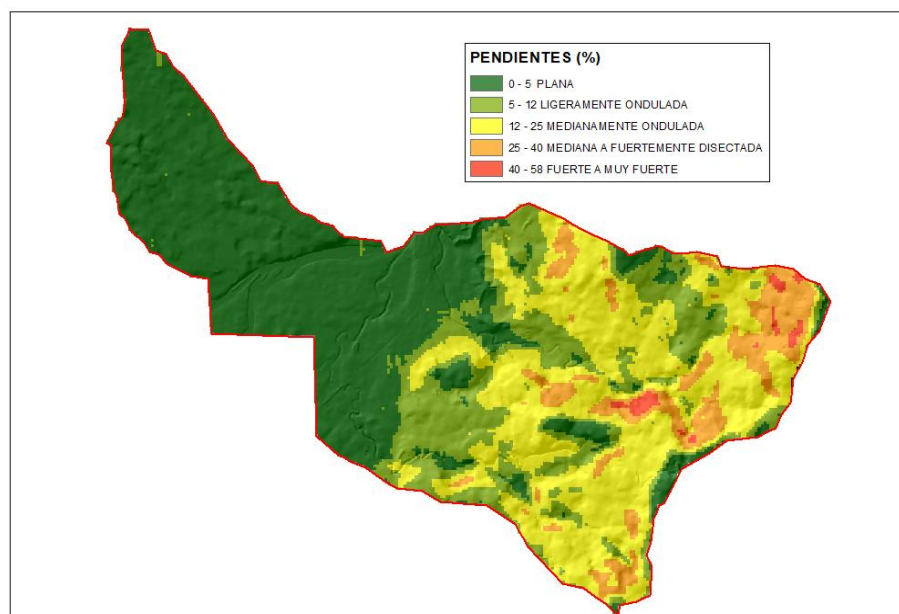
Además, se presentan las Figuras 4 a 8, las cuales describen la caracterización fisiográfica e hidrológica de la cuenca del río Anzu, comprendiendo el Modelo Digital de Elevación (DEM), la clasificación de pendientes, la red de drenaje y acumulación de flujo, la delimitación de la cuenca aportante al tramo de estudio y la cobertura y uso del suelo en la subcuenca. Esta información constituye la base espacial y física necesaria para la configuración del modelo hidrológico e hidrodinámico aplicado en la presente investigación.

Figura 4. Modelo Digital de Elevación (DEM) de la cuenca del río Anzu.



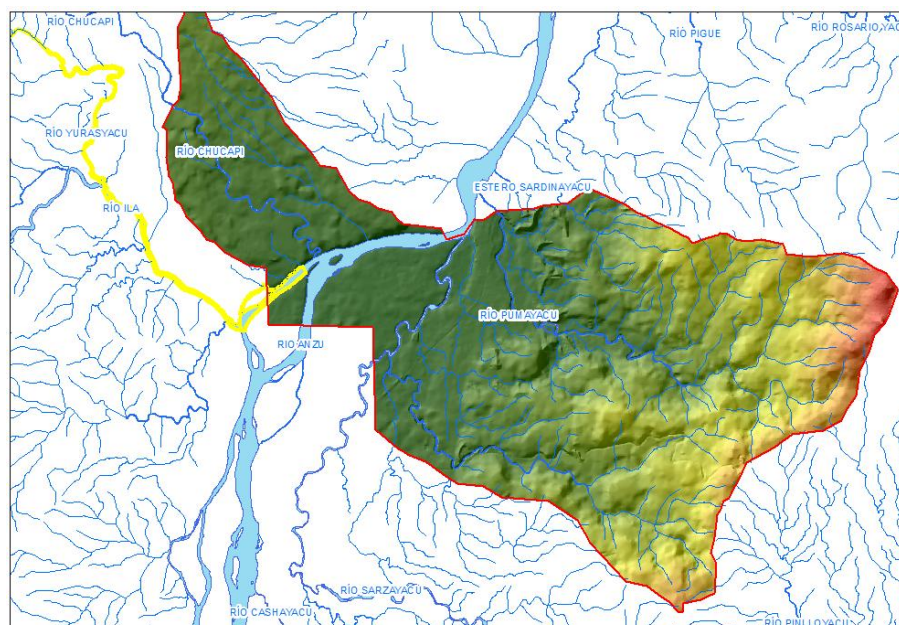
Fuente: Elaboración del autor a partir del Modelo Digital de Elevación SRTM de 30 m procesado en QGIS Pro (2026)

Figura 5. Clasificación de pendientes de la cuenca hidrográfica del río Anzu.



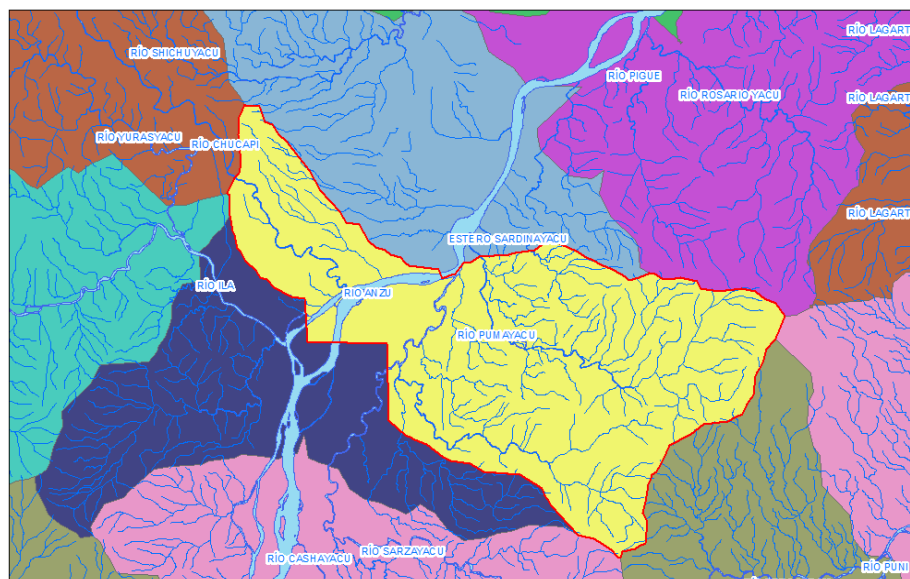
Fuente: Elaboración del autor a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) procesado en QGIS (2026).

Figura 6. Red de drenaje y acumulación de flujo de la cuenca del río Anzu.



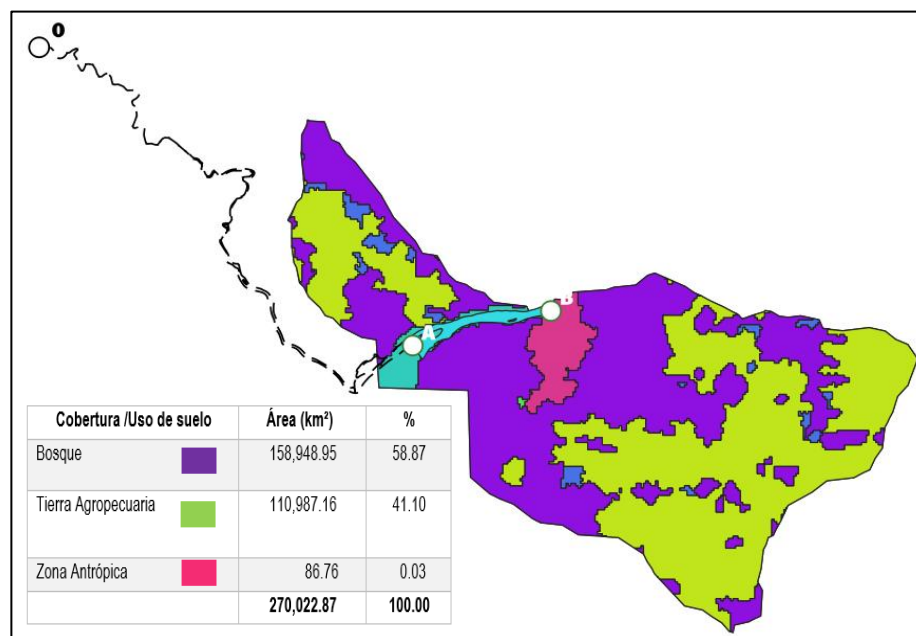
Fuente: Elaboración del autor a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) procesado mediante herramientas hidrológicas de QGIS (2026).

Figura 7. Delimitación de la cuenca aportante al tramo de estudio del río Anzu.



Fuente: Elaboración del autor a partir de información hidrográfica y cartográfica procesada en QGIS (2026).

Figura 8. Cobertura y uso de la tierra en la subcuenca del río Anzu y ubicación del tramo de estudio.



Fuente: Elaboración del autor mediante procesamiento geoespacial en QGIS a partir del Mapa de Cobertura y Uso de la Tierra (CUT 2022) del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), 2023.

3.4.2 Información hidrometeorológica

La información hidrometeorológica se obtuvo mediante recopilación documental de registros históricos de precipitación proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Se utilizaron datos de las estaciones Tena (M-070), Tena Hda. Chaupi Shungo (MB93) y Aeropuerto Jumandy, correspondientes al período 1992–2018. A partir de ello, se consolidó la información y se obtuvo las precipitaciones máximas anuales en 24 horas de los años registrados.

Tabla 3. Serie histórica de precipitaciones máximas anuales en 24 horas.

MAXIMOS ANUALES	
Año	P Máx 24h (mm)
1992	147.10
1993	110.50
1994	87.60
1995	90.70
1996	81.70
1997	96.40
1998	130.50
1999	126.40
2000	90.60
2008	182.20
2009	110.60
2010	103.00
2011	175.30
2012	104.50
2013	125.90
2014	216.50
2015	91.60
2016	109.00
2017	101.50
2018	95.50

Fuente: Elaboración del autor a partir de registros pluviométricos del INAMHI.

Técnica: Revisión documental.

Instrumento: Bases de datos y anuarios hidrometeorológicos del INAMHI, herramienta computacional como Microsoft Excel

Validez y confiabilidad: La información proviene de registros oficiales generados y administrados por el INAMHI, organismo competente en materia meteorológica e hidrológica en el Ecuador.

3.4.3 Muestreo de agua y sedimentos

Se realizó una campaña de monitoreo ambiental en tres puntos estratégicos del sistema hídrico Yurasyacu–Anzu, identificados como P0, PA y PB. En estos puntos se recolectaron muestras de agua superficial y sedimentos siguiendo los lineamientos establecidos para la obtención de muestras puntuales (grab samples), con el propósito de determinar las concentraciones de plomo (Pb) y evaluar su comportamiento espacial a lo largo del tramo de estudio.

El punto P0 fue establecido sobre el río Yurasyacu, aguas arriba de su confluencia con el río Anzu, con la finalidad de caracterizar las concentraciones iniciales del plomo (Pb) provenientes de la zona influenciada por actividades mineras auríferas ilegales. Los puntos PA y PB fueron ubicados sobre el río Anzu, permitiendo analizar los procesos de transporte, dispersión y atenuación del plomo a lo largo del tramo modelado. Adicionalmente, en el punto PB, localizado en las proximidades de la cabecera cantonal de Carlos Julio Arosemena Tola, se efectuó la caracterización de parámetros fisicoquímicos complementarios de calidad de agua, por corresponder al sector poblado más cercano al área de influencia del estudio y constituir la zona de mayor interés para la evaluación de posibles afectaciones ambientales asociadas a la presencia de plomo en el sistema hídrico.

Una vez recolectadas, las muestras fueron almacenadas en recipientes adecuados para el análisis de metales y preservadas mediante refrigeración a una temperatura menor o igual a 6 °C durante su transporte al laboratorio a la ciudad del Coca. Para las muestras destinadas a la determinación de plomo, se aplicaron los procedimientos de conservación recomendados para minimizar alteraciones físicas, químicas y biológicas antes del análisis.

Las determinaciones analíticas fueron realizadas por un laboratorio acreditado por el Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE), bajo la Norma NTE INEN ISO/IEC 17025:2018 (equivalente a la ISO/IEC 17025:2017), con acreditación N.º SAE LEN 14-009 para la ejecución de ensayos fisicoquímicos en aguas, entre ellos la determinación de plomo (Pb) y otros parámetros de calidad del agua. El laboratorio empleó procedimientos normalizados y métodos analíticos validados para la cuantificación de plomo y de los parámetros fisicoquímicos evaluados. Asimismo, efectuó la recepción, verificación, conservación y procesamiento de las muestras conforme a sus protocolos de aseguramiento de la calidad y cadena de custodia, garantizando la trazabilidad, integridad y confiabilidad de los resultados analíticos obtenidos.

En los Anexos D se incluye la cadena de custodia proporcionada por el laboratorio acreditado, la cual constituye el registro documental que garantiza la trazabilidad de las muestras durante las etapas de recolección, transporte, recepción y análisis, conforme a los procedimientos de aseguramiento de la calidad.

Técnica: Muestreo ambiental.

Instrumentos: Frascos de muestreo, fichas de campo, equipos de georreferenciación y análisis de laboratorio.

Validez y confiabilidad: Las muestras de agua y sedimentos fueron debidamente identificadas, georreferenciadas y preservadas bajo procedimientos estandarizados de muestreo y cadena de custodia. Los análisis fueron realizados por el laboratorio AQLAB, acreditado por el Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE) bajo la Norma NTE INEN ISO/IEC 17025:2018, garantizando la competencia técnica, trazabilidad y confiabilidad de los resultados obtenidos.

A continuación, se presenta el esquema metodológico para la evaluación y modelación del transporte de plomo (Pb) en el sistema hídrico Yurasyacu–Anzu, el cual integra las etapas de muestreo de agua y sedimentos, análisis de laboratorio y determinación de concentraciones de plomo (Pb), así como la generación del campo hidrodinámico mediante HEC-RAS. A partir de estos resultados, se aplica el modelo de advección–dispersión para la simulación del transporte del contaminante, obteniéndose mapas de concentración y la correspondiente zonificación ambiental del área de estudio.

Figura 9. Esquema metodológico para la evaluación y modelación del transporte de plomo (Pb) en el sistema hídrico Yurasyacu–Anzu



Fuente: Elaboración del autor (2026).

3.5 Procesamiento de la información y análisis estadístico:

3.5.1 Procesamiento de información geoespacial

La información topográfica y batimétrica fue procesada mediante Autodesk Civil 3D y QGIS, herramientas que permitieron generar superficies digitales del terreno (TIN), perfiles longitudinales, secciones transversales y el Modelo Digital de Elevación Topo batimétrico (MDE-TB), constituyendo los insumos geométricos fundamentales para la construcción del modelo hidráulico bidimensional desarrollado en HEC-RAS 2D.

Una vez consolidada la superficie topo batimétrica, esta fue exportada en formato GeoTIFF (.tif) para su posterior incorporación al módulo RAS Mapper de HEC-RAS. Adicionalmente, se configuró el sistema de referencia espacial mediante la importación del archivo de proyección correspondiente (.prj), garantizando la correcta georreferenciación del terreno y la compatibilidad geométrica entre el modelo digital de elevación, la malla bidimensional y las condiciones de frontera. El modelo fue desarrollado utilizando el sistema de coordenadas WGS 84 / UTM Zona 17 Sur (EPSG:32717). Este procedimiento permitió disponer de una base topo batimétrica continua y espacialmente consistente, capaz de representar adecuadamente las condiciones geométricas del cauce y de las zonas inundables adyacentes, proporcionando los insumos necesarios para la simulación hidrodinámica bidimensional y el posterior análisis del transporte y dispersión del contaminante en el río Anzu. La figura 1 muestra el procesamiento geoespacial realizado sobre el área de estudio

Figure 1. Delimitación topográfica del área de estudio en el río Anzu.



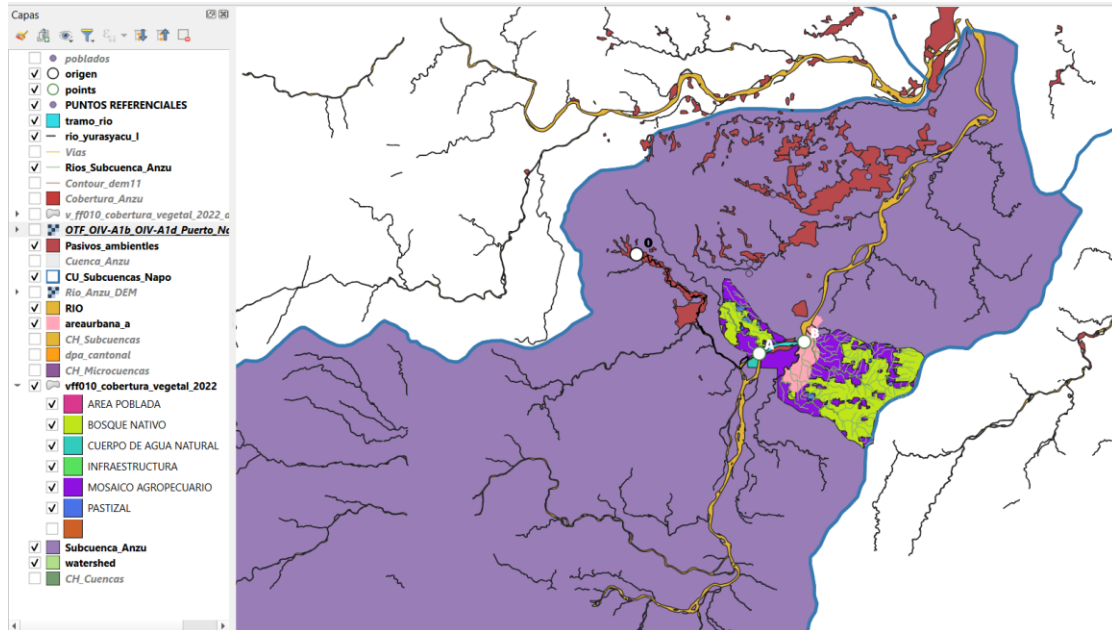
Fuente: *Elaboración del autor (2026)*

La información topográfica utilizada como base para el desarrollo de la presente investigación se muestra en el Anexo A

Adicionalmente, se presentan las siguientes figuras, en las que se muestran los procesos de análisis y preparación de la información espacial realizados en el Sistema de

Información Geográfica (QGIS), los cuales proporcionaron los insumos necesarios para el cálculo de la escorrentía de la cuenca.

Figura 10. Configuración geoespacial en QGIS



Fuente: Elaboración del autor mediante QGIS (2026).

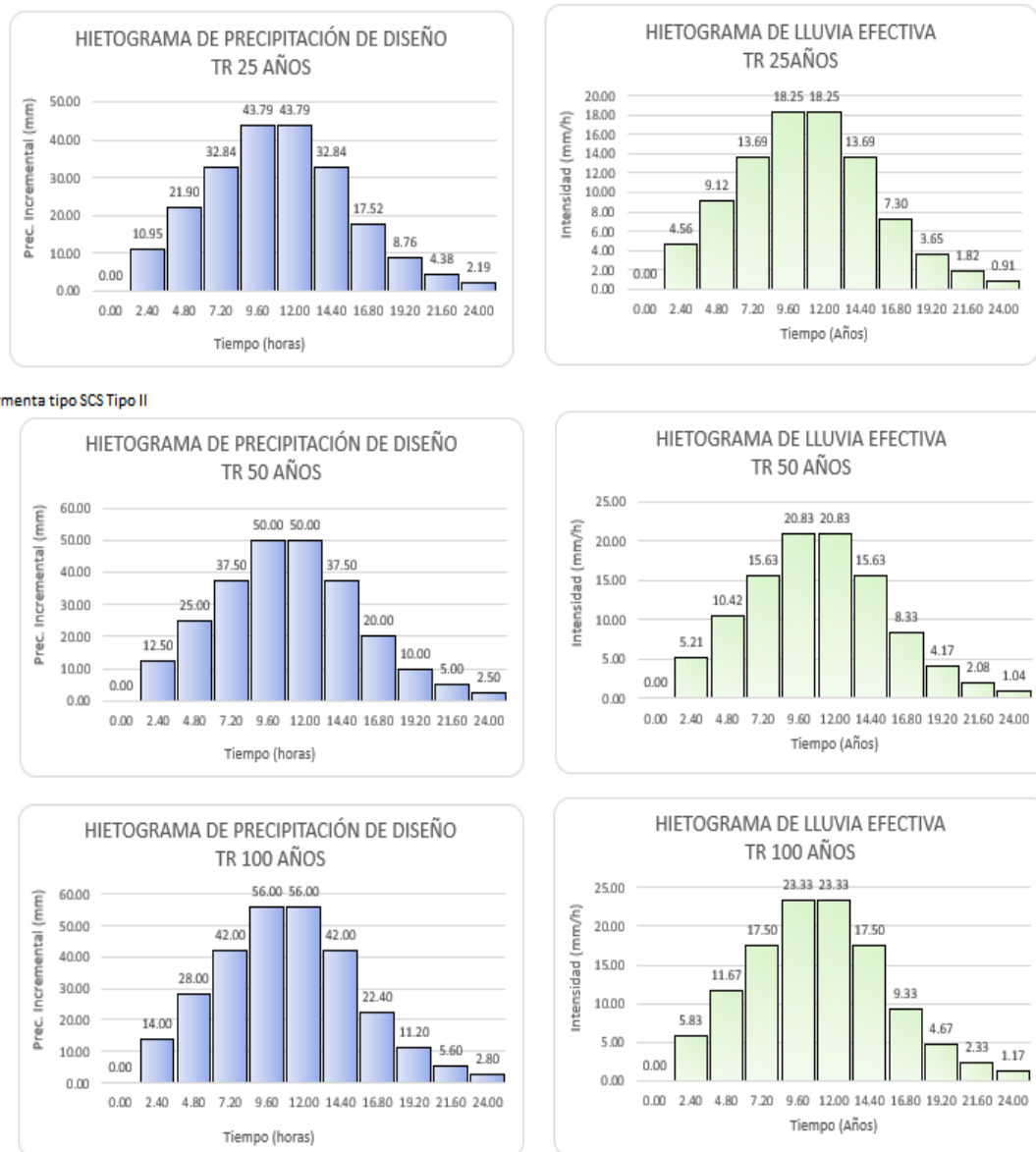
3.5.2 Procesamiento de Información hidrológica mediante HEC-HMS

Previo a la modelación hidrológica en HEC-HMS, se realizó el procesamiento de la información pluviométrica mediante Microsoft Excel. En esta etapa se consolidaron y depuraron los registros históricos de precipitación, se analizaron las precipitaciones máximas anuales y se determinaron las precipitaciones de diseño correspondientes a los períodos de retorno de 25, 50 y 100 años. Asimismo, se generaron los hietogramas de diseño que constituyeron los datos de entrada para la modelación lluvia–escorrentía, los cuales se visualiza en la figura 11. El procesamiento hidrológico se efectuó a partir de las precipitaciones de diseño obtenidas mediante el análisis de frecuencia hidrológica. Posteriormente, se calculó el tiempo de concentración de la cuenca utilizando la fórmula de Kirpich, parámetro empleado para definir la duración de la tormenta de diseño. Con esta información se aplicó el método de Distribución SCS Tipo II (simplificada), obteniendo la distribución temporal de la precipitación para cada período de retorno. A partir de los hietogramas se determinaron las precipitaciones incrementales y, mediante las ecuaciones del método SCS, se estimaron las pérdidas por infiltración, la lluvia efectiva y la escorrentía directa de la cuenca. Los resultados obtenidos fueron utilizados como información de entrada para la modelación

hidrológica en HEC-HMS como se visualiza en la figura 12 y, posteriormente, para la modelación hidráulica en HEC RAS 2D.

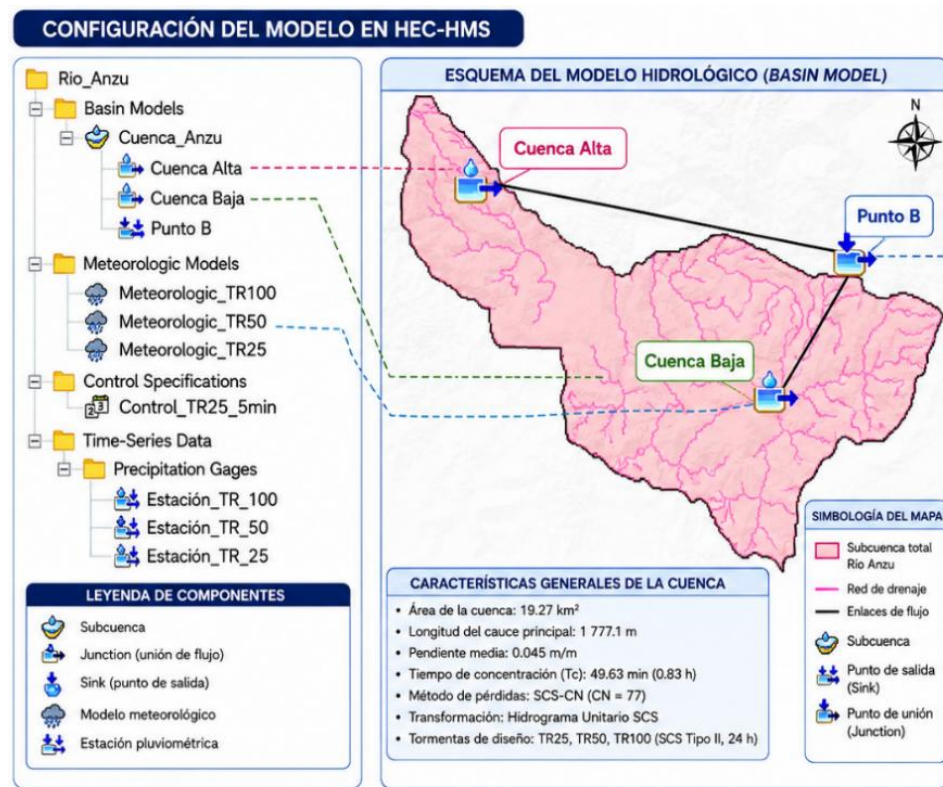
Debido a que la investigación corresponde a un estudio no experimental basado en modelación numérica, no fue necesaria la aplicación de un diseño experimental ni de pruebas estadísticas inferenciales o de comparación múltiple, tales como ANOVA, Tukey o Duncan.

Figura 11. Generación de hietogramas de diseño de precipitación



Fuente: Elaboración del autor mediante Microsoft Excel (2026).

Figura 12. Configuración del modelo hidrológico implementado en HEC-HMS para la cuenca del río Anzu.

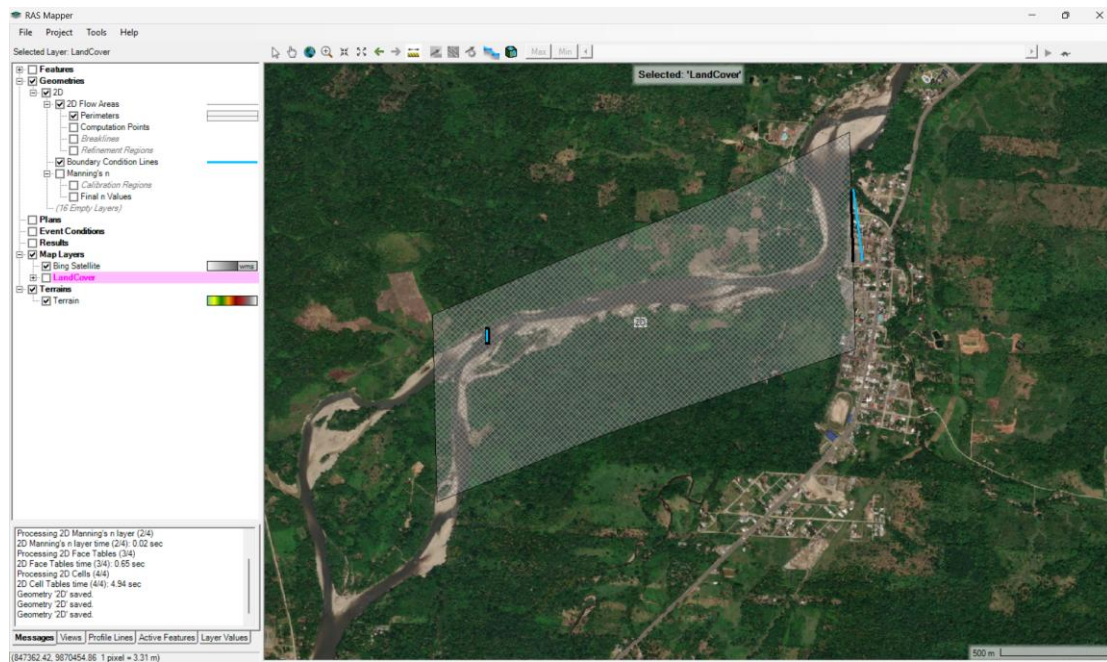


Fuente: Elaboración del autor mediante HEC-HMS 4.13 (2026).

3.5.3 Procesamiento de información hidrodinámico bidimensional en HEC-RAS 2D

Para iniciar la modelación hidrodinámica en HEC-RAS 2D, se verificó la disponibilidad del Modelo Digital del Terreno (MDT) en formato .tif, junto con su archivo de proyección. prj, previamente generados durante el procesamiento geoespacial. Estos archivos fueron incorporados al software como base para la representación de la topografía del área de estudio. Una vez importado el terreno, se procedió a definir el dominio de cálculo mediante la delimitación del área bidimensional, considerando el cauce principal del río Anzu y la planicie de inundación asociada. Posteriormente, se generó la malla computacional utilizando celdas bidimensionales de 10×10 m, resolución seleccionada para representar adecuadamente la geometría del cauce y mejorar la precisión de los resultados de la simulación. En la siguiente figura se podrá visualizar la configuración del modelo en estudio.

Figura 13. Configuración del modelo hidráulico implementado el HEC-RAS para el tramo de estudio A-B



Fuente: Elaboración del autor mediante HEC-RAS 7 (2026).

Con la geometría del modelo correctamente definido, se continuó con la configuración hidrodinámica, la cual comprendió la asignación de los coeficientes de rugosidad de Manning, la definición de las condiciones de frontera, la incorporación de las condiciones iniciales y la ejecución de las simulaciones hidráulicas. Cada uno de estos procedimientos se describe en los apartados siguientes, incluyendo la selección del escenario hidrológico empleado para el análisis hidrodinámico bidimensional.

3.5.3.1 Asignación de coeficientes de rugosidad de Manning

Los coeficientes de rugosidad de Manning fueron asignados en función de las características observadas durante el reconocimiento de campo y de las coberturas de uso y cobertura de la tierra identificadas en la subcuenca del río Anzu. Para ello, se empleó la capa cartográfica de Uso y Cobertura de la Tierra obtenida del Geoportal del Agro Ecuatoriano, elaborada por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), la cual fue procesada en el Sistema de Información Geográfica (QGIS) para delimitar y clasificar las coberturas presentes dentro del área de modelación. Con base en esta información se asignaron los valores de rugosidad correspondientes a cada tipo de cobertura vegetal y uso del suelo, representando de manera más realista la resistencia hidráulica que ejerce la superficie del terreno sobre el flujo. Considerando la predominancia de coberturas boscosas (58.87 %) y áreas agropecuarias (41.10 %), se definieron valores diferenciados de rugosidad para el cauce principal y las distintas

unidades de cobertura presentes en el área de estudio. Los valores adoptados se fundamentaron en rangos recomendados en la literatura especializada para condiciones hidráulicas similares.

Tabla 4. Coeficientes de rugosidad de Manning asignados según la cobertura del suelo

Cobertura	Manning n
Cauce principal	0.035
Bosque	0.080
Área agropecuaria	0.045
Área antrópica	0.030

Fuente: Adaptado de Chow (1959) y aplicado a las condiciones del área de estudio.

La rugosidad hidráulica constituye un parámetro fundamental en la modelación bidimensional, ya que controla la velocidad del flujo, la distribución de los tirantes de agua y la propagación de la inundación, influyendo directamente en la precisión de los resultados obtenidos mediante HEC-RAS 2D.

3.5.3.2 Definición de condiciones de frontera de entrada y salida

Las condiciones de frontera fueron definidas con el propósito de representar adecuadamente el comportamiento hidráulico del sistema durante los eventos de diseño. Como condición de frontera de entrada (upstream) se dispuso de los hidrogramas generados mediante HEC-HMS para los períodos de retorno de 25, 50 y 100 años, los cuales permitieron caracterizar la respuesta hidrológica de la cuenca. Posteriormente, se seleccionó el hidrograma correspondiente al período de retorno de 25 años para el desarrollo de la modelación hidrodinámica bidimensional. Para la condición de frontera de salida (downstream) se definió una condición de pendiente normal, utilizando la pendiente media del cauce de 0,45 %, lo que permitió representar adecuadamente el comportamiento hidráulico aguas abajo y garantizar la estabilidad numérica de la simulación.

3.5.3.3 Simulación hidrodinámica bidimensional

Las simulaciones hidráulicas se desarrollaron en régimen no permanente con el propósito de representar la variación temporal y espacial del flujo dentro del tramo de estudio. Si bien el análisis hidrológico se realizó para los períodos de retorno de 25, 50 y 100 años, la modelación hidrodinámica bidimensional se desarrolló utilizando el escenario correspondiente al período de retorno de 25 años.

La selección de este escenario responde a que constituye una condición de diseño representativa para caracterizar el comportamiento hidráulico del tramo y proporcionar el campo hidrodinámico necesario para la modelación del transporte y dispersión del plomo (Pb), objetivo principal de la presente investigación. A partir de la simulación

en HEC-RAS 2D se obtuvieron variables hidráulicas como profundidad, velocidad media, ancho mojado y dirección del flujo, las cuales fueron empleadas posteriormente como información de entrada para el modelo advectivo–dispersivo.

3.5.3.4 Determinación del tiempo de tránsito hidráulico

El tiempo de tránsito hidráulico se determinó con el propósito de estimar el tiempo requerido por el flujo para recorrer el tramo modelado entre las secciones de control definidas. Para su cálculo se utilizó la longitud del tramo de estudio y la velocidad media del flujo obtenida de los mapas de velocidad generados por HEC-RAS 2D.

La estimación se realizó mediante la relación entre la distancia recorrida y la velocidad media del flujo:

$$t = \frac{L}{V}$$

donde:

t = tiempo de tránsito hidráulico (s)

L = longitud del tramo modelado (m)

V = velocidad media del flujo (m/s)

Para el tramo analizado se consideró una longitud de 1.780 m comprendida entre los puntos de control PA y PB, y una velocidad media del flujo de 1,10 m/s, obtenida de los resultados hidráulicos del escenario correspondiente al período de retorno de 25 años.

Sustituyendo los valores:

$$t = \frac{1780 \text{ m}}{1,10 \text{ m/s}}$$
$$t = 1618 \text{ s}$$

Equivalente a:

$$t = 26,97 \text{ min} = 0,45 \text{ h}$$

Este valor representa el tiempo aproximado requerido por el flujo para desplazarse a través del tramo modelado bajo las condiciones hidráulicas simuladas.

3.5.3.5 Definición del tiempo de simulación hidráulica

El tiempo de simulación hidráulica fue definido considerando la duración del evento hidrológico representado mediante el hidrograma de entrada generado en HEC-HMS y el tiempo requerido para la propagación del flujo dentro del dominio bidimensional.

Debido a que el hidrograma correspondiente al período de retorno de 25 años presenta un tiempo al pico de 12,05 horas, se estableció un tiempo de simulación superior a este valor, permitiendo representar la etapa de ascenso del caudal, la ocurrencia del caudal máximo y la propagación del flujo hacia la sección de salida del tramo modelado.

Adicionalmente, se consideró el tiempo de tránsito hidráulico estimado para el tramo de estudio (0,45 horas), con el propósito de garantizar que la onda hidráulica asociada al evento pudiera desplazarse completamente dentro del dominio de cálculo. En función de estos criterios, se adoptó un tiempo de simulación de 13 horas, suficiente para representar la evolución temporal del flujo y obtener un campo hidrodinámico estable para su posterior utilización en la modelación advectivo–dispersiva del plomo (Pb).

3.5.4 Procesamiento del transporte de plomo (Advection-Dispersion) en Wasp.

Una vez obtenido el campo hidrodinámico mediante HEC-RAS 2D, se realizó la modelación del transporte del plomo (Pb) utilizando el software Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) versión 8.5, mediante el módulo Advanced Toxicant, empleado para analizar el comportamiento y transporte de sustancias tóxicas en sistemas acuáticos. Para la configuración del modelo se incorporaron las concentraciones de plomo obtenidas mediante los análisis de laboratorio, definiendo las condiciones iniciales y de frontera correspondientes al tramo de estudio del río Anzu. Asimismo, se integraron las condiciones hidráulicas generadas por HEC-RAS 2D, tales como velocidad, profundidad, caudal y volumen de agua, las cuales permitieron establecer la dinámica del flujo dentro del dominio de simulación. La simulación del transporte del contaminante se desarrolló considerando los procesos de advección y dispersión longitudinal, utilizando el campo hidrodinámico correspondiente al escenario seleccionado de período de retorno de 25 años. Bajo estas condiciones se evaluó la evolución espacial del plomo y su interacción con las características hidráulicas del tramo modelado.

Para representar adecuadamente el proceso de mezcla y expansión del contaminante dentro del sistema fluvial, fue necesario determinar el coeficiente de dispersión longitudinal (D_x), parámetro requerido por WASP para la simulación del transporte advectivo–dispersivo. La metodología empleada para la determinación del coeficiente de dispersión longitudinal, mediante la ecuación propuesta por Fischer, así como las variables hidráulicas requeridas para su cálculo, se describen en el siguiente apartado.

3.5.4.1 Determinación del coeficiente de dispersión longitudinal

Para representar el proceso de mezcla y expansión del plomo (Pb) en la dirección predominante del flujo, se determinó el coeficiente de dispersión longitudinal (D_x),

parámetro requerido por WASP para simular el transporte advectivo–dispersivo del contaminante dentro del sistema fluvial.

El coeficiente de dispersión longitudinal representa la capacidad del río para distribuir una sustancia disuelta debido a los procesos de mezcla asociados al movimiento del agua, considerando las características hidráulicas y geométricas del cauce. Su estimación se realizó a partir de las condiciones obtenidas mediante la modelación hidrodinámica en HEC-RAS 2D para el escenario seleccionado de período de retorno de 25 años, utilizando variables como la velocidad media del flujo, el ancho mojado, la profundidad hidráulica y la pendiente del tramo. La estimación del coeficiente de dispersión se efectuó mediante la ecuación propuesta por Fischer, expresada como:

$$D_x = 0,011 \frac{U^2 W^2}{H U_*}$$

Donde:

- D_x = coeficiente de dispersión longitudinal (m²/s).
- U = velocidad media del flujo (m/s).
- W = ancho mojado del cauce (m).
- H = profundidad media del flujo (m).
- U_* = velocidad de corte del flujo (m/s).

La velocidad de corte (U_*) fue determinada mediante la relación:

$$U_* = \sqrt{g R_h S}$$

donde:

- g = aceleración de la gravedad (9,81 m/s²).
- R_h = radio hidráulico del cauce (m).
- S = pendiente hidráulica del tramo.

A partir de estas expresiones se obtuvo el coeficiente de dispersión longitudinal correspondiente a las condiciones hidráulicas del escenario analizado, cuyo valor fue posteriormente incorporado en WASP como parámetro de transporte para representar la mezcla del plomo dentro del tramo modelado. Los valores utilizados en el cálculo y el resultado obtenido del coeficiente de dispersión longitudinal se presentan en el apartado de resultados correspondiente.

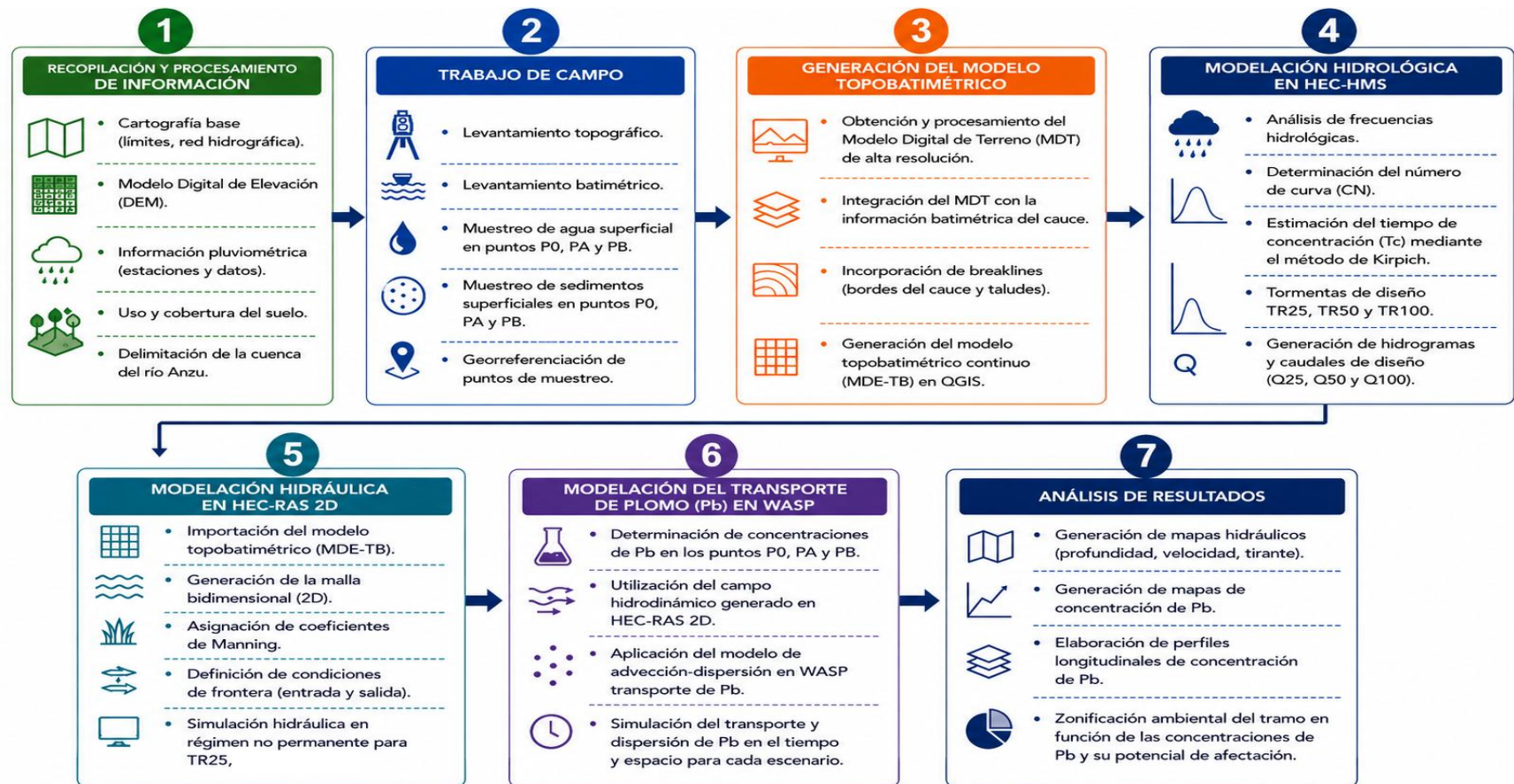
Una vez incorporadas las condiciones hidráulicas provenientes de HEC-RAS 2D, las concentraciones iniciales y de frontera de plomo, el tiempo de simulación y el coeficiente de dispersión longitudinal, se procedió a la ejecución del modelo WASP para simular el transporte advectivo–dispersivo del contaminante. Como resultado, el modelo permitió obtener la distribución espacio_temporal de las concentraciones de plomo a lo largo del tramo A–B del río Anzu, cuyos resultados fueron posteriormente

procesados y representados mediante mapas de dispersión para analizar la evolución del contaminante e identificar las zonas con mayor influencia dentro del área de estudio.

3.5.5 Síntesis del procedimiento metodológico

Concluidas las etapas de procesamiento de la información topográfica, hidrológica, hidráulica y de calidad del agua, se integraron los procedimientos metodológicos desarrollados para la construcción y ejecución del modelo numérico empleado en la presente investigación. La metodología se estructuró de forma secuencial, iniciando con el procesamiento de la información de entrada y continuando con la modelación hidrológica, hidrodinámica y del transporte del contaminante. Cada herramienta computacional desempeñó una función específica dentro del proceso de modelación. En primer lugar, HEC-HMS se utilizó para la modelación hidrológica y la estimación de los caudales de diseño correspondientes a los períodos de retorno de 25, 50 y 100 años. Con base en estos resultados, se seleccionó el escenario correspondiente al período de retorno de 25 años para la modelación hidrodinámica bidimensional en HEC-RAS 2D, obteniéndose variables hidráulicas como la profundidad, la velocidad, el ancho mojado y el campo hidrodinámico del tramo de estudio. Posteriormente, los resultados hidráulicos obtenidos en HEC-RAS 2D constituyeron la información de entrada para WASP, donde se simuló el transporte y la dispersión del plomo (Pb) mediante los procesos de advección y dispersión, permitiendo analizar su comportamiento espacial en el tramo modelado. La Figura 14 presenta el flujo metodológico que resume la secuencia seguida durante la investigación, desde la recopilación y el procesamiento de la información de entrada hasta la obtención de los resultados de la modelación hidrológica, hidrodinámica y del transporte del plomo, los cuales son analizados en el capítulo siguiente.

Figura 14. Flujo metodológico aplicado para la modelación hidrológica, hidráulica y del transporte de plomo (Pb) en el río Anzu.



Fuente: Elaboración del autor (2026)

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados de la modelación hidrológica, hidráulica y del transporte de plomo (Pb)

4.1.1 Resultados del procesamiento hidrológico

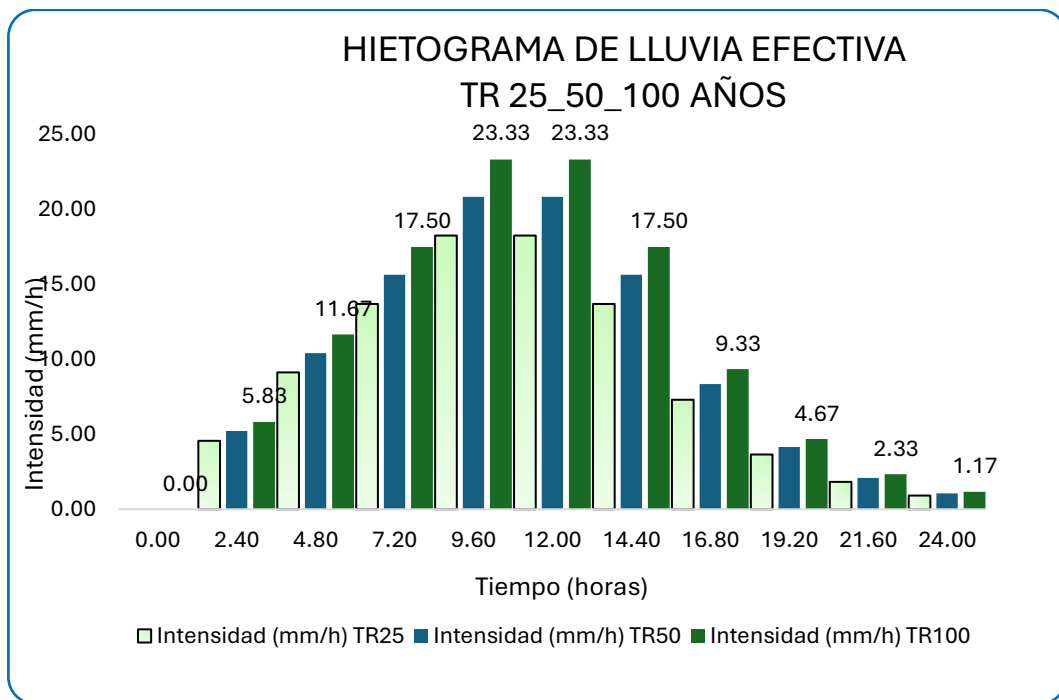
Los caudales de diseño a considerarse son los correspondientes a períodos de retorno de 25, 50 y 100 años, con valores de 159.4, 188.6 y 216.8 m³/s, respectivamente, los cuales se presentan en la tabla 5 y fueron obtenidos mediante la herramienta computacional Hec- HMS. El escenario seleccionado permite evaluar el comportamiento hidráulico del río. Asimismo, en la gráfica 3, se presenta una consolidación de los hietogramas para los tiempos de retorno establecidos los cuales fueron generados en base a la información emitida por HEC-HMS.

Tabla 5. Parámetros hidrológicos en el tramo de estudio (A-B)

Parámetro	Valor
Caudal (T = 25 años)	159.4 m ³ /s
Caudal (T = 50 años)	188.6 m ³ /s
Caudal (T = 100 años)	216.8 m ³ /s
Pendiente	0.45 %
Longitud	1,78 km
Área de aporte de la cuenca	19.27 km ²

Fuente: Elaboración del autor (2026)

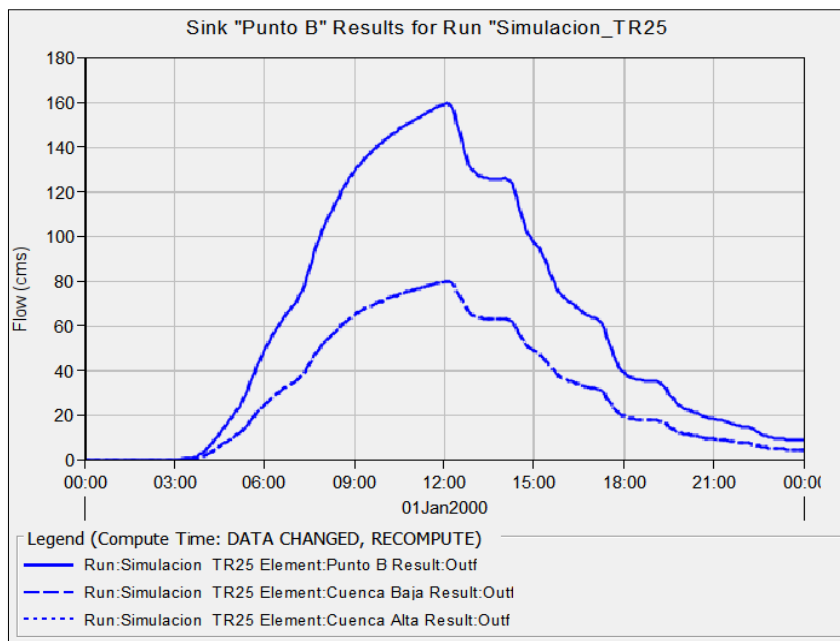
Gráfico 3. Hietogramas de lluvia efectiva para los períodos de retorno de 25, 50 y 100 años generados mediante la distribución temporal SCS Tipo II.



Fuente: Elaboración del autor mediante procesamiento hidrológico en HEC-HMS y hoja de cálculo complementaria (2026).

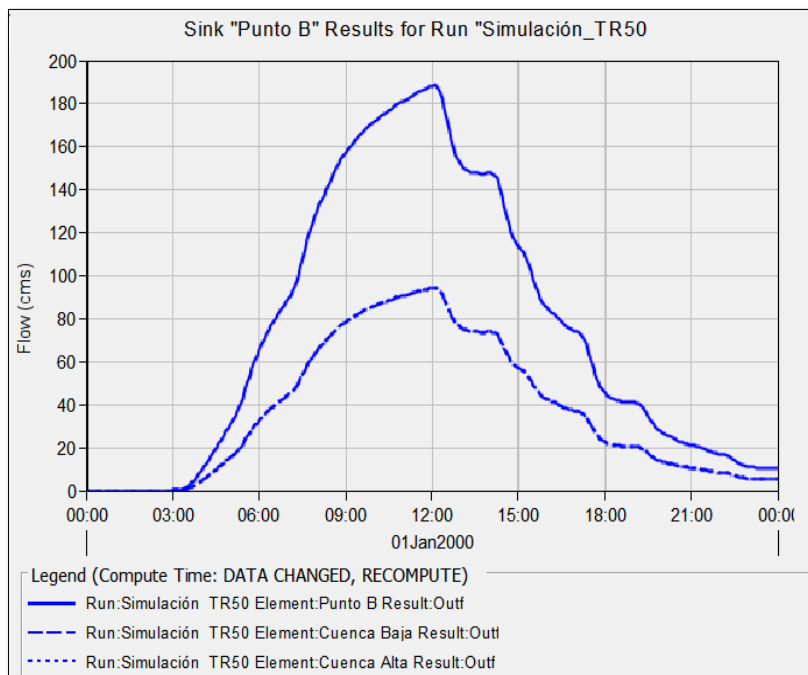
A continuación, se presentan los hidrogramas correspondientes a los períodos de retorno de 25, 50 y 100 años, los cuales representan los escenarios hidrológicos de diseño considerados en la presente investigación. Estos hidrogramas permiten caracterizar la variación temporal del caudal y constituyen la base para la modelación hidráulica del tramo de estudio

Gráfico 4. Hidrograma de salida en el Punto B para un periodo de retorno de 25 años (TR25).



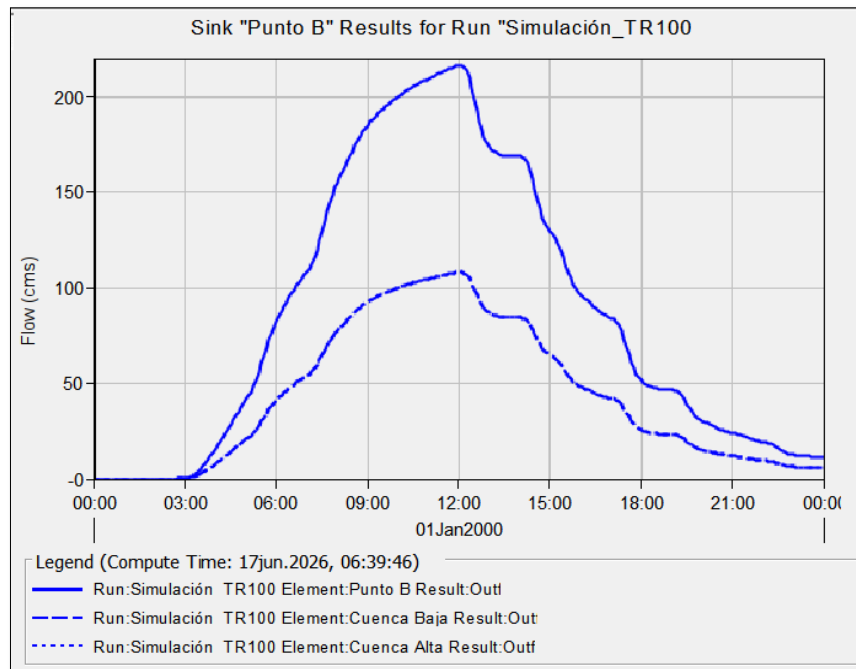
Fuente: Elaboración del autor a partir de simulaciones realizadas en HEC-HMS (2026).

Gráfico 5. Hidrograma de salida en el Punto B para un periodo de retorno de 50 años (TR50).



Fuente: Elaboración del autor a partir de simulaciones realizadas en HEC-HMS (2026).

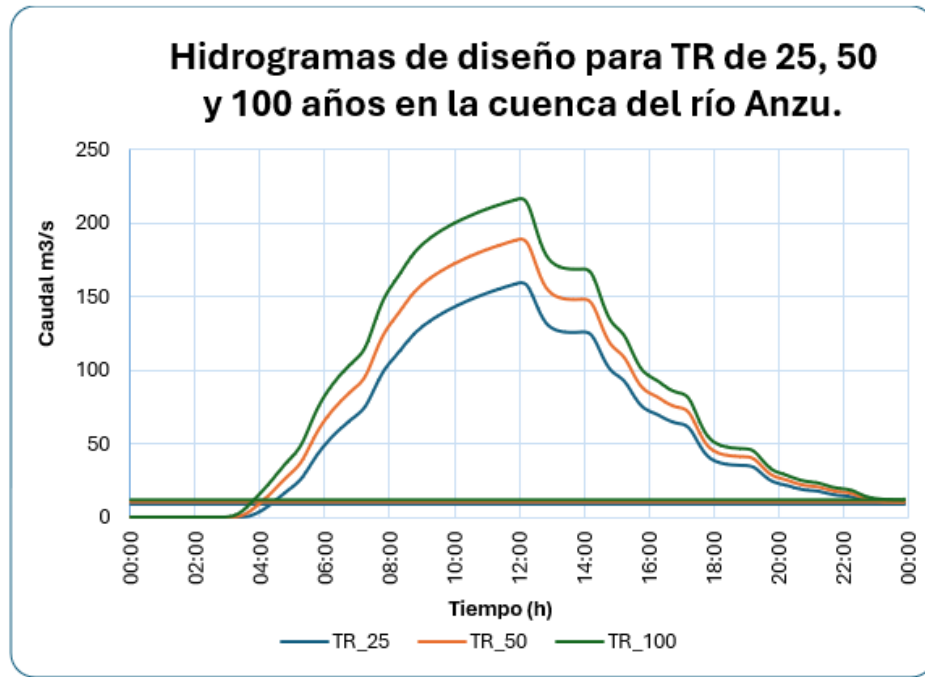
Gráfico 6. Hidrograma de salida en el Punto B para un período de retorno de 100 años (TR100).



Fuente: Elaboración del autor a partir de simulaciones realizadas en HEC-HMS (2026).

Además, se presenta una única gráfica en la que se han fusionado los hidrogramas correspondientes a los períodos de retorno de 25, 50 y 100 años, con el fin de facilitar la comparación del comportamiento hidrológico bajo diferentes escenarios de diseño. Esta representación conjunta permite visualizar la variación de los caudales en el tiempo y analizar de manera integrada las condiciones de mayor magnitud de escorrentía empleadas en la modelación hidráulica del sistema. Así como una tabla en la que se podrá visualizar los resultados hidrológicos obtenidos

Gráfico 7. Comparación de los hidrogramas correspondientes a los tres escenarios de simulación



Fuente: Elaboración del autor a partir de los resultados obtenidos en HEC-HMS 4.13 (2026).

Tabla 6. Resultados hidrológicos obtenidos para los diferentes períodos de retorno

Parámetro	TR 25 años	TR 50 años	TR 100 años
Precipitación máxima (mm)	219,0	250,0	280,0
Caudal pico Qp (m³/s) (Punto B Descarga)	159.4	188.6	216.8
Tiempo al pico Tp (h)	12,05	12,05	12,05

Fuente: Elaboración del autor a partir de simulaciones realizadas en HEC-HMS (2026).

En cuanto a la pendiente del cauce de 0.45 %, esta condiciona la velocidad del flujo y la capacidad de transporte de sedimentos a lo largo del tramo analizado.

La longitud: del tramo evaluado comprende 1,78 km, distancia considerada representativa para analizar el comportamiento hidráulico del río y la influencia de las actividades presentes en el sector.

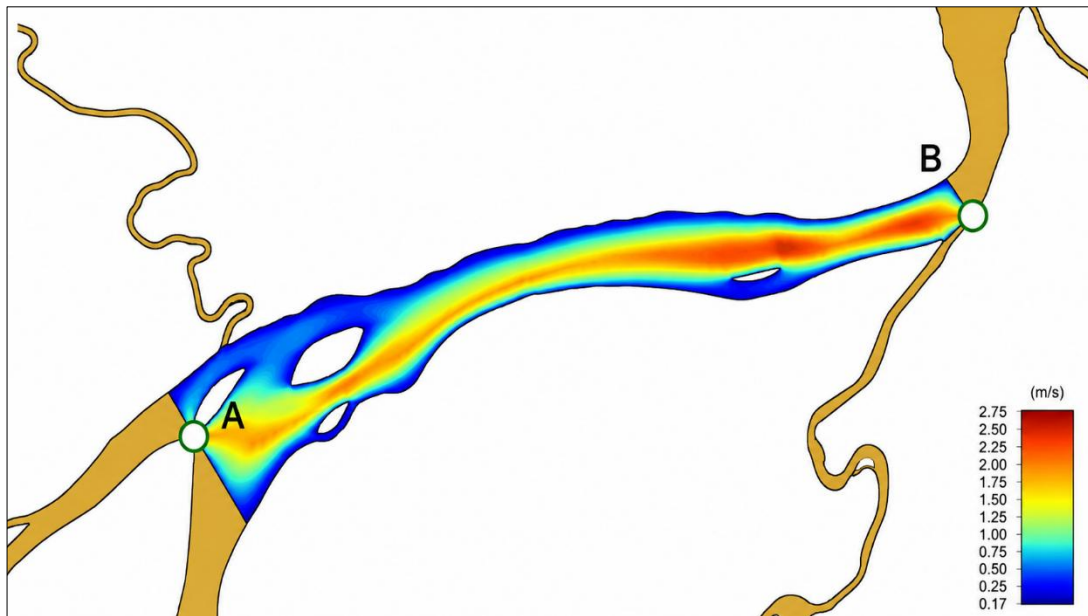
El área de aporte de la cuenca es de 19,27 km² y corresponde a la superficie hidrológica que contribuye con escorrentía hacia el tramo de estudio del río Anzu.

4.1.2 Resultados de la modelación hidrodinámica en HEC-RAS 2D

Los resultados de la modelación hidrodinámica bidimensional presentados en este apartado corresponden al escenario seleccionado de período de retorno $TR = 25$ años, con un caudal de $159,4 \text{ m}^3/\text{s}$. A partir de esta condición hidráulica se analizan las variables de profundidad, velocidad, ancho mojado, dirección del flujo y los tiempos hidráulicos asociados al tramo de estudio.

4.1.2.1 Campo de velocidades.

Figura 15. Distribución espacial de la velocidad del flujo en el tramo A-B del río Anzu, para el caudal de diseño TR_{25} ($Q=159.4 \text{ m}^3/\text{s}$)



Fuente: Elaboración del autor a partir de los resultados obtenidos en HEC-RAS 2D (2026).

La simulación hidráulica bidimensional permitió obtener la distribución espacial de velocidades dentro del tramo de estudio del río Anzu. Para la caracterización del comportamiento hidráulico y la estimación del coeficiente de dispersión longitudinal se seleccionó como condición representativa el escenario correspondiente al periodo de retorno de 25 años ($Q = 159.4 \text{ m}^3/\text{s}$), debido a que representa una condición hidrodinámica significativa del cauce sin considerar eventos extremos asociados a mayores periodos de retorno (50 y 100 años), los cuales corresponden principalmente a análisis de crecidas de mayor magnitud. Los resultados obtenidos mediante HEC-RAS 2D evidencian una variabilidad espacial del campo de velocidades, asociada principalmente a las características geométricas del cauce, variaciones de profundidad y cambios en la capacidad de conducción hidráulica. Las velocidades simuladas para este escenario oscilaron entre 0.17 m/s y 2.75 m/s , observándose los valores más elevados dentro del cauce principal, mientras que las menores velocidades se localizaron en zonas laterales y sectores de expansión del flujo.

Para la estimación del coeficiente de dispersión longitudinal utilizado posteriormente en el modelo WASP, se extrajeron velocidades puntuales del campo hidráulico simulado a lo largo del eje del cauce principal entre los puntos PA y PB (1.78 km). Estos valores permitieron obtener una velocidad hidráulica media representativa del tramo mediante un promedio aritmético, evitando considerar velocidades extremas correspondientes a zonas de baja interacción con el flujo principal o sectores localizados de alta concentración del flujo.

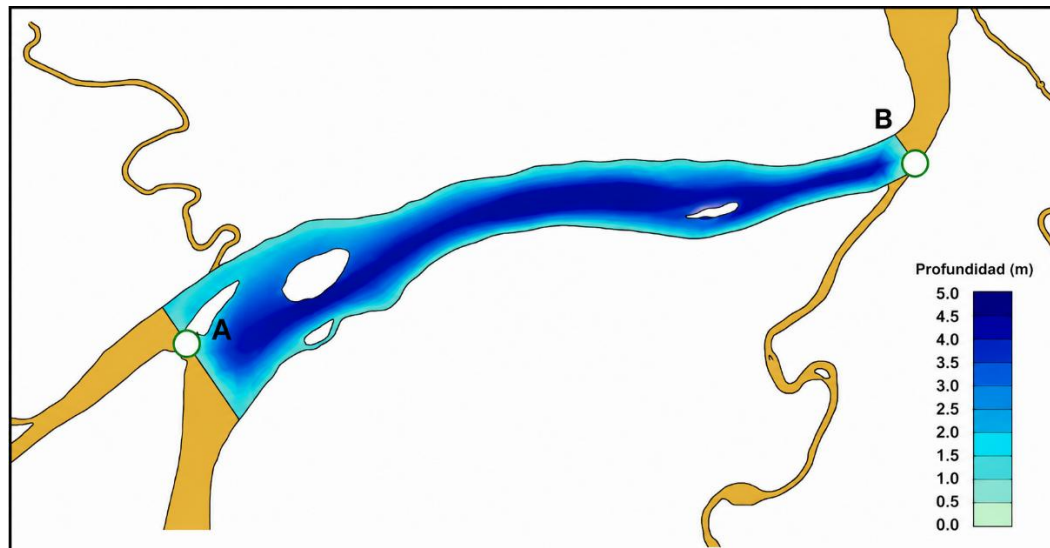
Tabla 7. Determinación de la velocidad promedio para el modelo de dispersión

Ubicación	Punto de evaluación	Velocidad (m/s)
0+000 (PA)	V ₁	1.05
0+440	V ₂	1.15
0+890	V ₃	1.20
1+330	V ₄	1.10
1+778 (PB)	V ₅	1.00
V _{promedio}		1.10

Fuente: Elaboración del autor (2026)

4.1.2.2 Distribución de profundidades.

Figura 16. Distribución espacial de la profundidad del flujo en el tramo A–B del río Anzu, para el caudal de diseño TR25 ($Q=159.4 \text{ m}^3/\text{s}$)



Fuente: Elaboración del autor a partir de los resultados obtenidos en HEC-RAS 2D (2026).

Los resultados obtenidos mediante HEC-RAS 2D para el escenario hidráulico seleccionado correspondiente al periodo de retorno de 25 años ($Q = 159.4 \text{ m}^3/\text{s}$) permitieron caracterizar la distribución espacial de las profundidades dentro del tramo modelado del río Anzu. Las profundidades simuladas variaron entre 0.00 m y 5.00 m, evidenciando una distribución heterogénea asociada a las características geométricas del cauce, las variaciones topográficas del lecho y la capacidad diferencial de conducción del flujo.

Los mayores tirantes hidráulicos se localizaron principalmente en el canal principal y en sectores donde el flujo presenta mayor confinamiento, mientras que las menores profundidades se identificaron hacia las márgenes y zonas de transición del cauce. Este comportamiento responde a la configuración natural del río, donde las variaciones de sección transversal y pendiente generan cambios espaciales en la distribución del tirante hidráulico. Desde el punto de vista del transporte de contaminantes, la distribución de profundidades constituye un parámetro relevante debido a su influencia sobre el volumen de agua disponible, la capacidad de mezcla y el tiempo de residencia del flujo, factores que condicionan los procesos advectivos y dispersivos dentro del sistema fluvial.

Para la estimación de los parámetros hidráulicos requeridos en el análisis de dispersión longitudinal, se seleccionaron valores puntuales de profundidad a lo largo del eje del cauce principal entre los puntos PA y PB, obtenidos a partir del campo espacial de profundidades generado mediante HEC-RAS 2D. Los valores seleccionados fueron promediados para obtener una profundidad hidráulica representativa del tramo, evitando considerar profundidades extremas asociadas a zonas marginales o sectores localizados del cauce, como se ve en la siguiente tabla.

Tabla 8. Determinación de la profundidad hidráulica promedio para el modelo de dispersión

Ubicación	Punto de evaluación	Profundidad (m)
0+000 (PA)	H₁	2.80
0+440	H₂	3.10
0+890	H₃	3.40
1+330	H₄	3.00
1+778 (PB)	H₅	2.70
	H_{promedio}	3.00

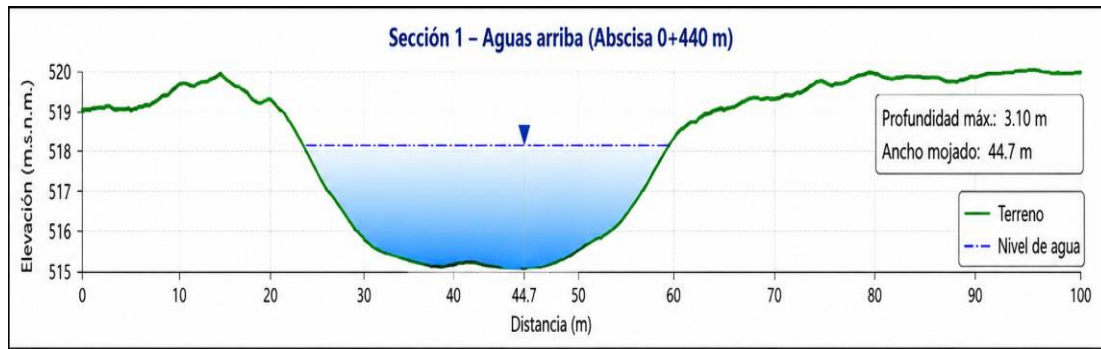
Fuente: Elaboración del autor (2026)

4.1.2.3 Determinación del ancho hidráulico representativo para el modelo de dispersión.

Sección aguas arriba correspondiente al periodo de retorno de 25 años (TR = 25 años)

La sección transversal ubicada en la abscisa 0+440 presenta un ancho mojado de 44,7 m, una profundidad de 3,10 m y una velocidad media de 1,15 m/s. La geometría del cauce evidencia una sección irregular, con taludes laterales relativamente pronunciados y un canal principal bien definido, condiciones que favorecen la concentración del flujo hacia el eje del cauce. Como resultado, se observa una distribución de velocidades acorde con la configuración hidráulica de la sección para el caudal correspondiente al periodo de retorno de 25 años.

Figura 17. Sección transversal hidráulica aguas arriba del tramo A–B del río Anzu (Abscisa 0+440m).

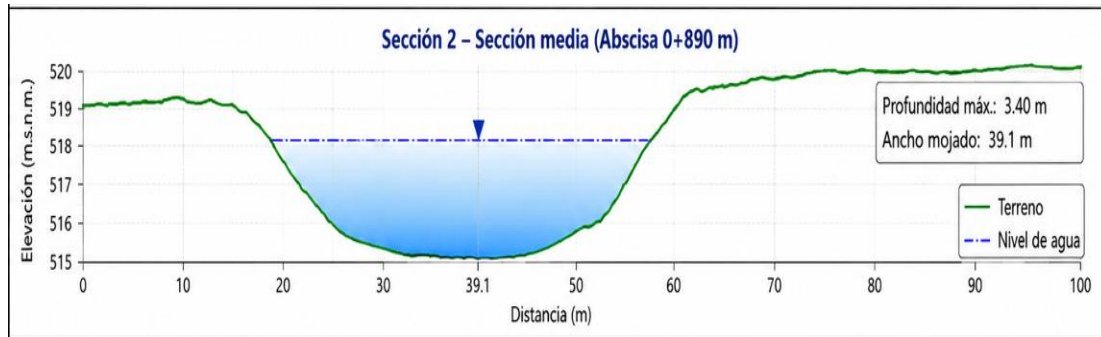


Fuente: Elaboración del autor a partir de los resultados obtenidos en HEC-RAS 2D (2026).

Sección media correspondiente al periodo de retorno de 25 años (TR = 25 años)

La sección transversal localizada en la parte media del tramo, en la abscisa 0+890, presenta un ancho mojado de 39,1 m, una profundidad de 3,40 m y una velocidad media de 1,20 m/s. La geometría del cauce se caracteriza por una sección relativamente más estrecha y profunda, con taludes de pendiente moderada y un fondo relativamente uniforme, condiciones que favorecen una mayor concentración del flujo en el canal principal. En consecuencia, esta sección registra la mayor velocidad del tramo analizado, asociada a la reducción del ancho hidráulico y al incremento de la profundidad.

Figura 18. Sección transversal hidráulica aguas arriba del tramo A–B del río Anzu (Abscisa 0+890m).

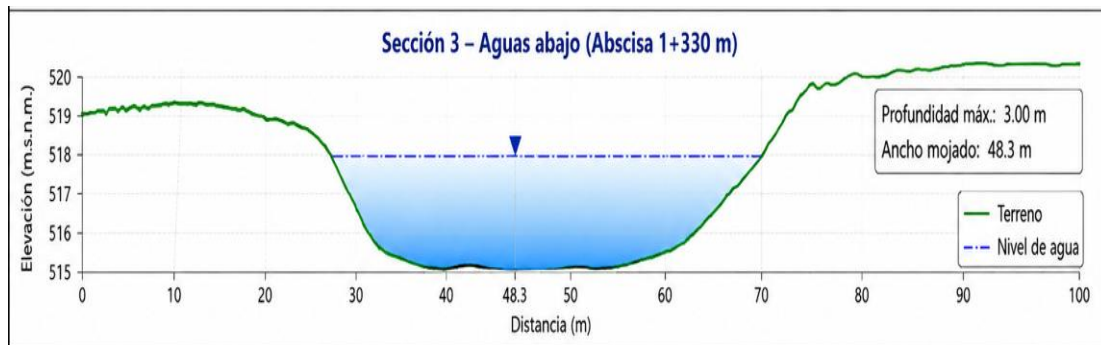


Fuente: Elaboración del autor a partir de los resultados obtenidos en HEC-RAS 2D (2026).

Sección aguas abajo correspondiente al periodo de retorno de 25 años (TR = 25 años)

La sección transversal ubicada aguas abajo, en la abscisa 1+330, presenta un ancho mojado de 48,3 m, una profundidad de 3,00 m y una velocidad media de 1,10 m/s. La geometría del cauce difiere de las secciones anteriores, evidenciando una mayor apertura de la sección hidráulica y taludes laterales de mayor inclinación. Estas características favorecen una distribución más uniforme del flujo, reflejada en una ligera disminución de la velocidad respecto a la sección media, manteniendo condiciones de flujo estables para el caudal correspondiente al periodo de retorno de 25 años.

Figura 19. Sección transversal hidráulica aguas arriba del tramo A–B del río Anzu (Abscisa 1+330 m).



Fuente: Elaboración del autor a partir de los resultados obtenidos en HEC-RAS 2D (2026).

La comparación entre las tres secciones transversales evidencia las variaciones geométricas e hidráulicas presentes a lo largo del tramo modelado, reflejadas en cambios del ancho del cauce, la profundidad, la pendiente de los taludes y la distribución de velocidades. Estas diferencias condicionan el comportamiento del flujo,

influyendo directamente en los procesos de transporte, mezcla y dispersión de los contaminantes dentro del sistema fluvial.

Tabla 9. Determinación del ancho hidráulica promedio para el modelo de dispersión

Sección	Ubicación	Ancho hidráulico (m)
0+440 (S1)	Aguas arriba	44.7
0+890 (S2)	Zona media	39.1
1+330 (S3)	Aguas abajo	48.3
W promedio		44.0

Fuente: Elaboración del autor (2026)

"A continuación, se presenta la ubicación de las tres secciones transversales seleccionadas para el análisis hidráulico del tramo modelado. Estas secciones, identificadas como S1, S2 y S3, corresponden a las abscisas 0+440, 0+890 y 1+330, respectivamente, y permiten evaluar las variaciones de la geometría del cauce y de las principales variables hidráulicas a lo largo del río."

Figura 20. Ubicación de las secciones transversales analizadas en el tramo de estudio



Fuente: Elaboración del autor (2026)

4.1.2.4 Tiempo de tránsito

El tiempo de tránsito hidráulico obtenido para el escenario seleccionado de **TR = 25 años** fue de aproximadamente **0,45 horas (27 minutos)**. Este valor representa el tiempo estimado que requiere el flujo para desplazarse desde la sección inicial **PA** hasta

la sección final PB del tramo modelado de 1,78 km, considerando una velocidad media del flujo de 1,10 m/s obtenida a partir del campo de velocidades generado por HEC-RAS 2D. Este resultado indica que, bajo las condiciones hidráulicas simuladas, el flujo presenta una capacidad de transporte que permite recorrer el tramo de estudio en un periodo inferior a una hora, constituyendo un parámetro de referencia para el análisis posterior del transporte y dispersión del plomo (Pb) dentro del sistema fluvial.

4.1.2.5 Tiempo de simulación

Para el escenario seleccionado de TR = 25 años, el tiempo de simulación hidráulica adoptado fue de 13 horas. Este periodo permitió representar la evolución temporal del evento de avenida, incluyendo la etapa de incremento del caudal, la ocurrencia del caudal máximo asociado al hidrograma de entrada y la propagación del flujo a través del tramo modelado hasta la sección de salida. La duración de la simulación permitió obtener un campo hidrodinámico representativo del comportamiento del río Anzu, considerando la respuesta temporal del flujo y las condiciones hidráulicas generadas por el evento analizado. Los resultados obtenidos durante este periodo fueron utilizados posteriormente como información de entrada para la modelación advectivo–dispersiva del plomo (Pb) mediante WASP.

Tabla 10. Condiciones hidráulicas del escenario seleccionado para la modelación hidrodinámica bidimensional

Parámetro	Valor
Período de retorno seleccionado	25 años
Caudal de entrada	159,4 m ³ /s
Velocidad media del flujo	1,10 m/s
Longitud del tramo modelado	1,78 km
Tiempo de tránsito hidráulico	0,45 h (27 min)
Tiempo de simulación	13 h

Fuente: Elaboración del autor (2026)

4.1.3 Resultados de la modelación del transporte de plomo

En la presente investigación, el plomo (Pb) fue empleado como contaminante indicador para evaluar los procesos de transporte y dispersión en el tramo de estudio del río Anzu. La modelación del transporte mediante WASP requirió como datos de entrada los parámetros hidráulicos obtenidos previamente a partir de la simulación bidimensional realizada con HEC-RAS 2D, entre ellos la velocidad media del flujo, la profundidad hidráulica promedio, el ancho hidráulico representativo y el coeficiente de dispersión longitudinal. Adicionalmente, se incorporaron las concentraciones de plomo determinadas en agua y sedimentos durante la campaña de monitoreo, las cuales

constituyeron las condiciones iniciales y de referencia para la simulación del transporte del contaminante.

4.1.3.1 Determinación del coeficiente de dispersión longitudinal

Con base en las condiciones hidráulicas obtenidas mediante la modelación hidrodinámica bidimensional en HEC-RAS 2D para el escenario seleccionado de TR = 25 años ($Q = 159,4 \text{ m}^3/\text{s}$), se determinó el coeficiente de dispersión longitudinal representativo del tramo analizado. Los parámetros hidráulicos promedio obtenidos del tramo PA–PB fueron:

Tabla 11. Parámetros hidráulicos utilizados para la estimación del coeficiente de dispersión longitudinal

Parámetro	Valor
Velocidad media del flujo	1,10 m/s
Ancho mojado promedio	44,0 m
Profundidad media	3,00 m
Pendiente longitudinal del cauce	0,0045
Radio hidráulico	2,64 m
Velocidad de corte	0,34 m/s

Fuente: Elaboración del autor (2026)

A partir de estos valores se obtuvo un coeficiente de dispersión longitudinal de:

$$D_x = 25,26 \text{ m}^2/\text{s}$$

El coeficiente de dispersión longitudinal obtenido fue de $D_x = 25,26 \text{ m}^2/\text{s}$. De acuerdo con **Fischer et al. (1979)**, este valor se encuentra dentro del orden esperado para un río natural de tamaño medio, considerando que los coeficientes de dispersión presentan una amplia variabilidad según las características hidráulicas y geométricas del cauce. Por tanto, el valor obtenido no corresponde a una condición de dispersión baja ni excesiva, sino a un rango coherente con las condiciones del tramo analizado.

4.1.3.2 Resultados del plomo en agua y sedimentos

✓ Plomo en agua

El laboratorio reportó oficialmente concentraciones de plomo inferiores al límite de cuantificación del método analítico ($< 0,005 \text{ mg/L}$) en todos los puntos de monitoreo. No obstante, para la implementación del modelo numérico se emplearon las respuestas instrumentales proporcionadas por el laboratorio, las cuales representan la señal

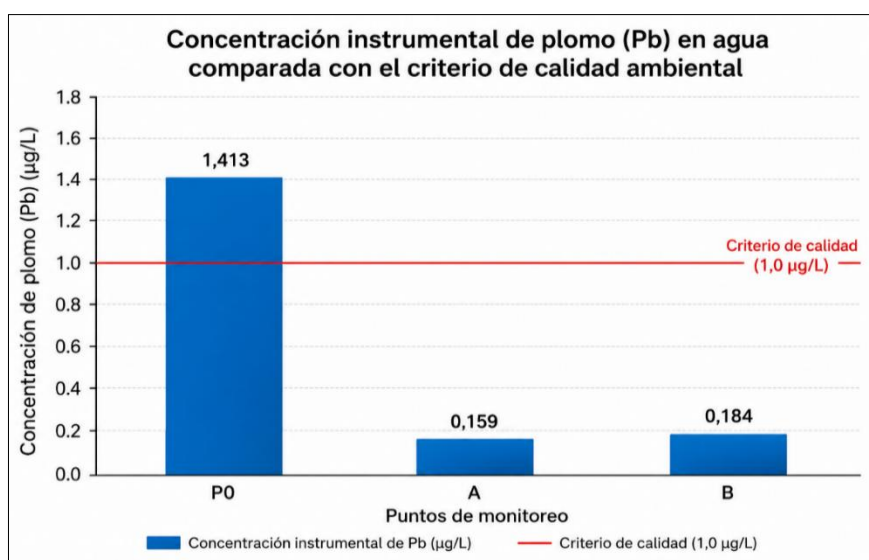
analítica registrada por el equipo, aunque no constituyen resultados cuantificados dentro del alcance acreditado del método. Los valores instrumentales fueron utilizados exclusivamente como condición inicial y de referencia para la simulación del transporte y la dispersión del plomo en el modelo hidrodinámico, permitiendo analizar la distribución espacial y las tendencias del contaminante en el río Anzu. En consecuencia, dichos valores no se emplearon para establecer el cumplimiento o incumplimiento de los criterios de calidad ambiental, ya que esta evaluación solo puede realizarse con resultados oficialmente cuantificados por el laboratorio. La Tabla X presenta tanto el resultado oficial reportado por el laboratorio como los valores instrumentales empleados en la modelación, diferenciando claramente el alcance de cada uno.

Tabla 12. Concentración de plomo en agua en los puntos de monitoreo

Puntos de monitoreo	Resultado oficial del laboratorio (mg/L)	Resultado instrumental (µg/L)	Equivalente utilizado en la modelación (mg/L)	Criterio de calidad (mg/L)
PO	< 0,005	1,413	0,001413	≤ 0,001
A	< 0,005	0,159	0,000159	≤ 0,001
B	< 0,005	0,184	0,000184	≤ 0,001

Fuente: Elaboración del autor (2026)

Gráfico 8. Resultados de concentración de plomo en agua en puntos de monitoreo.



Fuente: Elaboración del autor (2026)

Tabla 13. Concentración de plomo (Pb) en los puntos de monitoreo del río Anzu

Punto	Distancia parcial (m)	Distancia acumulada (m)	Concentración de Pb (mg/L)	Concentración Relativa Pb	Atenuación respecto a P0
P0	0	0	0.001413	100%	
PA	8146	8146	0.000159	11.25%	88.75%
PB	1777	9923	0.000184	13.02%	86.98%

Fuente: Elaboración del autor (2026)

✓ Plomo en sedimentos

En cuanto a la concentración de plomo en sedimentos se debe recalcar que en Ecuador no existe un límite oficial para metales pesados en sedimentos fluviales dentro de la normativa nacional. Por ello, la mayoría de las investigaciones científicas ecuatorianas (incluyendo los estudios de IKIAM y Capparelli et al.) utilizan las Canadian Sediment Quality Guidelines (CCME), que son una referencia internacional ampliamente aceptada.

Los valores para plomo (Pb) son:

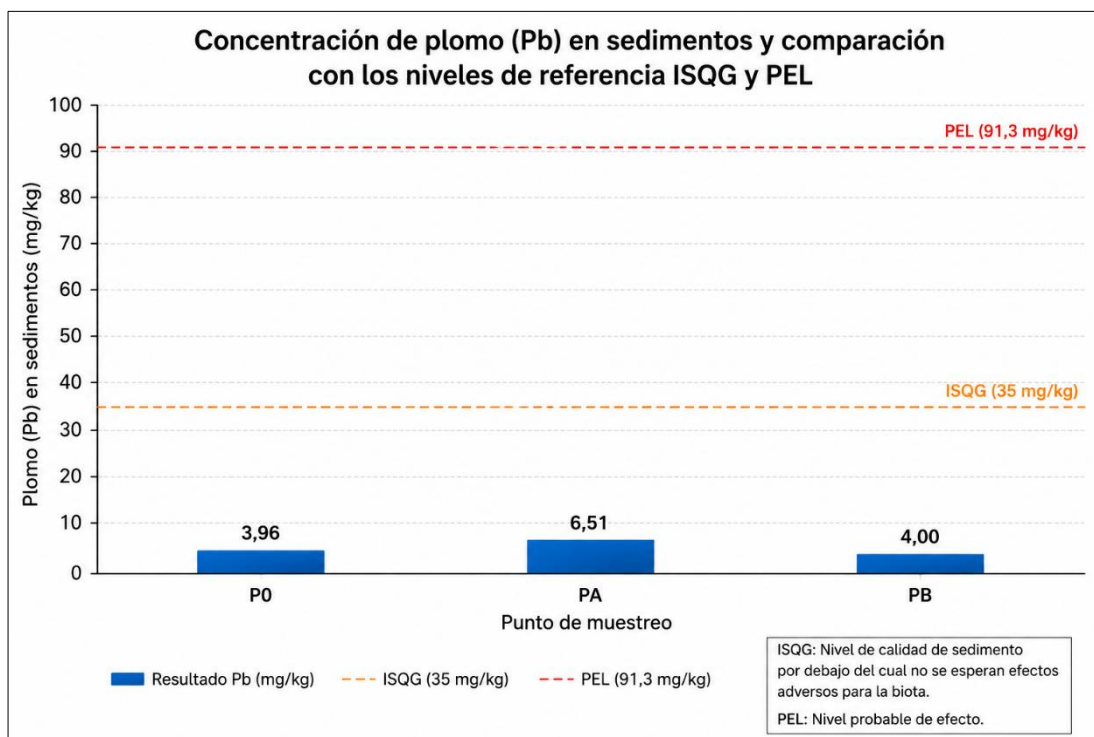
Tabla 14. Resultados de concentración de plomo en sedimentos

Punto	Resultado Pb (mg/kg)	GUIAS DE CALIDAD		Interpretación
		ISQG (35 mg/kg)	PEL (91,3 mg/kg)	
P0	3,96	Cumple	Cumple	Concentración muy inferior al nivel de riesgo.
PA	6,51	Cumple	Cumple	Concentración baja, sin riesgo esperado para la biota.
PB	4,00	Cumple	Cumple	Concentración baja, sin riesgo esperado para la biota.

Fuente: Elaboración del autor (2026)

Los análisis de sedimentos evidenciaron concentraciones de plomo comprendidas entre 3,96 y 6,51 mg/kg, valores significativamente inferiores al criterio internacional ISQG (35 mg/kg) establecido por el Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). En consecuencia, no se prevén efectos adversos sobre la biota acuática asociados a la concentración de plomo presente en los sedimentos del tramo evaluado del río Anzu. Esta diferencia es coherente desde el punto de vista ambiental. El plomo puede encontrarse temporalmente en la columna de agua sin que todavía se haya acumulado en cantidades significativas en los sedimentos, o bien las concentraciones históricas no han sido suficientes para generar acumulación por encima de los valores guía. Asimismo, se presenta las gráficas y tablas donde se puede visualizar los resultados entregados.

Gráfico 9. Resultados de concentración de plomo en sedimentos



Fuente: Elaboración del autor (2026)

Los resultados obtenidos en los análisis de agua y sedimentos permitieron evaluar la presencia de plomo (Pb) dentro del sistema hídrico Yurasyacu–Anzu y establecer una línea base de calidad ambiental para el tramo de estudio.

En las muestras de agua superficial, la mayor concentración de plomo fue registrada en el punto P0, alcanzando un valor de 0.001413 mg/L, mientras que la menor concentración se observó en el punto PA, con un valor de 0.000159 mg/L. Este comportamiento evidencia un gradiente decreciente de concentración a medida que el

contaminante se desplaza aguas abajo desde el punto de emisión, lo que sugiere la existencia de procesos de transporte, mezcla y dispersión del contaminante a lo largo del sistema fluvial. El resultado de P0 permite evaluar la influencia de las actividades mineras auríferas identificadas en la zona y su aporte potencial de plomo hacia el sistema hídrico estudiado.

Respecto a los sedimentos superficiales, la concentración máxima de plomo fue registrada en el punto PA, alcanzando un valor de 6.51mg/kg, mientras que en el punto P0 se obtuvo una concentración de 3.96 mg/kg. Estos resultados indican que el plomo presenta una mayor acumulación en los sedimentos del tramo aguas abajo del punto de emisión, como consecuencia de los procesos de transporte, deposición y retención del contaminante en el lecho del río, evidenciando la capacidad de los sedimentos para actuar como reservorios naturales de metales pesados dentro del sistema acuático.

4.1.3.3 Comportamiento advectivo-dispersivo del transporte del plomo en el tramo de estudio

Se observa una reducción significativa de la concentración entre el punto de emisión P0 y el tramo de estudio, seguida de variaciones menores entre las estaciones de control PA y PB, asociadas a las condiciones de transporte y mezcla del flujo dentro del tramo analizado. Este comportamiento coincide con la distribución espacial obtenida mediante los mapas de dispersión generados por el modelo WASP. El transporte del contaminante estuvo dominado por el proceso de advección, asociado a la velocidad media del flujo obtenida mediante HEC-RAS 2D para el escenario seleccionado de TR = 25 años, permitiendo representar el desplazamiento del plomo en la dirección principal de la corriente.

La dispersión longitudinal del contaminante fue representada mediante el coeficiente obtenido para las condiciones hidráulicas del tramo:

$$D_x = 25,26 \text{ m}^2/\text{s}$$

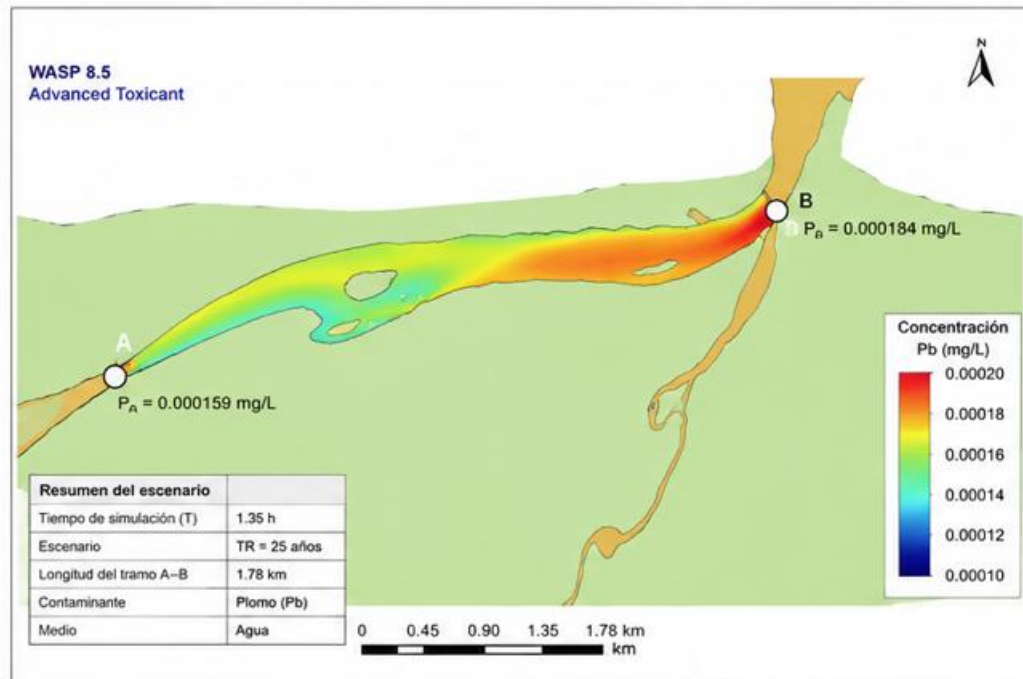
Este valor fue incorporado en WASP para simular la evolución espacial del contaminante dentro del tramo A–B del río Anzu. La interacción entre los procesos de advección y dispersión permitió representar la disminución progresiva de las concentraciones y la distribución del plomo a lo largo del sistema fluvial.

4.1.3.4 Concentración de plomo para T = 25 años

La Figura 20 presenta la distribución espacial de la concentración de plomo (Pb) en el tramo A–B del río Anzu para el escenario hidráulico correspondiente al período de retorno de 25 años. Los resultados obtenidos corresponden al tiempo de simulación adoptado de 13 horas, definido para representar la evolución del evento hidráulico y el transporte del contaminante dentro del dominio modelado.

Se observa que las concentraciones presentan una distribución espacial condicionada por los procesos de transporte advectivo–dispersivo del flujo, evidenciando la evolución del plomo a lo largo del tramo analizado.

Figura 21. Concentración de plomo en agua (mg/L) para un TR=25 años



Fuente: Elaboración del autor (2026)

La variación observada entre las concentraciones de plomo en las secciones PA (0,000159 mg/L) y PB (0,000184 mg/L) no está asociada a la incorporación de nuevas fuentes contaminantes dentro del tramo analizado, debido a que no se identificaron aportes adicionales entre ambos puntos. Este comportamiento corresponde a la redistribución espacial del contaminante producto de los procesos de transporte y mezcla representados en el modelo WASP.

En la zona próxima a la sección PB, las condiciones hidráulicas obtenidas mediante HEC-RAS 2D presentan una velocidad media de 1,10 m/s, un ancho mojado de 48,3 m y una profundidad aproximada de 3,00 m. Estas características geométricas e hidráulicas condicionan la distribución del flujo y los procesos de mezcla longitudinal, generando variaciones locales en la concentración del contaminante dentro del tramo modelado.

Por lo tanto, el incremento puntual de concentración observado entre PA y PB no representa un aumento de la carga contaminante, sino una respuesta del modelo asociada al transporte advectivo–dispersivo del plomo bajo las condiciones hidráulicas del escenario seleccionado.

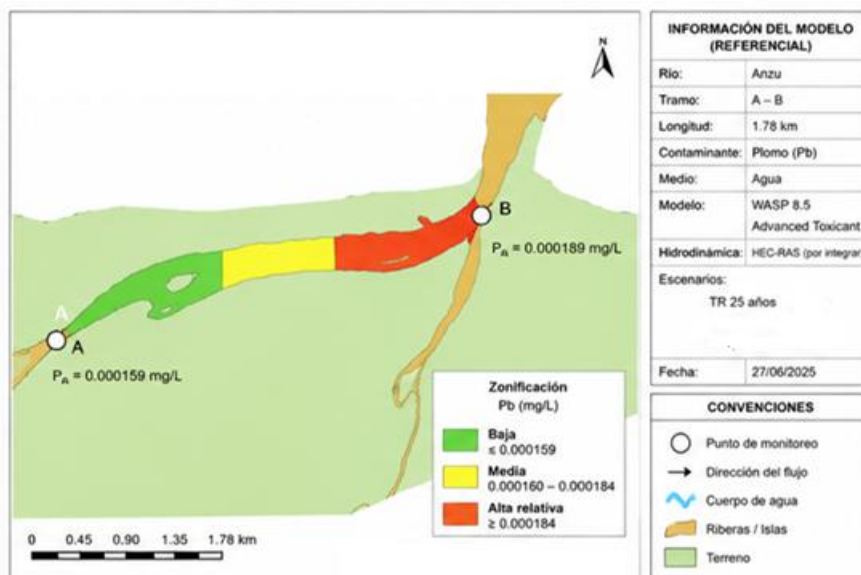
4.1.3.5 Zonificación espacial de la contaminación

La Figura 23 presenta la distribución espacial de las concentraciones de plomo (Pb) obtenidas mediante la modelación del transporte del contaminante en el tramo del río Anzu comprendido entre los puntos A y B. Los resultados evidencian que el punto P0, localizado aguas arriba y fuera del dominio de modelación, corresponde a la condición inicial de mayor concentración empleada en la simulación. A partir de este punto se observa una reducción de las concentraciones hacia el tramo modelado, asociada a los procesos de advección, dispersión y mezcla que gobiernan el transporte del contaminante dentro del sistema fluvial.

La mayor concentración inicial considerada en el modelo corresponde a la zona de influencia de posibles aportes asociados a actividades mineras desarrolladas en la cuenca, desde donde el plomo puede incorporarse al sistema acuático. Al ingresar al tramo de modelación, la concentración disminuye entre P0 y A debido al efecto combinado de la mezcla hidráulica y los procesos de transporte que favorecen la redistribución del contaminante dentro de la masa de agua. Dentro del tramo A–B se observa una variación de las concentraciones, registrándose un ligero incremento en el punto B respecto al punto A. Este comportamiento no representa la incorporación de una nueva fuente contaminante, sino una respuesta asociada a la dinámica espacial del flujo, donde las variaciones de velocidad, profundidad y geometría del cauce modifican los procesos de mezcla y dispersión del plomo. En consecuencia, la zonificación obtenida refleja un comportamiento no lineal de la distribución del contaminante, condicionado por las características hidráulicas del sistema fluvial.

Cabe señalar que las concentraciones empleadas en la modelación corresponden a valores instrumentales obtenidos mediante análisis de laboratorio y utilizados como datos de entrada para la simulación del transporte del contaminante. Por tanto, los resultados se interpretan únicamente como una representación de la distribución espacial y dinámica de dispersión del plomo dentro del tramo analizado, sin emplearse para determinar el cumplimiento o incumplimiento de criterios de calidad ambiental.

Figura 22. Zonificación espacial de la contaminación (Pb) en agua



Fuente: Elaboración del autor (2026)

4.2 Discusión de resultados y análisis del comportamiento espacial del contaminante

La comparación entre los resultados obtenidos en el presente estudio (2026) y los reportados por IKIAM en el año 2021 permite evidenciar cambios significativos en la calidad del agua del río Anzu. Ambos estudios fueron realizados en condiciones estacionales similares (meses de mayo–junio), lo que reduce la influencia de la variabilidad climática y permite atribuir las diferencias principalmente a factores espaciales y antrópicos

Tabla 15. Comparación de parámetros de calidad de agua del río Anzu entre los estudios de 2021 (IKIAM) y 2026 (AQLAB)

Parámetro	Unidad	Criterio de calidad	Observación	IKIAM_P6 (Mayo 2021)	AQLAB (Junio 2026)		
					P0	PA	PB
pH	Unidades	6,5 – 9,0	Rango permitido.	6.8	6.05	6.02	6
Turbiedad	NTU	No establece criterio	Se analiza como indicador de alteración física del	1457	17.3	118.8	35.9
Conductividad eléctrica	µS/cm	No establece criterio	Se usa como indicador de mineralización y presencia de sales.	45.8	30.9	6.68	28.5
Temperatura	°C	No incrementar más de 3 °C respecto a la condición	Debe protegerse la vida acuática.	29.2	28.5	28.9	29
Oxígeno disuelto_OD	mg/L	≥ 5,0	Valor mínimo para la protección de organismos acuáticos.		6.29	5.19	6.6
Saturación de oxígeno OD (% saturación)	%	No establece criterio	Indicador complementario del estado del río.	76.6	75.2	61.1	77.5
Sólidos Suspendidos Totales SST	mg/L	No establece criterio	Se utilizan para evaluar erosión y sedimentación.	953	179	18.3	31.25
DQO	mg/L	No establece criterio	Indicador complementario de contaminación		< 25	< 25	< 25
Plomo (Pb)	mg/L	≤ 0,001	Protección de la vida acuática.	0.018	0.001413	0.000159	0.000184

Fuente: Elaboración del autor (2026)

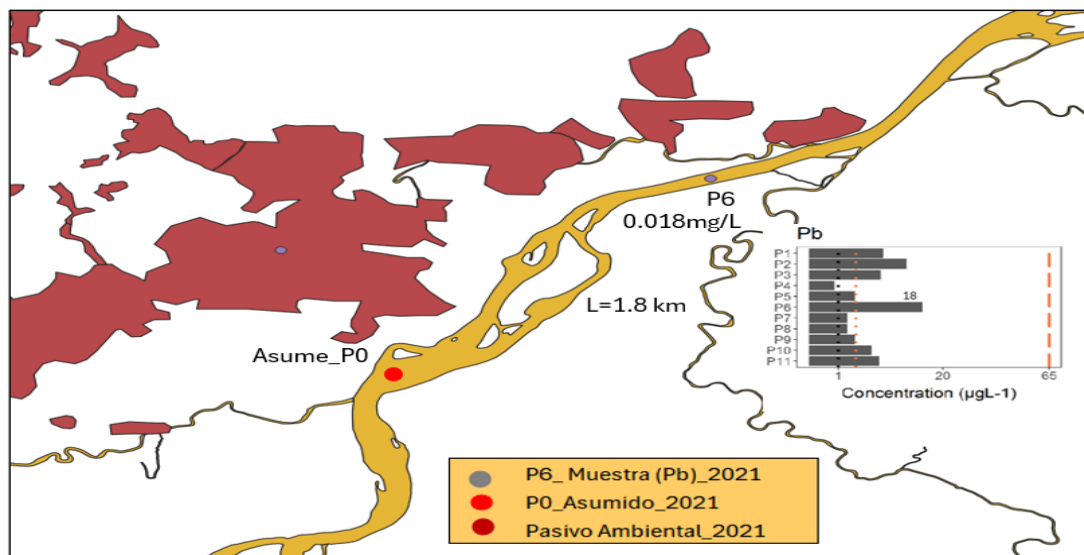
A partir de la tabla comparativa se observa que los parámetros físicos muestran una disminución general de la carga de material particulado en el tramo analizado en 2026. La turbiedad y los sólidos suspendidos totales (SST) presentan una reducción considerable respecto a los valores reportados en 2021, cuando se registraron condiciones altamente alteradas aguas abajo del punto de muestreo P6. Este comportamiento sugiere un proceso de atenuación natural del sistema fluvial, asociado a la dilución, sedimentación y menor aporte de material sólido en la actualidad. En cuanto a los parámetros fisicoquímicos, el pH se mantiene dentro del rango permitido en ambos periodos, evidenciando estabilidad del sistema en términos de acidez. El oxígeno disuelto en 2026 presenta valores adecuados para la vida acuática en todos los puntos, lo que contrasta con la condición de mayor estrés reportada en estudios previos. Asimismo, la DQO se mantiene baja (< 25 mg/L), lo que indica ausencia de incrementos significativos de carga orgánica en el tramo analizado.

El plomo (Pb) constituye el parámetro de mayor relevancia dentro del análisis comparativo de la calidad del agua del río Anzu, debido a su comportamiento como metal pesado persistente y su alta toxicidad para los ecosistemas acuáticos. En este contexto, la concentración de plomo determinada en la presente investigación al ingreso al punto de modelación fue de 0,000159 mg/L, valor considerablemente inferior al reportado en el estudio de referencia correspondiente al año 2021 (0,018

mg/L), realizado por IKIAM. Esta diferencia representa una reducción aproximada del 99,12 % respecto a la concentración informada en dicho periodo.

Mediante el análisis espacial realizado en QGIS se estimó que el punto de muestreo del estudio de referencia se encontraba aproximadamente a 1,8 km del pasivo ambiental más cercano, mientras que el punto A evaluado en la presente investigación se localiza a 8,1 km como se ve en la Figura 24. Esta diferencia en la distancia podría favorecer procesos naturales de dilución, dispersión, adsorción y sedimentación durante el transporte fluvial de los metales pesados, contribuyendo a la disminución de su concentración. Sin embargo, esta variación no puede atribuirse exclusivamente a la distancia, ya que también pueden influir factores como las condiciones hidrológicas del río, las diferencias temporales entre los muestreos (2021 y 2026), la intensidad de la actividad minera y la dinámica de transporte de sedimentos, aspectos ampliamente descritos en la literatura científica.

Figura 23. Ubicación espacial de los puntos de muestreo y fuente de contaminación en el río Anzu (Estudio IKIAM, 2021)



Fuente: Elaboración del autor (2026)

En este contexto, el comportamiento del plomo en el tramo de estudio estuvo condicionado por los procesos de transporte hidrodinámico de tipo advectivo y dispersivo, asociados a las condiciones hidráulicas obtenidas mediante la modelación bidimensional para el escenario seleccionado de período de retorno de 25 años. La advección constituyó el mecanismo principal de desplazamiento del contaminante en dirección aguas abajo, en función de la velocidad media del flujo obtenida mediante HEC-RAS 2D (1,10 m/s). Complementariamente, el proceso de dispersión longitudinal permitió representar la expansión espacial del contaminante dentro de la masa de agua,

incorporando un coeficiente de dispersión de $D_x = 25,26 \text{ m}^2/\text{s}$, determinado a partir de las características hidráulicas del tramo analizado.

La interacción entre estos procesos explica la distribución espacial del plomo obtenida mediante WASP, donde las variaciones de concentración responden a la dinámica del flujo, la geometría del cauce y las condiciones de mezcla presentes dentro del tramo modelado.

En cuanto a la dinámica temporal del transporte, el tiempo de tránsito hidráulico estimado para el tramo A–B fue de 0,45 horas (27 minutos), calculado a partir de la longitud del tramo de estudio y la velocidad media del flujo. Este valor representa el tiempo aproximado requerido por una partícula de agua para recorrer el dominio analizado bajo las condiciones hidráulicas seleccionadas.

Por otra parte, el tiempo de simulación adoptado fue de 13 horas, definido considerando la evolución temporal del hidrograma de entrada correspondiente al período de retorno de 25 años, cuyo tiempo al pico fue de 12,05 horas, además del tiempo requerido para la propagación del flujo dentro del dominio de cálculo. Este periodo permitió representar adecuadamente la evolución del evento hidráulico y obtener las condiciones necesarias para la simulación del transporte advectivo–dispersivo del plomo.

Es así que la reducción de las concentraciones de plomo observadas en el presente estudio, en comparación con los valores reportados en investigaciones previas, puede asociarse a diferentes factores relacionados con la dinámica del sistema fluvial:

✓ Distancia respecto al área de posible aporte:

En el presente estudio, las estaciones de monitoreo del tramo analizado se ubicaron aproximadamente a 8,1 km aguas abajo del punto P0, mientras que en el estudio desarrollado en 2021 el punto de evaluación se localizó aproximadamente a 1,8 km del área de referencia P6. Esta mayor distancia favorece la ocurrencia de procesos de transporte, mezcla y dispersión del contaminante dentro del sistema fluvial, contribuyendo a la disminución de las concentraciones medidas en la columna de agua.

✓ Procesos naturales de transporte y mezcla:

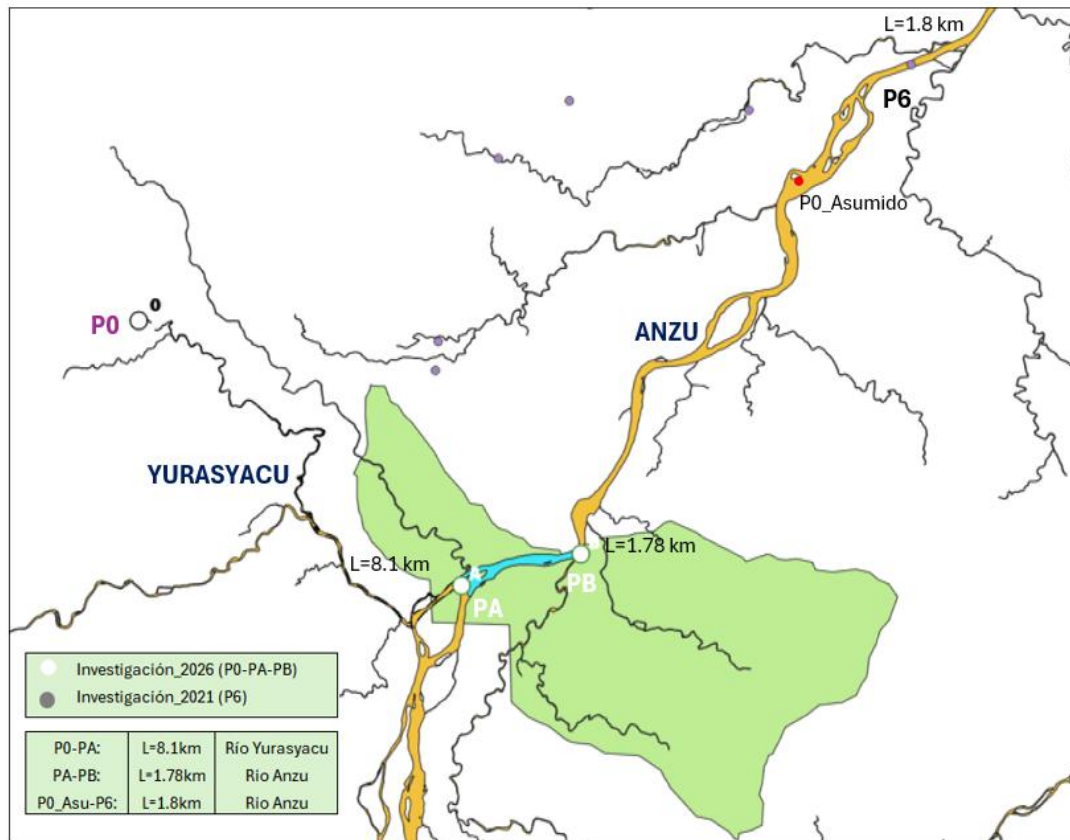
La dinámica hidráulica del río favorece procesos como la dispersión longitudinal, mezcla turbulenta y redistribución del contaminante dentro del cauce, los cuales pueden contribuir a la reducción de las concentraciones de plomo en la fase acuosa conforme aumenta la distancia recorrida.

✓ Condición actual de las actividades antrópicas en la cuenca:

De acuerdo con la información disponible, las actividades mineras en la zona de estudio se encontrarían suspendidas aproximadamente seis meses antes del muestreo realizado, condición que podría reducir los aportes recientes de contaminantes hacia el sistema fluvial.

En conjunto, los resultados sugieren una disminución de las concentraciones de plomo en el río Anzu respecto a los valores reportados en 2021. Sin embargo, debido a la dinámica propia del sistema fluvial y a la posible reactivación de actividades antrópicas en la cuenca, se considera necesario mantener programas de monitoreo que permitan evaluar la evolución temporal de la calidad del agua.

Figura 24. Distribución comparativa de puntos de muestreo (2021 vs 2026)



Fuente: Elaboración del autor (2026)

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA, ANEXOS.

5.1 Conclusiones

5.1.1 Caracterización hidrológica e hidráulica del tramo de estudio

Se caracterizaron las condiciones hidrológicas e hidráulicas del tramo de 1,78 km del río Anzu mediante la aplicación de modelos hidrológicos (HEC-HMS) e hidrodinámicos bidimensionales (HEC-RAS 2D). La modelación hidrológica permitió estimar los caudales de diseño para los períodos de retorno de 25, 50 y 100 años, obteniéndose valores de 159,4 m³/s, 188,6 m³/s y 216,8 m³/s, respectivamente, evidenciando un incremento progresivo del caudal conforme aumenta la magnitud del evento hidrológico. Para la modelación hidrodinámica bidimensional se seleccionó el escenario correspondiente al período de retorno de 25 años, con un caudal de diseño de 159,4 m³/s, permitiendo caracterizar la distribución espacial de las variables hidráulicas dentro del tramo analizado. Los resultados obtenidos evidenciaron variaciones de velocidad, profundidad y geometría hidráulica del cauce, identificando la influencia de las condiciones locales del río sobre el comportamiento del flujo y los procesos asociados al transporte y mezcla del contaminante.

5.1.2 Simulación de la dispersión espacial del plomo (Pb)

La selección del plomo (Pb) como contaminante indicador permitió representar adecuadamente los procesos de advección y dispersión de metales pesados en el río Anzu, debido a su persistencia, relevancia ambiental y asociación con las actividades mineras presentes en la cuenca. En este contexto, el Pb constituyó un parámetro adecuado para evaluar el escenario de contaminación y evidenciar la influencia de la hidrodinámica sobre la distribución espacial de las concentraciones en el sistema fluvial.

La simulación del transporte del plomo (Pb) evidenció una disminución general de las concentraciones en dirección aguas abajo, desde el punto de ingreso del contaminante (P0) hacia las estaciones de control. Para la implementación del modelo se empleó como condición inicial el valor instrumental de 0,001413 mg/L en el punto P0, a partir del cual la concentración disminuyó hasta 0,000159 mg/L en el punto A debido a los procesos de dilución y redistribución del contaminante en el flujo. Posteriormente, en el punto B se observó un ligero incremento hasta 0,000184 mg/L, comportamiento que no corresponde a una nueva fuente de contaminación, sino que se atribuye a las

condiciones hidráulicas locales del cauce, caracterizadas por un tramo curvo donde la disminución de la velocidad y el incremento de la profundidad favorecen los procesos de mezcla y la redistribución espacial del contaminante.

Es importante señalar que los valores empleados en la simulación corresponden a respuestas instrumentales proporcionadas por el laboratorio y utilizadas como datos de entrada para la modelación. En consecuencia, los resultados obtenidos permiten interpretar el comportamiento espacial del transporte y la dispersión del plomo en el río Anzu, pero no constituyen evidencia para establecer el cumplimiento o incumplimiento de los criterios de calidad ambiental, debido a que el laboratorio reportó oficialmente concentraciones inferiores al límite de cuantificación del método analítico ($< 0,005 \text{ mg/L}$).

Asimismo, el coeficiente de dispersión longitudinal obtenido para el escenario hidráulico seleccionado de período de retorno de 25 años fue de $D_x = 25,26 \text{ m}^2/\text{s}$, valor utilizado para representar los procesos de mezcla y expansión del contaminante dentro del tramo modelado. Finalmente, al comparar los resultados obtenidos con el estudio de referencia correspondiente al año 2021, se observa una reducción significativa de las concentraciones de plomo en el año 2026, comportamiento que puede estar asociado a la mayor distancia respecto al área de posible aporte, las condiciones actuales de la fuente contaminante y los procesos de transporte y mezcla propios del río Anzu.

5.1.3 Zonificación espacial de la dispersión del contaminante

Se elaboró una zonificación espacial del plomo (Pb) a partir de los resultados de la modelación, identificándose gradientes de concentración dentro del área de estudio. Las zonas de mayor afectación se localizan en las proximidades del punto de ingreso del contaminante P0, mientras que aguas abajo se observa una reducción progresiva de las concentraciones debido a los procesos de transporte y dispersión. Esta zonificación permite delimitar espacialmente los sectores con distinta sensibilidad ambiental dentro del tramo del río Anzu, constituyendo un insumo técnico para la gestión y evaluación de la calidad del agua.

5.1.4 Persistencia de la contaminación por plomo en el sistema hídrico

Los resultados evidenciaron la presencia de plomo (Pb) tanto en la columna de agua como en los sedimentos del río Anzu, confirmando la presencia del contaminante dentro del sistema fluvial. En la fase acuosa se registró una concentración máxima de $0,000159 \text{ mg/L}$ en el punto de ingreso considerado para la modelación, mientras que en los sedimentos se identificó la mayor concentración en el punto A, con un valor de $6,51 \text{ mg/kg}$, evidenciando la capacidad del lecho fluvial para retener parte del metal. La presencia de plomo en los sedimentos puede estar asociada a procesos de movilización y transporte de materiales provenientes de la cuenca, incluyendo posibles

aportes relacionados con actividades mineras, remoción de suelos y alteración de materiales geológicos que contienen metales. A diferencia de otros elementos utilizados directamente en procesos extractivos, como el mercurio empleado en la amalgamación del oro, el plomo puede encontrarse asociado tanto a fuentes naturales como antrópicas, por lo que su presencia debe interpretarse considerando la dinámica integral de la cuenca.

Asimismo, considerando que durante aproximadamente seis meses previos al muestreo no se registraron actividades de explotación minera en el sector de estudio, la presencia de plomo evidencia que la ausencia temporal de aportes no implica una recuperación inmediata del sistema, debido a la capacidad de los sedimentos para almacenar contaminantes y participar en procesos de intercambio con la columna de agua bajo cambios en las condiciones hidráulicas.

5.1.5 Evaluación del riesgo ambiental asociado a la presencia de plomo

Los resultados de la modelación de las concentraciones de plomo (Pb) y de la zonificación espacial evidencian una disminución progresiva del contaminante a lo largo del tramo de estudio, como consecuencia de los procesos de advección, dispersión y mezcla que gobiernan su transporte en el río Anzu. No obstante, la presencia de centros poblados aguas abajo, como la cabecera cantonal de Carlos Julio Arosemena Tola, donde el río puede ser utilizado con fines recreativos, resalta la importancia de mantener un seguimiento permanente de la calidad del agua. Si bien las concentraciones registradas en el presente estudio se encuentran en niveles bajos, la presencia de plomo requiere atención debido a su carácter acumulativo y a los efectos potenciales sobre la salud humana, especialmente en grupos vulnerables como niños, en quienes la exposición prolongada puede afectar procesos de desarrollo neurológico. Por ello, el monitoreo continuo constituye una medida preventiva para garantizar la protección de la población y de los ecosistemas acuáticos.

Los resultados obtenidos representan las condiciones analizadas durante el período de estudio y evidencian el comportamiento espacial del plomo bajo el escenario modelado. Sin embargo, estas condiciones podrían modificarse si se incrementan o reanudan las actividades mineras en la cuenca, generando nuevos aportes del contaminante al sistema fluvial y alterando su patrón de transporte y dispersión. En este contexto, se recomienda implementar un programa de monitoreo continuo de la calidad del agua que permita identificar oportunamente cambios en las concentraciones de plomo, actualizar las simulaciones hidrodinámicas y respaldar la toma de decisiones para la gestión ambiental del río Anzu.

5.2 Recomendaciones

- ✓ Implementar un programa permanente de monitoreo de calidad de agua y sedimentos en el sistema hídrico Yurasyacu–Anzu, considerando los puntos de control establecidos en la presente investigación y ampliando la red hacia

sectores identificados como críticos mediante la modelación hidráulica y la zonificación espacial del contaminante.

- ✓ Actualizar periódicamente los modelos hidrológicos e hidráulicos desarrollados mediante HEC-HMS y HEC-RAS 2D, incorporando información reciente de precipitación, caudales, topografía y calidad de agua, con el fin de mejorar la capacidad de predicción del comportamiento del sistema fluvial y del transporte del contaminante.
- ✓ Realizar campañas de monitoreo en diferentes condiciones hidrológicas (épocas de estiaje y crecida), con el objetivo de evaluar la influencia de la variabilidad del caudal sobre los procesos de transporte, dispersión y acumulación de plomo en el sistema fluvial mediante la aplicación de WASP.
- ✓ Evaluar periódicamente las condiciones de calidad ambiental en los sectores con uso recreativo y turístico, especialmente en las proximidades del cantón Carlos Julio Arosemena Tola, incorporando análisis de agua, sedimentos y, de ser necesario, estudios de bioacumulación en organismos acuáticos, con el fin de valorar posibles rutas de exposición y precautelar la salud de la población usuaria del recurso hídrico.
- ✓ Desarrollar investigaciones complementarias orientadas a determinar el origen y la dinámica del plomo dentro de la cuenca del río Anzu, mediante análisis geoquímicos que permitan diferenciar aportes asociados a actividades antrópicas, procesos naturales de movilización del suelo u otras fuentes potenciales. Asimismo, se recomienda evaluar los posibles efectos del contaminante sobre los ecosistemas acuáticos y la exposición humana asociada al uso recreativo o aprovechamiento del recurso hídrico, considerando especialmente la presencia de grupos vulnerables y la posible bioacumulación del metal en organismos acuáticos.

5.3 Bibliografía

- [1] M. V. Capparelli *et al.*, “An Integrative Approach to Assess the Environmental Impacts of Gold Mining Contamination in the Amazon,” *Toxics*, vol. 9, no. 7, 2021, doi: 10.3390/toxics9070149.
- [2] S. Jiménez-Oyola *et al.*, “Human Health Risk Assessment for Exposure to Potentially Toxic Elements in Polluted Rivers in the Ecuadorian Amazon,” *Water (Basel)*, vol. 13, no. 5, 2021, doi: 10.3390/w13050613.
- [3] “U.S. Army Corps of Engineers. (2025). HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual Version 6.7.,” 2024.
- [4] X. Wang, J. Yang, F. Wang, N. Xu, P. Li, and A. Wang, “Numerical Modeling of the Dispersion Characteristics of Pollutants in the Confluence Area of an Asymmetrical River,” *Water (Basel)*, vol. 15, no. 21, 2023, doi: 10.3390/w15213766.
- [5] INAMHI, “Anuario Meteorológico_Tena_Hda. Chaupi Shungo.”

- [6] “RESUMEN HISTÓRICO CLIMATOLÓGICO 2012-2018 AEROPUERTO ‘JUMANDY,’” 2018.
- [7] L. Tian, S. Gu, Y. Wu, H. Wu, and C. Zhang, “Numerical Investigation of Pollutant Transport in a Realistic Terrain with the SPH-SWE Method,” *Front. Environ. Sci.*, vol. Volume 10-2022, 2022, doi: 10.3389/fenvs.2022.889526.
- [8] I. L. Simanungkalit and I. Magdalena, “Numerical Model for 1D–2D Pollutant Transport Problems,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 3114, no. 1, p. 12007, Sep. 2025, doi: 10.1088/1742-6596/3114/1/012007.
- [9] A. Bachrudin, B. N. Ruchjana, A. S. Abdullah, and R. Budiarto, “Spatio-Temporal Model of a Product–Sum Simulation on Stream Network Based on Hydrologic Distance,” *Water (Basel)*, vol. 15, no. 11, 2023, doi: 10.3390/w15112039.
- [10] Juan M. Cuello, Alfredo E. Trento, and Ana M. Alvarez, “Transporte De Sedimentos Y Metales Pesados Con Wasp 7.0,” 2026.
- [11] M. Mawat and A. A. Hamdan, “Integration of numerical models to simulate 2D hydrodynamic/water quality model of contaminant concentration in Shatt Al-Arab River with WRDB calibration tools,” *Open Engineering*, vol. 13, Jun. 2023, doi: 10.1515/eng-2022-0416.
- [12] M. N. Gomes, C. A. F. do Lago, L. M. C. Rápalo, P. T. S. Oliveira, M. H. Giacomoni, and E. M. Mendiondo, “HydroPol2D — Distributed hydrodynamic and water quality model: Challenges and opportunities in poorly-gauged catchments,” *J. Hydrol. (Amst)*, vol. 625, p. 129982, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129982>.
- [13] A. Samake, M. Alassane, and M. Amadou, “A Numerical Framework for Pollutant Transport in Shallow-Water Flows: Application to the Niger River in Bamako,” *J. Appl. Math.*, vol. 2025, Jun. 2025, doi: 10.1155/jama/6702536.
- [14] D. Baek, I. W. Seo, J. S. Kim, S. H. Jung, and Y. Choi, “Improvement of the Two-Dimensional Routing Procedure for Observing Dispersion Coefficients in Open-Channel Flow,” *Water (Basel)*, vol. 16, no. 2, 2024, doi: 10.3390/w16020365.
- [15] Monitoring of the Andes Amazon Program (MAAP), “MAAP #230: Minería en la Amazonía Ecuatoriana Sector Centro – Provincia del Napo,” Jul. 2025.
- [16] Reyes Cordova, M. C. Encalada Zumba, S. S. Alvarez Villamarin, J. A. Moreno Lopez, and Alvaro Luis Jose, “Contaminación por minería aurífera ilegal en ríos del Ecuador y sus consecuencias socioambientales en la Amazonía ecuatoriana,” 2025.
- [17] Monitoring of the Andes Amazon Program (MAAP), “MAAP #238: Minería en la Amazonía Ecuatoriana Sector Sur – Provincia de Morona Santiago,” Jul. 2025.
- [18] R. Bahadur, M. Monteith, and W. Samuels, “Comparative Review of Longitudinal Dispersion Coefficient Equations in Rivers,” *Journal of*

- Environmental Engineering*, vol. 147, p. 4021030, Jun. 2021, doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001901.
- [19] P. Onnis, P. Byrne, K. A. Hudson-Edwards, T. Stott, and C. O. Hunt, “Fluvial Morphology as a Driver of Lead and Zinc Geochemical Dispersion at a Catchment Scale,” *Minerals*, vol. 13, no. 6, 2023, doi: 10.3390/min13060790.
- [20] C. Phillips *et al.*, “Threshold constraints on the size, shape and stability of alluvial rivers,” *Nat. Rev. Earth Environ.*, vol. 3, Jun. 2022, doi: 10.1038/s43017-022-00282-z.
- [21] B. G. Krishnappan, “Modelling of River Flows, Sediment and Contaminants Transport,” *Water (Basel)*, vol. 14, no. 4, 2022, doi: 10.3390/w14040649.

5.4 Anexos

En este apartado se incorporan los informes de resultados de laboratorio que respaldan el desarrollo de la investigación. Estos documentos constituyen el soporte técnico de la información utilizada para la caracterización de la calidad del agua y la modelación del transporte del contaminante, garantizando la trazabilidad y confiabilidad de los datos empleados en el estudio.

Para facilitar su consulta, los anexos se encuentran disponibles en el siguiente enlace:

[https://drive.google.com/file/d/1ArVSoDk1pF_x7OEH8uL0WXQJ77Zn0yTm/view?usp=drive_link]

CAPÍTULO VI

6. PROPUESTA

6.1 Título

Implementación de una herramienta de gestión hidrológica, hidráulica y de calidad del agua mediante los modelos HEC-HMS, HEC-RAS, WASP para el monitoreo y control de la contaminación por plomo (Pb) en el sistema hídrico Yurasyacu–Anzu.

6.2 Descripción

Los resultados obtenidos en la presente investigación evidenciaron la presencia de concentraciones de plomo (Pb) en agua y sedimentos dentro del sistema hídrico Yurasyacu–Anzu, así como la influencia de las condiciones hidrológicas e hidráulicas sobre los procesos de transporte, dispersión y acumulación del contaminante.

La modelación desarrollada mediante HEC-HMS permitió caracterizar la respuesta hidrológica de la cuenca frente a diferentes escenarios de precipitación, mientras que la modelación hidráulica bidimensional realizada en HEC-RAS 2D permitió identificar la distribución espacial de velocidades, profundidades y zonas hidráulicamente críticas. Asimismo, la simulación del transporte del plomo permitió generar mapas de concentración y una zonificación ambiental del área de estudio mediante WASP.

Considerando que las concentraciones de plomo continúan presentes dentro del sistema fluvial a pesar de la suspensión de las actividades mineras y que existen sectores poblados potencialmente expuestos al contaminante, se propone implementar una herramienta de gestión basada en los modelos hidrológicos e hidráulicos desarrollados en esta investigación.

La propuesta busca que los modelos HEC-HMS, HEC-RAS Y WASP constituyan una plataforma técnica de apoyo para el monitoreo permanente de la calidad del agua, la actualización periódica de escenarios hidrológicos y la evaluación del comportamiento futuro de contaminantes dentro del sistema hídrico.

6.3 Desarrollo de la propuesta

6.3.1 Fase I: Consolidación del sistema de monitoreo hidrológico e hidráulico

Objetivo:

Implementar una red básica de monitoreo que permita actualizar periódicamente la información hidrológica, hidráulica y ambiental utilizada por los modelos desarrollados.

Actividades:

- Mantener los puntos de monitoreo P0, PA y PB establecidos durante la investigación.
- Incorporar puntos complementarios en zonas identificadas como críticas mediante la modelación hidráulica.
- Levantar información periódica de precipitación, caudales y niveles de agua.
- Actualizar la información topográfica y geomorfológica del cauce cuando se presenten cambios significativos.

Productos esperados:

- Base de datos hidrometeorológica actualizada.
- Base de datos geoespacial del sistema hídrico.
- Red de monitoreo ambiental georreferenciada.

6.3.2 Fase II: Monitoreo periódico de calidad de agua y sedimentos

Objetivo:

Evaluar la evolución temporal de las concentraciones de plomo dentro del sistema hídrico.

Actividades:

- Realizar campañas periódicas de muestreo de agua superficial.
- Realizar campañas periódicas de muestreo de sedimentos.
- Determinar concentraciones de plomo mediante análisis de laboratorio.
- Monitorear parámetros fisicoquímicos complementarios.

Frecuencia propuesta:

- Monitoreo ordinario trimestral.
- Monitoreo extraordinario posterior a eventos extremos de precipitación.

Productos esperados:

- Informes de calidad de agua.

- Informes de calidad de sedimentos.
- Base histórica de concentraciones de plomo.

6.3.3 Fase III: Actualización de los modelos HEC-HMS, HEC-RAS y WASP

Objetivo:

Mantener actualizadas las herramientas de simulación hidrológica e hidráulica desarrolladas en la investigación.

Actividades:

- Incorporar nuevos registros de precipitación.
- Actualizar escenarios hidrológicos de diseño.
- Actualizar condiciones hidráulicas del cauce.
- Recalcular escenarios de transporte y dispersión del contaminante.

Productos esperados:

- Modelos HEC-HMS actualizados.
- Modelos HEC-RAS actualizados.
- Modelos WAPS actualizados.

6.3.4 Fase IV: Sistema de gestión y alerta ambiental

Objetivo:

Utilizar los resultados de la modelación como herramienta para la toma de decisiones ambientales y de gestión del recurso hídrico.

Actividades:

- Generar mapas periódicos de concentración de plomo.
- Actualizar la zonificación ambiental del sistema hídrico.
- Identificar sectores de riesgo para actividades recreativas y uso del recurso hídrico.
- Emitir reportes técnicos para instituciones competentes.

Productos esperados:

- Mapas de riesgo ambiental.
- Zonificación actualizada de contaminación por plomo.
- Informes técnicos para la gestión ambiental.

6.3.5 Cronograma de implementación

Tabla 16. Cronograma general de implementación de la propuesta.

Actividad	Mes 1-2	Mes 3-4	Mes 5-6	Mes 7-8	Mes 9-10	Mes 11-12
Consolidación del monitoreo						
Monitoreo de agua y sedimentos						
Actualización de modelos						
Sistema de gestión y alerta						

Fuente: Elaboración del autor (2026).

La implementación de esta propuesta permitirá disponer de una herramienta técnica permanente para la evaluación de la calidad del agua y el control de la contaminación por plomo dentro del sistema hídrico Yurasyacu–Anzu, facilitando la toma de decisiones por parte de las instituciones responsables de la gestión ambiental y de los recursos hídricos de la provincia de Napo.