



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

“ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDROGRÁFICAS DE UN SEGMENTO DEL CAUCE DEL RÍO PUMACUNCHI DE LA MICROCUENCA DE DRENAJES MENORES, DE LA PARROQUIA MATRÍZ, CANTÓN LATACUNGA, PROVINCIA DE COTOPAXI MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA CON DRON”.

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de
Ingeniera Ambiental

Autora:

Cobos Sangoquiza Paula Melissa

Tutor:

Velastegui Tapia Vincent Benjamín

LATACUNGA – ECUADOR

Agosto 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Paula Melissa Cobos Sangoquiza, con cédula de ciudadanía No.1726024811, declaro ser autora del presente Proyecto de Investigación: **“ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDROGRÁFICAS DE UN SEGMENTO DEL CAUCE DEL RÍO PUMACUNCHI DE LA MICROCUENCA DE DRENAJES MENORES, DE LA PARROQUIA MATRÍZ, CANTÓN LATACUNGA, PROVINCIA DE COTOPAXI MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA CON DRON”**, siendo el Ing. Vincent Benjamin Velastegui Tapia, Tutor del presente trabajo; y, eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Latacunga, 04 de agosto del 2026

Paula Melissa Cobos Sangoquiza

C.C: 1726024811

ESTUDIANTE

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **PAULA MELISSA COBOS SANGOQUIZA** identificado con cédula de ciudadanía N° **1726024811**, de estado civil casada, a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. –**LA CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado “**ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDROGRÁFICAS DE UN SEGMENTO DEL CAUCE DEL RÍO PUMACUNCHI DE LA MICROCUENCA DE DRENAJES MENORES, DE LA PARROQUIA MATRÍZ, CANTÓN LATACUNGA, PROVINCIA DE COTOPAXI MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA CON DRON**”, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: Octubre 2019 – Marzo 2020

Finalización de la carrera: Abril 2026 – Agosto 2026

Tutor: Ing. Vincent Benjamin Velastegui Tapia, Mg.

Tema: “**ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDROGRÁFICAS DE UN SEGMENTO DEL CAUCE DEL RÍO PUMACUNCHI DE LA MICROCUENCA DE DRENAJES MENORES, DE LA PARROQUIA MATRÍZ, CANTÓN LATACUNGA, PROVINCIA DE COTOPAXI MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA CON DRON**”

CLÁUSULA SEGUNDA. - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **LA CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - **OBJETO DEL CONTRATO:** Por el presente contrato **LA CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- b) La publicación del trabajo de grado.
- c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **LA CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - **LA CESIONARIA** podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **LA CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 04 días del mes de Agosto del 2026.

Paula Melissa Cobos Sangoquiza

LA CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.

LA CESIONARIA

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Proyecto de Investigación sobre el título:

“ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDROGRÁFICAS DE UN SEGMENTO DEL CAUCE DEL RÍO PUMACUNCHI DE LA MICROCUENCA DE DRENAJES MENORES, DE LA PARROQUIA MATRÍZ, CANTÓN LATACUNGA, PROVINCIA DE COTOPAXI MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA CON DRON”., de Cobos Sangoquiza Paula Melissa, de la carrera de Ingeniería Ambiental, considero que el presente trabajo investigativo es merecedor del aval de aprobación al cumplir las normas, técnicas y formatos previstos, así como también ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

Latacunga, 04 de agosto del 2026

Ing. Vincent Benjamin Velastegui Tapia, Mg.

C.C: 0502547649

DOCENTE TUTOR

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprobamos el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi; y, por la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; por cuanto, la postulante: Cobos Sangoquiza Paula Melissa, con el título de Proyecto de Investigación: **“ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDROGRÁFICAS DE UN SEGMENTO DEL CAUCE DEL RÍO PUMACUNCHI DE LA MICROCUENCA DE DRENAJES MENORES, DE LA PARROQUIA MATRÍZ, CANTÓN LATACUNGA, PROVINCIA DE COTOPAXI MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA CON DRON”**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 04 de agosto del 2026

Ing. Kalina Marcela Fonseca Largo, Ph.D.
C.C: 1723534457
LECTOR 1 (PRESIDENTE)

Lcdo. Jaime Rene Lema Pillalaza, Mg.
C.C: 1713759932
LECTOR 2 (MIEMBRO)

Ing. Oscar Rene Daza Guerra, Mg.
C.C: 0400689790
LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

Con un corazón lleno de gratitud alabo a Dios, el rey del universo, autor de vida, mi fortaleza en la tormenta, sin su misericordia nada de esto sería posible.

A mi amada madre, María Sangoquiza por su gran amor, paciencia, ejemplo y apoyo incondicional.

Al amor de mi vida, mi compañero de vida, mi esposo Daniel Espinoza por siempre motivarme, amarme y reconfortarme, por siempre apoyar mis sueños incluso sacrificando los suyos.

A mi tutor, Benjamin Velastegui por su dedicación, vocación y compromiso con este proyecto.

A mis queridos docentes por cada valioso aporte, su integridad y pasión por la docencia.

A mi familia por creer en mí y porque de alguna u otra manera me han apoyado y ayudado en esta importante etapa de mi vida

Paula Melissa Cobos Sangoquiza

DEDICATORIA

A la memoria de mi amor eterno Laura Bonilla, tus enseñanzas y amor de madre me ha motivado día con día a cumplir mis sueños.

A todas las mujeres que, aun siendo madres, esposas e hijas, salen a luchar constantemente por sus sueños.

En memoria de mi amigo Alexis Coba con quien caminamos juntos durante toda la carrera, en donde sea que estes este logro que un día soñamos juntos te lo dedico.

Paula Melissa Cobos Sangoquiza

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

TÍTULO: “ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDROGRÁFICAS DE UN SEGMENTO DEL CAUCE DEL RÍO PUMACUNCHI DE LA MICROCUENCA DE DRENAJES MENORES, DE LA PARROQUIA MATRÍZ, CANTÓN LATACUNGA, PROVINCIA DE COTOPAXI MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA CON DRON”.

AUTORA

Cobos Sangoquiza Paula Melissa

RESUMEN

La presente investigación analizó las características hidrográficas de un segmento del cauce del río Pumacunchi, perteneciente a la microcuenca Drenajes Menores, mediante el uso de fotogrametría con dron. El propósito del estudio fue evaluar la morfología del cauce e identificar los factores que influyen en su dinámica hídrica, con el fin de comprender mejor su comportamiento, los cambios que experimenta y los posibles riesgos asociados. Para ello, se empleó una metodología con enfoque descriptivo y exploratorio. En primer lugar, se realizó una revisión bibliográfica que permitió sustentar los fundamentos teóricos de la investigación. Posteriormente, se llevó a cabo el levantamiento de información mediante un vehículo aéreo no tripulado, con el que se obtuvieron imágenes aéreas de alta resolución. A partir de estas imágenes se generaron ortomosaicos georreferenciados y modelos digitales de elevación, los cuales fueron procesados y analizados utilizando los programas ArcGIS, Google Earth, Pix4D Enterprise, Pix4D Capture y HEC-GeoRAS. Finalmente, el análisis se centró en variables como el ancho y la longitud del cauce, el tipo de suelo, la pendiente del terreno y la susceptibilidad a inundaciones, permitiendo una caracterización detallada del área de estudio. Los resultados evidenciaron una morfología alargada en la zona de estudio, Los resultados permitieron delimitar una microcuenca de 39 562,70 m² y un tramo del río Pumacunchi de 4,452,32 m², con una longitud de cauce de 492,51 m y un volumen estimado de 18 810,02 m³. El análisis topográfico evidenció el predominio de pendientes entre 4 % y 8 % (35 874,72 m²) y una variación altitudinal entre 2705,67 y 2732,02 m s. n. m., mientras que el modelamiento hidráulico permitió delimitar las zonas con mayor susceptibilidad a inundaciones, confirmando la utilidad de la fotogrametría con UAV para la caracterización hidrográfica y la gestión del riesgo. Se concluye que la fotogrametría con UAV, integrada con herramientas SIG y HEC-GeoRAS, permitió caracterizar con precisión las condiciones hidrográficas y geomorfológicas del tramo del río Pumacunchi, facilitando la identificación de zonas susceptibles a inundaciones y generando información confiable para la gestión del riesgo y la planificación territorial.

Palabras clave: : ArcGis, Microcuenca, Fotogrametría, Morfología, Vehículo Aéreo no tripulado

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCES AND NATURAL RESOURCES

TITLE: “ANALYSIS OF THE HYDROGRAPHIC CHARACTERISTICS OF A SEGMENT OF THE PUMACUNCHI RIVER CHANNEL IN THE DRENAJES MENORES MICRO-WATERSHED, MATRIZ PARISH, LATACUNGA CANTON, COTOPAXI PROVINCE, USING DRONE PHOTOGRAMMETRY”

AUTHOR:
Cobos Sangoquiza Paula Melissa

ABSTRACT

This research analyzed the hydrographic characteristics of a segment of the Pumacunchi River channel, located within the Drenajes Menores micro-watershed, through the use of drone photogrammetry. The purpose of the study was to evaluate the morphology of the river channel and identify the factors that influence its water dynamics in order to gain a better understanding of its behavior, the changes it undergoes, and the potential associated risks. For this purpose, a descriptive and exploratory methodological approach was employed. First, a literature review was conducted to establish the theoretical foundations of the research. Subsequently, data were collected using an unmanned aerial vehicle, which captured highresolution aerial images. These images were used to generate georeferenced orthomosaics and digital elevation models, which were processed and analyzed using ArcGIS, Google Earth, Pix4D Enterprise, Pix4D Capture, and HEC-GeoRAS software. Finally, the analysis focused on variables such as the width and length of the river channel, soil type, terrain slope, and susceptibility to flooding, allowing for a detailed characterization of the study area. The results revealed an elongated morphology within the study area. They also made it possible to delineate a micro-watershed covering 39,562.70 m² and a 4,452.32 m² segment of the Pumacunchi River, with a channel length of 492.51 m and an estimated volume of 18,810.02m³. The topographic analysis showed a predominance of slopes ranging from 4% to 8%, covering an area of 35,874.72 m², as well as an elevation variation between 2,705.67 and 2,732.02 m s. n. m. Meanwhile, the hydraulic modeling made it possible to delineate the areas with the highest susceptibility to flooding, confirming the usefulness of UAV photogrammetry for hydrographic characterization and risk management. It was concluded that UAV photogrammetry, integrated with GIS tools and HEC-GeoRAS, enabled an accurate characterization of the hydrographic and geomorphological conditions of the Pumacunchi River segment, facilitating the identification of flood-prone areas and generating reliable information for risk management and territorial planning.

Keywords: ArcGIS, Micro-watershed, Photogrammetry, Morphology, Unmanned Aerial Vehicle.

INDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	iii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR.....	iiii
AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	v
AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	vii
AGRADECIMIENTO.....	viii
DEDICATORIA.....	viii
RESUMEN.....	ixx
ABSTRACT.....	x
1. INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2. INTRODUCCIÓN.	2
3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	3
4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO.....	4
5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	5
6. OBJETIVOS.....	6
6.1 Objetivo General.....	6
6.2 Objetivos Específicos	6
7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS	7
8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA.....	8

8.1 Recursos Hídrico del Ecuador	8
8.2. Determinación de variables hidrológicas.....	9
8.2.1 Área (A).....	10
8.2.2 Perímetro (P).	10
8.2.3 Longitud de la cuenca (L).....	11
8.2.4 Ancho de la cuenca (B).....	11
8.2.5 Pendiente media de la cuenca.....	11
8.2.6 Factores asociados con la forma.....	12
8.2.9 Factores asociados al relieve	13
8.2.10 Parámetros de bifurcación	14
8.3. Drones o vehículos aéreos no tripulados.....	14
8.3.1 Tipos de UAV	15
8.3.2 Clasificación de los UAV de acuerdo al uso y aplicación	15
8.3.3. Componentes de los UAV	16
8.3.4. Ventajas y desventajas del uso del Dron.....	17
8.5. Plan de vuelo.....	18
8.5.1. Cálculos de factores de vuelo	19
8.6.1 Tipos de imágenes utilizadas en fotogrametría	22
8.6.2. Proceso de la fotogrametría digital mediante UAV	23
8.7 Marco legal	27

8.7.1 Constitución de la República del Ecuador.....	27
8.7.2 Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua	27
8.7.3 Código Orgánico del Ambiente (COA)	28
8.7.4 Regulación para la operación de vehículos aéreos no tripulados (UAV) en el Ecuador	28
8.7.5 Ministerio de Ambiente y Energía (MAE).....	28
8. VALIDACIÓN DE LAS PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS	29
9. METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL	29
9.1. Area de estudio	29
9.2. Enfoque de la investigación	30
9.3. Tipo de investigación	31
9.3.1. Investigación descriptiva	31
9.3.2. Investigación exploratoria.....	31
9.4 Métodos de la investigación.....	31
9.4.1 Método descriptivo.....	31
9.4.2 Método exploratorio	32
9.5. Procedimiento metodológico	32
9.5.1. Delimitación del área de estudio	32
9. 5.2 Determinación de los parámetros de vuelo.....	33
9.4.3. Cálculo de la altura de vuelo.....	33

9.5. Planificación del levantamiento fotogramétrico	35
9.5.1. Optimización del patrón de vuelo.....	36
9.5.2. Colocación de puntos de control.....	36
9.5.3. Misión de vuelo.....	37
9.6. Procesamiento fotogramétrico en Pix4D Mapper.....	37
9.6.1. Importación y alineación inicial de las imágenes	38
9.6.2. Generación de la nube de puntos densa.....	38
9.6.3. Generación del modelo digital tridimensional	39
9.6.4. Obtención del ortomosaico georreferenciado.....	41
9.6.5. Corrección y depuración de los productos fotogramétricos	41
9.6.6. Productos obtenidos del procesamiento fotogramétrico	42
9.7. Procesamiento de la información geoespacial	43
9.8. Obtención de variables hidrográficas	44
9.8.1. Análisis de pendiente del terreno.....	44
9.8.2. Determinación del perímetro y longitud del cauce	44
9.8.3 Cálculo del volumen del cauce	44
9.8.4. Procesamiento y tratamiento de datos	44
9.9. Determinación de los parámetros hidrográficos.....	45
9.9.1. Coeficiente de compacidad de Gravelius	45
9.9.2. Factor de forma.....	46

9.9.3. Factor de elongación	46
9.10. Técnicas de investigación	47
9.10.1. Sistemas de Información Geográfica (SIG)	47
9.10.2 Levantamiento fotogramétrico mediante UAV	47
9.10.3 Análisis hidrográfico y geomorfológico	47
9.10.4 Observación de campo.....	48
9.11. Instrumentos de investigación	48
10. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	49
10.1. Productos cartográficos obtenidos mediante fotogrametría con UAV	49
10.2. Delimitación espacial del área de estudio	52
10.2.1. Área y perímetro de la microcuenca	52
10.2.2. Area y perímetro del tramo del río Pumacunchi	53
10.3. Índices morfométricos de la microcuenca	54
10.3.1. Coeficiente de Compacidad de Gravelius	54
10.3.2 Factor de forma.....	55
10.3.3. Factor de elongación	56
10.4. Delimitación espacial del tramo del río Pumacunchi	56
10.5. Análisis de la pendiente del terreno	58
10.6. Análisis de la pendiente del terreno	60
10.7. Determinación de la longitud del cauce	62

10.8. Estimación del volumen del tramo de estudio	63
10.9. Modelo de Red Irregular Triangulada (TIN).....	64
10.10. Zonificación altitudinal de la microcuenca	66
10.11. Zonas de corte para el modelamiento de inundación	69
10.12. Configuración del modelo de inundación	71
10.13. Delimitación de la zona de inundación.....	73
10.14. Representación de la zona de inundación sobre la ortofoto.....	75
11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
11.1. Conclusiones	77
11.2. Recomendaciones	78
12.BIBLIOGRAFÍA.....	77

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudios río Pumacunchi.....	29
Figura 2. Fase inicial de procesamiento y alineación de imágenes en Pix4D Mapper.	38
Figura 3. Generación de la nube de puntos densa en Pix4D Mapper.	39
Figura 4. Modelo digital tridimensional generado en Pix4D Enterprise.	40
Figura 5. Ortomosaico georreferenciado generado en Pix4D Enterprise.	41

Figura 6. <i>Corrección del ortomosaico y depuración de la nube de puntos en Pix4D Enterprise.</i>	42
Figura 7. <i>Ortofoto del tramo de estudio del río Pumacunchi obtenida mediante fotogrametría con UAV.</i>	51
Figura 8. <i>Muestra la longitud del área de estudio.</i>	55
Figura 9. <i>Delimitación espacial del tramo del río Pumacunchi.</i>	57
Figura 10. <i>Distribución espacial de la pendiente del terreno en el área de estudio.</i>	59
Figura 11. <i>Modelo de Red Irregular Triangulada (TIN) del área de estudio.</i>	65
Figura 12. <i>Zonificación altitudinal de la microcuenca del río Pumacunchi.</i>	67
Figura 13. <i>Eje del cauce, márgenes y secciones transversales del río Pumacunchi.</i>	72
Figura 14. <i>Configuración de la geometría hidráulica del tramo del río Pumacunchi.</i>	74
Figura 15. <i>Configuración de la geometría hidráulica del modelo del río Pumacunchi.</i>	76

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Beneficiarios del proyecto</i>	4
Tabla 2 <i>Actividades y sistemas de tareas en relación con los componentes.</i>	7
Tabla 3 <i>Factores asociados a la forma de la cuenca</i>	12
Tabla 4 <i>Parámetros del relieve</i>	13
Tabla 5 <i>Parámetros de la red hídrica</i>	14
Tabla 6 <i>Clasificación de los UAV</i>	16

Tabla 7. <i>Los componentes de los UAV.....</i>	16
Tabla 8 <i>Ventajas y desventajas del uso de vehículos aéreos no tripulados en estudios hidrográficos.....</i>	17
Tabla 9 <i>Clasificación de las imágenes en fotogrametría.....</i>	23
Tabla 10 <i>Etapas del proceso de fotogrametría digital mediante UAV</i>	24
Tabla 11 <i>Levantamiento fotométrico</i>	36
Tabla 12 <i>Instrumentos utilizados durante la investigación</i>	48
Tabla 13. <i>Área y perímetro del tramo de estudio del río Pumacunchi</i>	52
Tabla 14. <i>Área y perímetro del tramo de río Pumacunchi</i>	53
Tabla 15. <i>Rango de valores del factor de forma de Horton</i>	55
Tabla 16. <i>Distribución del área según las clases de pendiente del terreno</i>	61
Tabla 17. <i>Longitud del cauce del río Pumacunchi</i>	62
Tabla 18. <i>Volumen estimado del tramo de estudio del río Pumacunchi.....</i>	63
Tabla 19. <i>Distribución del área según la zonificación altitudinal del tramo de estudio.....</i>	68

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto: “Análisis de las características hidrográficas de un segmento del cauce del río Pumacunchi de la microcuenca de Drenajes menores, de la parroquia Matriz, cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi, mediante la fotogrametría con dron”

Fecha de inicio: abril 2026

Fecha de finalización: agosto 2026

Lugar de ejecución: Parroquia Latacunga

Facultad que auspicia: Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales

Carrera que auspicia: Carrera de Ingeniería Ambiental

Equipo de Trabajo:

Tutor de Titulación: Ing. Vincent Benjamin Velastegui Tapia Mg.

Investigador: Cobos Sangoquiza Paula Melissa

Lector 1:

Lector 2:

Lector 3:

Área de Conocimiento: Protección del Medio Ambiente Ciencias Naturales. Medio Ambiente.

Línea de investigación: Análisis, Conservación y Aprovechamiento de la Diversidad Local.

Línea de vinculación de la carrera: Manejo y conservación del recurso Hídrico.

2. INTRODUCCIÓN.

La gestión sostenible de los recursos hídricos constituye uno de los principales desafíos ambientales a nivel mundial, debido a que el agua es un recurso esencial para el desarrollo económico, la producción agrícola, la conservación de los ecosistemas y el bienestar de la población. En este contexto, la caracterización de las cuencas y microcuencas hidrográficas permite comprender el comportamiento del recurso hídrico y generar información técnica que facilite la planificación territorial, la prevención de riesgos y la conservación ambiental. La gestión integrada de los recursos hídricos es considerada un elemento fundamental para alcanzar el desarrollo sostenible y fortalecer la resiliencia frente a los efectos del cambio climático (United Nations, 2024).

En Ecuador, las microcuencas hidrográficas cumplen un papel estratégico al abastecer de agua a poblaciones rurales y urbanas, además de sostener actividades agrícolas, pecuarias e industriales. Sin embargo, la expansión urbana, los cambios en el uso del suelo y la variabilidad climática han modificado el comportamiento natural de numerosos sistemas hídricos, incrementando la necesidad de realizar estudios que permitan conocer con mayor precisión sus características físicas e hidrográficas para apoyar la gestión ambiental y la reducción del riesgo de desastres (United Nations, 2025).

Dentro de este contexto se encuentra el río Pumacunchi, perteneciente a la microcuenca de Drenajes menores de la parroquia Matriz del cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi. Este sistema hídrico requiere información actualizada sobre la configuración del cauce, la morfología del terreno y las condiciones topográficas que influyen en su dinámica, debido a que estos factores condicionan procesos como la escorrentía superficial, la erosión y la susceptibilidad a inundaciones. La disponibilidad de información geoespacial de alta resolución constituye un insumo indispensable para la planificación territorial y la gestión sostenible del recurso hídrico (Pizarro et al., 2024).

En los últimos años, la fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV) se ha consolidado como una herramienta de alta precisión para la adquisición de información geoespacial, permitiendo generar ortomosaicos, modelos digitales de elevación y reconstrucciones tridimensionales del terreno con un elevado nivel de detalle. Su integración con

los Sistemas de Información Geográfica (SIG) facilita el análisis espacial de variables hidrográficas y geomorfológicas, optimizando los procesos de monitoreo ambiental y apoyando la toma de decisiones basada en evidencia científica (Villarreal et al., 2025).

En este sentido, la presente investigación tiene como finalidad analizar las características hidrográficas de un segmento del cauce del río Pumacunchi mediante la aplicación de fotogrametría con dron, con el propósito de generar información técnica que contribuya a la caracterización del cauce, la evaluación de las condiciones del terreno y el fortalecimiento de la gestión ambiental de la microcuenca.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La caracterización de las características hidrográficas de los cuerpos de agua constituye una herramienta fundamental para la gestión sostenible de los recursos hídricos, ya que permite comprender la dinámica de los cauces, identificar factores que pueden afectar su estabilidad y generar información técnica para la planificación territorial y la conservación ambiental. En este contexto, el análisis de un segmento del río Pumacunchi aporta información actualizada sobre las condiciones físicas y geomorfológicas de este sistema hídrico, contribuyendo a fortalecer los procesos de manejo y protección del recurso hídrico (UNESCO, 2024, 2025).

La utilización de la fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV) representa una alternativa tecnológica que permite obtener información geoespacial con alta resolución y precisión, facilitando la generación de ortomosaicos, modelos digitales de elevación y reconstrucciones tridimensionales del terreno. Estos productos permiten analizar variables como la topografía, pendiente, morfología del cauce y cobertura del terreno, reduciendo el tiempo de levantamiento de información y optimizando los costos frente a los métodos topográficos convencionales (Pizarro et al., 2024; Villarreal et al., 2025).

Desde el punto de vista técnico, la investigación proporcionará información cartográfica que podrá ser utilizada como apoyo para futuros estudios relacionados con la gestión de microcuencas, el monitoreo ambiental, la planificación territorial y la identificación de zonas susceptibles a procesos erosivos o inundaciones. Asimismo, la integración de los productos

fotogramétricos en Sistemas de Información Geográfica facilitará el análisis espacial y la toma de decisiones por parte de las instituciones responsables de la gestión ambiental.

Finalmente, la investigación posee relevancia ambiental y social porque generará información que contribuirá al conocimiento del comportamiento hidrográfico del río Pumacunchi y servirá como base para promover estrategias orientadas al uso sostenible del recurso hídrico, la conservación de los ecosistemas asociados y el fortalecimiento de la gestión ambiental en el cantón Latacunga.

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

Tabla 1.

Beneficiarios del proyecto

Beneficiarios directos			Beneficiarios Indirectos		
Habitantes de la Parroquia Matriz			Habitantes del Cantón Latacunga.		
Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres	Total
60.044	65.607	125.651	106.010	111.251	217.261

Nota. La tabla presenta la población beneficiaria directa e indirecta del proyecto de investigación, considerando como beneficiarios directos a los habitantes de la parroquia Matriz y como beneficiarios indirectos a la población del cantón Latacunga. **Fuente:** Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, proyección poblacional vigente).

Los beneficiarios directos de la investigación corresponden a la población de la parroquia Matriz del cantón Latacunga, debido a que el área de estudio se localiza dentro de esta jurisdicción y la información generada contribuirá al conocimiento de las características hidrográficas del río Pumacunchi. Como beneficiarios indirectos se considera a la población del cantón Latacunga y a las instituciones vinculadas con la gestión ambiental y de los recursos hídricos, ya que los resultados podrán servir como insumo técnico para futuros procesos de planificación territorial, monitoreo ambiental y conservación del recurso hídrico.

5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La microcuenca de drenajes menores, donde se localiza el río Pumacunchi en la parroquia Matriz del cantón Latacunga, constituye un sistema hídrico de importancia para el equilibrio ambiental y el desarrollo de las actividades productivas de la zona. Sin embargo, la dinámica natural del cauce puede verse influenciada por factores físicos, climáticos y antrópicos que modifican sus características hidrográficas y geomorfológicas, afectando la estabilidad del ecosistema y la disponibilidad del recurso hídrico (UNESCO, 2025; United Nations, 2024).

Entre los principales factores naturales que condicionan el comportamiento de la microcuenca se encuentran la topografía, la pendiente, la geología y las condiciones climáticas, las cuales influyen directamente en los procesos de escorrentía superficial, erosión, transporte de sedimentos y conformación de la red de drenaje. El conocimiento de estas variables resulta indispensable para comprender el funcionamiento hidrológico de la microcuenca y evaluar su respuesta frente a eventos hidrometeorológicos extremos.

A estos factores se suman las actividades desarrolladas por el ser humano, como la expansión agrícola, los cambios en el uso del suelo y el crecimiento urbano, que pueden alterar las condiciones naturales del territorio y modificar el comportamiento del cauce. Estas intervenciones favorecen procesos como la pérdida de cobertura vegetal, el incremento de la escorrentía superficial, la erosión de las riberas y el deterioro de la calidad del agua, generando efectos sobre los ecosistemas asociados y aumentando la vulnerabilidad frente a fenómenos como las inundaciones.

A pesar de la importancia ambiental del río Pumacunchi, la información técnica disponible sobre sus características hidrográficas, topográficas y morfométricas es limitada, lo que dificulta la planificación de acciones orientadas a la gestión del recurso hídrico y la conservación del sistema fluvial. Considerando que la microcuenca posee una extensión superior a las 7000 hectáreas y que el área de estudio comprende aproximadamente 175 hectáreas, resulta necesario generar información geoespacial actualizada que permita caracterizar el tramo seleccionado, comprendido entre las coordenadas $X = 764226,27$; $Y = 9896742,15$ y $X = 765166,07$; $Y = 9894277,35$.

En este contexto, la aplicación de la fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV), integrada con herramientas de Sistemas de Información Geográfica, constituye una alternativa que permite obtener información espacial de alta resolución para analizar las características hidrográficas del río Pumacunchi. Los productos derivados de esta tecnología facilitarán la caracterización del relieve, la morfología del cauce y otras variables físicas del área de estudio, aportando información técnica para apoyar la gestión ambiental y la planificación territorial (Pizarro et al., 2024; Villarreal et al., 2025).

6. OBJETIVOS

6.1 Objetivo General

Analizar las características hidrográficas de un segmento del cauce del río Pumacunchi de la microcuenca de drenajes menores, de la parroquia Matriz, cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi, mediante la utilización de fotogrametría con dron.

6.2 Objetivos Específicos

Determinar las características topográficas y morfométricas del segmento del cauce del río Pumacunchi mediante el análisis de información obtenida con fotogrametría utilizando un vehículo aéreo no tripulado (UAV).

Caracterizar las condiciones físicas del cauce y su entorno mediante el procesamiento de ortomosaicos y modelos digitales de elevación para identificar las principales características hidrográficas del área de estudio.

Integrar la información obtenida mediante fotogrametría en un Sistema de Información Geográfica para elaborar cartografía temática que apoye el análisis espacial de las características hidrográficas del área de estudio.

7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

En la tabla 2 se presenta de forma detallada y organizada los objetivos específicos relacionados con las actividades, metodologías y resultados que se abordan.

Tabla 2 *Actividades y sistemas de tareas en relación con los componentes.*

Objetivo específico	Actividades principales	Instrumento de registro	Resultados esperados
Obj. 1. Determinar las características topográficas morfométricas del segmento del cauce del río Pumacunchi mediante el análisis de información obtenida con fotogrametría utilizando un vehículo aéreo no tripulado (UAV).	- Planificar el levantamiento y fotogramétrico. - Ejecutar el vuelo con y base de datos geoespacial. - Obtener ortofotografías y modelos digitales del terreno. - Calcular los parámetros morfométricos del cauce.	Registro fotográfico, Modelo topográfico y Digital de Elevación (DEM) morfométrica del segmento del cauce.	Caracterización topográfica y morfométrica del segmento del cauce.
Obj. 2. Caracterizar las condiciones físicas del cauce y su entorno mediante el procesamiento de ortomosaicos y modelos digitales de elevación para identificar las principales características físicas del cauce.	- Procesar ortomosaicos y modelos digitales de elevación. - Analizar las características físicas del cauce. - Identificar zonas con procesos de erosión y susceptibilidad a inundaciones.	Ortofotografías, DEM, TIN, registro fotográfico y cartografía temática.	Caracterización física del cauce e identificación de zonas susceptibles a procesos erosivos e inundaciones.

hidrográficas del área de estudio.

Obj. 3. Integrar la información obtenida mediante fotogrametría en un Sistema de Información Geográfica para elaborar cartografía espacial del área de temática que apoye el estudio.	• Organizar la información geoespacial obtenida. • Elaborar mapas temáticos y productos cartográficos. • Realizar el análisis espacial de las características hidrográficas del área de estudio.	Base de datos geoespacial, Cartografía temática y capas temáticas, mapas análisis espacial de las características hidrográficas del área de estudio.
--	---	---

Nota. La tabla muestra la correspondencia entre los objetivos específicos, las actividades principales, los instrumentos de registro y los resultados esperados del proceso de investigación. **Elaborado por:** Cobos, P. (2026).

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

8.1 Recursos Hídrico del Ecuador

Los recursos hídricos constituyen un componente esencial para el desarrollo sostenible, debido a que garantizan el abastecimiento de agua para consumo humano, la producción agropecuaria, la generación de energía, las actividades industriales y la conservación de los ecosistemas. A nivel mundial, la gestión integrada de los recursos hídricos representa uno de los principales retos para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 6, que promueve la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. En este contexto, los países deben fortalecer estrategias de planificación, monitoreo y conservación que permitan garantizar la disponibilidad del recurso frente al crecimiento poblacional, el cambio climático y el incremento de las actividades productivas (UNESCO, 2024; United Nations, 2025).

En el Ecuador, la gestión del recurso hídrico ha evolucionado hacia un modelo de administración que reconoce al agua como un patrimonio estratégico de uso público y un elemento fundamental para el desarrollo económico, social y ambiental del país. La planificación

de los recursos hídricos contempla la protección de las cuencas hidrográficas, la regulación de los diferentes usos del agua y la participación de las instituciones públicas y de las organizaciones comunitarias en su gestión, buscando garantizar un aprovechamiento sostenible del recurso (FAO, 2023; United Nations, 2024).

El territorio ecuatoriano se encuentra conformado por 31 sistemas hidrográficos distribuidos en 79 cuencas hidrográficas, organizadas en dos grandes vertientes: la del océano Pacífico y la Amazónica. Esta configuración determina la disponibilidad espacial del recurso hídrico y condiciona el desarrollo de las actividades agrícolas, pecuarias, industriales y ambientales en las diferentes regiones del país. El conocimiento de las características físicas de las cuencas constituye una herramienta fundamental para la planificación territorial, la gestión ambiental y la prevención de riesgos asociados a eventos hidrológicos (UNESCO, 2025; Vinicio Mogro Cepeda et al., 2021).

La provincia de Cotopaxi forma parte de un sistema hidrográfico de gran importancia para la región andina del Ecuador, debido a la presencia de cuencas y subcuencas que abastecen de agua a la población y sustentan gran parte de las actividades agropecuarias. Sin embargo, la creciente demanda del recurso hídrico, los cambios en el uso del suelo y la variabilidad climática han incrementado la presión sobre estas fuentes de agua, haciendo necesario fortalecer los procesos de monitoreo, planificación y conservación de las microcuencas (FAO, 2023).

En el cantón Latacunga, las microcuencas hidrográficas desempeñan un papel fundamental en el abastecimiento de agua y en el desarrollo de las actividades económicas locales. Por esta razón, la caracterización de las condiciones hidrográficas mediante herramientas geoespaciales de alta precisión constituye una alternativa técnica que permite generar información actualizada para apoyar la gestión ambiental, la planificación territorial y la conservación del recurso hídrico (Pizarro et al., 2024; Villarreal et al., 2025).

8.2. Determinación de variables hidrológicas

Las variables hidrológicas corresponden al conjunto de parámetros físicos y morfométricos que permiten caracterizar el comportamiento de una cuenca hidrográfica y comprender la dinámica del escurrimiento superficial, la infiltración, el transporte de sedimentos

y la respuesta del sistema frente a eventos de precipitación. Su análisis constituye una herramienta fundamental para la planificación de los recursos hídricos, la gestión ambiental y la evaluación de procesos hidrológicos, ya que facilita la interpretación de las características geomorfológicas que condicionan el funcionamiento de una cuenca. Actualmente, la integración de la fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha permitido mejorar la precisión en la obtención de estos parámetros, generando información geoespacial de alta resolución para estudios hidrológicos y ambientales (Pizarro et al., 2024).

Entre las principales variables hidrológicas utilizadas para la caracterización de una cuenca hidrográfica se encuentran el área de drenaje, el perímetro, la longitud, el ancho medio, la pendiente, los factores asociados a la forma, los parámetros del relieve y la red de drenaje. Estas variables permiten evaluar el comportamiento hidrológico de la cuenca, estimar su capacidad de respuesta frente a eventos extremos y generar información útil para la planificación territorial y la gestión sostenible del recurso hídrico (UNESCO, 2025; Villarreal et al., 2025).

8.2.1 Área (A).

El área de una cuenca hidrográfica corresponde a la superficie delimitada por la divisoria de aguas que contribuye al escurrimiento superficial hacia un punto de salida común. Este parámetro constituye una de las variables morfométricas más importantes, ya que influye directamente en el volumen de escorrentía, el tiempo de concentración y la respuesta hidrológica de la cuenca frente a eventos de precipitación. Su determinación permite comprender el comportamiento hidrológico del territorio y constituye la base para el cálculo de diversos índices morfométricos utilizados en la planificación y gestión de los recursos hídricos (Memon et al., 2024; Raja Shekar & Mathew, 2024).

8.2.2 Perímetro (P).

El perímetro corresponde a la longitud total de la divisoria de aguas que delimita una cuenca hidrográfica. Este parámetro permite definir los límites físicos de la cuenca y constituye una variable fundamental para el cálculo de índices morfométricos relacionados con la forma, la compacidad y el comportamiento hidrológico del sistema de drenaje. Su análisis facilita la

interpretación de la respuesta de la cuenca frente a eventos de precipitación y procesos de escorrentía superficial (Memon et al., 2024)

8.2.3 Longitud de la cuenca (L)

El perímetro de una cuenca hidrográfica corresponde a la longitud total de la divisoria de aguas que delimita su superficie de drenaje. Este parámetro permite establecer los límites físicos de la cuenca y constituye una variable básica para el cálculo de índices morfométricos relacionados con la forma y la compacidad del territorio. Su determinación facilita la caracterización geomorfológica y el análisis del comportamiento hidrológico de la cuenca mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Jandry et al., 2024).

8.2.4 Ancho de la cuenca (B).

El ancho medio de una cuenca representa la relación existente entre el área de drenaje y la longitud de la cuenca. Este parámetro permite describir la configuración geométrica del territorio y complementar el análisis morfométrico, facilitando la interpretación del comportamiento hidrológico y la distribución espacial del escurrimiento superficial (Matovelle et al., 2020)

La ecuación para determinar el ancho medio de la cuenca es:

$$B = \frac{A}{L}$$

Donde:

- **B** = ancho medio de la cuenca (km)
- **A** = área de la cuenca (km²)
- **L** = longitud de la cuenca (km)

8.2.5 Pendiente media de la cuenca.

La pendiente de una cuenca hidrográfica expresa el grado de inclinación del terreno y constituye uno de los parámetros morfométricos que mayor influencia ejerce sobre la velocidad del escurrimiento superficial, la infiltración, los procesos erosivos y el transporte de sedimentos.

Cuencas con pendientes elevadas presentan respuestas hidrológicas más rápidas frente a eventos de precipitación, mientras que pendientes suaves favorecen una mayor infiltración y almacenamiento temporal del agua (Zhicay, 2020).

La pendiente media de la cuenca puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$S = \frac{H-h}{L}$$

Donde:

- **S:** Pendiente media de la cuenca (m/m)
- **H:** Elevación del punto más alto de la cuenca (m)
- **h:** Elevación del punto más bajo de la cuenca (m)
- **L:** Longitud de la cuenca (m)

8.2.6 Factores asociados con la forma

Los factores asociados con la forma corresponden a un conjunto de índices morfométricos utilizados para describir la configuración geométrica de una cuenca hidrográfica a partir de la relación existente entre su área, perímetro y longitud. Estos parámetros permiten interpretar el comportamiento hidrológico del territorio, estimando la rapidez con la que el agua es concentrada hacia el cauce principal durante eventos de precipitación. En conjunto, estos índices constituyen una herramienta fundamental para evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca y apoyar la planificación del manejo de los recursos hídricos (Macas Cobeña et al., 2023).

Tabla 3 Factores asociados a la forma de la cuenca

Perímetro y Área de drenaje	Este parámetro se define como la superficie comprendida dentro de la divisoria de aguas de la región de estudio, cuya magnitud se representa habitualmente en kilómetros cuadrados (km ²) o hectáreas (ha).
Índice de forma	Este indicador establece la relación entre la forma de la cuenca y la de un cuadrado equivalente, cuando el índice tiene valores bajos la cuenca tiene menor probabilidad de generar incrementos bruscos del caudal que otra de la misma superficie con un factor de forma más elevado.

Índice de compacidad de Gravelius	Este parámetro establece la relación entre el perímetro de la cuenca y la circunferencia de un círculo de área equivalente, cuando su valor se aproxima a uno la cuenca es más propensa a generar crecidas.
Factor de forma	Este parámetro establece la relación entre el ancho medio del cauce principal y la longitud del sistema de drenaje de la cuenca. Las cuencas con forma alargada tienen menor probabilidad de tener precipitaciones bastante intensas de forma simultánea en toda su extensión lo que hace que tengan una exposición generalmente a eventos de menor intensidad.

Nota. Adaptado de Macas Cobeña et al. (2023). **Elaborado por** Cobos, P. (2026).

8.2.9 Factores asociados al relieve

Los factores asociados al relieve permiten caracterizar las condiciones topográficas de una cuenca hidrográfica mediante el análisis de parámetros como la altitud, el desnivel y la pendiente media. Estas variables influyen directamente en la velocidad del escurrimiento superficial, los procesos de erosión, la infiltración y el transporte de sedimentos, por lo que constituyen indicadores fundamentales para comprender la dinámica hidrológica y geomorfológica del territorio (Loaiza Espinoza et al., 2022)

Tabla 4 *Parámetros del relieve*

Longitud del cauce principal	Corresponde al recorrido total del cauce más largo dentro de la cuenca, el cual coincide con el río principal
Pendiente del cauce principal	Representa la relación entre la diferencia de elevación entre el punto inicial y final del cauce y su principal
Pendiente de la cuenca	Es el parámetro que muestra el grado de inclinación del terreno dentro de toda la cuenca influyendo

Curva hipsométrica	Es una representación gráfica que muestra la distribución altitudinal del área de una cuenca
---------------------------	--

Nota. Adaptado de Loaiza Espinoza et al. (2022). **Elaborado por** Cobos, P. (2026).

8.2.10 Parámetros de bifurcación

Los parámetros de bifurcación describen el grado de ramificación de la red de drenaje mediante la relación existente entre los cauces de diferentes órdenes. Su análisis permite evaluar la organización del sistema hidrográfico y conocer la influencia de las condiciones geológicas, geomorfológicas y estructurales sobre el desarrollo de la red de drenaje. Estos parámetros son ampliamente utilizados en estudios hidrológicos para interpretar el comportamiento del escurrimiento superficial y la evolución de las cuencas hidrográficas (Jandry et al., 2024).

Tabla 5 *Parámetros de la red hídrica*

Bifurcación de la red (orden de cauces)	Este parámetro hace referencia a la jerarquización de los cursos de agua dentro de una cuenca hidrográfica, donde las corrientes de primer orden son aquellas sin tributarios y que generalmente son originarias de zonas altas o de nacientes, a medida que los cauces se unen su orden crece, permitiendo analizar la estructura y complejidad del sistema de drenaje.
Densidad de drenaje	Es un parámetro morfométrico que relaciona la longitud total de la red de drenaje con el área de la cuenca, este índice permite evaluar la eficiencia del sistema de drenaje y su capacidad para evacuar el agua de escorrentía superficial.

Nota. Adaptado de Corozo Hurtado y Merino Córdova (2024). **Elaborado por** Cobos, P. (2026)..

8.3. Drones o vehículos aéreos no tripulados

Los vehículos aéreos no tripulados (Unmanned Aerial Vehicles, UAV) son plataformas aéreas capaces de realizar vuelos controlados de forma remota o mediante sistemas de navegación autónoma. Gracias a la incorporación de sensores, cámaras de alta resolución y sistemas de

posicionamiento global, estos equipos permiten obtener información geoespacial con elevada precisión, convirtiéndose en una herramienta ampliamente utilizada en estudios ambientales, agrícolas, forestales e hidrológicos. En la actualidad, su aplicación ha incrementado significativamente debido a la rapidez en la adquisición de datos, la reducción de costos operativos y la posibilidad de acceder a zonas de difícil acceso, facilitando el monitoreo y análisis de los recursos naturales (Pizarro et al., 2024).

Asimismo, los UAV integran diversos sistemas tecnológicos como sensores, cámaras de alta resolución, sistemas de posicionamiento global (GPS), unidades de navegación inercial y transmisores de datos, lo que les permite recopilar y transmitir información geoespacial con alta precisión. Dependiendo de su tamaño y capacidad operativa, pueden clasificarse en micro, mini o de gran escala, adaptándose a distintos tipos de misiones. Su capacidad de operar en tiempo real y acceder a áreas complejas ha impulsado su integración con Sistemas de Información Geográfica (SIG), fortaleciendo su aplicación en el análisis espacial y la gestión de riesgos naturales (Liang & Cui, 2024).

8.3.1 Tipos de UAV

Los UAV pueden clasificarse de acuerdo con la configuración de su estructura y sistema de vuelo. Entre los más utilizados se encuentran los de ala fija, caracterizados por cubrir grandes extensiones con mayor autonomía de vuelo, y los multirrotores, que ofrecen mayor estabilidad y maniobrabilidad para realizar vuelos a baja altura y obtener imágenes de alta resolución. Debido a estas características, los multirrotores son ampliamente utilizados en estudios de fotogrametría, cartografía y levantamientos topográficos de precisión (Liang & Cui, 2024).

8.3.2 Clasificación de los UAV de acuerdo al uso y aplicación

Los vehículos aéreos no tripulados pueden clasificarse según el propósito para el cual fueron diseñados. Entre sus principales aplicaciones se encuentran la agricultura de precisión, el monitoreo ambiental, la gestión de recursos hídricos, la cartografía, la inspección de infraestructura, la minería y la gestión de riesgos. En investigaciones relacionadas con recursos hídricos, los UAV permiten generar modelos digitales del terreno, ortomosaicos y productos cartográficos de alta resolución que facilitan la caracterización de cauces, microcuencas y zonas de interés ambiental (Villarreal et al., 2025).

Tabla 6 *Clasificación de los UAV*

UAV de reconocimiento	Diseñados para la observación y obtención de información en tiempo real mediante sensores ópticos, térmicos o multispectrales.
UAV señuelo o de distracción	Empleados para confundir sistemas de defensa aérea o simular la presencia de aeronaves reales, reduciendo el riesgo en operaciones militares.
UAV logísticos o de transporte	Diseñados para el traslado de carga ligera o suministros en zonas de difícil acceso, siendo útiles en emergencias, salud y entrega de materiales.
UAV de investigación y desarrollo	Utilizados en pruebas experimentales, desarrollo tecnológico y validación de nuevos sistemas de navegación, sensores o aerodinámica.

Nota. La tabla presenta la clasificación funcional de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) según su propósito operativo en distintos ámbitos de aplicación. **Elaborado por** Cobos P, 2026.

8.3.3. Componentes de los UAV

Los vehículos aéreos no tripulados están conformados por diversos componentes electrónicos, mecánicos y de navegación que permiten controlar el vuelo, estabilizar la aeronave y capturar información geoespacial con alta precisión. La integración adecuada de estos elementos garantiza el correcto funcionamiento del UAV durante las operaciones de fotogrametría y monitoreo ambiental (Zhang & Zhu, 2023).

Tabla 7. *Los componentes de los UAV*

Estructura o chasis (frame)	Es la base física del UAV donde se integran todos los componentes, proporciona soporte estructural y
Motores	Son los encargados de generar la fuerza de sustentación mediante la rotación de las hélices. E
Hélices (propelas)	Elementos aerodinámicos que transforman la energía del motor en empuje, permitiendo el ascenso, de

Controlador de vuelo (Flight Controller)	Es el “cerebro” del dron, encargado de procesar la información de los sensores y estabilizar el vuelo
Sistema de posicionamiento GPS/GNSS	Permite determinar la ubicación geográfica del UAV en tiempo real, facilitando la navegación autónoma
Sensores (cámaras, LiDAR, multiespectral)	Dispositivos encargados de capturar información del terreno, se utilizan para fotogrametría, monitoreo
Batería o sistema de energía	Es la fuente de alimentación del UAV habitualmente basada en baterías de polímero de litio (Li-Po), o
Sistema de comunicación (radio o telemetría)	Ayuda a la transmisión de datos entre el dron y la estación de control en tierra, incluyendo imágenes,

Nota. Adaptado de Zhang y Zhu (2023). *Elaborado por* Cobos P. (2026).

8.3.4. Ventajas y desventajas del uso del Dron

La utilización de vehículos aéreos no tripulados ha transformado los levantamientos fotogramétricos debido a su capacidad para obtener información geoespacial de alta resolución en menor tiempo y con menores costos operativos. No obstante, su aplicación también presenta limitaciones relacionadas con la autonomía de vuelo, las condiciones meteorológicas y la normativa vigente.

Tabla 8 *Ventajas y desventajas del uso de vehículos aéreos no tripulados en estudios hidrográficos*

VENTAJAS	Permiten obtener imágenes de muy alta resolución espacial, superiores a las de muchos satélites comerciales, lo que mejora la precisión en la generación de ortomosaicos y Modelos Digitales de Elevación (MDE). Reducen significativamente el tiempo y los costos de adquisición de información
-----------------	---

topográfica en comparación con métodos tradicionales de levantamiento terrestre. Facilitan el acceso a zonas de difícil acceso o que representan riesgos para el personal técnico, como cuencas, laderas inestables o áreas inundadas. Permiten generar productos cartográficos de alta precisión, como ortomosaicos, nubes de puntos, modelos digitales del terreno y modelos tridimensionales, útiles para estudios hidrológicos e hidráulicos.

DESVENTAJAS

La autonomía de vuelo es limitada debido a la capacidad de las baterías, especialmente en los UAV multirrotor, lo que restringe el área que puede levantarse en una sola misión.

Las condiciones meteorológicas, como lluvia, niebla o vientos fuertes, afectan la estabilidad del vuelo y la calidad de las imágenes obtenidas.

Requieren planificación previa del vuelo y personal capacitado para la operación del equipo y el procesamiento de la información.

Nota. Adaptado de Pizarro et al. (2024). *Elaborado por Cobos P.* (2026).

8.5. Plan de vuelo

El plan de vuelo constituye una etapa fundamental en los levantamientos fotogramétricos realizados mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV), ya que permite organizar de manera anticipada la misión de captura de imágenes y garantizar una cobertura completa del área de estudio. Durante esta fase se establecen las condiciones operativas necesarias para optimizar la adquisición de datos, considerando las características del terreno, el tipo de sensor utilizado y los objetivos de la investigación. Una adecuada planificación contribuye a mejorar la precisión geométrica de los productos fotogramétricos y reduce la posibilidad de errores durante la ejecución de la misión (Debus & Rodehorst, 2024).

Para la planificación del vuelo se emplean programas especializados que permiten definir la trayectoria del UAV mediante puntos de recorrido (waypoints), así como parámetros técnicos relacionados con la altura de vuelo, velocidad, dirección de las líneas de vuelo y porcentaje de traslape entre imágenes. Estos elementos garantizan que cada fotografía presente suficiente información común con las imágenes adyacentes, favoreciendo la reconstrucción tridimensional

del terreno y la generación de ortomosaicos y modelos digitales de elevación con alta precisión (Maes, 2025).

Una planificación adecuada también permite optimizar el tiempo de vuelo, disminuir el consumo energético del UAV y mejorar la calidad de los datos obtenidos. La correcta selección de los parámetros de vuelo influye directamente en la resolución espacial de las imágenes, la exactitud de los modelos digitales y la eficiencia del procesamiento fotogramétrico, por lo que constituye una etapa indispensable en investigaciones relacionadas con cartografía, monitoreo ambiental y caracterización hidrográfica (Nikolova et al., 2024).

8.5.1. Cálculos de factores de vuelo

La planificación de un vuelo fotogramétrico requiere definir previamente una serie de parámetros técnicos que influyen directamente en la calidad de la información obtenida y en la precisión de los productos cartográficos finales. Entre los principales se encuentran la altura de vuelo, la resolución espacial del terreno o Ground Sampling Distance (GSD), el porcentaje de traslape longitudinal y transversal entre imágenes, la velocidad de vuelo y el número de fotografías necesarias para cubrir completamente el área de estudio. La correcta configuración de estos parámetros garantiza una cobertura uniforme del terreno y favorece el procesamiento fotogramétrico mediante algoritmos de reconstrucción tridimensional (Debus & Rodehorst, 2024).

La altura de vuelo es uno de los parámetros más importantes, ya que determina el nivel de detalle de las imágenes capturadas. A menor altura se obtiene una mayor resolución espacial, aunque disminuye la superficie cubierta por cada fotografía; por el contrario, una mayor altura incrementa el área de cobertura, pero reduce el detalle de la información. Por ello, la selección de la altura debe realizarse considerando las características del sensor, los objetivos del estudio y la precisión requerida (Debus & Rodehorst, 2024).

Otro parámetro fundamental es el traslape entre imágenes, el cual corresponde al porcentaje de área compartida entre fotografías consecutivas y entre líneas de vuelo adyacentes. Un traslape adecuado permite identificar puntos homólogos durante el procesamiento fotogramétrico, mejorando la calidad de los ortomosaicos, modelos digitales de elevación y nubes

de puntos. En aplicaciones de cartografía y caracterización del terreno suelen emplearse porcentajes elevados de traslape para garantizar una reconstrucción tridimensional precisa (Maes, 2025).

Asimismo, la velocidad de vuelo debe ajustarse para evitar imágenes borrosas y asegurar una captura uniforme de la superficie. En conjunto, estos parámetros permiten optimizar el tiempo de vuelo, reducir la necesidad de repetir misiones y obtener productos cartográficos confiables para estudios hidrológicos, ambientales y de ingeniería.

El cálculo de la altura de vuelo promedio es la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Cálculo de la altura de vuelo

La altura de vuelo representa la distancia vertical entre el UAV y la superficie del terreno durante la captura de imágenes. Este parámetro influye directamente en la resolución espacial, la cobertura de cada fotografía y la precisión de los productos fotogramétricos generados. La selección de una altura adecuada depende de la resolución requerida, las características del sensor y los objetivos del estudio

$$H = C * Em$$

Donde:

- **H**= altura
- **C**= longitud focal
- **Em**= escala de la imagen

Ecuación 2. Cálculo de la distancia focal real

La distancia focal real corresponde a la longitud focal efectiva de la cámara considerando el factor de recorte del sensor. Este parámetro permite realizar los cálculos fotogramétricos con mayor precisión y constituye una variable importante durante la planificación del vuelo y la determinación del GSD.

$$C_{real} = \frac{c}{fr}$$

Donde:

- **C**= longitud focal
- **Fr**= factor de recorte
- **C real**= distancia focal real

8.6 Fotogrametría

La obtención de información geoespacial precisa constituye un elemento fundamental para el análisis y representación del territorio. En este contexto, la fotogrametría se ha consolidado como una de las principales técnicas para la generación de productos cartográficos digitales, debido a que permite obtener información métrica y espacial mediante el procesamiento de imágenes capturadas desde diferentes plataformas, entre ellas los vehículos aéreos no tripulados (UAV).

La fotogrametría es una técnica que permite obtener información geométrica, métrica y espacial de objetos o superficies a partir del procesamiento de imágenes digitales tomadas desde diferentes posiciones. Su aplicación posibilita la generación de ortomosaicos, modelos digitales de elevación, modelos digitales de superficie, nubes de puntos y reconstrucciones tridimensionales, productos ampliamente utilizados en estudios topográficos, ambientales, hidrológicos y de planificación territorial (Maes, 2025).

En los últimos años, el desarrollo de los UAV y de los algoritmos de reconstrucción fotogramétrica ha permitido optimizar la captura y el procesamiento de imágenes, reduciendo los costos y el tiempo de adquisición de datos en comparación con los métodos tradicionales. Asimismo, la incorporación de técnicas como Structure from Motion (SfM) ha incrementado la precisión de los modelos tridimensionales obtenidos, facilitando la caracterización detallada del terreno y el análisis espacial en diferentes áreas de investigación (Pizarro et al., 2024).

En investigaciones relacionadas con la caracterización hidrográfica, la fotogrametría mediante UAV constituye una herramienta eficiente para obtener información de alta resolución sobre la morfología del terreno, la cobertura vegetal y la configuración de los cauces. Los productos generados permiten realizar mediciones precisas, elaborar cartografía temática y apoyar la toma de decisiones para la gestión y conservación de los recursos hídricos (Maes, 2025).

8.6.1 Tipos de imágenes utilizadas en fotogrametría

Las imágenes constituyen la principal fuente de información en los procesos fotogramétricos, ya que a partir de ellas se obtienen las mediciones necesarias para generar productos cartográficos y modelos tridimensionales del terreno. La calidad de estos productos depende de factores como el tipo de sensor empleado, la resolución de las imágenes y las condiciones en que fueron capturadas, aspectos que influyen directamente en la precisión del procesamiento fotogramétrico. (Fanta-Jende et al., 2023)

En la actualidad, las imágenes utilizadas en fotogrametría son principalmente digitales, debido a que facilitan su almacenamiento, procesamiento y análisis mediante programas especializados. Estas imágenes pueden obtenerse con cámaras RGB convencionales, sensores multispectrales, hiperespectrales o cámaras térmicas, cuya selección dependerá de los objetivos de la investigación y de la información que se pretenda obtener del área de estudio (Pargiela, 2023).

De acuerdo con la orientación de captura, las imágenes pueden clasificarse en verticales y oblicuas. Las imágenes verticales son las más empleadas en cartografía y levantamientos topográficos porque presentan menores deformaciones geométricas y permiten generar ortomosaicos y modelos digitales del terreno con mayor precisión. Por su parte, las imágenes oblicuas registran la superficie desde diferentes ángulos, proporcionando información adicional sobre fachadas, taludes y otros elementos tridimensionales, lo que favorece la reconstrucción de modelos 3D más completos (Fanta-Jende et al., 2023).

Asimismo, la resolución espacial, el tamaño del píxel y el porcentaje de traslape entre imágenes constituyen parámetros fundamentales durante la captura de datos fotogramétricos, ya que condicionan la identificación de puntos homólogos y la calidad de los productos finales obtenidos mediante técnicas de reconstrucción tridimensional. Por ello, la selección adecuada del tipo de imagen y de las condiciones de adquisición representa una etapa esencial para garantizar la precisión de los levantamientos realizados con vehículos aéreos no tripulados.

Tabla 9 Clasificación de las imágenes en fotogrametría

Criterio de clasificación	Tipo de imagen	Aplicación principal
Formato	Digital (JPEG, TIFF, RAW)	Procesamiento fotogramétrico y generación de productos cartográficos.
Tipo de sensor	RGB	Elaboración de ortomosaicos y modelos digitales del terreno.
Tipo de sensor	Multiespectral	Evaluación de cobertura vegetal y estudios ambientales.
Tipo de sensor	Térmica	Monitoreo de temperatura superficial e inspección de infraestructura.
Orientación	Vertical	Cartografía, topografía y ortomosaicos.
Orientación	Oblicua	Reconstrucción tridimensional e inspección de estructuras.

Nota. Adaptado de Pargiela (2023). *Elaborado por* Cobos P. (2026).

8.6.2. Proceso de la fotogrametría digital mediante UAV

El procesamiento fotogramétrico mediante vehículos aéreos no tripulados comprende una secuencia ordenada de etapas que permiten transformar las imágenes capturadas durante el vuelo en información geoespacial útil para el análisis del territorio. Este proceso inicia con la planificación de la misión, continúa con la adquisición de imágenes, la georreferenciación y el procesamiento digital, y finaliza con la obtención de productos cartográficos como ortomosaicos, modelos digitales de elevación y nubes de puntos. La correcta ejecución de cada una de estas fases influye directamente en la precisión y calidad de los resultados obtenidos.

Durante el procesamiento fotogramétrico se emplean algoritmos capaces de identificar automáticamente puntos comunes entre fotografías consecutivas, reconstruyendo la geometría tridimensional del terreno mediante técnicas de correlación de imágenes. Este procedimiento permite generar modelos espaciales con alta precisión, ampliamente utilizados en levantamientos

topográficos, monitoreo ambiental, ingeniería y caracterización hidrográfica (Debus & Rodehorst, 2024).

Tabla 10 *Etapas del proceso de fotogrametría digital mediante UAV*

Planificación del vuelo	Consiste en definir la altura de vuelo, el GSD (Ground Sampling Distance), el traslape longitudinal y transversal, la velocidad y la trayectoria que seguirá el UAV, con el fin de garantizar una cobertura completa y obtener imágenes de calidad para el procesamiento fotogramétrico.
Orientación interna	Corresponde al proceso de calibración de la cámara mediante la determinación de sus parámetros internos, como la distancia focal, el punto principal y las distorsiones de la lente, con el propósito de mejorar la precisión geométrica de las imágenes.
Orientación externa	Permite determinar la posición y orientación de la cámara en el momento de la captura de cada fotografía utilizando información del sistema GNSS, la unidad de medición inercial (IMU) y puntos homólogos entre imágenes.
Puntos de control terrestre (GCP)	Son puntos materializados en el terreno cuyas coordenadas son obtenidas con equipos GNSS de alta precisión. Se utilizan para georreferenciar el proyecto y mejorar la exactitud posicional de los productos fotogramétricos.

Puntos de verificación (Chack Points)	Son puntos independientes que permiten evaluar la precisión del modelo fotogramétrico sin intervenir en el proceso de ajuste, verificando la calidad de los resultados obtenidos.
Ground Sampling Distance (GSD)	Representa el tamaño del terreno que corresponde a un píxel de la imagen. Un menor valor de GSD implica una mayor resolución espacial y un mayor nivel de detalle en los productos cartográficos.
Aerial Triangulation	Proceso mediante el cual se establecen relaciones geométricas entre fotografías consecutivas utilizando puntos comunes, permitiendo reconstruir la posición espacial de las imágenes y generar una nube de puntos inicial.
Generación de la nube de	Mediante algoritmos de Structure from Motion (SfM) y Multi-View Stereo (MVS) se reconstruye una representación tridimensional del terreno compuesta por millones de puntos georreferenciados.

puntos	
Modelo Digital del Terreno o (MDT/MDT)	A partir de la nube de puntos se generan modelos digitales que representan la topografía del terreno y sirven como base para análisis hidrológicos, modelación hidráulica y estudios de inundación.
Ortorefotografía)	Imagen georreferenciada corregida geométricamente que elimina las deformaciones provocadas por la perspectiva y el relieve, permitiendo realizar mediciones precisas sobre la superficie terrestre.
Procesamiento o media nte software	Los datos capturados son procesados en programas especializados como Agisoft Metashape, Pix4D Mapper o DJI Terra, donde se realiza la alineación de imágenes, reconstrucción tridimensional y generación de los productos cartográficos finales.

e
foto
gra
mét
rico

Nota. Adaptado de Debus y Rodehorst (2024). **Elaborado por** Cobos P. (2026).

8.7 Marco legal

El desarrollo de investigaciones relacionadas con la caracterización hidrográfica mediante vehículos aéreos no tripulados requiere el cumplimiento del marco jurídico vigente que regula la protección de los recursos hídricos, la conservación del ambiente y el uso de tecnologías aplicadas al levantamiento de información geoespacial. En el Ecuador, la Constitución, las leyes ambientales y las disposiciones emitidas por las entidades competentes establecen los principios para el manejo sostenible del agua, la conservación de las cuencas hidrográficas y la utilización responsable de herramientas tecnológicas en actividades de investigación y gestión territorial. En este contexto, el presente estudio se fundamenta en las principales normas legales que respaldan la protección del recurso hídrico y la aplicación de la fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados.

8.7.1 Constitución de la República del Ecuador

La Constitución de la República del Ecuador constituye la norma jurídica suprema del país y reconoce al agua como un derecho humano fundamental e irrenunciable, además de declararla patrimonio nacional estratégico de uso público. Asimismo, incorpora los derechos de la naturaleza, estableciendo la obligación del Estado de proteger y conservar los ecosistemas, promover el uso sostenible de los recursos naturales y garantizar la preservación de las cuencas hidrográficas. Estos principios proporcionan el sustento jurídico para investigaciones orientadas al análisis y conservación de los recursos hídricos (Constitucion del Ecuador, 2025).

8.7.2 Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua

La Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua regula la administración, planificación, conservación y aprovechamiento sostenible del recurso hídrico en

el Ecuador. Esta normativa promueve la gestión integrada de las cuencas hidrográficas y fomenta la generación de información técnica que facilite la planificación, monitoreo y conservación de los cuerpos de agua. En consecuencia, constituye uno de los principales fundamentos legales para investigaciones enfocadas en la caracterización hidrográfica mediante técnicas de fotogrametría y sistemas de información geográfica (Asamblea Nacional, 2020).

8.7.3 Código Orgánico del Ambiente (COA)

El Código Orgánico del Ambiente establece el marco jurídico para la protección, conservación, restauración y uso sostenible del patrimonio natural del Ecuador. Entre sus disposiciones se promueve la generación de información ambiental como base para la planificación territorial, la gestión de los ecosistemas y la toma de decisiones orientadas a la conservación de los recursos naturales. Por ello, el empleo de tecnologías geoespaciales como la fotogrametría mediante UAV constituye una herramienta que fortalece los procesos de evaluación y gestión ambiental contemplados en esta normativa (COA, 2020).

8.7.4 Regulación para la operación de vehículos aéreos no tripulados (UAV) en el Ecuador

La operación de vehículos aéreos no tripulados en el Ecuador se encuentra regulada por la Dirección General de Aviación Civil (DGAC), entidad responsable de establecer las disposiciones técnicas y de seguridad para el uso del espacio aéreo nacional. Estas regulaciones determinan los requisitos que deben cumplir las operaciones con UAV destinadas a actividades civiles, científicas y de investigación, garantizando la seguridad operacional y el cumplimiento de la normativa aeronáutica vigente. En investigaciones que emplean drones para levantamientos fotogramétricos, el cumplimiento de estas disposiciones resulta indispensable para asegurar el desarrollo adecuado de las actividades de campo.

8.7.5 Ministerio de Ambiente y Energía (MAE)

El Ministerio de Ambiente y Energía es la entidad rectora encargada de formular, coordinar y ejecutar las políticas públicas relacionadas con la gestión ambiental y la administración de los recursos hídricos en el Ecuador. Entre sus funciones se encuentran la protección de cuencas hidrográficas, la conservación de los ecosistemas y la promoción de herramientas técnicas que contribuyan al manejo sostenible del territorio. En este sentido, la

información generada mediante fotogrametría constituye un insumo de apoyo para los procesos de planificación y gestión ambiental impulsados por esta institución (Hugo Del Pozo Barrezuela, 2020).

8. VALIDACIÓN DE LAS PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS

¿Cómo contribuye la utilización de la fotogrametría con dron al análisis de las características hidrográficas de un segmento del cauce del río Pumacunchi, perteneciente a la microcuenca Drenajes Menores?

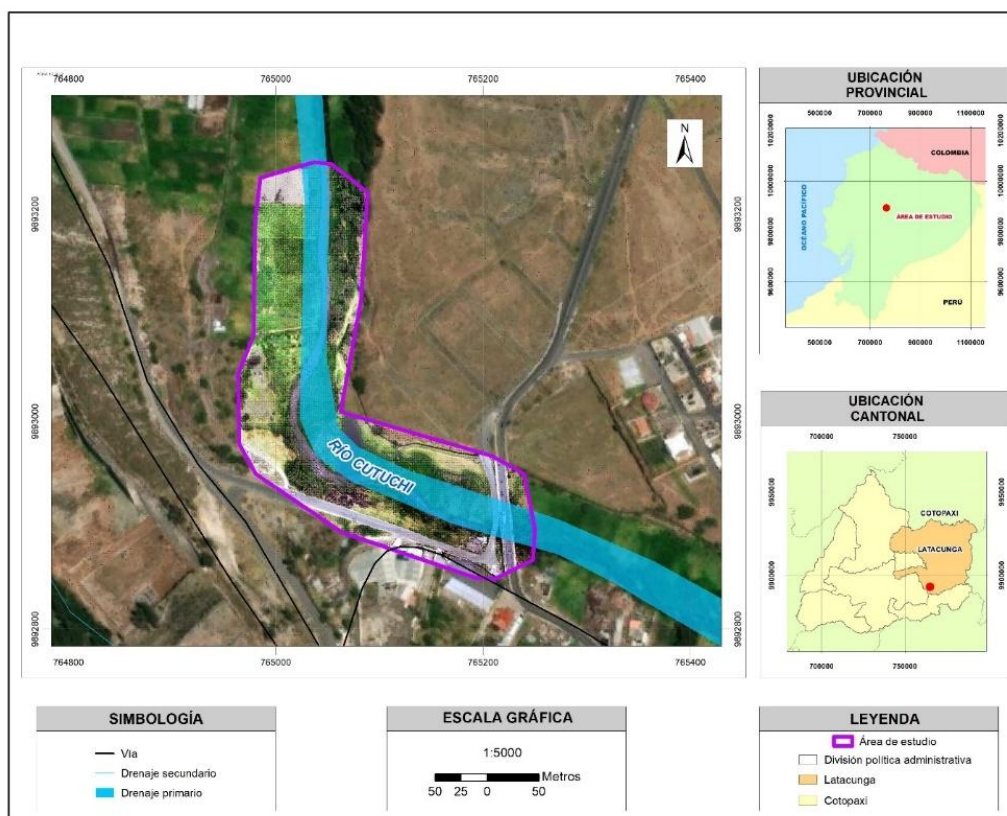
9. METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL

La presente investigación se desarrolló mediante una secuencia metodológica orientada a cumplir el objetivo planteado, la cual comprendió la planificación del levantamiento fotogramétrico, la adquisición de información geoespacial mediante un vehículo aéreo no tripulado (UAV), el procesamiento de las imágenes obtenidas y el análisis de las características hidrográficas del tramo de estudio del río Pumacunchi mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). El desarrollo de estas etapas permitió obtener productos cartográficos de alta resolución y la información necesaria para la caracterización hidrográfica del área de estudio

9.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en la parroquia Matriz que pertenece al cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi, comprende un tramo del río Pumacunchi, uno de los principales afluentes del río Cutuchi, ubicado en la parte occidental del área urbana de la ciudad de Latacunga. El tramo analizado se extiende desde las coordenadas UTM (WGS 84, Zona 17 Sur) $X = 764226,27$ m; $Y = 9896742,15$ m hasta $X = 765166,07$ m; $Y = 9894277,35$ m, abarcando aproximadamente 0,445232 ha.

Figura 1. *Área de estudios río Pumacunchi*



Nota. Comprende el tramo de estudio del río Pumacunchi. *Elaborado por* Cobos P. (2026).

9.2. Enfoque de la investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, debido a que se fundamentó en la obtención, procesamiento y análisis de información geoespacial generada mediante fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (UAV), Modelos Digitales de Elevación (DEM) y Sistemas de Información Geográfica (SIG). La información obtenida permitió determinar las características hidrográficas del tramo de estudio mediante el cálculo de variables morfométricas, topográficas e hidrográficas, garantizando precisión en la representación del terreno y en el análisis de los resultados

9.3. Tipo de investigación

9.3.1. Investigación descriptiva

La investigación fue de tipo descriptiva, ya que permitió caracterizar las condiciones hidrográficas del tramo de estudio del río Pumacunchi mediante la determinación de variables morfométricas, topográficas e hidrográficas obtenidas a partir del procesamiento fotogramétrico y del análisis espacial. La información recopilada permitió describir el comportamiento físico del cauce y representar cartográficamente las principales características del área evaluada.

9.3.2. Investigación exploratoria

La investigación también presentó un alcance exploratorio, debido a que empleó la fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV) como herramienta para la obtención de información geoespacial de alta resolución en un tramo del río Pumacunchi. La aplicación de esta tecnología permitió explorar las condiciones físicas del área de estudio y generar información técnica que contribuyó a la caracterización hidrográfica del cauce.

9.4 Métodos de la investigación

Los métodos empleados permitieron desarrollar de manera sistemática las diferentes etapas de la investigación, desde la recopilación de información hasta el análisis de las características hidrográficas del tramo de estudio del río Pumacunchi. Para ello se aplicaron los métodos descriptivo y exploratorio, los cuales facilitaron la obtención, procesamiento e interpretación de la información geoespacial generada mediante fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (UAV).

9.4.1 Método descriptivo

El método descriptivo se utilizó para caracterizar las condiciones físicas e hidrográficas del tramo de estudio del río Pumacunchi. Mediante este método se identificaron y describieron variables como la longitud del cauce, el perímetro, la pendiente del terreno y otros parámetros

morfométricos obtenidos a partir del procesamiento de la información geoespacial y del análisis realizado en los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

9.4.2 Método exploratorio

El método exploratorio permitió desarrollar el levantamiento fotogramétrico mediante un vehículo aéreo no tripulado (UAV), obteniendo imágenes aéreas de alta resolución que posteriormente fueron procesadas para generar el ortomosaico, el Modelo Digital de Elevación (DEM) y los demás productos cartográficos utilizados en la caracterización hidrográfica del área de estudio. Asimismo, facilitó el reconocimiento de las condiciones físicas del terreno y el análisis espacial del tramo evaluado del río Pumacunchi.

9.5. Procedimiento metodológico

El procedimiento metodológico se desarrolló de manera secuencial para cumplir con el objetivo de la investigación. Este comprendió la delimitación del área de estudio, la determinación de los parámetros de vuelo, la planificación y ejecución del levantamiento fotogramétrico mediante un vehículo aéreo no tripulado (UAV), el procesamiento de la información geoespacial y la obtención de las variables hidrográficas necesarias para la caracterización del tramo del río Pumacunchi. Las diferentes etapas permitieron generar productos cartográficos de alta resolución y obtener información confiable para el análisis hidrográfico del área de estudio.

9.5.1. Delimitación del área de estudio

Como parte de la planificación del levantamiento fotogramétrico, se realizó un diagnóstico preliminar del área de estudio mediante el software Google Earth Pro. Con el propósito de garantizar una cobertura adecuada durante el levantamiento aéreo, se definió un corredor de 50 metros a cada lado del eje del cauce, mediante el trazado de líneas perpendiculares a la trayectoria del río Pumacunchi. Este procedimiento permitió delimitar el polígono de trabajo y establecer la superficie que sería cubierta durante las misiones de vuelo, asegurando la obtención de información suficiente para el posterior procesamiento fotogramétrico.

9. 5.2 Determinación de los parámetros de vuelo

Para garantizar la calidad de la información obtenida durante el levantamiento fotogramétrico se establecieron previamente los principales parámetros de vuelo del vehículo aéreo no tripulado (UAV), considerando la altura de vuelo, la resolución espacial o Ground Sampling Distance (GSD), el porcentaje de traslape longitudinal y transversal, la velocidad de desplazamiento, la cobertura del área de estudio y la configuración de la cámara. La adecuada definición de estos parámetros permitió obtener imágenes con la resolución necesaria para generar productos cartográficos de alta precisión y minimizar errores durante el procesamiento fotogramétrico.

En la presente investigación se utilizó un DJI Phantom 4 Pro, equipado con una cámara digital con sensor CMOS de una pulgada y una distancia focal equivalente de 24 mm para formato de 35 mm. Debido a las características del sensor, la distancia focal real utilizada para los cálculos fotogramétricos correspondió aproximadamente a 8,8 mm, valor obtenido mediante la relación entre la distancia focal equivalente y el factor de recorte del sensor.

La selección de la altura de vuelo se realizó considerando las condiciones topográficas del tramo del río Pumacunchi, la presencia de vegetación ribereña, infraestructura existente y otros elementos que pudieran influir en la seguridad de la operación. Además, se evaluaron las condiciones meteorológicas antes de cada misión de vuelo para garantizar la estabilidad del UAV y la calidad de las imágenes capturadas.

La altura de vuelo mantiene una relación directa con la resolución espacial de las imágenes. A menores alturas se obtiene un mayor nivel de detalle, mientras que alturas superiores permiten cubrir áreas más extensas, aunque con menor resolución. Por esta razón, la altura fue seleccionada buscando un equilibrio entre la precisión de la información obtenida, la cobertura del terreno y la eficiencia del levantamiento fotogramétrico.

9.4.3. Cálculo de la altura de vuelo

Para garantizar la calidad del levantamiento fotogramétrico se establecieron previamente los parámetros de vuelo del vehículo aéreo no tripulado (UAV), considerando la altura de vuelo,

la resolución espacial (Ground Sampling Distance, GSD), el porcentaje de traslape longitudinal y transversal, la velocidad de desplazamiento, la orientación de las líneas de vuelo y la configuración de la cámara. La definición de estos parámetros permitió obtener imágenes con la resolución necesaria para la generación de productos cartográficos de alta precisión.

En la presente investigación se utilizó un DJI Phantom 4 Pro, equipado con una cámara digital con sensor CMOS de una pulgada y una distancia focal equivalente de 24 mm. Debido a las características del sensor, la distancia focal real empleada en los cálculos fotogramétricos correspondió a 8,8 mm, valor obtenido mediante la relación entre la distancia focal equivalente y el factor de recorte.

La altura de vuelo fue determinada considerando las características topográficas del área de estudio, la presencia de obstáculos naturales y antrópicos, así como las condiciones meteorológicas existentes durante la ejecución de las misiones de vuelo. Una adecuada selección de este parámetro permitió optimizar la cobertura del terreno, garantizar una resolución espacial apropiada y obtener la superposición necesaria entre imágenes para el procesamiento fotogramétrico.

La altura de vuelo se calculó mediante la siguiente expresión:

Ecuación 1. Cálculo de la altura de vuelo

$$H = C * Em$$

Donde:

- H = Altura de vuelo.
- C = Longitud focal.
- Em = Escala de la imagen.

Para determinar la distancia focal real de la cámara se aplicó la siguiente relación:

Ecuación 2. Relación entre la distancia focal y el factor de recorte

$$C_{real} = \frac{C}{Fr}$$

$$C_{real} = \frac{24 \text{ mm}}{2.7}$$

$$C_{real} = 8,8 \text{ mm}$$

Donde:

- C = Longitud focal.
- Fr = Factor de recorte.
- C real = Distancia focal real.

El resultado obtenido permitió determinar la distancia focal real de la cámara (8,8 mm), valor utilizado en los cálculos fotogramétricos para establecer la altura de vuelo.

Una vez establecida la altura de vuelo, se definieron los demás parámetros operativos del levantamiento fotogramétrico, incluyendo el porcentaje de traslape longitudinal y transversal, la velocidad de desplazamiento del UAV, la orientación de las líneas de vuelo y la configuración de la cámara. La adecuada planificación de estos parámetros permitió obtener imágenes con alta calidad geométrica para la generación del ortomosaico, la nube de puntos y el Modelo Digital de Elevación (DEM), utilizados posteriormente en el análisis hidrográfico del tramo de estudio del río Pumacunchi.

9.5. Planificación del levantamiento fotogramétrico

Con el fin de ejecutar el levantamiento fotogramétrico, fue necesario planificar cuidadosamente la misión de vuelo, definiendo la trayectoria más adecuada para cubrir la totalidad del área de estudio de manera eficiente. Durante esta etapa se establecieron las condiciones de operación, considerando la altitud de vuelo, la distribución de los puntos de control y la viabilidad del recorrido programado, con el propósito de garantizar una adecuada captura de imágenes. Para la adquisición de la información geoespacial se utilizó un vehículo aéreo no tripulado (UAV) DJI Phantom 4 Pro, equipado con una batería adicional que permitió asegurar la continuidad de las operaciones de campo.

9.5.1. Optimización del patrón de vuelo

Como parte de la planificación del levantamiento aéreo, se diseñó la misión de vuelo con el fin de determinar el número de recorridos necesarios para cubrir completamente el área de estudio. Para la captura de las imágenes se empleó un vehículo aéreo no tripulado DJI Phantom 4 Pro, realizando un total de cinco vuelos, los cuales permitieron registrar la totalidad del polígono establecido para la investigación, correspondiente a una superficie aproximada de 0,445232 ha.

Tabla 11 *Levantamiento fotométrico*

VUELO	ALTURA	LONGITUD
PRIMER VUELO	150m	30 ha
SEGUNDO VUELO	150m	30 ha
TERCER VUELO	150m	30 ha
CUARTO VUELO	150m	30 ha
QUINTO VUELO	150m	30 ha

Nota. La tabla presenta el número de vuelos realizados, la altura de operación y la superficie cubierta durante el levantamiento fotogramétrico. *Elaborado por* Cobos P. (2026).

9.5.2. Colocación de puntos de control

Como parte del levantamiento fotogramétrico, se instalaron puntos de control terrestre distribuidos estratégicamente dentro del área de estudio. Estos puntos sirvieron como referencias para georreferenciar las imágenes capturadas por el vehículo aéreo no tripulado (UAV) y mejorar la precisión de los productos cartográficos generados.

Cada punto fue materializado mediante marcas claramente visibles desde el aire, facilitando su identificación durante el procesamiento fotogramétrico. Posteriormente, sus coordenadas fueron determinadas utilizando equipos de posicionamiento satelital (GPS) de alta precisión, lo que permitió ajustar la ubicación espacial de las imágenes y reducir errores de georreferenciación. La incorporación de estos puntos de control contribuyó a incrementar la exactitud del ortomosaico, del Modelo Digital de Elevación (DEM) y de los demás productos obtenidos durante el procesamiento de la información.

9.5.3. Misión de vuelo

Una vez definidos los parámetros de vuelo y planificada la cobertura del área de estudio, se procedió a la ejecución del levantamiento fotogramétrico mediante el vehículo aéreo no tripulado (UAV). Previamente a cada operación se realizó una inspección del equipo, verificando el estado de las baterías, las hélices, el sistema de almacenamiento y el correcto funcionamiento del control remoto, con el propósito de garantizar un vuelo seguro y continuo.

Posteriormente, se cargó en el UAV el plan de vuelo previamente diseñado, el cual contenía la delimitación del área de estudio y las rutas programadas para la captura automática de las imágenes. Esta planificación permitió optimizar la cobertura del terreno y asegurar el nivel de traslape requerido entre fotografías para el procesamiento fotogramétrico.

Antes del despegue se efectuó un reconocimiento del sitio de operación con el fin de seleccionar un punto adecuado para el lanzamiento y aterrizaje del UAV. Para ello, se verificó que el área estuviera libre de obstáculos que pudieran comprometer la seguridad del vuelo, tales como líneas eléctricas, edificaciones, árboles de gran altura o elementos que pudieran interferir con la comunicación entre el control remoto y la aeronave.

Una vez comprobadas las condiciones de operación y las características del entorno, se ejecutaron las misiones de vuelo programadas, obteniendo las imágenes aéreas necesarias para la generación del ortomosaico, el Modelo Digital de Elevación (DEM) y los demás productos cartográficos empleados en el análisis hidrográfico del río Pumacunchi.

9.6. Procesamiento fotogramétrico en Pix4D Mapper

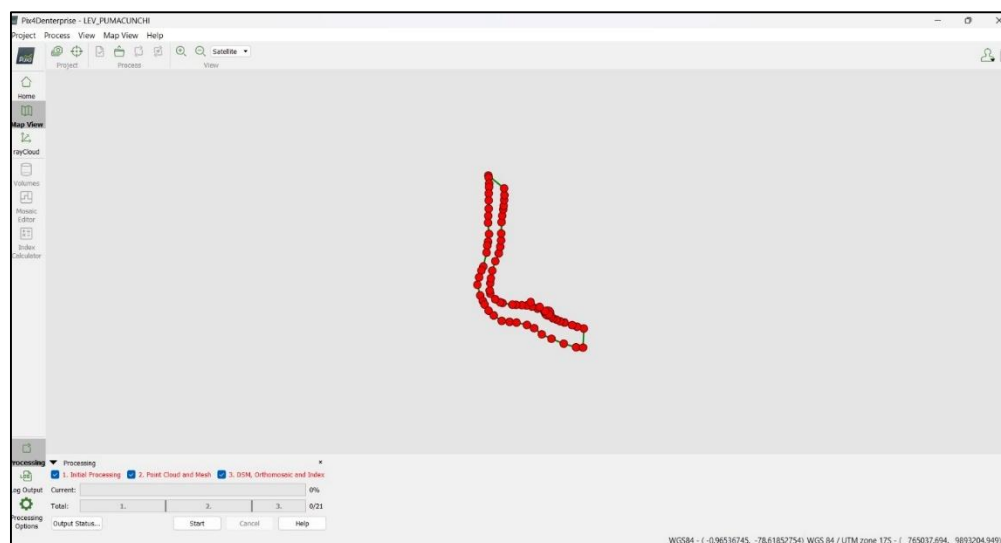
Las imágenes obtenidas durante las misiones de vuelo con el vehículo aéreo no tripulado DJI Phantom 4 Pro fueron procesadas mediante el software Pix4D Enterprise, con el propósito de generar productos geoespaciales de alta resolución para el análisis hidrográfico del tramo del río Pumacunchi. El procedimiento comprendió la importación y alineación de las fotografías, la generación de la nube de puntos densa, la reconstrucción tridimensional del terreno, la obtención del ortomosaico georreferenciado y la corrección de los productos fotogramétricos antes de su incorporación en ArcGIS.

9.6.1. Importación y alineación inicial de las imágenes

En la primera etapa se importaron al software Pix4D Enterprise las fotografías obtenidas durante el levantamiento aéreo y se configuró el sistema de coordenadas correspondiente al proyecto. Posteriormente, se realizó el procesamiento inicial mediante la identificación automática de puntos homólogos entre fotografías consecutivas, lo que permitió establecer la posición, orientación y relación espacial de cada imagen.

La alineación permitió reconstruir preliminarmente la trayectoria seguida por el UAV y verificar la cobertura del área de estudio. Durante esta fase también se revisó la correspondencia entre las imágenes y se identificaron posibles fotografías con baja calidad, desenfoque o insuficiente superposición que pudieran afectar la reconstrucción fotogramétrica.

Figura 2. Fase inicial de procesamiento y alineación de imágenes en Pix4D Mapper.



Nota. Organización espacial y alineación inicial de las fotografías capturadas mediante el UAV DJI Phantom 4 Pro.
Elaborado por Cobos P. (2026).

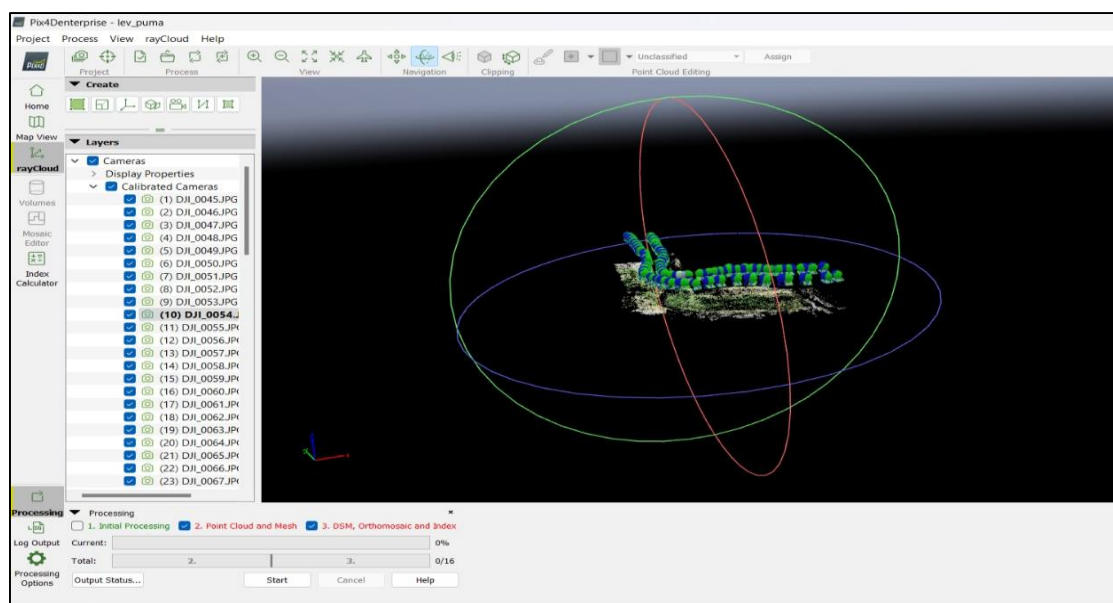
9.6.2. Generación de la nube de puntos densa

Una vez completada la alineación inicial, se procedió a generar la **nube de puntos densa**, mediante la identificación de coincidencias entre los píxeles de las diferentes fotografías. Este

proceso permitió obtener una representación tridimensional detallada del área evaluada, en la que se reconocieron la superficie del terreno, el cauce, la vegetación, la infraestructura y los demás elementos presentes dentro del tramo de estudio.

La densificación de puntos mejoró el nivel de detalle de la reconstrucción y proporcionó la información necesaria para la generación de la superficie tridimensional y de los productos cartográficos derivados. Además, se verificó la continuidad de la nube de puntos para identificar vacíos, deformaciones o elementos aislados que requirieran corrección posterior.

Figura 3. Generación de la nube de puntos densa en Pix4D Mapper.



Nota. Reconstrucción tridimensional preliminar del área de estudio obtenida mediante el procesamiento de imágenes UAV. *Elaborado por* Cobos P. (2026).

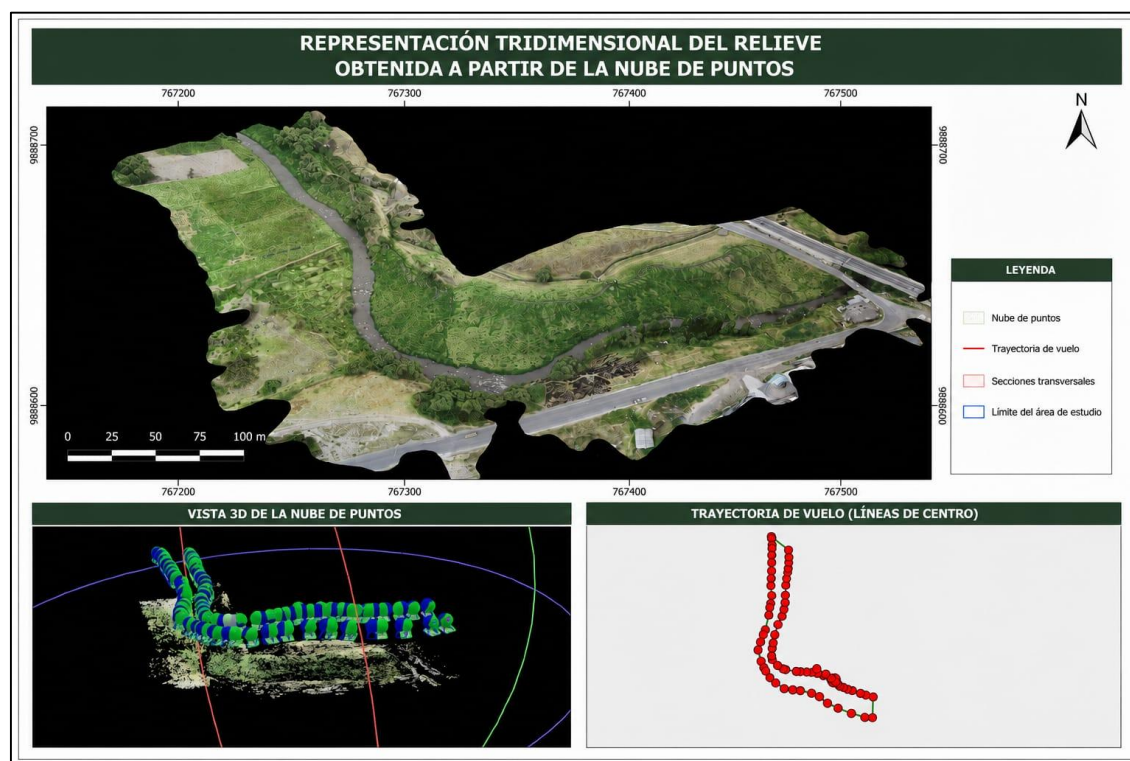
9.6.3. Generación del modelo digital tridimensional

A partir de la nube de puntos densa se generó el modelo digital tridimensional de la superficie del terreno. Este producto permitió representar las variaciones altitudinales y la

configuración espacial del área de estudio, facilitando la visualización del cauce del río Pumacunchi y de los cambios de relieve existentes en sus márgenes.

El modelo tridimensional constituyó un insumo intermedio para la obtención del Modelo Digital de Superficie y de los demás productos altimétricos empleados posteriormente en el análisis de pendientes, la generación del modelo TIN, la zonificación altitudinal y el cálculo de variables hidrográficas.

Figura 4. Modelo digital tridimensional generado en Pix4D Enterprise.



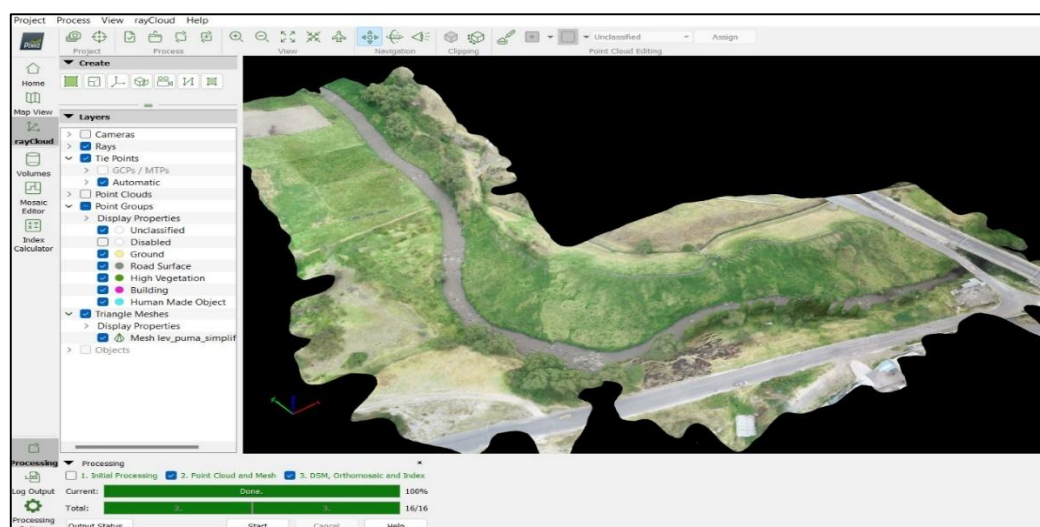
Nota. Representación tridimensional del relieve obtenida a partir de la nube de puntos densa. *Elaborado por* Cobos P. (2026).

9.6.4. Obtención del ortomosaico georreferenciado

Después de la reconstrucción tridimensional, se generó el ortomosaico georreferenciado, mediante la integración y corrección geométrica de las fotografías capturadas durante las misiones de vuelo. Este producto permitió obtener una imagen continua y de alta resolución espacial del tramo del río Pumacunchi, eliminando las distorsiones asociadas a la perspectiva y a la inclinación de la cámara.

El ortomosaico permitió identificar con detalle el recorrido del cauce, la cobertura vegetal, las áreas agrícolas, las vías y los demás elementos presentes en el entorno. Posteriormente, fue exportado en formato ráster para su incorporación en ArcGIS y su utilización en la delimitación del área de estudio, la obtención de variables espaciales y la elaboración de cartografía temática.

Figura 5. *Ortomosaico georreferenciado generado en Pix4D Enterprise.*



Nota. Producto cartográfico obtenido mediante la integración de las fotografías capturadas durante el levantamiento fotogramétrico. *Elaborado por* Cobos P. (2026).

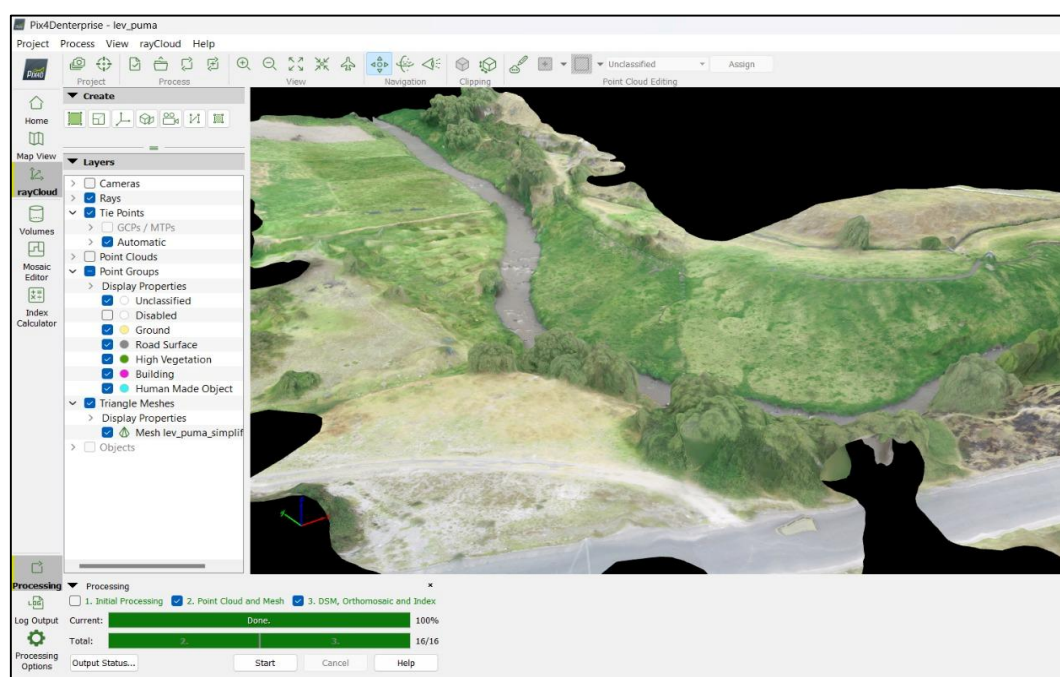
9.6.5. Corrección y depuración de los productos fotogramétricos

Finalmente, se realizó la revisión y corrección del ortomosaico, del modelo digital y de la nube de puntos, con la finalidad de identificar y eliminar imperfecciones generadas durante el

procesamiento automático. Entre los errores revisados se consideraron zonas sin información, franjas oscuras, discontinuidades, deformaciones y puntos ubicados fuera del área de interés.

La corrección del ortomosaico se efectuó mediante la selección de las imágenes que presentaban mejor correspondencia con la superficie real del terreno. De igual manera, la nube de puntos fue depurada mediante herramientas de clasificación y eliminación de puntos aislados o deformados. Este procedimiento permitió mejorar la continuidad y calidad de los productos finales antes de su exportación a ArcGIS.

Figura 6. Corrección del ortomosaico y depuración de la nube de puntos en Pix4D Enterprise.



Nota. Comparación de los productos antes y después del proceso de corrección y limpieza. *Elaborado por* Cobos P. (2026).

9.6.6. Productos obtenidos del procesamiento fotogramétrico

Como resultado del procesamiento realizado en Pix4D Enterprise se obtuvieron la nube de puntos densa, el modelo digital tridimensional, el ortomosaico georeferenciado y los productos altimétricos necesarios para el análisis del área de estudio. Estos insumos fueron

exportados e incorporados posteriormente en ArcGIS para la elaboración del mapa de pendientes, el modelo TIN, la zonificación altitudinal, la delimitación del cauce, el cálculo de área, perímetro, longitud y volumen, y la preparación de la información utilizada en el modelamiento de inundación.

9.7. Procesamiento de la información geoespacial

Una vez finalizado el levantamiento fotogramétrico, las imágenes obtenidas mediante el vehículo aéreo no tripulado (UAV) fueron revisadas y clasificadas considerando su calidad, cobertura del terreno y correspondencia con las condiciones observadas durante el trabajo de campo. Posteriormente, las fotografías fueron procesadas mediante el software Pix4D Enterprise, donde se realizó la reconstrucción fotogramétrica del área de estudio mediante la generación de la nube de puntos, el ortomosaico georreferenciado, el Modelo Digital de Elevación (DEM) y el modelo tridimensional del terreno. Estos productos constituyeron la base para el análisis espacial y la caracterización hidrográfica del tramo del río Pumacunchi.

Los productos fotogramétricos obtenidos fueron incorporados posteriormente al software ArcGIS, donde se realizaron los procedimientos de análisis espacial necesarios para la obtención de las variables hidrográficas del área de estudio. A partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) se efectuó el análisis de la pendiente del terreno mediante herramientas de geoprocetamiento, reclasificando la información en diferentes rangos para identificar las condiciones topográficas predominantes del sector. Posteriormente, la información fue transformada a formato vectorial para facilitar la elaboración de cartografía temática y el análisis espacial.

Asimismo, mediante las herramientas de medición y análisis espacial disponibles en ArcGIS se determinaron parámetros como la longitud del cauce, el perímetro del área de estudio y el volumen del tramo analizado, utilizando para ello la superficie triangular irregular (TIN) generada a partir del modelo digital del terreno. La información obtenida permitió caracterizar las condiciones geomorfológicas e hidrográficas del río Pumacunchi y sirvió como base para el cálculo de los índices morfométricos presentados en el apartado siguiente.

9.8. Obtención de variables hidrográficas

9.8.1. Análisis de pendiente del terreno

A partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) generado durante el procesamiento fotogramétrico, se realizó el análisis de la pendiente del terreno mediante herramientas de geoprocésamiento en ArcGIS. La información raster obtenida fue reclasificada en rangos de pendiente, permitiendo identificar la variación del relieve dentro del área de estudio y determinar las condiciones topográficas predominantes del sector.

Posteriormente, los resultados fueron transformados a formato vectorial para obtener la superficie correspondiente a cada categoría de pendiente y facilitar su representación mediante cartografía temática.

9.8.2. Determinación del perímetro y longitud del cauce

Para la obtención de las características geométricas del tramo analizado, se utilizó la información espacial del cauce principal del río Pumacunchi dentro del entorno SIG. Mediante las herramientas de medición y análisis espacial de ArcGIS se determinó la longitud del cauce principal y el perímetro asociado al área de estudio, parámetros necesarios para el cálculo de índices morfométricos e interpretación del comportamiento hidrográfico de la microcuenca.

9.8.3 Cálculo del volumen del cauce

El cálculo del volumen asociado al cauce se realizó mediante herramientas de análisis de superficie, utilizando como base el modelo tridimensional del terreno generado a partir de la información fotogramétrica. A través de la superficie triangular irregular (TIN) se representó la topografía del área evaluada y posteriormente se estimó el volumen correspondiente al tramo de análisis, permitiendo obtener una aproximación de las características geométricas del cauce.

9.8.4. Procesamiento y tratamiento de datos

El procesamiento de la información inició con la revisión y clasificación de las imágenes obtenidas durante las misiones de vuelo realizadas con el UAV DJI Phantom 4 Pro. Las

fotografías fueron analizadas considerando la calidad visual, cobertura del terreno y correspondencia con las condiciones observadas durante el trabajo de campo.

Posteriormente, las imágenes fueron procesadas mediante el software fotogramétrico Pix4D Enterprise, donde se realizó la reconstrucción digital del terreno mediante la generación de nubes de puntos, ortomosaicos de alta resolución y modelos tridimensionales del área de estudio. Estos productos permitieron disponer de información espacial detallada para el análisis de las características hidrográficas y geomorfológicas del río Pumacunchi.

La información procesada fue posteriormente incorporada al software ArcGIS, donde se elaboraron mapas temáticos, análisis espaciales y representación gráfica de las variables obtenidas. Los productos generados permitieron identificar características del relieve, comportamiento del cauce, variaciones topográficas y elementos relevantes para la evaluación de zonas susceptibles a inundación dentro del área de estudio.

9.9. Determinación de los parámetros hidrográficos

En esta etapa se determinaron los principales parámetros hidrográficos y morfométricos del área de estudio mediante la aplicación de ecuaciones e índices ampliamente utilizados en hidrología. Los valores obtenidos permitieron caracterizar la forma y el comportamiento de la microcuenca, proporcionando información para el análisis hidrográfico del tramo del río Pumacunchi.

9.9.1. Coeficiente de compacidad de Gravelius

El coeficiente de compacidad de Gravelius se empleó para evaluar la configuración geométrica de la microcuenca, estableciendo el grado de semejanza entre su perímetro y el de una circunferencia de igual superficie. Este índice permitió interpretar la forma de la microcuenca y su posible influencia en la respuesta hidrológica frente a eventos de precipitación. Para su determinación se aplicó la siguiente expresión matemática:

$$C_g = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

Donde:

- **Cg**= coeficiente de Gravelius
- **P**= Perímetro de la cuenca en Km
- **A** = Superficie de la cuenca en Km^2

9.9.2. Factor de forma

Este parámetro permitió determinar el comportamiento de respuesta de la microcuenca ante eventos de precipitación, evaluando su tendencia a generar incrementos rápidos del caudal o, por el contrario, presentar una respuesta hidrológica más gradual y prolongada. Para su cálculo se empleó la siguiente expresión matemática:

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

9.9.3. Factor de elongación

Este índice establece la relación existente entre el diámetro de una circunferencia cuya superficie es equivalente al área de la cuenca y la longitud máxima de la misma. Su cálculo permite analizar la configuración geométrica de la cuenca y comprender la influencia de su forma sobre el comportamiento hidrológico. Para su determinación se utilizó la siguiente ecuación:

$$R_e = \frac{(1,128)(\sqrt{A})}{L_c}$$

Donde:

- **Lc** = Longitud acial de la cuenca km
- **A** = Área de la cuenca km

9.10. Técnicas de investigación

9.10.1. Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica constituyeron una herramienta fundamental para el procesamiento, análisis e interpretación de la información espacial obtenida durante la investigación. Mediante el software ArcGIS se gestionaron los datos georreferenciados generados a partir del levantamiento fotogramétrico, permitiendo realizar procedimientos de análisis territorial y representación cartográfica.

A través de estas herramientas fue posible determinar variables relacionadas con las características físicas del área de estudio, como pendiente del terreno, longitud del cauce, perímetro, volumen del tramo analizado y otros parámetros hidrográficos necesarios para la caracterización del río Pumacunchi. Además, permitió elaborar mapas temáticos que facilitaron la interpretación espacial de los resultados obtenidos.

9.10.2 Levantamiento fotogramétrico mediante UAV

La fotogrametría aérea mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV) fue la técnica principal utilizada para la adquisición de información detallada del terreno. Este método permitió obtener imágenes de alta resolución mediante el uso del dron DJI Phantom 4 Pro, generando una representación tridimensional del área evaluada.

A partir del procesamiento fotogramétrico de las imágenes capturadas se obtuvieron productos digitales como el ortomosaico, la nube de puntos y el Modelo Digital de Elevación (DEM), los cuales proporcionaron información precisa sobre las condiciones topográficas y geomorfológicas del tramo del río Pumacunchi.

9.10.3 Análisis hidrográfico y geomorfológico

El análisis hidrográfico y geomorfológico permitió evaluar las características físicas del cauce y su relación con la dinámica del agua dentro de la microcuenca. Mediante la información obtenida del DEM y los análisis realizados en SIG, se estudiaron variables relacionadas con la pendiente, configuración del relieve, características del cauce y comportamiento espacial del sistema de drenaje.

Este análisis permitió identificar las condiciones del terreno que pueden influir en la circulación del flujo superficial y reconocer características geomorfológicas asociadas a la susceptibilidad de presentar procesos de inundación.

9.10.4 Observación de campo

La observación directa en campo fue utilizada como método complementario para validar la información obtenida mediante la fotogrametría y el procesamiento espacial. Durante las visitas al área de estudio se verificaron las condiciones reales del cauce, características del entorno, accesibilidad del terreno y elementos que pudieran influir en la interpretación de los resultados.

La comparación entre la información obtenida mediante herramientas digitales y las condiciones observadas en campo permitió mejorar la confiabilidad de los productos cartográficos y asegurar una adecuada representación del área analizada.

9.11. Instrumentos de investigación

Para el desarrollo de la investigación se emplearon herramientas tecnológicas y programas especializados que permitieron la adquisición, procesamiento, análisis e interpretación de información geoespacial del tramo de estudio del río Pumacunchi. Estos instrumentos facilitaron la generación de productos cartográficos de alta precisión y el análisis de las características hidrográficas del área evaluada. Por lo que se los organizo en la siguiente tabla.

Tabla 12 *Instrumentos utilizados durante la investigación*

Instrumento	Descripción	Aplicación en la investigación
Vehículo aéreo no tripulado (DJI Phantom 4 Pro)	Dron equipado con cámara digital de alta resolución y sistema de navegación GNSS/GPS.	Captura de imágenes aéreas del área de estudio para el levantamiento fotogramétrico.
Software Pix4D Enterprise	Software especializado en fotogrametría digital para el procesamiento de imágenes aéreas.	Generación del ortomosaico, nube de puntos, Modelo Digital de Elevación (DEM) y modelo tridimensional del terreno.

Software ArcGIS	Sistema de Información Geográfica (SIG) para el procesamiento y análisis de información espacial.	Obtención de variables hidrográficas, análisis de pendiente, cálculo del perímetro, longitud del cauce, volumen y elaboración de cartografía temática.
Google Earth Pro	Plataforma de visualización y análisis geoespacial.	Delimitación del área de estudio, planificación del levantamiento fotogramétrico y definición del corredor de vuelo.

Nota. La tabla presenta los principales instrumentos tecnológicos utilizados para la adquisición, procesamiento y análisis de la información geoespacial durante el desarrollo de la investigación. *Elaborado por* Cobos P. (2026)

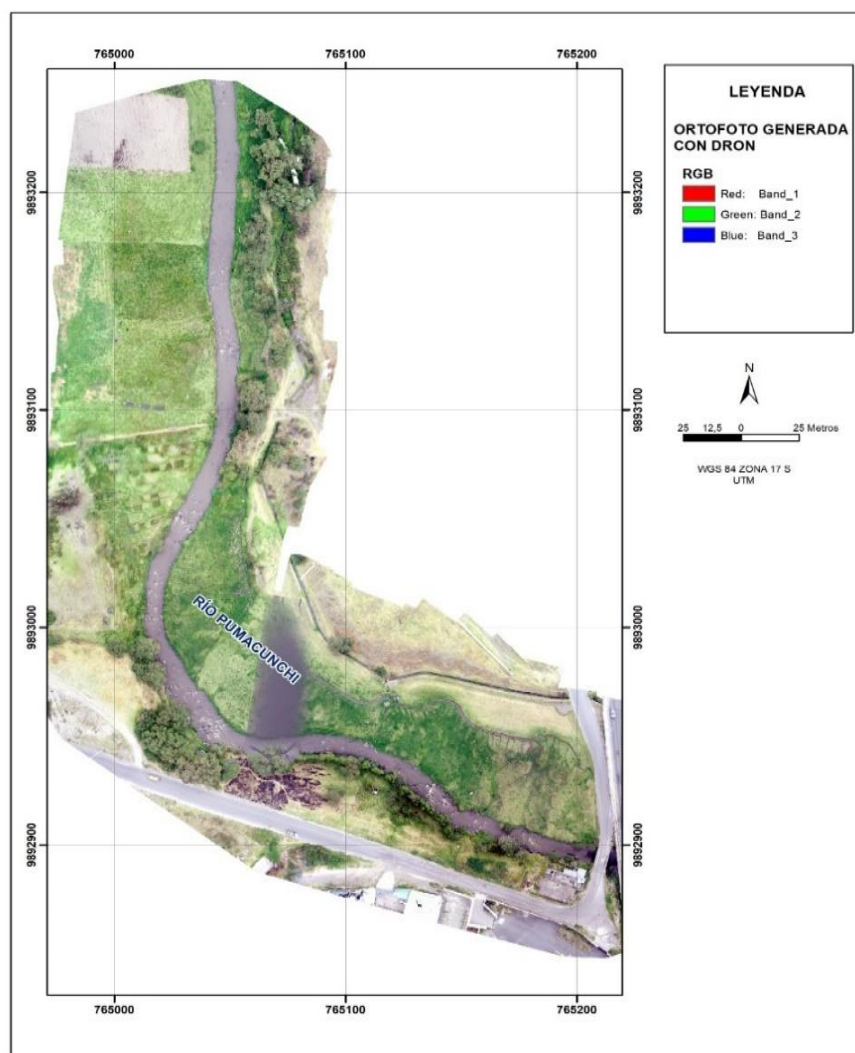
10. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante el levantamiento fotogramétrico y el procesamiento de la información geoespacial permitieron caracterizar las condiciones hidrográficas del tramo de estudio del río Pumacunchi. Mediante el empleo del vehículo aéreo no tripulado (UAV), el procesamiento fotogramétrico y el análisis mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), se generaron productos cartográficos y variables espaciales que sirvieron de base para la evaluación de las características geomorfológicas e hidrográficas del área de estudio. Los resultados se presentan siguiendo la secuencia metodológica desarrollada en la investigación y posteriormente se discuten con base en estudios científicos relacionados con la aplicación de la fotogrametría mediante UAV en estudios hidrográficos.

10.1. Productos cartográficos obtenidos mediante fotogrametría con UAV

La aplicación de la fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados permitió obtener productos cartográficos de alta resolución espacial, los cuales constituyeron la base para el análisis hidrográfico del tramo de estudio del río Pumacunchi. Entre estos productos, la ortofoto representó el principal insumo para la delimitación del cauce, la identificación de las características físicas del terreno y la generación de los modelos digitales utilizados en las etapas posteriores del análisis.

Figura 7. Ortofoto del tramo de estudio del río Pumacunchi obtenida mediante fotogrametría con UAV.



Nota. Ortofoto generada a partir del procesamiento fotogramétrico de las imágenes capturadas con el UAV DJI Phantom 4 Pro. *Elaborado por* Cobos P. (2026).

Interpretación

La ortofoto obtenida permitió identificar con precisión el cauce principal del río Pumacunchi, la cobertura vegetal ribereña, las áreas agrícolas, la red vial y otros elementos presentes en el entorno inmediato. Asimismo, la resolución espacial alcanzada facilitó la delimitación del tramo de estudio y proporcionó la información necesaria para la generación de

los productos cartográficos utilizados en el análisis hidrográfico, constituyéndose en el insumo principal para el procesamiento geoespacial desarrollado en la investigación.

Discusión

La obtención de una ortofoto de alta resolución confirmó la utilidad de la fotogrametría mediante UAV para el análisis de sistemas fluviales, al permitir una representación detallada del cauce y de los elementos que conforman su entorno. Estos resultados son consistentes con los reportados por Mlambo et al. (2024), quienes indican que el empleo de vehículos aéreos no tripulados incrementa la precisión de los productos cartográficos y mejora la identificación de características geomorfológicas relevantes para estudios hidrológicos. De manera similar, Padró et al. (2021) señalan que las ortofotos obtenidas mediante UAV constituyen una herramienta confiable para la delimitación de cauces, el análisis del uso del suelo y la elaboración de modelos digitales del terreno. En la presente investigación, la calidad del producto generado permitió disponer de una base cartográfica precisa para el cálculo de las variables hidrográficas y el desarrollo del modelamiento espacial del río Pumacunchi.

10.2. Delimitación espacial del área de estudio

10.2.1. Área y perímetro de la microcuenca

Con el propósito de definir espacialmente el área de estudio, se determinaron el área y el perímetro de la microcuenca mediante herramientas de análisis geoespacial en ArcGIS. Estos parámetros permitieron establecer la extensión del polígono delimitado y constituyeron la base para los análisis hidrográficos desarrollados posteriormente.

Tabla 13. Área y perímetro del tramo de estudio del río Pumacunchi

Zona de estudio	Área (m ²)	Área (km ²)	Perímetro (m)	Perímetro (km)
Microcuenca	39 562,70	0,039563	1 080,94	1,080,943

Nota. Área y perímetro de la microcuenca obtenidos mediante ArcGIS. *Elaborado por* Cobos P. (2026).

Interpretación

Los resultados obtenidos muestran que la microcuenca delimitada posee un área de 39 562,70 m² (0,039563 km²) y un perímetro de 1 080,94 m (1,080943 km). Estos valores representan la dimensión espacial del área analizada y permiten establecer con precisión los límites de la microcuenca utilizada para la caracterización hidrográfica del río Pumacunchi.

Discusión

La delimitación precisa del área de una microcuenca constituye una etapa fundamental para el desarrollo de estudios hidrológicos, ya que permite obtener parámetros espaciales confiables que sirven de base para el cálculo de índices morfométricos y el análisis del comportamiento del drenaje. En este sentido, Ariza-López et al. (2022) destacan que la integración de herramientas SIG mejora la precisión en la delimitación de unidades hidrográficas, mientras que Casella et al. (2020) señalan que la utilización de información obtenida mediante UAV permite definir con mayor exactitud los límites espaciales y reducir errores asociados a métodos tradicionales de cartografía.

10.2.2. Área y perímetro del tramo del río Pumacunchi

Tabla 14. Área y perímetro del tramo de río Pumacunchi

Tramo analizado	Área (m ²)	Área (km ²)	Perímetro (m)	Perímetro (km)
Tramo del río Pumacunchi	4 452,32	0,004452	1 004,41	1,004412

Nota. Área y perímetro del tramo del río Pumacunchi obtenidos mediante ArcGIS. **Elaborado por** Cobos P. (2026).

Interpretación

La delimitación espacial permitió establecer con precisión tanto la extensión de la microcuenca como del tramo del río Pumacunchi analizado. Los resultados muestran que la microcuenca presenta un área de 39 562,70 m², mientras que el tramo específico del cauce comprende 4 452,32 m², evidenciando que este último representa únicamente una porción del área total considerada para el estudio. La obtención de estos parámetros permitió definir con exactitud los límites espaciales del análisis y proporcionó la información necesaria para el cálculo de las variables hidrográficas desarrolladas en los apartados siguientes.

Discusión

La delimitación espacial constituye una etapa esencial en los estudios hidrográficos, ya que permite establecer con precisión la unidad de análisis sobre la cual se desarrollan los procedimientos de caracterización morfométrica e hidrológica. En este sentido, Ariza-López et al. (2022) destacan que la utilización de Sistemas de Información Geográfica mejora la precisión en la delimitación de cuencas y cauces, reduciendo los errores asociados a la cartografía convencional. Asimismo, Casella et al. (2020) señalan que la integración de información obtenida mediante UAV con herramientas SIG permite definir con mayor exactitud los límites espaciales de áreas de estudio, fortaleciendo la confiabilidad de los análisis posteriores. En la presente investigación, la delimitación tanto de la microcuenca como del tramo del río Pumacunchi proporcionó una base espacial precisa para la obtención de los parámetros hidrográficos y el análisis del comportamiento del cauce.

10.3. Índices morfométricos de la microcuenca

Con base en los valores obtenidos de área, perímetro y longitud de la microcuenca, se calcularon los principales índices morfométricos relacionados con su forma. Estos parámetros permiten interpretar la configuración geométrica de la microcuenca y su posible respuesta frente a eventos de escorrentía y crecidas.

10.3.1. Coeficiente de Compacidad de Gravelius

El coeficiente de compacidad de la microcuenca del río Pumacunchi es de 1.53 esto indica que la microcuenca presenta una forma alargada e irregular, este tipo de morfología generalmente se asocia con menores caudales pico y una menor susceptibilidad a crecidas repentinas en comparación con cuencas más compactas.

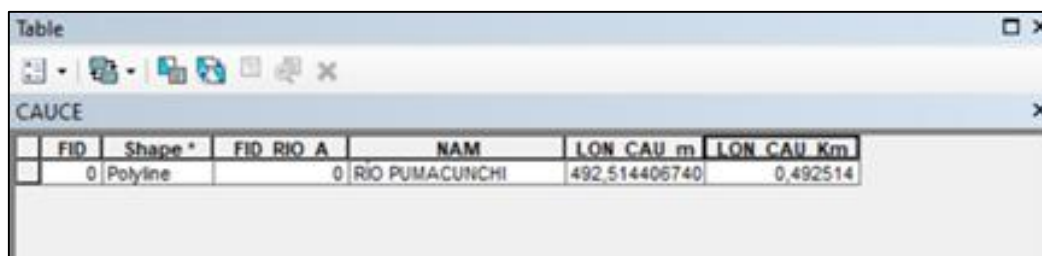
$$C_g = \frac{1.08094km}{2\sqrt{\pi 0,039563km^2}}$$

$$C_g = 1.53$$

10.3.2 Factor de forma

Para calcular el factor de la forma es necesario conocer el valor de la longitud la cual se presenta en la siguiente figura:

Figura 8. Muestra la longitud del área de estudio.



FID	Shape*	FID RIO A	NAM	LON CAU m	LON CAU Km
0	Polyline	0	RIO PUMACUNCHI	492,514406740	0,492514

Nota: Cobos P. 2026

El factor de forma es de 0,163 el cual indica que el segmento de estudios presenta una forma muy alargada, las microcuencas con valores bajos del factor de forma tienden a concentrar el escurrimiento de manera menos simultánea, por lo tanto, genera caudales picos menores y presenta menor susceptibilidad a inundaciones repentinas.

$$K_f = \frac{0,039563}{0,492514^2}$$

$$K_f = 0.163$$

Tabla 15. Rango de valores del factor de forma de Horton

Rango de Valores	Forma de la Cuenca
< 0,22	Muy alargada
0,22 – 0,30	Alargada
0,3 – 0,37	Ligeramente alargada
0,37 – 0,45	Ni alargada ni ensanchada

0,45 – 0,60	Ligeramente ensanchada
0,60 – 0,80	Ensanchada
0,80 -1,12	Muy ensanchada
> 1,20	Rodeando el desagüe

Nota: Los valores se asocian la forma de la cuenca de HORTON. *Elaborado por* Cobos P, 2026

10.3.3. Factor de elongación

El factor de elongación es de 0.456 la cual indica un factor de elongación bajo, lo que sugiere que la microcuenca tiene una morfología alargada, debido a que valores menores a 0.7 están asociados con cuencas que se alejan de la forma circular, favoreciendo que el escurrimiento superficial se distribuya a lo largo del tiempo y reduciendo la concentración simultanea de flujos, por eso, las crecidas son menos bruscas.

$$R_e = \frac{(1,128)(\sqrt{0.039563})}{0.492514}$$

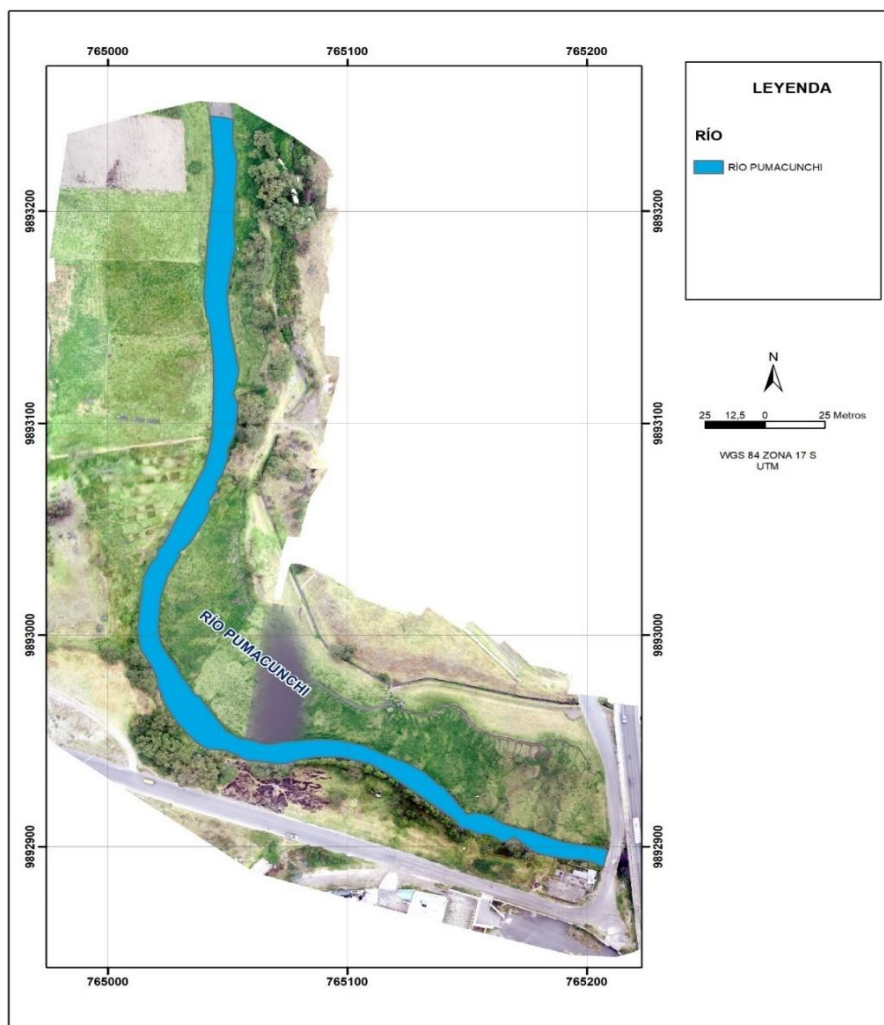
$$R_e = 0.465$$

En conjunto, los tres índices morfométricos evidencian que la microcuenca del río Pumacunchi presenta una forma alargada e irregular. Esta configuración favorece una respuesta hidrológica más gradual, con menor concentración simultánea del escurrimiento y menor susceptibilidad a crecidas repentinas en comparación con microcuencas de forma compacta.

10.4. Delimitación espacial del tramo del río Pumacunchi

Con el procesamiento de la información geoespacial fue posible delimitar con precisión el tramo del río Pumacunchi considerado para el desarrollo de la investigación. La delimitación permitió establecer los límites espaciales del cauce analizado y definir el área sobre la cual se efectuaron los análisis hidrográficos posteriores.

Figura 9. Delimitación espacial del tramo del río Pumacunchi.



Nota. Delimitación del tramo de estudio obtenida mediante ArcGIS a partir de la ortofoto generada con UAV DJI Phantom 4 Pro. **Elaborado por** Cobos P. (2026).

Interpretación

La delimitación obtenida permitió representar de manera precisa el recorrido del tramo del río Pumacunchi seleccionado para el estudio, identificando claramente sus límites dentro del área analizada. Esta representación espacial constituyó una referencia para la obtención de las variables hidrográficas y permitió desarrollar los análisis posteriores sobre un sector previamente definido, reduciendo posibles errores en la interpretación de la información geoespacial.

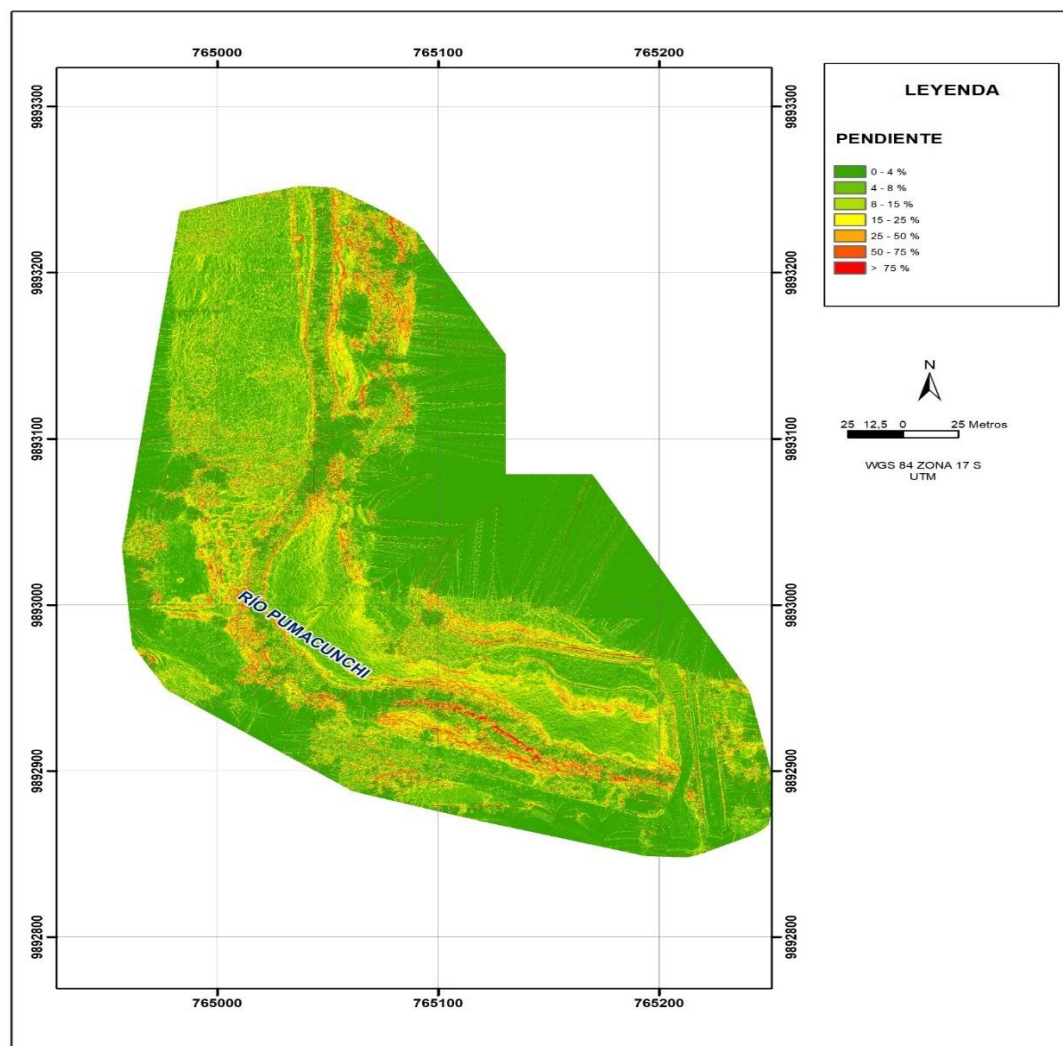
Discusión

La delimitación espacial del cauce constituye un procedimiento fundamental en los estudios hidrográficos, ya que permite definir con precisión la unidad de análisis sobre la cual se calculan los parámetros morfométricos y se desarrollan los modelos hidrológicos. En este estudio, la integración de la ortofoto con las herramientas de ArcGIS facilitó la identificación precisa del tramo del río Pumacunchi, reduciendo posibles errores en la definición de sus límites. Estos resultados coinciden con lo reportado por Casella et al. (2020), quienes señalan que la combinación de información obtenida mediante UAV y Sistemas de Información Geográfica mejora la delimitación de cauces y fortalece la precisión de los análisis espaciales. Asimismo, Tomsett y Leyland (2021) destacan que los productos fotogramétricos de alta resolución permiten representar con mayor exactitud la geometría de los sistemas fluviales, favoreciendo la obtención de información confiable para estudios hidrológicos y de gestión del territorio.

10.5. Análisis de la pendiente del terreno

Como parte de la caracterización geomorfológica del área de estudio, se determinó la distribución espacial de la pendiente del terreno mediante el análisis del Modelo Digital de Elevación (DEM). Esta variable permitió identificar las diferencias topográficas presentes en el tramo del río Pumacunchi y reconocer los sectores con mayor inclinación, información indispensable para comprender el comportamiento del escurrimiento superficial y la dinámica del cauce.

Figura 10. Distribución espacial de la pendiente del terreno en el área de estudio.



Nota. Mapa de pendientes generado a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) mediante ArcGIS. *Elaborado por* Cobos P. (2026).

Interpretación

La distribución de pendientes evidencia el predominio de superficies con inclinaciones bajas, representadas principalmente por las categorías de 0 - 4 % y 4 - 8 %, las cuales ocupan la mayor parte del área de estudio. En contraste, las pendientes más elevadas se concentran en los márgenes del cauce y en sectores específicos del relieve, donde se observan las categorías superiores representadas por tonalidades amarillas, naranjas y rojas. Esta variación topográfica

refleja la transición entre zonas relativamente planas y áreas con mayor inclinación asociadas a las riberas del río Pumacunchi.

Discusión

La distribución espacial de las pendientes obtenida en esta investigación demuestra que el relieve del área de estudio presenta un predominio de superficies de baja inclinación, mientras que los mayores gradientes se concentran en las márgenes del cauce, condición que influye directamente en la velocidad del escurrimiento superficial y en los procesos de erosión localizados. Estos resultados son similares a los reportados por Tarolli (2020), quien señala que los Modelos Digitales de Elevación derivados de fotogrametría con UAV permiten identificar con alta precisión las variaciones topográficas y mejorar el análisis de procesos geomorfológicos en ambientes fluviales. De igual manera, Fernández et al. (2022) indican que el análisis de pendientes mediante Sistemas de Información Geográfica constituye una herramienta confiable para evaluar la dinámica del relieve y apoyar la identificación de sectores con mayor susceptibilidad a procesos erosivos e inundaciones. En este estudio, el mapa de pendientes proporcionó información fundamental para comprender la configuración topográfica del tramo del río Pumacunchi y respaldar los análisis hidrográficos posteriores.

10.6. Análisis de la pendiente del terreno

Como parte de la caracterización geomorfológica del área de estudio, se determinó la distribución espacial de la pendiente del terreno mediante el análisis del Modelo Digital de Elevación (DEM). Este análisis permitió identificar los diferentes rangos de inclinación presentes en el tramo del río Pumacunchi y reconocer las zonas donde el relieve presenta mayores variaciones topográficas, información relevante para comprender el comportamiento del escurrimiento superficial y su influencia sobre la dinámica del cauce.

Tabla 16. Distribución del área según las clases de pendiente del terreno

Clase de pendiente (%)	Área (m ²)	Área (km ²)
0 – 4	20 290,35	0,020290
4 – 8	35 874,72	0,035875
8 – 15	12 156,37	0,012156
15 – 25	5 510,57	0,005511
25 – 50	1 940,49	0,001940
50 – 75	52,71	0,000053
> 75	10,69	0,000011

Nota. Clasificación de pendientes obtenida mediante el análisis del Modelo Digital de Elevación (DEM) en ArcGIS. *Elaborado por Cobos P. (2026).*

Interpretación

El análisis de pendientes muestra que el área de estudio está dominada por superficies de baja y moderada inclinación, siendo la categoría de 4–8 % la que registra la mayor extensión (35 874,72 m²), seguida por la clase de 0–4 % (20 290,35 m²). En contraste, las pendientes superiores al 50 % ocupan una superficie muy reducida, concentrándose principalmente en sectores próximos a las márgenes del cauce y en zonas con cambios abruptos del relieve. Estos resultados evidencian un predominio de terrenos con pendientes suaves, interrumpidos por áreas localizadas de mayor inclinación.

Discusión

La distribución de las pendientes obtenida en el presente estudio evidencia que el relieve del tramo analizado está conformado principalmente por superficies de baja a moderada inclinación, condición que influye en el comportamiento del escurrimiento superficial y en la estabilidad de las márgenes del cauce. Estos resultados son consistentes con lo señalado por Tarolli (2020), quien indica que los Modelos Digitales de Elevación generados mediante fotogrametría con UAV permiten representar con alta precisión las variaciones topográficas y facilitan la identificación de sectores con mayor susceptibilidad a procesos erosivos. De manera similar, Fernández et al. (2022) destacan que el análisis de pendientes mediante Sistemas de Información Geográfica constituye una herramienta eficaz para evaluar la dinámica del relieve y

apoyar estudios relacionados con la gestión de cuencas y la identificación de zonas potencialmente vulnerables a procesos de erosión e inundación. En la presente investigación, la predominancia de pendientes bajas y moderadas constituye un elemento importante para interpretar las condiciones geomorfológicas del tramo del río Pumacunchi y comprender su comportamiento hidrográfico.

10.7. Determinación de la longitud del cauce

La longitud del cauce constituye uno de los parámetros hidrográficos más importantes para la caracterización física de un sistema fluvial, debido a que permite describir el recorrido del río dentro del área de estudio y sirve como variable para el cálculo de diversos índices morfométricos. Para el tramo analizado del río Pumacunchi, esta variable fue obtenida mediante herramientas de medición espacial implementadas en ArcGIS.

Tabla 17. *Longitud del cauce del río Pumacunchi*

Cauce	Longitud (m)	Longitud (km)
Río Pumacunchi	492,51	0,492514

Nota. Longitud del cauce obtenida mediante el análisis espacial realizado en ArcGIS. *Elaborado por* Cobos P. (2026).

Interpretación

Los resultados muestran que el tramo analizado del río Pumacunchi presenta una longitud de 492,51 m (0,492514 km). Este valor corresponde al recorrido del cauce principal dentro del área delimitada para la investigación y constituye un parámetro fundamental para la caracterización hidrográfica del sector, ya que representa la dimensión longitudinal del tramo evaluado.

Discusión

La determinación precisa de la longitud del cauce es un aspecto esencial en los estudios hidrográficos, debido a que influye en la caracterización morfométrica de los sistemas fluviales

y en la interpretación de su comportamiento hidrológico. En la presente investigación, la medición realizada mediante ArcGIS permitió obtener un valor confiable del recorrido del cauce dentro del área de estudio. Estos resultados son consistentes con lo señalado por Yilmaz et al. (2021), quienes indican que el uso de Sistemas de Información Geográfica mejora la precisión en la medición de parámetros lineales de redes de drenaje. Asimismo, Ghorbanzadeh et al. (2022) destacan que la integración de datos obtenidos mediante UAV con herramientas SIG facilita la obtención de mediciones espaciales precisas y fortalece el análisis geomorfológico e hidrológico de los cauces.

10.8. Estimación del volumen del tramo de estudio

Como parte de la caracterización geomorfológica del área de estudio, se realizó la estimación del volumen del terreno correspondiente al tramo del río Pumacunchi mediante herramientas de análisis tridimensional en ArcGIS. Este procedimiento permitió cuantificar el volumen comprendido dentro del área delimitada, proporcionando información útil para la interpretación de la configuración del terreno y su relación con las condiciones hidrográficas del sector.

Tabla 18. *Volumen estimado del tramo de estudio del río Pumacunchi*

Plano de referencia (m)	Área 2D (m ²)	Área 3D (m ²)
2738,59	4 441,75	7 767,99

Nota. Valores obtenidos mediante el análisis volumétrico realizado en ArcGIS. **Elaborado por** Cobos P. (2026).

Interpretación

Los resultados muestran que el análisis volumétrico del tramo de estudio registró un área bidimensional de 4 441,75 m², un área tridimensional de 7 767,99 m² y un volumen estimado de 18 810,02 m³, considerando un plano de referencia de 2738,59 m. Estos valores reflejan las

características tridimensionales del terreno y evidencian las variaciones del relieve presentes dentro del área analizada, constituyendo un insumo importante para la evaluación geomorfológica del cauce.

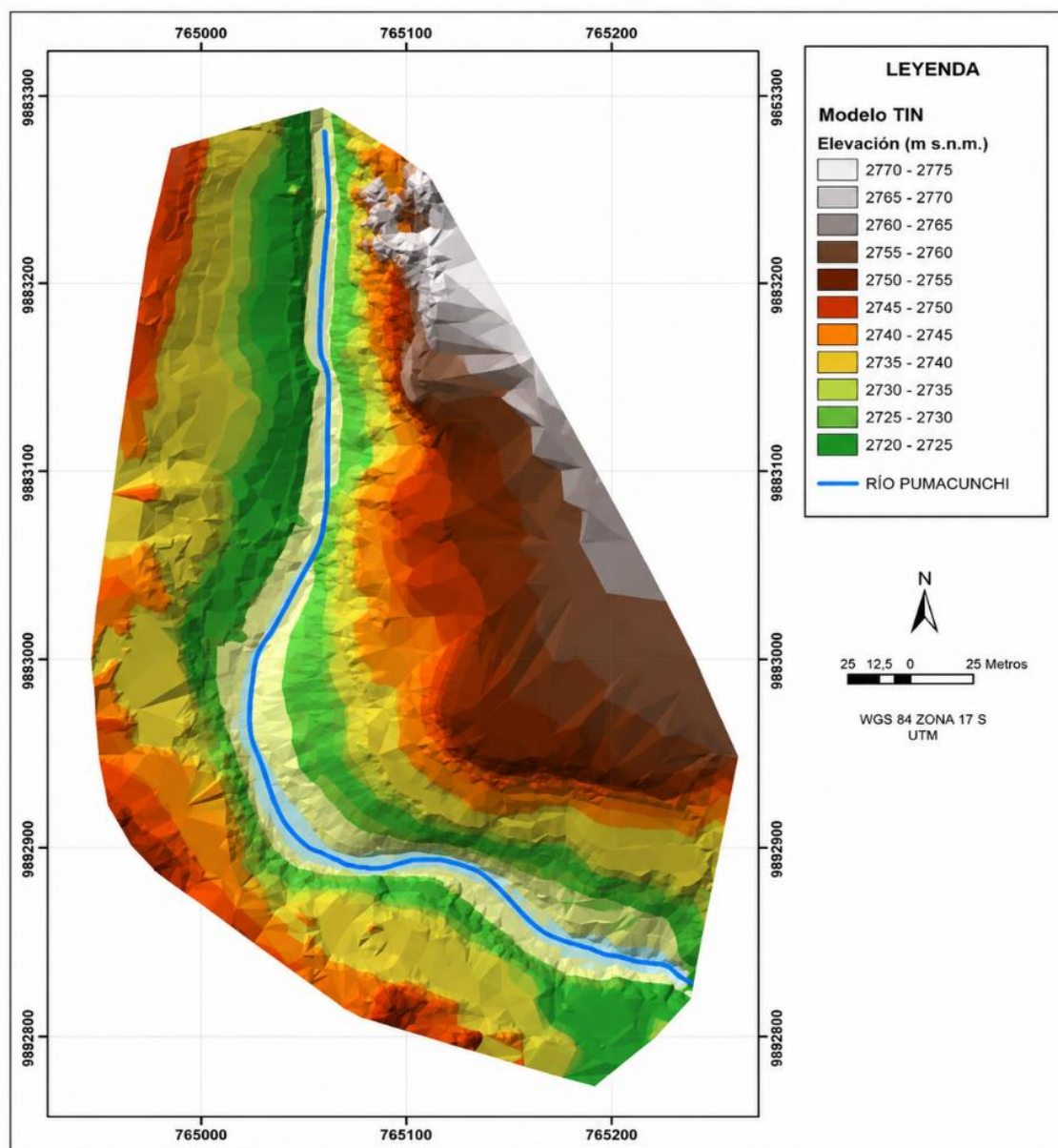
Discusión

La estimación del volumen mediante modelos tridimensionales constituye una herramienta importante para comprender la configuración del relieve y evaluar las características geomorfológicas de los sistemas fluviales. En la presente investigación, el empleo de ArcGIS permitió obtener una cuantificación del volumen del terreno a partir de información geoespacial derivada de la fotogrametría, proporcionando resultados consistentes para la caracterización del tramo estudiado. Estos hallazgos coinciden con lo señalado por Eltner et al. (2021), quienes destacan que la integración de modelos digitales de superficie y herramientas SIG mejora la precisión de los análisis volumétricos en estudios ambientales. Asimismo, Nex y Remondino (2021) indican que los modelos tridimensionales obtenidos mediante fotogrametría con UAV permiten estimar volúmenes y representar las variaciones del terreno con un alto nivel de precisión, favoreciendo la evaluación de procesos geomorfológicos y la gestión de espacios naturales.

10.9. Modelo de Red Irregular Triangulada (TIN)

Con el propósito de representar la configuración tridimensional del terreno, se generó un Modelo de Red Irregular Triangulada (TIN) a partir de la información obtenida durante el levantamiento fotogramétrico. Este modelo permitió representar las variaciones altitudinales del área de estudio mediante una superficie continua, facilitando la interpretación de la forma del relieve y constituyendo un insumo para el análisis de las características geomorfológicas del tramo del río Pumacunchi.

Figura 11. Modelo de Red Irregular Triangulada (TIN) del área de estudio.



Nota. Modelo TIN generado mediante ArcGIS a partir de la información obtenida por fotogrametría con UAV.

Elaborado por Cobos P. (2026).

Interpretación

El modelo TIN representa la variación altitudinal del terreno mediante una superficie tridimensional conformada por una red de triángulos irregulares. En la figura se observa que las mayores elevaciones se concentran hacia los extremos del área de estudio, mientras que las zonas

de menor altitud corresponden al cauce del río Pumacunchi y su planicie inmediata. Esta representación permitió visualizar la configuración del relieve e identificar los cambios topográficos presentes dentro del tramo analizado.

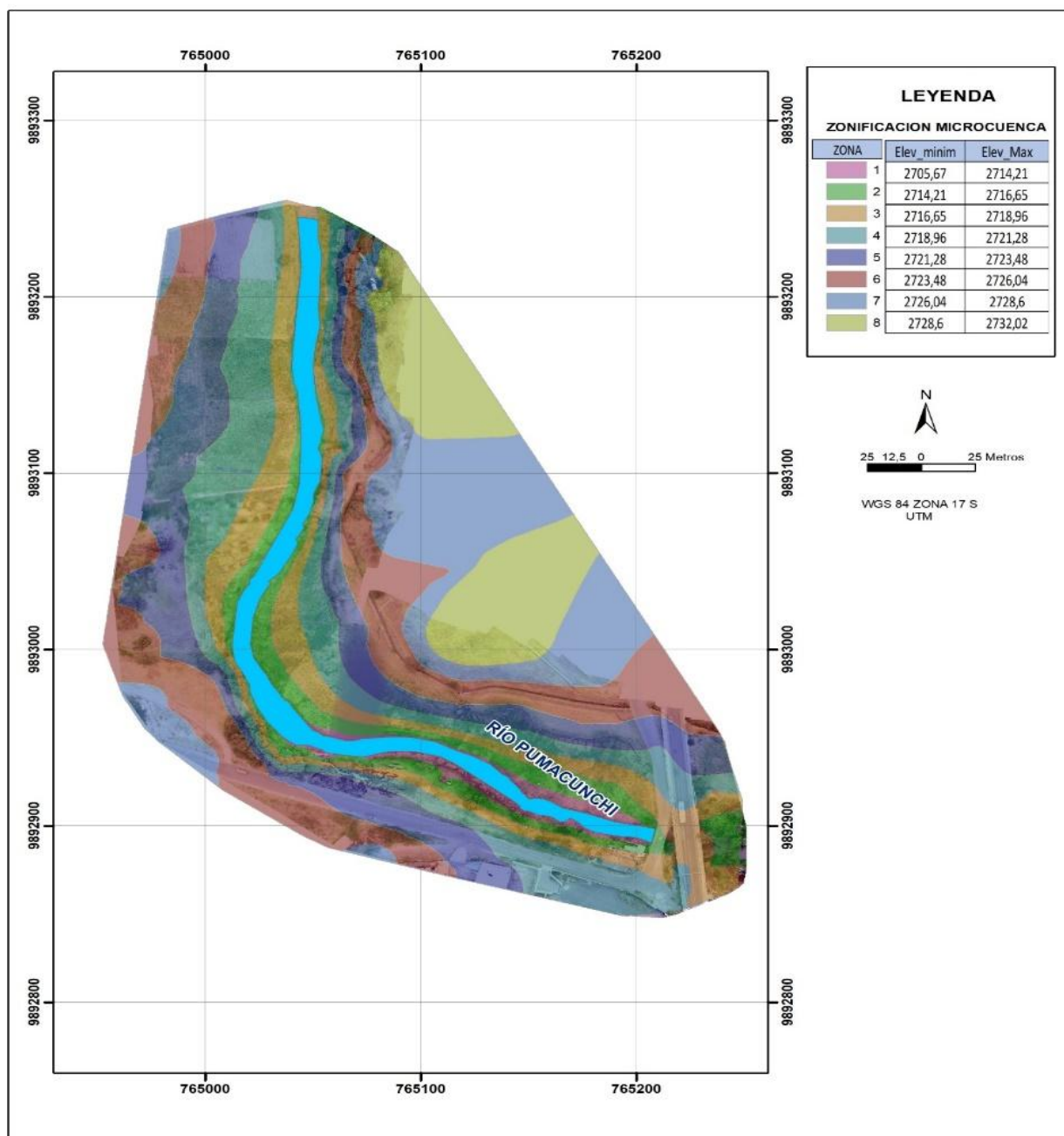
Discusión

La generación del modelo TIN permitió representar de forma detallada la configuración tridimensional del terreno, facilitando la identificación de las variaciones altitudinales que condicionan la dinámica del cauce y el comportamiento del escurrimiento superficial. Estos resultados son consistentes con lo señalado por Colomina y Molina (2021), quienes destacan que los modelos tridimensionales derivados de fotogrametría mediante UAV constituyen una herramienta confiable para la representación del relieve y el análisis geomorfológico. De igual manera, Fernández-Hernández et al. (2022) indican que los modelos TIN obtenidos a partir de información geoespacial permiten describir con mayor precisión la topografía del terreno y sirven como base para la generación de modelos digitales utilizados en estudios hidrológicos y ambientales. En la presente investigación, el modelo TIN permitió comprender la distribución espacial de las elevaciones y proporcionó un soporte técnico para el análisis de la pendiente y de las demás variables hidrográficas.

10.10. Zonificación altitudinal de la microcuenca

Con el fin de analizar la distribución espacial de las variaciones altitudinales presentes en el área de estudio, se realizó la zonificación de la microcuenca mediante la clasificación de intervalos de elevación obtenidos a partir del Modelo Digital de Elevación. Este procedimiento permitió dividir el terreno en diferentes zonas altitudinales, facilitando la identificación de las variaciones topográficas existentes a lo largo del tramo del río Pumacunchi y proporcionando una base para la interpretación de las condiciones geomorfológicas del área.

Figura 12. Zonificación altitudinal de la microcuenca del río Pumacunchi.



Nota. Zonificación elaborada mediante ArcGIS a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM). *Elaborado por* Cobos P. (2026).

Interpretación

La zonificación permitió identificar ocho intervalos altitudinales dentro de la microcuenca, comprendidos entre 2705,67 m s. n. m. y 2732,02 m s. n. m. Se observa una distribución gradual de las elevaciones, donde las cotas más bajas se localizan en las proximidades del cauce del río Pumacunchi, mientras que las mayores elevaciones se concentran hacia los sectores periféricos del área de estudio. Esta distribución evidencia la transición natural del relieve y permite reconocer las diferencias topográficas que caracterizan el entorno del cauce.

Discusión

La zonificación altitudinal constituye una herramienta importante para comprender la organización espacial del relieve y su influencia sobre el comportamiento hidrológico de una microcuenca. En la presente investigación, la clasificación en ocho intervalos permitió representar de manera detallada las variaciones de elevación existentes en el área de estudio, facilitando la interpretación de la dinámica geomorfológica del tramo analizado. Estos resultados coinciden con lo señalado por Zevenbergen et al. (2021), quienes indican que la clasificación altitudinal derivada de modelos digitales del terreno mejora la interpretación de los procesos geomorfológicos y favorece la caracterización de cuencas hidrográficas. Asimismo, Santos et al. (2023) destacan que la integración de información altimétrica obtenida mediante fotogrametría con UAV y herramientas SIG proporciona una representación precisa de la variabilidad topográfica, fortaleciendo los análisis relacionados con la planificación territorial y la gestión de recursos hídricos.

Tabla 19. Distribución del área según la zonificación altitudinal del tramo de estudio

Zona	Elevación mínima (m s. n. m.)	Elevación máxima (m s. n. m.)	Área (m ²)	Área (km ²)
1	2705,67	2714,21	3 142,19	0,003142
2	2714,21	2716,65	7 205,26	0,007205
3	2716,65	2718,96	8 879,15	0,008879
4	2718,96	2721,28	11 870,34	0,011870
5	2721,28	2723,48	12 581,31	0,012581
6	2723,48	2726,04	13 424,23	0,013424
7	2726,04	2728,60	10 815,35	0,010815
8	2728,60	2732,02	8 007,90	0,008008

Nota. Clasificación altitudinal obtenida mediante ArcGIS a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM).
Elaborado por Cobos P. (2026).

Interpretación

La zonificación altitudinal permitió clasificar el área de estudio en ocho intervalos de elevación comprendidos entre 2705,67 y 2732,02 m s. n. m. De acuerdo con los resultados obtenidos, la zona 6 presentó la mayor superficie con 13 424,23 m², seguida por las zonas 5 y 4, mientras que la zona 1 registró la menor extensión con 3 142,19 m². Esta distribución evidencia una variación altitudinal gradual a lo largo del tramo analizado, permitiendo identificar las diferencias topográficas que caracterizan el relieve de la microcuenca.

Discusión

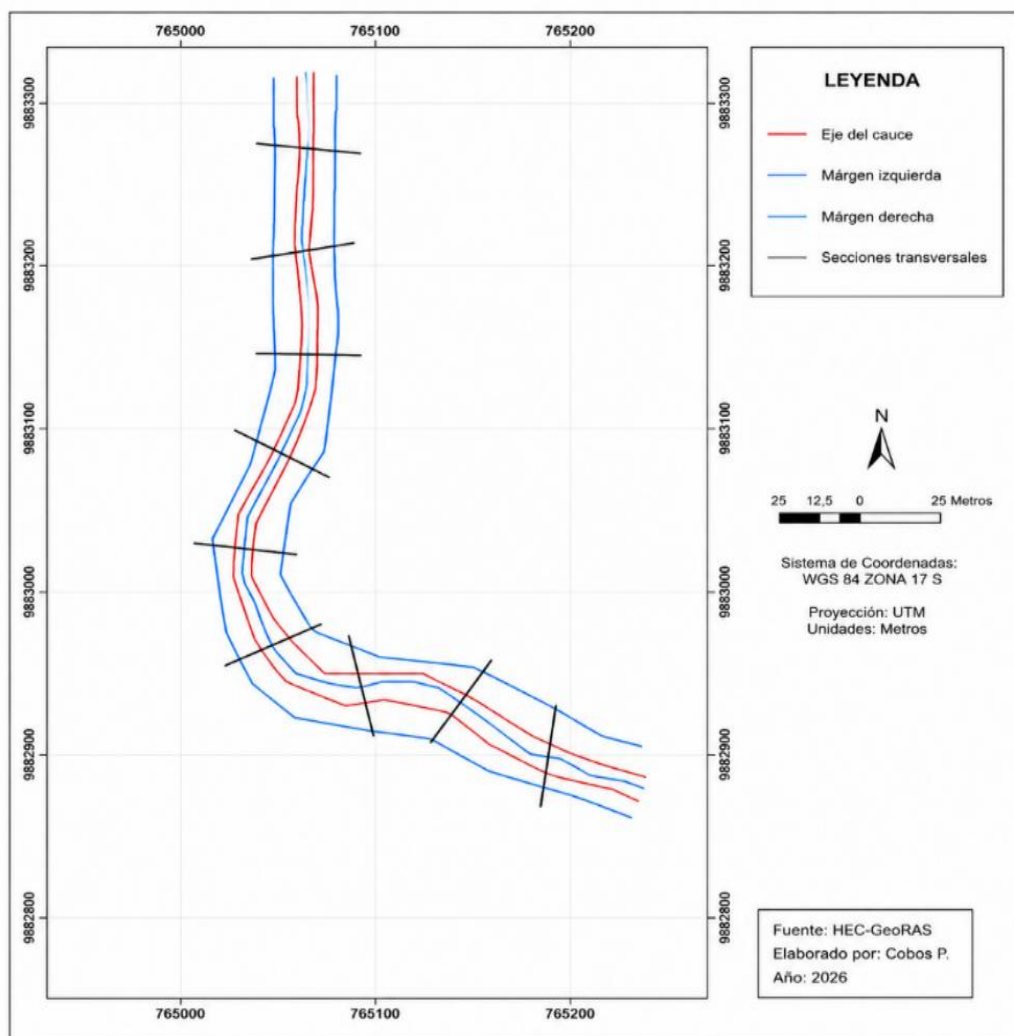
La clasificación del terreno en intervalos altitudinales permitió representar de manera detallada la distribución espacial de las elevaciones presentes en el tramo de estudio, constituyendo una herramienta útil para comprender la organización del relieve y su influencia sobre la dinámica hidrográfica. La mayor concentración de superficie en los niveles intermedios sugiere una transición altitudinal progresiva, mientras que las zonas de menor extensión corresponden a los extremos del rango de elevación. Estos resultados son concordantes con lo reportado por Santos et al. (2023), quienes señalan que la zonificación altitudinal derivada de Modelos Digitales de Elevación facilita la caracterización geomorfológica de microcuencas y mejora la interpretación de los procesos hidrológicos. Asimismo, Li et al. (2022) destacan que la integración de información altimétrica obtenida mediante fotogrametría con UAV y herramientas SIG permite generar modelos topográficos de alta precisión, favoreciendo la delimitación de unidades fisiográficas y el análisis de la variabilidad del terreno.

10.11. Zonas de corte para el modelamiento de inundación

Con el propósito de desarrollar el modelamiento hidráulico del tramo del río Pumacunchi, se establecieron las zonas de corte mediante la definición de secciones transversales distribuidas a lo largo del cauce. Estas secciones permitieron representar la geometría del río en diferentes puntos del área de estudio, constituyendo la base para la simulación del comportamiento hidráulico y la delimitación de las áreas potencialmente inundables.

Figura 13.

Eje del cauce, márgenes y secciones transversales del río Pumacunchi.



Nota. Geometría del cauce generada mediante HEC-GeoRAS para el modelamiento hidráulico. **Elaborado por** Cobos P. (2026).

Interpretación

Las zonas de corte fueron distribuidas estratégicamente a lo largo del tramo del río Pumacunchi, permitiendo representar las variaciones geométricas del cauce en diferentes puntos del recorrido. La ubicación de estas secciones constituye el insumo principal para el desarrollo del modelo hidráulico, ya que permite describir las características físicas del cauce y de las áreas adyacentes necesarias para la simulación de escenarios de inundación.

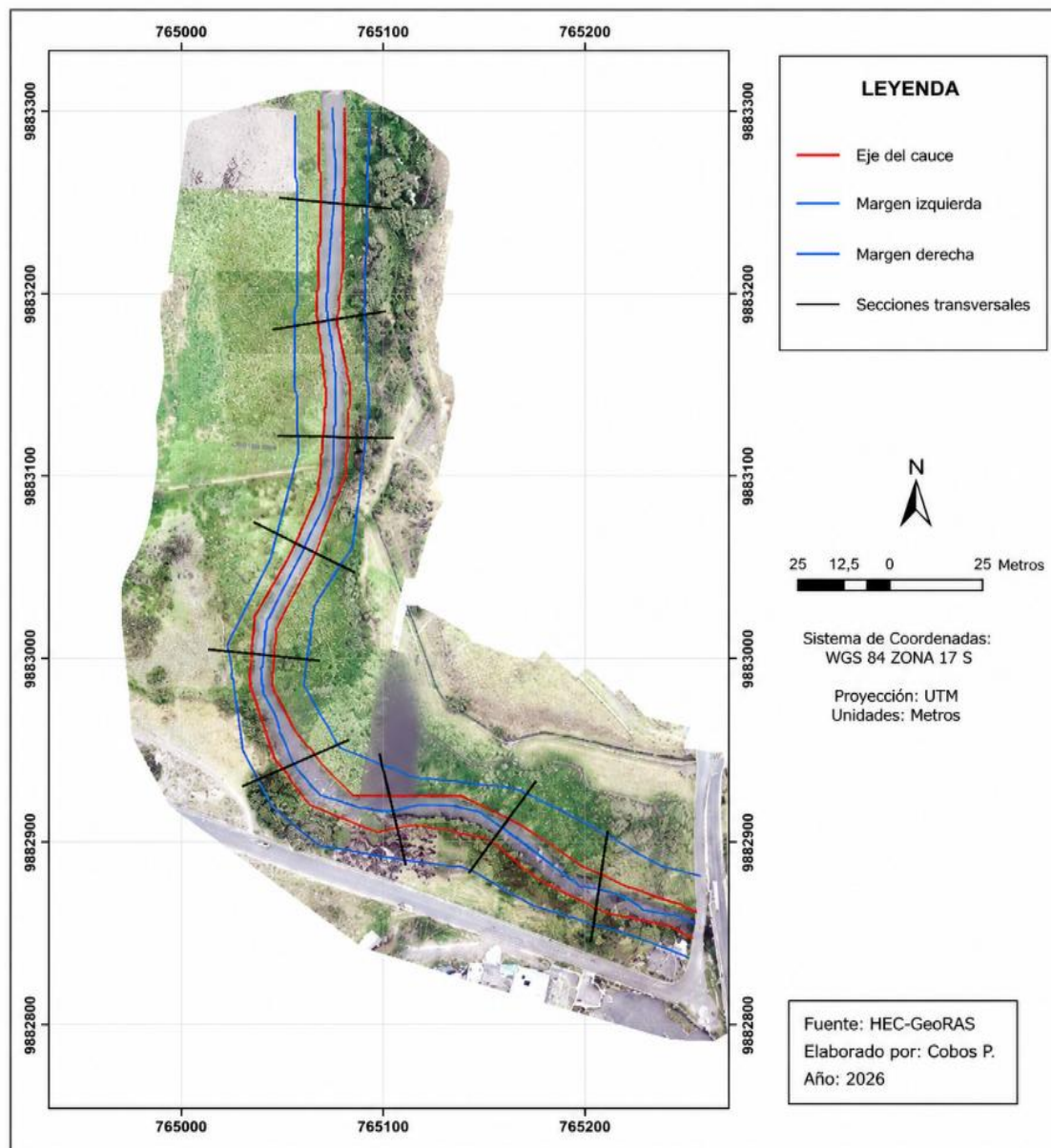
Discusión

La correcta ubicación de las secciones transversales constituye una etapa fundamental en los modelos hidráulicos, debido a que permite representar adecuadamente la geometría del cauce y mejorar la precisión de las simulaciones de inundación. En la presente investigación, las zonas de corte fueron definidas utilizando información geoespacial obtenida mediante fotogrametría con UAV, permitiendo representar con mayor detalle las condiciones reales del tramo estudiado. Estos resultados coinciden con Brunner (2023), quien señala que la distribución adecuada de las secciones transversales incrementa la confiabilidad de los modelos desarrollados en HEC-RAS. Asimismo, Costabile et al. (2021) indican que la integración entre fotogrametría y modelamiento hidráulico mejora la representación geométrica de los cauces y fortalece la evaluación de zonas susceptibles a inundación.

10.12. Configuración del modelo de inundación

Una vez definidas las zonas de corte, se configuró el modelo de inundación mediante la incorporación de los elementos geométricos requeridos por HEC-GeoRAS, incluyendo las estaciones de ribera, las áreas de flujo y los límites del cauce. Esta configuración permitió estructurar el modelo hidráulico que posteriormente fue utilizado para la simulación de escenarios de inundación.

Figura 13. Eje del cauce, márgenes y secciones transversales del río Pumacunchi.



Nota. Geometría del cauce obtenida mediante HEC-GeoRAS sobre la ortofoto generada con UAV DJI Phantom 4 Pro. *Elaborado por* Cobos P. (2026).

Interpretación

La configuración del modelo permitió integrar las estaciones de ribera, las áreas de flujo y las secciones transversales dentro de una misma estructura geométrica, representando las condiciones físicas del tramo analizado. Estos elementos constituyen la base para la simulación

hidráulica, ya que permiten definir el comportamiento del flujo y su interacción con las planicies adyacentes durante eventos de crecida.

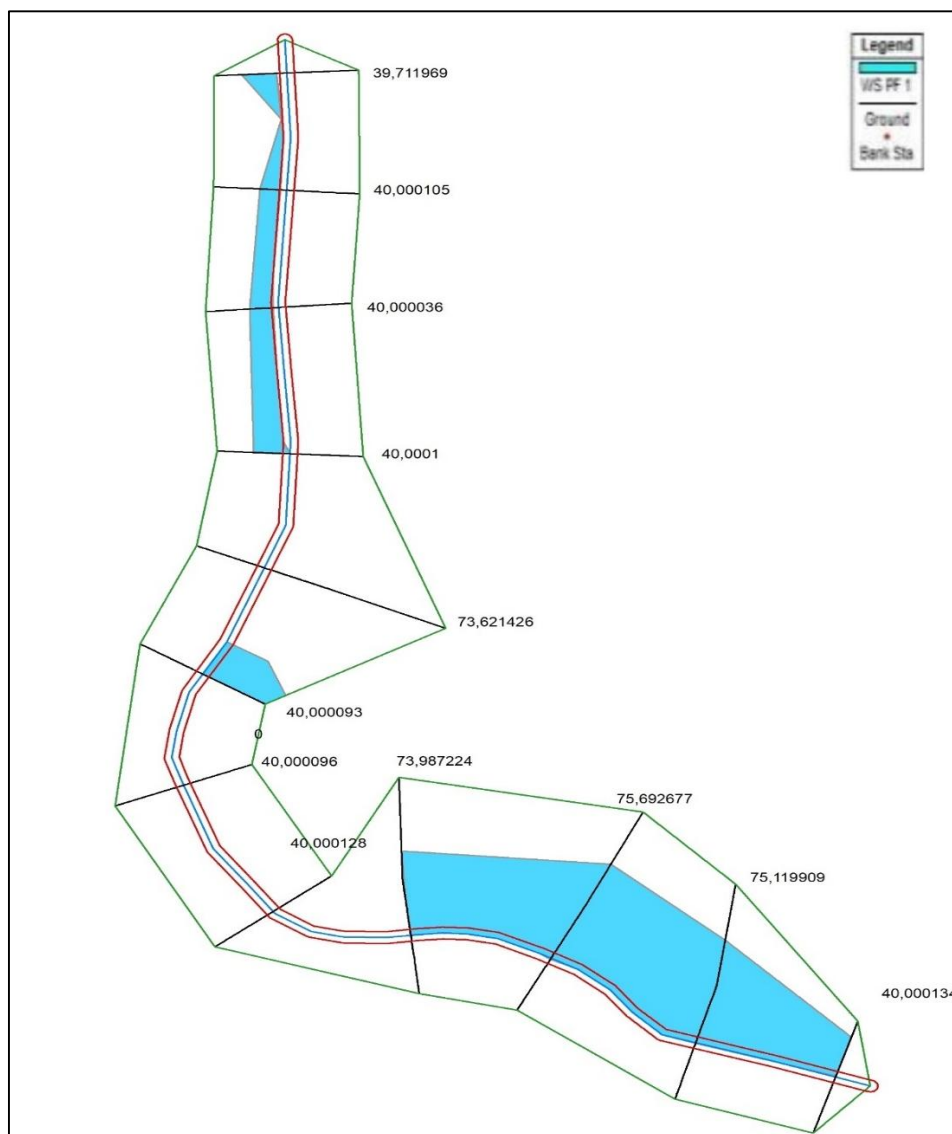
Discusión

La configuración geométrica del modelo hidráulico representa una etapa esencial para garantizar la calidad de las simulaciones de inundación. La incorporación de las estaciones de ribera, áreas de flujo y secciones transversales permite representar de forma adecuada la dinámica del cauce y mejorar la precisión del cálculo hidráulico. De acuerdo con Brunner (2023), la correcta estructuración de la geometría constituye uno de los factores que mayor influencia tiene sobre la confiabilidad de los resultados obtenidos mediante HEC-RAS. Asimismo, Neal et al. (2021) destacan que la integración de modelos digitales de terreno con herramientas SIG favorece la construcción de modelos hidráulicos más representativos y precisos.

10.13. Delimitación de la zona de inundación

Como resultado de la simulación hidráulica desarrollada en el tramo del río Pumacunchi, se obtuvo la delimitación espacial de la zona potencialmente inundable. Este resultado permitió identificar la extensión alcanzada por el flujo durante el escenario analizado y reconocer los sectores con mayor susceptibilidad de ser afectados por procesos de inundación.

Figura 14. Configuración de la geometría hidráulica del tramo del río Pumacunchi.



Nota. Geometría hidráulica generada en HEC-GeoRAS para la preparación del modelo en HEC-RAS. *Elaborado por* Cobos P. (2026).

Interpretación

La simulación hidráulica permitió delimitar la superficie potencialmente inundable a lo largo del tramo del río Pumacunchi, observándose una expansión del flujo principalmente hacia las planicies adyacentes al cauce. La extensión de la inundación varía de acuerdo con la geometría

del terreno y las condiciones topográficas presentes en el área de estudio, permitiendo identificar los sectores con mayor susceptibilidad de afectación.

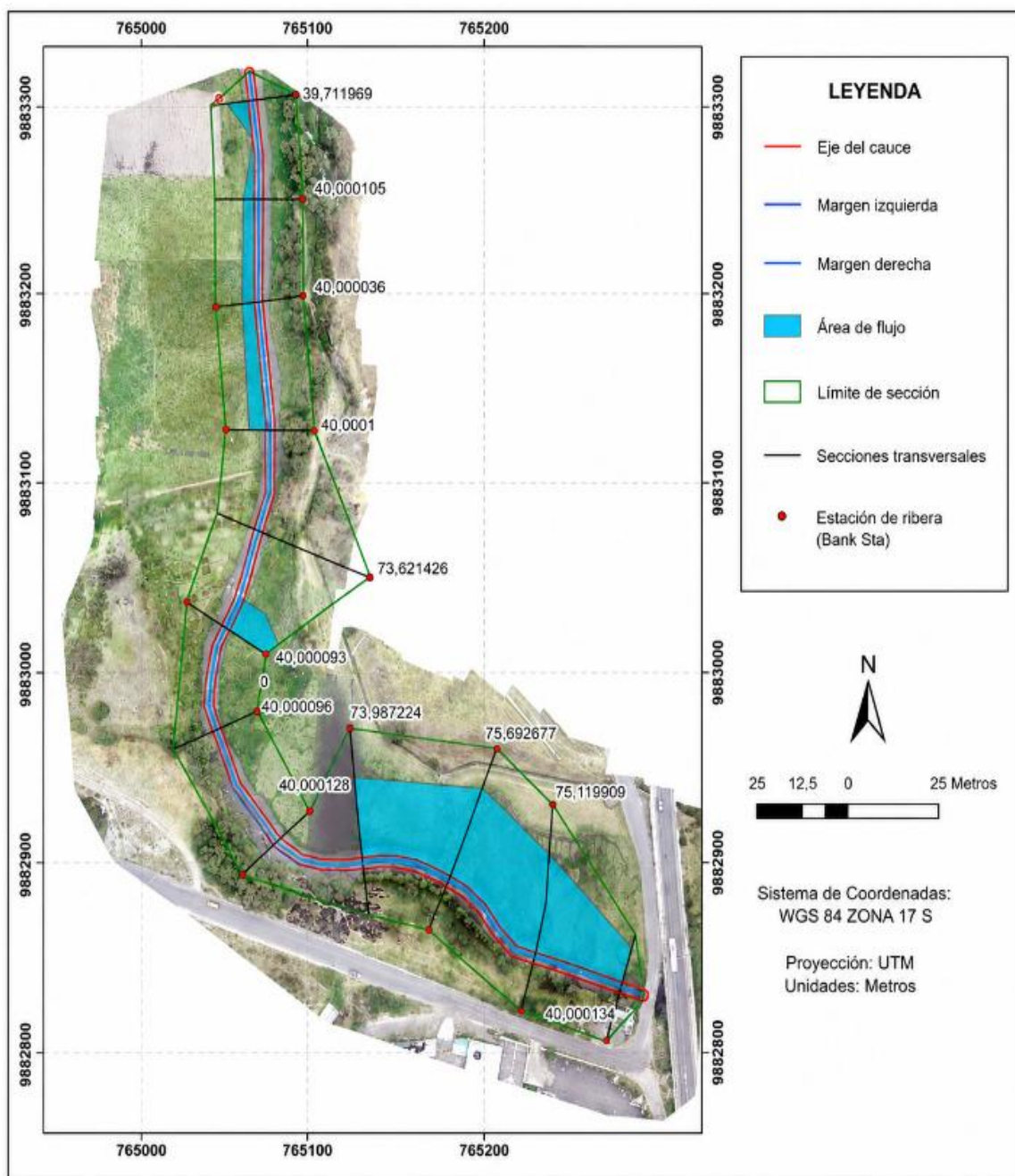
Discusión

La delimitación de zonas inundables constituye uno de los principales productos del modelamiento hidráulico, ya que facilita la identificación de áreas expuestas al riesgo y aporta información para la planificación territorial. En este estudio, la simulación permitió representar espacialmente la extensión de la inundación considerando las características geométricas del cauce obtenidas mediante fotogrametría con UAV. Estos resultados concuerdan con Costabile et al. (2021), quienes señalan que la integración de modelos hidráulicos con información geoespacial de alta resolución mejora la precisión en la delimitación de áreas inundables. De igual forma, Brunner (2023) destaca que HEC-RAS constituye una herramienta ampliamente utilizada para la simulación de inundaciones y la evaluación del comportamiento hidráulico de cauces naturales.

10.14. Representación de la zona de inundación sobre la ortofoto

Con el propósito de facilitar la interpretación espacial de los resultados obtenidos mediante el modelamiento hidráulico, la zona de inundación fue superpuesta sobre la ortofoto generada con UAV. Esta representación permitió visualizar la relación entre la superficie inundada y los elementos existentes dentro del área de estudio, proporcionando una base cartográfica para el análisis de la posible afectación del territorio.

Figura 15. Configuración de la geometría hidráulica del modelo del río Pumacunchi.



Nota. Configuración de la geometría hidráulica obtenida mediante HEC-GeoRAS sobre la ortofoto generada con UAV DJI Phantom 4 Pro. *Elaborado por* Cobos P. (2026).

Interpretación

La superposición de la zona inundada sobre la ortofoto permitió identificar de manera precisa los sectores que podrían verse afectados por el desbordamiento del cauce. La representación espacial facilita la visualización de la interacción entre la inundación simulada y los elementos presentes en el terreno, como áreas agrícolas, vegetación, vías de acceso y otros componentes del entorno, contribuyendo a una mejor interpretación del riesgo potencial.

Discusión

La integración de los resultados del modelamiento hidráulico con ortofotos de alta resolución constituye una herramienta de gran utilidad para la evaluación del riesgo de inundación, ya que permite relacionar directamente la extensión del flujo con las condiciones reales del territorio. En la presente investigación, la utilización de productos fotogramétricos obtenidos mediante UAV permitió mejorar la representación espacial de la inundación y facilitar la identificación de áreas potencialmente vulnerables. Estos resultados coinciden con Costabile et al. (2021), quienes destacan que la combinación de modelos hidráulicos y ortofotos incrementa la precisión cartográfica y favorece la toma de decisiones para la gestión del riesgo. Asimismo, Casella et al. (2020) señalan que la integración de información obtenida mediante UAV con Sistemas de Información Geográfica proporciona productos de alta resolución adecuados para estudios hidrológicos y planificación territorial.

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

11.1. Conclusiones

Se determinaron las características topográficas y morfométricas del segmento del cauce del río Pumacunchi mediante la aplicación de fotogrametría con un vehículo aéreo no tripulado (UAV), obteniéndose productos cartográficos como ortofotos, modelos digitales del terreno (DEM), modelos TIN y parámetros espaciales que permitieron caracterizar con precisión la configuración física del área de estudio.

La caracterización de las condiciones físicas del cauce permitió identificar la distribución de las pendientes, la variación altitudinal y las principales características geomorfológicas del tramo analizado, evidenciando que la información obtenida mediante fotogrametría constituye

una herramienta eficaz para el análisis de sistemas hidrográficos y para la identificación de sectores con susceptibilidad a procesos de inundación.

La integración de la información geoespacial en un Sistema de Información Geográfica facilitó la elaboración de cartografía temática y el desarrollo del modelamiento hidráulico, permitiendo representar espacialmente las zonas potencialmente inundables y generando información técnica que puede servir de apoyo para la planificación territorial y la gestión del riesgo en el área de estudio.

11.2. Recomendaciones

Ampliar el análisis hidrográfico mediante la evaluación de un tramo de mayor extensión del río Pumacunchi, incorporando información hidrológica obtenida en diferentes épocas del año para fortalecer la caracterización del comportamiento del cauce bajo distintas condiciones climáticas.

Complementar futuras investigaciones con información de campo relacionada con caudales, precipitaciones y características hidráulicas del río, con el fin de mejorar la precisión de los modelos de inundación y fortalecer la interpretación de los resultados obtenidos mediante fotogrametría.

Promover el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) y Sistemas de Información Geográfica en estudios hidrográficos desarrollados por instituciones públicas, gobiernos autónomos descentralizados y entidades vinculadas a la gestión de recursos hídricos, debido a que estas herramientas permiten generar información geoespacial de alta resolución para apoyar la planificación territorial y la gestión del riesgo.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Asamblea Nacional. (2020). *LEY ORGÁNICA DE RECURSOS HÍDRICOS, USOS Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA*.
- COA. (2020). *CÓDIGO ORGÁNICO DEL AMBIENTE*.
- Constitución del Ecuador. (2025). *Constitución de la República del Ecuador. Actualizada*.
- Debus, P., & Rodehorst, V. (2024). UAS Flight Path Planning: A Comparative Analysis of Diverse Use Cases and Approaches. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 10(4/W5-2024), 111–118. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W5-2024-111-2024>
- Fanta-Jende, P., Steininger, D., Kern, A., Widhalm, V., Apud Baca, J. G., Hofstätter, M., Simon, J., Bruckmüller, F., & Sulzbachner, C. (2023). Semantic Real-Time Mapping with UAVs. *PFG - Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 91(3), 157–170. <https://doi.org/10.1007/s41064-023-00242-2>
- FAO. (2023). *Marco conceptual de la FAO para la ordenación integrada de los recursos de tierras y aguas*.
- Hugo Del Pozo Barrezueta. (2020). *CODIGO ORGANICO DEL AMBIENTE*. www.lexis.com.ec
- Jandry, J., Hurtado, C., Alejandro, P., & Córdova, M. (2024). Caracterización Geomorfológica de la Microcuenca del Estero Mutile Utilizando Modelos Digitales de Elevación (MDE) en el Geomorphological characterization of the Mutile Estuary Microbasin Using Digital Elevation Models (DEM) in QGIS 3.36.2 Software. 542–552.
- Liang, Y., & Cui, J. (2024). High Output Third-Order Intercept Point Low-Noise Amplifier Design Based on 0.13 μm CMOS Process for High-Precision Sensors †. *Engineering Proceedings*, 82(1). <https://doi.org/10.3390/ecsa-11-20465>
- Loaiza Espinoza, M. E., Nieto Cañarte, C. A., Burgos Carpio, B. A., & Sanabria Yépez, C. V. (2022). Descripción hidrogeomorfológica de la cuenca del río Santa Rosa (Ecuador) con fines de riego y control de inundaciones. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(5), 4699–4709. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i5.3427
- Macas Cobeña, M., Bonilla Zambrano, M., Carriel Reyes, W., Parrales Carriel, J., Riofrio Arrobo, J., & Zambrano Flores, N. (2023). Caracterización hidrológica de la microcuenca del

estero Hondo, cantón La Maná, Ecuador. *Ciencia y Tecnología*, 16(2), 35–48. <https://doi.org/10.18779/cyt.v16i2.634>

- Maes, W. H. (2025). Practical Guidelines for Performing UAV Mapping Flights with Snapshot Sensors. In *Remote Sensing* (Vol. 17, Number 4). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/rs17040606>
- Matovelle, C., Heras, D., Ávalos, C., Al-Cántar, G., Mora, G., López, P., & Patrón, R. (2020). *Comparative analysis of the morphometric characteristics of hydrographic systems of the Pacific slope, Ecuador*. <http://orcid.org/0000-0002->
- Memon, A. V., Patel, Y. S., & Parangi, T. (2024). Exploring watershed dynamics: a comprehensive review on morphometric analysis and geospatial techniques. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 30(5), 744–757. <https://doi.org/10.1080/09715010.2024.2383184>
- Nikolova, V., Gospodinova, V., & Kamburov, A. (2024). Assessment of Unmanned Aerial System Flight Plans for Data Acquisition from Erosional Terrain. *Geosciences (Switzerland)*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/geosciences14030075>
- Pargieła, K. (2023). Optimising UAV Data Acquisition and Processing for Photogrammetry: A Review. *Geomatics and Environmental Engineering*, 17(3), 29–59. <https://doi.org/10.7494/geom.2023.17.3.29>
- Pizarro, A., Valera-Gran, D., Navarrete-Muñoz, E. M., & Dal Sasso, S. F. (2024). The Use of Unmanned Aerial Systems for River Monitoring: A Bibliometric Analysis Covering the Last 25 Years. *Hydrology*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/hydrology11060080>
- Raja Shekar, P., & Mathew, A. (2024). Morphometric analysis of watersheds: A comprehensive review of data sources, quality, and geospatial techniques. In *Watershed Ecology and the Environment* (Vol. 6, pp. 13–25). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.wsee.2023.12.001>
- UNESCO. (2024). *Informe mundial del agua*. https://www.unesco.org/en/reports/wwdr/2024?utm_source=chatgpt.com
- UNESCO. (2025). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos | Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos*. https://www.unesco.org/reports/wwdr/en?utm_source=chatgpt.com
- United Nations. (2024, August 25). *Avances en la implementación de la gestión integrada de los recursos hídricos – Actualización 2024 | ONU-Agua*.

https://www.unwater.org/publications/progress-implementation-integrated-water-resources-management-2024-update?utm_source=chatgpt.com

- United Nations. (2025). *Seguimiento del ODS 6 | ONU-Agua*. https://www.unwater.org/publications/sdg-6-monitoring?utm_source=chatgpt.com
- Villarreal, M. L., Bishop, T. B. B., Sankey, T. T., Smith, W. K., Burgess, M. A., Caughlin, T. T., Gillan, J. K., Havrilla, C. A., Huang, T., LeBeau, R. L., Norton, C. L., Sankey, J. B., Scholl, V. M., von Nonn, J., & Yao, E. H. (2025). Applications of unoccupied aerial systems (UAS) in landscape ecology: a review of recent research, challenges and emerging opportunities. In *Landscape Ecology* (Vol. 40, Number 2). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s10980-024-02040-6>
- Vinicio Mogro Cepeda, Y., Antonio Riofrío Guevara, M., Javier Jácome Mogro, E., & Piovanelli Tizano, R. (2021). *Impact of Irrigation Water Technification on Seven Directories of the San Juan-Patoa River Using Plithogenic n-SuperHyperGraphs Based on Environmental Indicators in the Canton of Pujilí, 2021*. https://digitalrepository.unm.edu/nss_journal
- Zhang, Z., & Zhu, L. (2023). A Review on Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing: Platforms, Sensors, Data Processing Methods, and Applications. In *Drones* (Vol. 7, Number 6). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/drones7060398>
- Maya, J. A. (2006). *Análisis de la gestión de recursos hídricos en la provincia de Cotopaxi* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. Repositorio Institucional PUCE. <https://repositorio.puce.edu.ec/items/6754c605-dcac-4add-9016-a609f20f662e>
- Carrera, D. F. (2016). *Análisis espacial de las cuencas hidrográficas del cantón Latacunga mediante sistemas de información geográfica* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio Institucional UTC. <https://repositorio.utc.edu.ec/items/f3bd4e74-d937-4e6c-bf85-68818ad026df>
- Riofrío, M., et al. (2025). *Importancia de la educación ambiental para entender la contaminación de agua por metales pesados en las microcuencas de la provincia de Cotopaxi* [Tesis/Trabajo académico]. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/387806920_IMPORTANCIA_DE_LA_EDUCACION_AMBIENTAL_PARA_ENTENDER_LA_CONTAMINACION_DE_AGUA_POR_M

ETALES_PESADOS_EN_LAS_MICROCUENCAS_DE_LA_PROVINCIA_DE_COTOPAXI

- Jumbo, F., Franco, J., Pacheco, C., & Cañarte, E. (2025). *Aplicación de herramientas basadas en SIG para la delimitación automática de cuencas hidrográficas*. Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú.
- Pullotasig Taco, D. V., & Taípe Jaya, J. D. (2025). *Diseño de bocatoma lateral para la comunidad "Virgen de Guadalupe"*. Repositorio Institucional UTC. <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/123456789/14330>
- Montenegro Vásquez, D. (2024). *Caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas mediante sistemas de información geográfica para la gestión de recursos hídricos*. Repositorio Institucional UNC.
- Mejía V., D. G. (2023). *Variabilidad temporal y espacial de la cantidad y calidad de agua en la cuenca del río San Francisco*. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Loja.
- Zhicay Lombaida, J. I. (2020). *Caracterización morfométrica y estudio hidrológico de la microcuenca del río San Francisco, cantón Gualaceo* [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional UPS.
- Cevallos Aleaga, X. K. (2016). *Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo en la parroquia Vilcabamba* [Trabajo de titulación, Universidad Técnica Particular de Loja]. Repositorio Institucional UTPL. Repositorio UTPL
- Cobos Anguisaca, J. D. (2021). *Análisis multitemporal de cambios de cobertura y usos de suelo de la cuenca del río Jubones, Ecuador* [Trabajo de titulación, Universidad Técnica de Machala]. Repositorio Institucional UTMACH. Repositorio UTMACH
- Guamán Quizhpe, D. A. (2019). *Caracterización morfométrica de la microcuenca del río Shucay mediante herramientas SIG* [Trabajo de titulación, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional Universidad de Cuenca.
- Zhicay Lombaida, J. I. (2020). *Caracterización morfométrica y estudio hidrológico de la microcuenca del río San Francisco* [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio UPS.
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). *Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>

- Nex, F., & Remondino, F. (2014). *UAV for 3D mapping applications: A review*. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., & Sarazzi, D. (2011). *UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling – Current status and future perspectives*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1/C22, 25–31.
- Shahbazi, M., Sohn, G., Théau, J., & Menard, P. (2014). *Development and evaluation of a UAV-photogrammetry system for precise 3D environmental modeling*. *Sensors*, 14(2), 2749–2771. <https://doi.org/10.3390/s140202749>
- Watts, A. C., Ambrosia, V. G., & Hinkley, E. A. (2012). *Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use*. *Remote Sensing*, 4(6), 1671–1692. <https://doi.org/10.3390/rs4061671>
- Harwin, S., & Lucieer, A. (2012). *Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from UAV imagery*. *Remote Sensing*, 4(6), 1573–1599. <https://doi.org/10.3390/rs4061573>
- Kraus, K. (2007). *Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans* (2nd ed.). Walter de Gruyter.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Harley, I. (2020). *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging* (3rd ed.). De Gruyter.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). *Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications*. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>