

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO
FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO
TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RÍO SECO – MUNICIPIO
DE VIACHA**

Proyecto de grado presentado para la obtención del Grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

POR: EDGAR CHOQUE TUMIRI
TUTOR: DR. ING. JOSÉ ANTONIO LUNA VERA

LA PAZ - BOLIVIA

2024



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

DEDICATORIA

A Dios, por darme fortaleza, guía y sabiduría en cada paso de este camino. Sin Su luz y Su protección, este logro no habría sido posible.

A mi familia: a mi padre, Esteban Choque Choque, y a la memoria de mi amada madre, Hilaria Tumiri Gutiérrez, quien sigue siendo una guía en mi vida. A mis hermanos: Reynaldo, Wilson, María Lizeth, Mónica Rosmery, Henry y Jenny.

Gracias por ser mi refugio, mi fuerza y mi inspiración constante. A ustedes, que han estado a mi lado en cada momento, apoyándome con su amor incondicional y enseñándome que los sueños se alcanzan con esfuerzo y perseverancia. Cada palabra de aliento, cada gesto de paciencia y cada acto de fe en mí me han dado el valor para llegar hasta aquí.

Este logro les pertenece tanto como a mí, y con todo mi cariño se los dedico.

Edgar Choque Tumiri

AGRADECIMIENTOS

Al Director de la Carrera de Ingeniería Civil, Ing. Miguel Muñoz Black, y a nuestra distinguida Facultad de Ingeniería, por brindarme a lo largo de los años la formación necesaria para ejercer mi profesión con sabiduría, templanza y honestidad.

A mi asesor, Dr. Ing. José Antonio Luna Vera, por su apoyo invaluable en la elaboración y conclusión de este proyecto.

A los miembros del tribunal, Dr. Ing. José Luis Montaña Vargas, Dr. Ing. Edson Edwin Ramírez Rodríguez, Ing. Jhon Antony Moreno Barrenechea y, finalmente, Ing. Rubén Darío Aliendre Martínez, quienes desempeñaron un papel fundamental en este exigente proceso que me ha permitido convertirme en un profesional íntegro.

Quisiera expresar mi agradecimiento al Instituto de Ingeniería Hidráulica e Hidrología de la Universidad Mayor de San Andrés, por brindarme las herramientas y el conocimiento necesarios para llevar a cabo este Proyecto de Grado.

Agradezco también al personal técnico de la Unidad de Gestión de la Cuenca Katari del Ministerio de Medio Ambiente y Agua, en especial a la Ing. Elvira Chavarria, Ing. Omar Castillo, Ing. Adrián Villegas, y a un gran compañero, Ing. Josué Gonzales Huanca, así como a todos los profesionales de las distintas áreas de esta unidad. Su colaboración ha sido fundamental al brindarme acceso a los equipos y facilitarme información valiosa y necesaria para el desarrollo de este proyecto.

RESUMEN

“MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA”

La problemática de desbordamientos en el Río Seco, cercano a la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha del Departamento de La Paz, ocasiona inundaciones que afectan negativamente la calidad de vida de los habitantes. Se empleó fotogrametría con drones y batimetría para obtener un Modelo Digital de Terreno con alta precisión, para la representación de la superficie topo batimétrica del tramo del río, consistente en 2 km longitudinales y 100 m de margen. Se realizó el análisis de la información hidrométrica de la Estación Viacha KH-05, con 16 datos aforos de caudal y niveles registrados en el período 2019 a 2023, obteniéndose una curva de descarga calibrada y extrapolada. La calibración del modelo computacional HEC-RAS 2D consistió en modificar un parámetro hidráulico sensible, como es el coeficiente de rugosidad de Manning. Posteriormente, se simularon escenarios de crecidas con flujo no permanente para 50 y 100 años de período de retorno, identificándose 19 tramos críticos propensos a desbordamiento. Como medida de mitigación se propusieron muros de gaviones con alturas de 3.5 y 3.0 m en una longitud total de 791.0 m, verificándose su correcto funcionamiento mediante la modelación 2D para un evento de crecida de 100 años de periodo de retorno.

Palabras claves: modelación hidrodinámica, vehículos aéreos no tripulados, hidrometría, calibración.

ABSTRACT

“HYDRODYNAMIC MODELING USING PHOTOGRAMMETRY WITH UNMANNED AERIAL VEHICLES, CASE STUDY: RÍO SECO – MUNICIPALITY OF VIACHA”

The overflow issues in the Río Seco, near the Mamani Community in the Municipality of Viacha, Department of La Paz, cause flooding that negatively impacts the quality of life of the residents. Photogrammetry with drones and bathymetry were used to obtain a high-precision Digital Terrain Model for the topobathymetric representation of the river section, covering 2 longitudinal kilometers and a 100-meter margin. The hydrometric information from the Viacha KH-05 Station was analyzed, with 16 flow measurement data points and recorded levels from the period 2019 to 2023, resulting in a calibrated and extrapolated discharge curve. The calibration of the HEC-RAS 2D computational model involved adjusting a sensitive hydraulic parameter, namely Manning’s roughness coefficient. Subsequently, flood scenarios with unsteady flow for 50- and 100-year return periods were simulated, identifying 19 critical sections prone to overflow. As a mitigation measure, gabion walls with heights of 3.5 and 3.0 meters over a total length of 791.0 meters were proposed, and their proper performance was verified through 2D modeling for a 100-year flood event.

Keywords: hydrodynamic modeling, unmanned aerial vehicles, hydrometry, calibration.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción.	1
1.1	Justificación general.	1
1.2	Fines.	2
1.2.1	Estado del arte.	3
1.3	Objetivos del proyecto.	5
1.3.1	Objetivo general.	5
1.3.2	Objetivos específicos.	5
1.4	Alcance.	5
1.5	Metodología.	6
1.6	Herramientas y equipos utilizados.	8
2	Características del área de estudio.	9
2.1	Ubicación del proyecto	9
2.2	Descripción del área del proyecto.	10
2.3	Hidrografía.	10
2.4	Afluentes de aguas al Río Seco.	12
2.4.1	Aguas residuales	12
2.4.2	Aguas pluviales.	13
2.4.3	Aguas tratadas.	13
2.4.4	Inundaciones y desbordes reportados.	14
3	Marco teórico	16
3.1	Modelación.	16
3.1.1	Información básica para la modelación de ríos.	16
3.2	Modelos hidrodinámicos.	16
3.2.1	Regímenes de flujo.	17
3.2.2	Modelo HEC-RAS.	18
3.2.3	Leyes físicas que gobiernan el flujo bidimensional.	21
3.2.4	Método de solución.	22
3.2.5	Calibración del modelo hidrodinámico.	23
3.2.6	Análisis del desempeño del modelo.	24
3.3	Fotogrametría	25
3.3.1	Fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados.	26
3.3.2	Proyecto de vuelo aerofotogrametrico.	26

3.3.3	Procesamiento de información aerofotogramétrica.	30
3.3.4	Procesamiento imágenes con Pix4M mapper	30
3.3.5	Proyección geográfica o cartográfica.	33
3.3.6	Network Transportation of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) . . .	34
3.4	Hidrometría	34
3.4.1	Estación hidrométrica.	34
3.4.2	Curvas de descarga o gasto H-Q.	36
3.4.3	Elaboración de la curva de descarga.	37
3.4.4	Extrapolación de la curva de descarga.	39
3.5	Obras de protección en ríos.	41
3.5.1	Muros de gavión longitudinal.	41
3.5.2	Diseño estructural de muro de gaviones.	42
3.5.3	Socavación en estructuras.	43
3.5.4	Socavación general	43
4	Levantamiento aerofotogramétrico y batimétrico.	46
4.1	Elección de las proyecciones cartográficas y datum.	46
4.2	Planificación y altura de vuelo aerofotogramétrico.	47
4.3	Esquema de trabajo.	47
4.4	Distribución y medición de los puntos de control terrestre y validación.	48
4.5	Ejecución de las misiones vuelo aerofotogramétrico.	52
4.6	Perfilado de secciones (batimetría).	54
4.7	Procesamiento de imágenes con Pix4D Mapper.	55
4.8	Evaluación del ajuste aerofotogramétrico.	58
4.9	Procesamiento de imágenes sin puntos de control.	59
4.10	Comparación de procesamientos con y sin puntos de control	60
4.11	Generación de la superficie topo batimétrica.	62
5	Tratamiento y procesamiento de información hidrométrica.	64
5.1	Información hidrométrica recolectada.	64
5.2	Análisis de la información hidrométrica.	65
5.3	Análisis de la curva de descarga y elaboración de hidrogramas.	67
5.3.1	Realización campañas de monitoreo.	68
5.3.2	Construcción de la curva de descarga.	69
5.3.3	Extrapolación de la curva de descarga	71
5.3.4	Selección de eventos de crecidas	76
5.3.5	Elaboración de hidrogramas	77

5.4	Determinación de hidrogramas de entrada para la modelación	78
6	Modelación hidrodinámica.	81
6.1	Creación del proyecto.	81
6.2	Creación de la geometría.	81
6.3	Generación del terreno.	82
6.4	Malla computacional.	82
6.4.1	Refinamiento de la malla computacional.	83
6.4.2	Líneas de condición de borde.	83
6.5	Selección del coeficiente de rugosidad de Manning.	84
6.6	Introducción de datos de flujo	85
6.7	Corrida del plan de simulación del modelo.	86
6.7.1	Paso del tiempo computacional.	86
6.8	Calibración del modelo hidrodinámico.	89
6.8.1	Resultados de la calibración del modelo hidrodinámico.	90
6.9	Implementación del modelo.	92
6.9.1	Resultados de la modelación.	94
6.10	Identificación de tramos críticos de desbordamiento.	98
7	Obras de protección.	100
7.1	Predimensionamiento del muro de gavión	100
7.2	Diseño hidráulico.	102
7.2.1	Propiedades granulométricas	102
7.2.2	Parámetros hidráulicos y geométricos.	102
7.2.3	Cálculo de la socavación general	104
7.3	Diseño y análisis estructural.	105
7.4	Emplazamiento de los muros gaviones.	109
7.5	Simulación con obras de protección	111
7.6	Presupuesto del muro de gaviones	114
8	Conclusiones y recomendaciones.	116
8.1	Conclusiones	116
8.2	Recomendaciones	118
	Bibliografía	119
	Anexos	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Metodología.	7
Figura 2.	Mapa de ubicación del área de estudio y estación hidrométrica KH-05 . . .	9
Figura 3.	Mapa de ubicación geográfica de la Microcuenca Pallina	11
Figura 4.	Inundación en la Comunidad Chonchocoro	15
Figura 5.	Dron inteligente usado en diferentes campos de la ingeniería.	26
Figura 6.	Traslape y líneas de vuelo unidireccional.	28
Figura 7.	Vista de puntos de control de apoyo y control tierra terrestre.	29
Figura 8.	Aplicación DJI Pilot, utilizado en la planificación y ejecución de vuelos. . .	29
Figura 9.	Modelo digital de superficie	31
Figura 10.	Ortofoto u ortomosaico georreferenciado	32
Figura 11.	Nube de puntos densa	32
Figura 12.	Zonas UTM en Bolivia	33
Figura 13.	Zonas UTM en Bolivia	34
Figura 14.	Variación del caudal en el tiempo	35
Figura 15.	Estación hidrométrica automática y regla limnimétrica	36
Figura 16.	Formas de la curva de descarga.	37
Figura 17.	Representación del nivel ho según la ubicación del nivel cero de la regla limnimétrica.	38
Figura 18.	Representación del nivel ho según la ubicación del nivel cero de la regla limnimétrica.	39
Figura 19.	Grafica k versus h (altura de medición).	40
Figura 20.	Muro gavión en ríos	41
Figura 21.	Configuración del muro de gaviones	42
Figura 22.	Socavacion general en una seccion transversal.	44
Figura 23.	Representación las alturas de referencia.	46
Figura 24.	Esquema de trabajo	48
Figura 25.	Mapa de ubicación de los puntos de control y validación terrestre	49
Figura 26.	Trayectoria del plan de vuelo ejecutado por segmento	52
Figura 27.	Ejecución de la misión de vuelo del segmento 4 y toma área del tramo de estudio	53

Figura 28. Muestra de la nube de puntos obtenida del perfilaje batimétrico	55
Figura 29. Licencia Pix4D Mapper	56
Figura 30. Alineación manual de los puntos de control GCPs	56
Figura 31. Nube de puntos densa	57
Figura 32. Ortomasico y Modelo Digital de Superficie (DSM)	58
Figura 33. Comparación de alturas medidas y observadas	59
Figura 34. Licencia estudiantil iTwin Capture modeler	59
Figura 35. Captura del modelo tridimensional generado del área de estudio	60
Figura 36. Secuencia de pasos	62
Figura 37. Unión de las superficies generadas	63
Figura 38. Serie de tiempo de niveles de agua registros (2019-2023)	66
Figura 39. Curva de descarga	69
Figura 40. Ajuste logarítmico de los datos.	70
Figura 41. Curva de calibración ajustada	71
Figura 42. Perfil topográfico de la sección de aforo	72
Figura 43. Ajuste logarítmico de los datos.	73
Figura 44. Nivel de agua vs factor k	75
Figura 45. Curva de descarga extrapolada	75
Figura 46. Curva teorica n vs Q	76
Figura 47. Hidrogramas de los eventos de crecidas seleccionados	77
Figura 48. Propagación de avenidas	78
Figura 49. Hidrograma de entrada para la modelación hidrodinámica	80
Figura 50. Malla computacional del proyecto	82
Figura 51. Refinamiento de la malla computacional	83
Figura 52. Condiciones de borde de entrada y salida	83
Figura 53. Introducción de condiciones de flujo al modelo	86
Figura 54. Asignación del intervalo de cómputo al modelo	87
Figura 55. Mapa de valores de coeficientes de Manning	89
Figura 56. Mapa de valores de coeficientes de Manning	92
Figura 57. Hidrograma de crecida y hietograma de precipitación (Tr=100 años)	93
Figura 58. Resultado de las profundidades de flujo (Tr= 50 años)	94
Figura 59. Resultado de los velocidades de flujo (Tr= 50 años)	95
Figura 60. Resultado de los niveles de flujo (Tr= 50 años)	95
Figura 61. Resultado de las profundidades de flujo (Tr= 100 años)	96

Figura 62. Resultado de las velocidades de flujo (Tr= 100 años)	96
Figura 63. Resultado de las niveles de flujo (Tr= 100 años)	97
Figura 64. Captura del plan de simulación finalizado	97
Figura 65. Tramos críticos de desbordamiento del río	99
Figura 66. Parámetros para el predimensionamiento de muro de gaviones	100
Figura 67. Configuración de los tipos de muro de gaviones	101
Figura 68. Información granulométrica	102
Figura 69. Disposición de los muros de gaviones	103
Figura 70. Secciones transversales del emplazamiento del muro de gavión	109
Figura 71. Vista en planta del emplazamiento del muro de gavión	110
Figura 72. Simulación con obras de protección	111
Figura 73. Simulación con obras de protección	112
Figura 74. Simulación con obras de protección	113
Figura 75. Simulación con obras de protección	114
Figura 76. Presupuesto general de las obras protección	115

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1. Descripción de herramientas y equipos utilizados	8
Tabla 2. Resumen de la ubicación de la Microcuenca	11
Tabla 3. Método de solución	22
Tabla 4. Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe	25
Tabla 5. Características General del terreno	28
Tabla 6. Valores de coeficiente de contracción μ	45
Tabla 7. Valores de x	45
Tabla 8. Valores del coeficiente β	45
Tabla 9. Descripción de parámetros	47
Tabla 10. Coordenadas oficiales de la estación CORS GEO1-LA PAZ	50
Tabla 11. Medición de las coordenadas de los puntos de control terrestre	51
Tabla 12. Resumen de la ejecución del vuelo	54
Tabla 13. Evaluación del ajuste aerofotogramétrico	58
Tabla 14. Errores de validación en coordenadas Este y Norte con y sin GCPs.	61
Tabla 15. Errores de validación con y sin GCPs.	61
Tabla 16. Ubicación geográfica y registros disponibles de la estación automática	64
Tabla 17. Datum de referencia vertical de la estación hidrométrica	65
Tabla 18. Lectura de niveles de agua y aforos de caudales recolectados	66
Tabla 19. Resumen de niveles y caudales de las campañas de monitoreo	69
Tabla 20. Resultados de la regresión y error	70
Tabla 21. Propiedades geométricas de la sección de control	73
Tabla 22. Parámetros extrapolados	74
Tabla 23. Parámetros hidráulicos y geométricos extrapolados	74
Tabla 24. Datos de eventos hidrológicos con caudal y nivel del flujo.	77
Tabla 25. Valores de Hidrograma, K y X	79
Tabla 26. Valores del coeficiente de Manning en canales naturales	85
Tabla 27. Valores de calibración para diferentes corridas	90
Tabla 28. Resultados combinados de las corridas del plan de simulación	91
Tabla 29. Caudales totales para diferentes periodos de retorno	93

Tabla 30. Parámetros del modelo	94
Tabla 31. Tramos críticos de desbordamiento	98
Tabla 32. Resumen del predimensionamiento del muro de gavión	101
Tabla 33. Resumen de los parámetros hidráulicos de los tramos críticos	103
Tabla 34. Resumen de parámetros hidráulicos	105
Tabla 35. Detalles de las obras y sus características	110
Tabla 36. Parámetros de simulación con obras de protección	112
Tabla 37. Errores de validación con y sin GCPs.	116
Tabla 38. Resultados de las corridas para cada evento.	117

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1	Pastoreo de ganado lechero y pradera de alfalfa.	10
Fotografía 2	Mapa de ubicación del área de estudio y estación hidrométrica KH-05 .	12
Fotografía 3	Descarga de aguas residuales y domésticas	12
Fotografía 4	Descarga de aguas pluviales	13
Fotografía 5	Descarga de aguas tratadas de la PTAR Puchukollo.	14
Fotografía 6	Dianas de marcadores de los puntos de control y validación	50
Fotografía 7	Medición de las coordenadas de los GCPs y validación.	51
Fotografía 8	Levantamiento aerofotogramétrico del área de estudio	53
Fotografía 9	Vista del río y perfil batimétrico.	55
Fotografía 10	Estación hidrométrica y regla limnimétrica	65
Fotografía 11	Medición del caudal con ADCP en la sección de aforo	68
Fotografía 12	Materiales en el cauce principal y llanura de inundación	84

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.

Los eventos hidrológicos ocurren con frecuencia y pueden causar destrozos, tanto en áreas urbanas y rurales. Cuando se presenta en el área rural, puede causar perjuicios, desde daños a viviendas, pérdida de áreas de cultivo y de pastoreo, afectado en el desarrollo de las comunidades y la calidad de vida de la población.

Las diversas investigaciones enfocadas a la modelación de hidráulica fluvial han mejorado sus técnicas significativamente en las últimas décadas, integrando en la actualidad metodologías de relevamiento de información más detallada y precisa de campo. La implementación de la tecnología de vehículos aéreos no tripulados (VANTs o drones) en esta área de la ingeniería, ha permitido representar de forma digital la superficie, siendo este un factor importante en la modelación computacional del comportamiento del agua.

Esta investigación tiene como objetivo analizar el comportamiento hidrodinámico de un tramo del Río Seco como sitio de estudio y que comprende una longitud de 2.0 Kilómetros del cauce y cruza por la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha. Se implementará una modelación bidimensional de flujo no permanente con el modelo HEC-RAS para eventos hidrológicos con periodos de retorno de 50 y 100 años, con la finalidad de identificar zonas de posible inundación.

La metodología utilizada se basa en un enfoque mixto de investigación, que comprende tres fases, combinando enfoques cuantitativos y cualitativos. En la fase inicial, se recolectarán datos numéricos de campo, como mediciones de caudal, velocidad del agua y vuelo fotogramétrico. En la fase 2, se analizará y procesará los datos para la generación de una curva de descarga y un modelo digital de terreno topo batimétrico, proporcionando información cualitativa detallada del río en el tramo de estudio. Por último, en la fase final, se integrarán los datos cuantitativos y cualitativos para realizar la modelación hidrodinámica del río y una propuesta de medida estructural de mitigación.

1.1 Justificación general.

Los problemas de desbordamiento y en consecuencia la ocurrencia de inundaciones causadas por el Río Seco en la comunidad Mamani del Municipio de Viacha, son los principales motivos que llevan al desarrollo del presente trabajo. Estas inundaciones representan un riesgo para la seguridad de la población y provocan daños materiales importantes, afectando de manera negativa la calidad de vida de los habitantes y genera un impacto económico en los

pobladores.

La relevancia de este estudio radica en los impactos negativos en las comunidades rurales cercanas al río, como pérdidas en la cobertura de cultivos, pérdida de áreas de pastoreo, daños en infraestructuras y pérdida económica, lo que afecta gravemente el sustento y el bienestar local.

El uso de la fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (UAVs o drones) en la modelación hidrodinámica representa una metodología precisa para obtener datos de terreno y también, por esa información, comprender y predecir el comportamiento del agua, que es el principal propósito en el estudio que se presenta. La fotogrametría permitirá capturar imágenes aéreas de alta resolución del área de estudio, las cuales serán procesadas para generar un modelo tridimensional del terreno.

Al implementar un modelo hidrodinámico calibrado mediante eventos hidrológicos registrados, se espera obtener información valiosa para la toma de decisiones en la gestión hídrica y la prevención de desastres hidrológicos. La utilización de modelos numéricos computacionales permitirá realizar un análisis del flujo del agua, lo que facilitará la identificación de zonas propensas a desbordamientos e inundaciones en el área de estudio. De esta manera, es posible proponer medidas estructurales de mitigación y resiliencia.

El estudio realizado por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua, titulado “Plan de Gestión de Riesgos y Adaptación al Cambio Climático de la Cuenca Katari y el Lago Menor del Titicaca”, donde se ha catalogado al Municipio de Viacha como una zona de alto riesgo ante inundaciones. Debido a la recurrencia de estos eventos hidrológicos en sus principales ríos. Esta investigación contribuye al estudio hidrodinámico en ríos de pendiente baja, mediante la aplicación de una metodología actualizada y el uso de equipos de precisión, así como la utilización de modelos numéricos computacionales para realizar un análisis del flujo del agua.

1.2 Fines.

Por medio de este proyecto de grado, se pretende modelar la hidrodinámica de un tramo del Río Seco empleando técnicas de fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (drones) y modelos numéricos computacionales como HEC-RAS Bidimensional, con base en la información recolectada de fuentes primarias y secundarias. Además de diseñar una medida estructural para protección en algunos puntos de las márgenes del río del tramo de estudio.

Una vez implementado el modelo hidrodinámico, se llevará a cabo su calibración utilizando

datos hidrométricos disponibles en el área de estudio. Esto permitirá comprender el comportamiento fluvial del río con baja pendiente. La calibración consistirá en ajustar el parámetro de rugosidad del cauce. La validación del modelo, se realizará comparando los resultados de la modelación con los datos observados en la estación hidrométrica, esto con el propósito de asegurar su confiabilidad.

Finalmente, el modelo hidrodinámico como resultado de la presente investigación será una herramienta valiosa y una base sólida para realizar simulaciones con diferentes escenarios de crecidas asociados a periodos de retorno. Entre las principales aplicaciones se encuentran la modelación de inundaciones y eventos hidrológicos.

1.2.1 Estado del arte.

Se han llevado diversas investigaciones y estudios relacionados que aborden la modelación hidrodinámica en nuestro entorno. Como parte de la actual investigación, se realizó una revisión bibliográfica actualizada relacionada con levantamientos aerofotogramétricos para la generación de modelos digitales de elevación, análisis de información hidrométrica y obras de protección en ríos, como se evidencia en la bibliografía adjunta.

El artículo que publicaron Heredia et al. (2023) titulado “Desafíos en la modelación numérica hidrodinámica de ríos morfológicamente activos: caso de estudio del Río Pilcomayo, Bolivia”. En esta investigación, se abordan los desafíos encontrados durante la calibración hidrodinámica y se describen las técnicas utilizadas. Se destaca especialmente la relación establecida entre el caudal y el coeficiente de rugosidad de Manning, la cual se obtuvo a partir de los registros de aforos en la estación hidrométrica del área de estudio.

El Ministerio de Medio Ambiente y Agua (2021), a través del Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, en colaboración con la Unidad de Riesgos Hidrológicos, Proyectos y Temas Estratégicos, publicó el “Catálogo de medidas de protección y mitigación para reducir eventos de inundación y crecidas en áreas agrícolas y urbanas en cuencas alta y baja”. Este catálogo tiene como objetivo proporcionar herramientas técnicas y contribuir a la formulación de estudios de diseño técnico de preinversión. Así mismo se detallan los procedimientos para llevar a cabo un estudio hidrológico e hidráulico, de igual forma para obtener información topográfica a través de levantamientos fotogramétricos, técnicas de perfilado de ríos para la obtención de la batimetría, y la implementación, calibración y validación de un modelo bidimensional. Se hace énfasis en estos aspectos, ya que son de gran relevancia e interés para el desarrollo del presente proyecto.

De acuerdo con el Estudio Hidrológico realizado por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (2020) como parte del proyecto “Diseño y construcción de obras civiles para el mejoramiento y ampliación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Puchukollo - El Alto”, el cual tuvo uno de los objetivos de determinar los caudales máximos para diferentes periodos de retorno que fluyen a través del cauce del Río Seco, los mismo que atraviesan las cercanías de la PTAR Puchukollo. Los resultados obtenidos indican que los caudales de avenida para periodos de retorno de 50 y 100 años son de 30.69 y 34.49 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, respectivamente. Además, se determinó que el caudal máximo de la PTAR en su operación será de 2.0 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ representa aproximadamente un 5 % de los caudales de avenida máxima.

En el proyecto de grado presentado por Martínez A. y Rubio N. (2018), titulado como “Modelo de inundación mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados en la cuenca media del Río Magdalena, en el municipio de La Dorada, Caldas”, explican los autores dos metodologías: la convencional, que utiliza equipos topográficos, y la no convencional, que utiliza levantamientos fotogramétricos para la generación de un modelo digital de terreno. A partir de estos datos, se realiza una modelación numérica computacional utilizando el software IBER v.2.4.2. Los resultados obtenidos demuestran que la metodología no convencional ofrece mejores resultados debido a la mayor cantidad de información del terreno disponible en el área de estudio. Esta investigación destaca la utilidad de los vehículos aéreos no tripulados y los levantamientos fotogramétricos en el campo de la modelación de inundaciones y resalta la importancia de contar con datos detallados del terreno para obtener resultados más precisos.

Según el artículo de Ochoa et al. (2016) titulado “Modelación hidrodinámica del tramo medio del Río Ctalamochita, Provincia de Córdoba”, relata que en la investigación compararon modelos hidrodinámicos unidimensionales (utilizando el software HEC-RAS) y bidimensionales (utilizando el software IBER). Los resultados obtenidos de la calibración mostraron que el modelo realizado con el software IBER presentó un error promedio del 5 %, mientras que el modelo desarrollado con HEC-RAS tuvo un error promedio del 15 %. Se evaluaron las variables de velocidad y profundidad para realizar esta comparación. Además, se comprobó que, para ríos meándricos, el modelo bidimensional se ajusta mejor a las condiciones hidrodinámicas.

Según el trabajo de Ochoa et al. (2016) titulado “Modelación hidráulica en 2D del tramo puente Av. Felipe II – Tres puentes del Río Yanuncay utilizando IBER”, el estudio destaca la generación de un modelo digital de elevación utilizando fotogrametría con drones. Este modelo digital de elevación se utiliza posteriormente para la modelación y calibración del modelo hidrodinámico bidimensional, utilizando información recolectada en campo. Este enfoque

integrado entre la captura de datos mediante fotogrametría y la modelación hidrodinámica permite obtener resultados más precisos y detallados en la simulación del comportamiento hidráulico del tramo del Río Yanuncay analizado.

1.3 Objetivos del proyecto.

1.3.1 Objetivo general.

Modelar el comportamiento hidrodinámico de un tramo del Río Seco mediante el uso de fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (drones) e información hidrométrica disponible.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Generar un modelo digital del terreno del área de estudio mediante un levantamiento aerofotogramétrico y batimétrico con precisión centimétrica, para su implementación en el modelo computacional HEC-RAS 2D.
- Modelar el comportamiento hidrodinámico del tramo de estudio del Río Seco utilizando la información hidrométrica disponible del periodo 2019-2023, mediante un análisis de sensibilidad del parámetro de calibración del modelo.
- Identificar los tramos críticos de desbordamiento mediante simulaciones del modelo hidrodinámico calibrado, para escenarios de crecidas con periodos de retorno de 50 y 100 años.
- Diseñar una obra estructural de protección en los tramos identificados como críticos a desbordamiento, para mitigar la problemática de inundación en el área de estudio. .

1.4 Alcance.

El alcance de este proyecto de grado es realizar un estudio del comportamiento hidrodinámico del Río Seco. El área de estudio abarca un tramo de 2 Km, con una extensión de 100 m a cada lado del margen del río, dentro de la comunidad Mamani del Municipio de Viacha, ubicado en una zona de riesgo hidrológico alto por inundación y desborde. Para lograr este objetivo, se lleva a cabo varias actividades, que incluyen la realización de un levantamiento aerofotogramétrico con dron para obtener un modelo digital del terreno, así como una batimetría para conocer la profundidad y perfil del lecho del río. Además, se realizan campañas de monitoreo para medir el caudal y los niveles de agua en la sección de aforo y la construcción de una curva de descarga en la estación hidrométrica. Finalmente, se propone medidas

estructurales resilientes para mitigar la problemática de inundación y desborde en el área de estudio.

Se utilizará el modelo computacional HEC-RAS para modelar el comportamiento hidrodinámico del río. Además, se llevará a cabo la calibración del modelo utilizando la información registrada por la estación hidrométrica con código Viacha KH-05 durante el periodo 2019-2023. Esta estación fue implementada por la Unidad de Gestión de la Cuenca Katari en el año 2019.

La implementación de este modelo hidrodinámico en el tramo del Río Seco permitirá identificar las zonas de posible inundación para eventos hidrológicos con periodos de retorno de 50 y 100 años. Además, se llevará a cabo el diseño de medidas estructurales que mitiguen las inundaciones en esas áreas identificadas, contribuyendo así a la gestión y prevención de desastres hidrológicos.

1.5 Metodología.

La metodología utilizada se basa en un enfoque mixto de investigación, que comprende tres fases, combinando enfoques cuantitativos y cualitativos, tal como se muestra en la Figura 2. En la fase inicial, se recolectarán datos numéricos de campo, como mediciones de caudal, velocidad del agua y vuelo fotogramétrico. Estos datos cuantitativos proporcionaron una base para el análisis posterior. En la fase 2, se analiza y procesan los datos para la generación de una curva de descarga y un modelo digital de terreno mediante levantamiento aerofotogramétrico y batimétrico, proporcionando información cualitativa del río en el tramo de estudio. Por último, en la fase final, se integran los datos cuantitativos y cualitativos para realizar la modelación hidrodinámica del río y el diseño de una propuesta de medida estructural de mitigación ante inundación y desborde en el tramo de estudio.

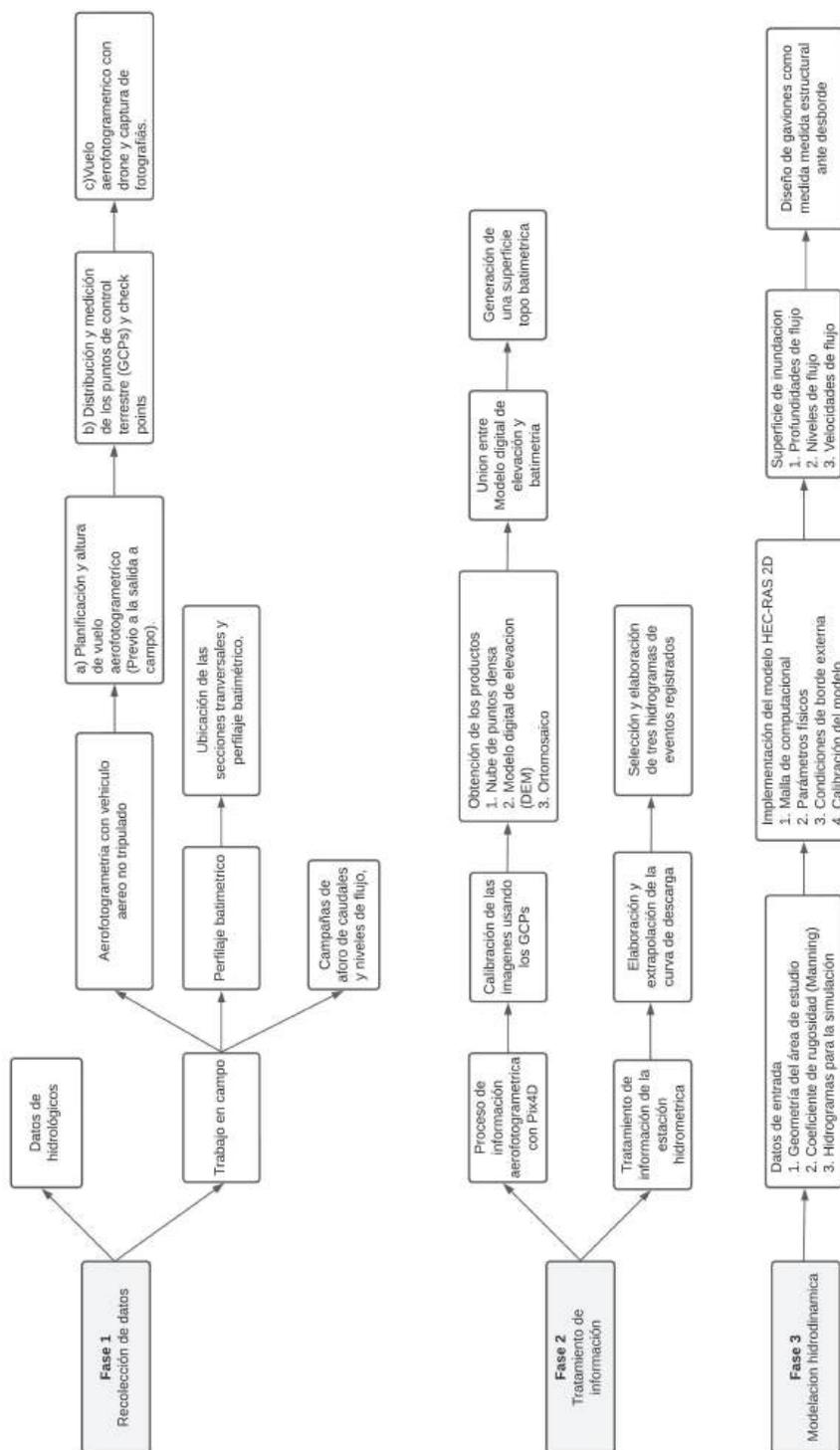


Figura 1. Metodología.

1.6 Herramientas y equipos utilizados.

Para la recopilación y procesamiento de los datos obtenidos, fue necesario el uso de equipos de precisión y herramientas tanto en campo como en gabinete para el desarrollo del presente proyecto. A continuación, en la Tabla 1, se describen los equipos y herramientas utilizados:

Equipo	Descripción
 <p data-bbox="407 527 570 554">Phantom 4 Pro</p>	<p data-bbox="703 533 1398 732">El dron DJI Phantom 4 Pro es un dron de ala rotatoria utilizado en levantamientos fotogramétricos. Equipado con un sistema de detección de obstáculos en cinco direcciones y cámaras visuales e infrarrojas, captura imágenes detalladas. Puede grabar en 4K, tomar fotos de 20 megapíxeles. Con hasta 25 minutos de tiempo de vuelo por batería inteligente, recopila datos seguros y precisos, siendo una herramienta valiosa en levantamientos fotogramétricos.</p>
 <p data-bbox="407 751 570 779">Leica Zeno 20</p>	<p data-bbox="703 774 1398 1005">El Leica Zeno 20 es un receptor GNSS de alta precisión y submétrico diseñado para aplicaciones geoespaciales. Compatible con tecnologías de corrección en tiempo real como ser RTK, permite obtener una precisión submétrica en levantamientos y mapeo. Su versatilidad se extiende a la posibilidad de utilizar servicios de corrección en tiempo real, como el NTRIP, para optimizar aún más la precisión de la ubicación en campo. Este equipo resulta importante en actividades de cartografía, ingeniería y ciencias ambientales gracias a su diseño robusto y portátil.</p>
 <p data-bbox="367 1041 618 1068">Computadora Desktop</p>	<p data-bbox="703 1056 1398 1140">La computadora de escritorio utilizada para el procesamiento de las imágenes o fotografías capturadas por el vehículo aéreo no tripulado cuenta con las siguientes especificaciones:</p> <ul data-bbox="748 1146 1252 1283" style="list-style-type: none"> ✓ Procesador: Ryzen 7 5800X ✓ Memoria RAM: Corsair 16GB ✓ Tarjeta de video: Nvidia GeForce RTX 3060 12GB ✓ Sistema operativo: Windows 11 Pro ✓ Memoria de almacenamiento: 500GB <p data-bbox="703 1289 1398 1373">Para el procesamiento de las imágenes, se empleó el software Pix4D Mapper, que aprovecha las capacidades de esta configuración de hardware para realizar un procesamiento eficiente de los datos capturados por el dron.</p>
 <p data-bbox="391 1402 586 1430">ADCP StreamPro</p>	<p data-bbox="703 1409 1398 1635">El ADCP StreamPro es un equipo de perfilaje de corrientes acuáticas que se utiliza en aplicaciones hidrográficas y ambientales. Este dispositivo es capaz de medir con precisión la velocidad, caudal y dirección de las corrientes en ríos, canales y cuerpos de agua, proporcionando información para estudios de hidrología y mapeo de lechos fluviales. Su diseño compacto y su capacidad para realizar mediciones en tiempo real hacen que el ADCP StreamPro sea una herramienta valiosa el monitoreo de corrientes y la recopilación de datos hidrográficos.</p>

Tabla 1. Descripción de herramientas y equipos utilizados

CAPÍTULO 2: CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.

2.1 Ubicación del proyecto

El área de ubicación del proyecto se encuentra en la Comunidad Mamani, a 4 Kilómetros al norte del centro poblado del Municipio de Viacha, en el Departamento de La Paz, Bolivia, a una altitud de aproximadamente 3900 metros sobre el nivel del mar. Las coordenadas geográficas del área de estudio son: entre los paralelos $16^{\circ}36'26.35''$ y $16^{\circ}37'10.62''$ de latitud sur, y los meridianos $68^{\circ}17'49.99''$ y $68^{\circ}18'15.74''$ de longitud oeste.

El tramo de estudio inicia en el Puente Pataraya, donde se encuentra instalada la estación hidrométrica KH-05 y finaliza a 2 Kilómetros aguas arriba del río, en sentido contrario al flujo.

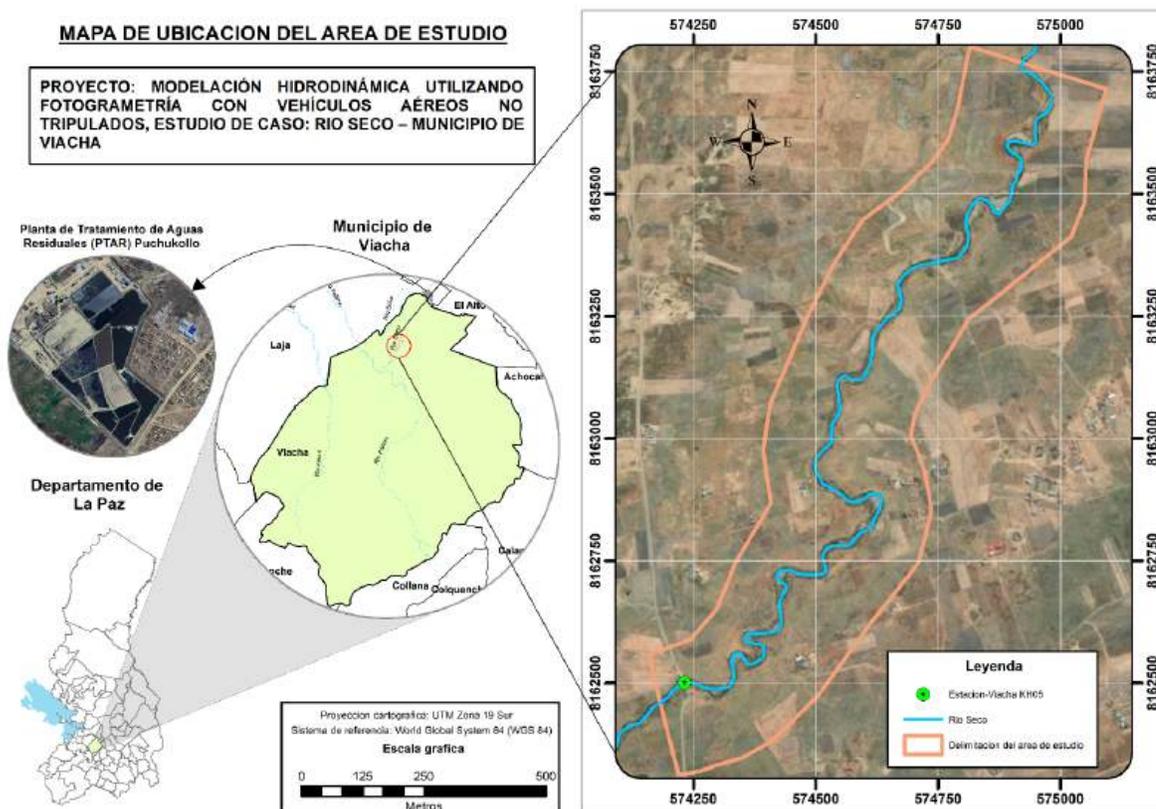


Figura 2. Mapa de ubicación del área de estudio y estación hidrométrica KH-05

2.2 Descripción del área del proyecto.

La Comunidad Mamani se caracteriza por ser un sector agrícola y ganadero, donde se destaca la producción de cultivos típicos del altiplano boliviano, como la quinua, avena, cebada, alfalfa, y papa, además de la actividad ganadera enfocada en la producción de leche.

La actividad de pastoreo en la Comunidad Mamani genera ingresos económicos de ganado lechero (con ganado de razas Holstein y mestizo) en praderas nativas y praderas de forraje introducido, como alfalfa, así como otros pastos como Ovillo y Llorón. Además, del pastoreo de ganado ovino (raza Merino), siendo esta actividad importante para el desarrollo económico de la población local, tal como se observa en la Fotografía 1.



Fotografía 1. Pastoreo de ganado lechero y pradera de alfalfa

2.3 Hidrografía.

A una altitud de 4600 m.s.n.m. nace el Río Seco, en los nevados del Chacaltaya al norte del Municipio de El Alto, con poco caudal y velocidad de corriente, sigue su curso a través la canalización por la ciudad de El Alto, seguidamente se une con el río Pallina y posteriormente con el río Katari, que finalmente desemboca en el Lago Menor del Titicaca.

De acuerdo con la metodología Pfafstetter, que se utiliza para la delimitación y codificación de las unidades hidrográficas de Bolivia, el área del proyecto se encuentra dentro de la Microcuenca del Río Pallina, mismo que se ubica en la región hidrográfica de la cuenca del Río Katari y a su vez éste, forma parte de la cuenca endorreica del Lago Titicaca (Figura 3).

La Microcuenca Pallina se ubica entre los paralelos 16°64'36" y 16°36'12" Latitud Sud y 68°30'44 y 68°27'18" Longitud Oeste. En la siguiente Tabla 2 se presenta un resumen de la ubicación de la Microcuenca de estudio.

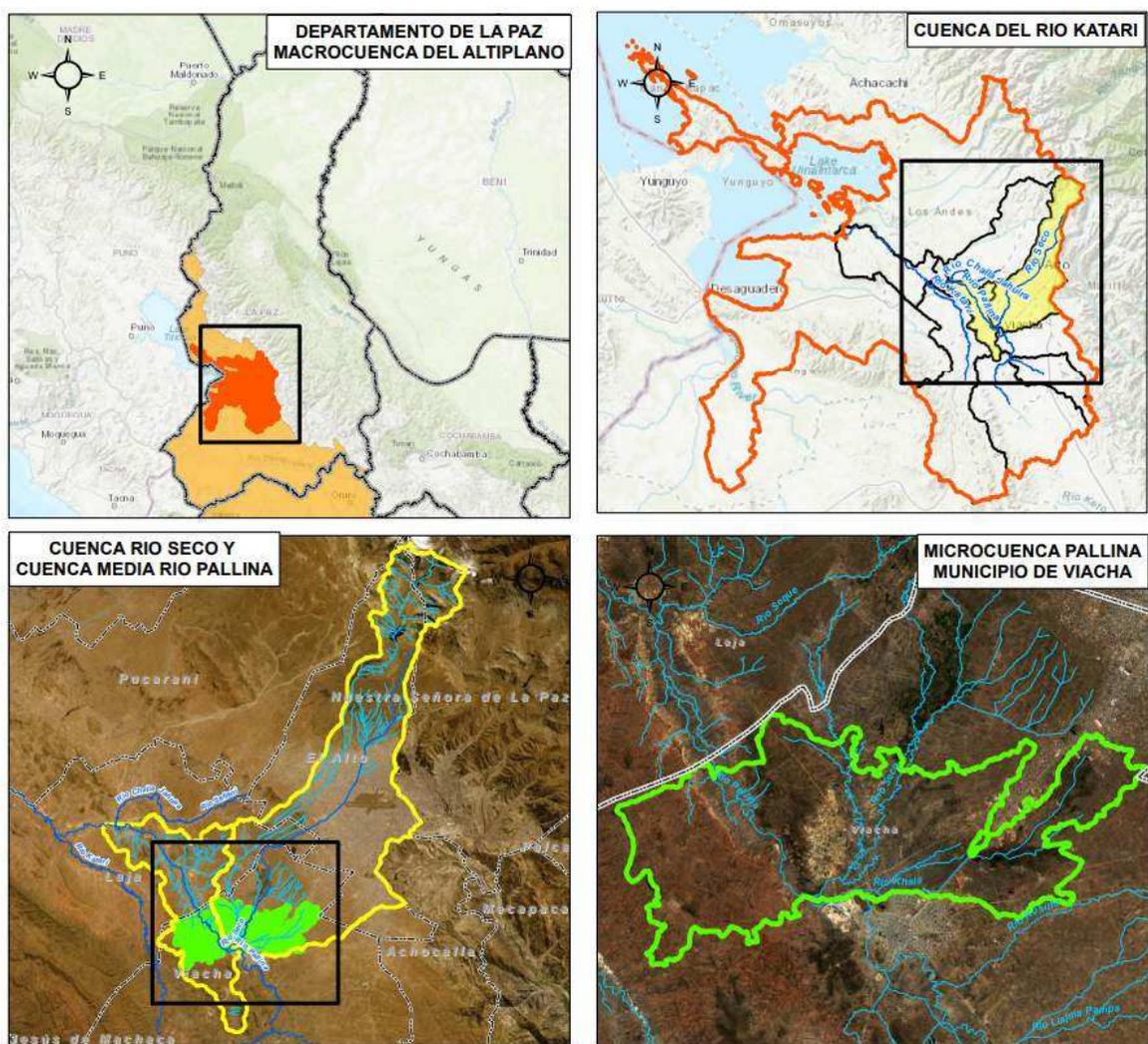


Figura 3. Mapa de ubicación geográfica de la Microcuenca Pallina
 Fuente: Extraído del E.D.T.P. Microcuenca Pallina, MMAyA (2019).

Administrativa	Departamento	La Paz	Provincia	Ingavi
	Municipio	Viacha		
	Comunidad(es)/ Ayllu(s)	Pallina Grande, Pallina Chico, Pallina Centro, Contorno Bajo, Contorno Pallcoso, Sequejahuire, Mamani, Granja Convento, Challajahuire.		
Hidrográfica	Región hidrográfica	1 cuenca Endorreica	Cuenca estratégica	Katari
	Microcuenca de intervención		Pallina	
	Rio principal		Pallina	
	Unidad hidrográfica de gestión (UHG)		Pallina	
Ubicación Geográfica	Latitud Norte	16° 64' 36''	Longitud Este	68° 30' 44''
	Altitud media	3885	Msnm	

Tabla 2. Resumen de la ubicación de la Microcuenca
 Fuente: Extraído del E.D.T.P. Microcuenca Pallina, MMAyA (2019).

2.4 Afluentes de aguas al Río Seco.

A continuación, se describen los afluentes del Río Seco más representativos aguas arriba del tramo de estudio del proyecto.

2.4.1 Aguas residuales

De acuerdo con el trabajo de Castillo Chuquimia (2019), el Río Seco recibe los afluentes del río Kantutani y del río Hernani. El río Kantutani presenta una calidad de agua de nivel medio a deficiente debido a la presencia de aguas domésticas, lodos de la Planta Potabilizadora de Alto Lima y aguas industriales (Fotografía 2).



Fotografía 2. Mapa de ubicación del área de estudio y estación hidrométrica KH-05

Asimismo, el río Hernani muestra una calidad de agua muy deficiente, influenciada por aguas domésticas, residuos de curtiembres, mataderos, aguas industriales provenientes de la Ciudad de El Alto.

A lo largo de la canalización del Río Seco existe numerosas conexiones clandestinas de efluentes proveniente de mataderos informales, aguas residuales domésticas y aguas residuales industriales, tal como se demuestra en la Fotografía 3.



Fotografía 3. Descarga de aguas residuales y domésticas

2.4.2 Aguas pluviales.

Uno de los afluentes del Río Seco con mayor caudal en la temporada de las lluvias son los sistemas de drenaje pluviales conocido como embovedados (Fotografía 4). Estos embovedados captan las aguas pluviales mediante sumideros y redes de alcantarillado pluvial de varios sectores del área urbana de la ciudad de El Alto.



Fotografía 4. Descarga de aguas pluviales

2.4.3 Aguas tratadas.

De acuerdo con Gutiérrez et al. (2010), la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Puchukollo está situada aledaña al Río Seco, que actúa como cuerpo receptor de las aguas tratadas que provienen de dicha planta. En la ciudad de El Alto, los distritos 1, 2, 3, 4, 5, 6 y algunas zonas de los distritos 7 y 8 descargan sus aguas residuales en esta PTAR. Estas aguas son recolectadas a través del sistema de alcantarillado sanitario de la ciudad y transportadas hasta la planta mediante un emisario. La PTAR tiene una capacidad operativa de 430 l/s, pero durante la temporada de lluvias puede llegar hasta 1800 l/s. En estos casos, se abren las compuertas del sistema de derivación (By-Pass) para desviar todo el caudal hacia el Río Seco.

La salida de las aguas tratadas es conducida a través de canales construidos hasta el punto de descarga en el Río Seco, como se muestra en la Fotografía 5.



Fotografía 5. Descarga de aguas tratadas de la PTAR Puchukollo

2.4.4 Inundaciones y desbordes reportados.

En los últimos años, se han reportado en varios medios digitales y escritos desbordes e inundaciones recurrentes en comunidades cercanas al área de estudio, especialmente durante la temporada de lluvias. Aunque estos reportes no corresponden directamente al área de estudio de este proyecto, su proximidad destaca la vulnerabilidad de las zonas aledañas y subraya la necesidad de implementar medidas estructurales de mitigación y resiliencia para prevenir futuros desastres en la región.

El medio informativo Agencia de Noticias Fides (2018) reportó el 13 de marzo de 2018 la noticia titulada “Desborde de río provoca inundación en el Penal de Chonchocoro”, indicando que varias celdas del penal de máxima seguridad San Pedro de Chonchocoro en La Paz fueron afectadas por el desborde de un río cercano, provocado por fuertes lluvias y granizo. Se evacuó a 15 reclusos del bloque D15, y se realizaron trabajos de drenaje al alcanzar el agua un metro de altura. Este incidente evidencia la vulnerabilidad de las infraestructuras ante eventos hidrológicos y la necesidad de mejoras en los sistemas de drenaje y protección.

Según el informe publicado por Contra Parte (2024) el 9 de marzo de 2024, la Comunidad Chonchocoro, ubicada cerca de la Comunidad Mamani, sufrió importantes daños debido al desbordamiento del Río Seco. En dicho reporte se indicó: “La Zona Cabaña de la Comunidad de Chonchocoro en Viacha hace un llamado a la emergencia ante el desbordamiento del Río Seco, que se encuentra en cercanía del lugar”.



Figura 4. Inundación en la Comunidad Chonchocoro
Fuente: Imagen extraída del medio digital Contra Parte (2024).



CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO

3.1 Modelación.

Un modelo es una abstracción de la realidad, en la que se establecen relaciones para tratar de entender el comportamiento de un fenómeno. La representación de un sistema real a través de un modelo parte de ciertas inferencias y emplea información a diferentes escalas para entender el comportamiento del fenómeno de interés (IDEAM, 2018).

Como plantean López et al. (2009), los modelos en general se dividen en tres categorías: Modelos físicos: representan el sistema real en una determinada escala. Modelos analógicos: analizan un sistema a partir de otro regido por leyes similares. Modelos matemáticos o numéricos: el sistema se representa por ecuaciones matemáticas y sentencias lógicas que expresan las relaciones entre variables y parámetros.

3.1.1 Información básica para la modelación de ríos.

Según lo expuesto por el IDEAM (2018), para llevar a cabo una modelación hidrodinámica, es necesario contar con la siguiente información:

Secciones transversales (batimetría): esto incluye no solo la parte húmeda del río, sino también la topografía de la parte seca, al menos hasta los taludes.

Información histórica de series de niveles y caudales: se deben disponer de datos de niveles y caudales tanto en la entrada como en la salida del trayecto a modelar, que sirvan como fronteras para la modelación.

Cartografía y topografía: es necesario contar con la cartografía más detallada posible del trayecto que se está modelando. En el caso de zonas de inundación donde se requiere un modelo 2D, se necesita una topografía y cartografía que incluyan curvas de nivel con intervalos inferiores a 1.0 m.

3.2 Modelos hidrodinámicos.

En el trabajo de elaborado por el IDEAM (2018), expone que la implementación de un modelo hidrodinámico se vuelve más desafiante a medida que se consideran más dimensiones del flujo, lo que aumenta significativamente la cantidad de información necesaria y los recursos computacionales requeridos. Sin embargo, es importante destacar que los modelos

bidimensionales están obteniendo un mayor reconocimiento debido a su capacidad para representar con mayor precisión fenómenos complejos. Estos modelos toman en consideración tanto la variación longitudinal como la lateral del cauce, lo que los hace más idóneos para simular flujos en áreas con geometrías irregulares o cambios abruptos en la topografía. Aunque los modelos bidimensionales requieren una mayor demanda de tiempo de cálculo y recursos computacionales, su precisión y habilidad para capturar fenómenos más complejos los convierten en herramientas valiosas para la ingeniería hidráulica y la gestión de recursos hídricos. Los modelos unidimensionales son ampliamente utilizados debido a su simplicidad y eficiencia computacional. Estos modelos son especialmente útiles en situaciones donde la variación lateral del cauce no es crítica y se busca obtener resultados rápidos y aceptables con un menor consumo de recursos computacionales.

Los regímenes de flujo en los cauces o ríos son considerados al utilizar modelos numéricos para la estimación de parámetros. Los regímenes de agua, como el flujo laminar, turbulento, supercrítico o subcrítico, determinan las condiciones de flujo en el cauce y tienen un impacto significativo en la hidráulica del sistema. Los modelos unidimensionales generalmente asumen un régimen de flujo permanente, simplificando el cálculo al suponer que las propiedades del flujo son constantes a lo largo del cauce. Por otro lado, los modelos bidimensionales pueden reproducir con mayor exactitud un régimen no permanente de agua al tener en cuenta la variación temporal del flujo, permitiendo una representación más realista de los fenómenos hidrodinámicos y una mejor comprensión de los procesos fluviales en presencia de cambios topográficos, estructuras y geometrías irregulares.

3.2.1 Regímenes de flujo.

Para entender con mayor claridad la clasificación del flujo en canales abiertos este se puede resumir de la manera siguiente (Chow, 1994).

- A. Flujo permanente
 - 1. Flujo uniforme
 - 2. Flujo variado
 - a. Flujo gradualmente variado
 - b. Flujo rápidamente variado
- B. Flujo no permanente
 - 1. Flujo uniforme no permanente (raro)

2. Flujo no permanente (es decir, flujo variado no permanente)
 - a. Flujo gradualmente variado no permanente
 - b. Flujo rápidamente variado no permanente

Flujo permanente: Se dice que un flujo es permanente cuando en una sección del canal permanecen constantes con respecto al tiempo las características hidráulicas del flujo (caudal, velocidad media, tirante, etc).

Flujo no permanente: El flujo es no permanente cuando en una sección del canal no permanecen constantes con respecto al tiempo las características hidráulicas del flujo (caudal, velocidad media, tirante, etc).

Flujo uniforme: Las características hidráulicas del flujo permanecen constantes a lo largo de todo el canal.

Flujo no uniforme: Las características hidráulicas no permanecen constantes a lo largo de todo el canal, también se le conoce con el nombre de flujo variado.

3.2.2 Modelo HEC-RAS.

HEC-RAS (Hydrological Engineering Center – River Analysis System) es un software de libre uso, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (US Army Corps of Engineers), cuyo proceso ha introducido nuevas herramientas de trabajo para el análisis de flujos en diversas condiciones. Esta mejora se ha dado desde la versión 2.2, que analizaba el flujo de forma unidimensional en condiciones permanentes, hasta las versiones más recientes que permiten el modelado en una y dos dimensiones tanto para condiciones de flujo permanentes como no permanentes.

Las ecuaciones de Navier-Stokes describen el movimiento de los fluidos en tres dimensiones, pero en el modelamiento de canales e inundaciones se aplican simplificaciones, especialmente en ríos con baja pendiente. Un conjunto simplificado de ecuaciones utilizado en este contexto son las ecuaciones de aguas poco profundas (SW siglas en inglés) o ecuaciones de Saint Venant bidimensionales. Estas ecuaciones asumen un flujo incompresible, densidad uniforme y presión hidrostática predominante, y son promediadas mediante el método de Reynolds. También se considera que la escala vertical es mucho menor que las escalas horizontales, lo que resulta en una velocidad vertical pequeña y una presión hidrostática dominante. Estas simplificaciones son especialmente adecuadas para modelar flujos en ríos de baja pendiente, donde los efectos tridimensionales son menos significativos y se busca una

representación más simplificada y eficiente del flujo (U.S. Army Corps of Engineers, 2022).

HEC-RAS, en sus versiones más recientes, ofrece funcionalidades de modelado hidráulico unidimensional y bidimensional para una variedad de análisis en ríos. Estas funcionalidades incluyen los siguientes componentes:

1. *Modelación de flujo en régimen permanente*  : Permite simular el flujo de agua en condiciones estables, donde no hay cambios significativos en las características del flujo a lo largo del tiempo. Se utiliza para determinar los niveles de agua y las velocidades del flujo en un cauce en condiciones estables.
2. *Modelación de flujo en régimen no permanente*  : Permite simular el flujo de agua en condiciones que cambian a lo largo del tiempo, como eventos de lluvia intensa o crecidas repentinas. Se utiliza para estudiar y predecir la propagación de inundaciones, el comportamiento del flujo durante eventos transitorios y las respuestas hidrológicas no estacionarias.
3. *Modelación de transporte de sedimentos*  : Permite simular el transporte de sedimentos en un cauce, teniendo en cuenta su erosión, transporte y deposición. Se utiliza para evaluar los efectos del flujo de agua en los patrones de sedimentación y erosión, y para comprender el impacto de los sedimentos en la morfología del cauce y en la calidad del agua.
4. *Modelación de calidad de aguas*  : Permite simular la dispersión y el transporte de contaminantes y sustancias químicas en el agua. Se utiliza para evaluar la calidad del agua en términos de parámetros físicos, químicos o biológicos, y para comprender la distribución y el impacto de los contaminantes en un sistema fluvial.

Para el presente proyecto se dará uso al componente flujo en régimen no permanente. Este componente de modelado hidrodinámico en HEC-RAS es utilizado para realizar estudios de análisis de inundaciones, es decir, para simular las áreas que pueden verse afectadas por desbordes e inundaciones en diferentes escenarios. Esto permite identificar zonas de inundación y tomar medidas de gestión y prevención adecuadas.

Según el manual del usuario de U.S. Army Corps of Engineers (2022), este software cuenta con la capacidad de modelar flujos tanto unidimensionales (1D) como bidimensionales (2D) o una combinación de ambos, tal como se describe a continuación.

- HEC-RAS puede realizar modelos en 1D, 2D y combinación de ambas. La ventaja

de trabajar en un modelo combinado (1D/2D) permite trabajar al usuario trabajar en sistemas fluviales más grandes

- El software utiliza las ecuaciones de Saint-Venant o Ecuaciones de Difusión de Onda. Las ecuaciones de difusión de onda permiten que el software permite que se ejecute más rápido, y tienen mayores propiedades de estabilidad. Las ecuaciones de Saint-Venant 2D son aplicables a una amplia gama de problemas. Sin embargo, varias situaciones de modelamiento se pueden modelar con precisión con las Ecuaciones de Difusión de Onda en 2D
- Solución Algorítmica de Volumen Finito Implícito. El algoritmo de solución implícita permite pasos de tiempo de cálculo más grandes que los métodos explícitos. El método de volúmenes finitos proporciona un incremento en la estabilidad y robustez sobre diferencias finitas tradicionales y técnicas de elementos finitos. Además, también maneja los regímenes de flujo subcrítico, supercrítico y mixtos (flujo que pasa a través de la profundidad crítica, tal como un salto hidráulico).
- Solución Algorítmica de Acoplado 1D y 2D. Los algoritmos de solución 1D y 2D están estrechamente acoplados en un paso de tiempo por un tiempo base con una opción para iterar entre 1D y transferencias de flujo 2D dentro de un paso de tiempo. Esto permite la retroalimentación directa de cada paso de tiempo entre los elementos de flujo 1D y 2D.
- Las grillas computacionales no estructurados o estructurados. El software está diseñado para utilizar grillas computacionales no estructurados, pero también puede manejar grillas estructuradas. Una grilla estructurada es lo mismo que una no estructurada, con la excepción que aprovecha las celdas ortogonales para simplificar algunos cálculos requeridos, es decir, las celdas computacionales pueden ser de distintas formas geométricas de distintos tamaños y formas (desde 3 hasta 8 lados).
- Tabla detallada de propiedades hidráulicas para celdas y contornos de celdas computacionales 2D. Cada celda contiene información diferente de acuerdo con la relación elevación-volumen y para cada contorno de celda se calcula la relación Elevación-Perímetro Mojado, Elevación-Área, Elevación-Rugosidad, etc. Estas relaciones que crea el programa permiten crear las celdas requeridas de distintos tamaños sin distorsionar los detalles del terreno y agiliza los tiempos de cálculo. Además, el tamaño de la celda de la grilla está ligado al nivel de detalle que se requiere para la investigación.

- Se detalla la cartografía de inundaciones y animaciones de inundación. La cartografía de las zonas inundadas, así como las animaciones de las inundaciones, se pueden hacer dentro de HEC-RAS usando la característica RAS Mapper. El área inundada se basará en los detalles del terreno subyacente y no el tamaño de celda de la grilla computacional. Luego del proceso, las celdas pueden quedar parcialmente inundadas o secas. El mapeo de los resultados reflejará esos detalles.
- Solución de algoritmo basado en Multi-Procesadores (Computación paralela). La ventaja de trabajar con múltiples procesadores permite obtener la solución del modelo de una manera más rápida y eficiente.

3.2.3 Leyes físicas que gobiernan el flujo bidimensional.

De acuerdo con el manual de usuario U.S. Army Corps of Engineers (2022), esta herramienta utiliza las leyes físicas que gobiernan el flujo de agua en un río o canal, que son el *principio de conservación de la masa* (continuidad) y el *principio de conservación del momentum* (segunda ley de Newton).

- a) **Principio de conservación de la masa:** El principio de conservación de la masa en flujo no permanente se basa en el concepto de volumen de control, una región específica dentro del sistema fluvial donde se analiza la conservación de la masa. En este volumen de control, se considera que la masa de agua es constante, lo que implica que la cantidad de agua que entra es igual a la cantidad que sale. Además, se tiene en cuenta la variación de la masa de agua debido a los cambios de almacenamiento en el volumen de control. Para evaluar estos cambios, se utiliza el concepto de altura promedio, que representa la altura media del agua en el volumen de control. Al considerar la altura promedio y las diferencias en los flujos de entrada y salida, se puede determinar cómo varía la masa de agua en el tiempo, tal como se describe con la ecuación (3.1).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

Donde:

H : corresponde a la altura del flujo.

u : es el componente en x de la velocidad altura-promedio.

v : es el componente en y de la velocidad altura-promedio.

- b) **Principio de conservación del momentum:** El principio de conservación del momentum se basa en las leyes físicas que rigen el flujo de agua en un río o canal. Se parte de

la simplificación de las ecuaciones de Navier-Stokes, asumiendo que el flujo tiene una profundidad pequeña en comparación con la longitud y el ancho del río, lo que permite despreciar los efectos verticales. Se utiliza una versión promediada verticalmente de la ecuación de momentum, donde se supone que la presión es casi hidrostática en ausencia de gradientes de presión fuertes y forzamientos de viento significativos. Estas ecuaciones diferenciales (3.2) y (3.3) expresan cómo varía el momentum en el tiempo y en el espacio.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (3.2)$$

Aceleración local
Aceleración convectiva
Presión hidrostática
Viscosidad (Turbulencia)
Fricción de fondo
Efecto de Coreolis

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad (3.3)$$

Aceleración local
Aceleración convectiva
Presión hidrostática
Viscosidad (Turbulencia)
Fricción de fondo
Efecto de Coreolis

3.2.4 Método de solución.

Según Heredia Gomez (2022), el método de solución depende del problema a resolver, en la tabla 3 se detalla las condiciones para cada tipo de flujo.

Tipo de flujo	Condiciones iniciales	Condiciones de borde
Permanente		✓
No permanente	✓	✓

Tabla 3. Método de solución

Fuente: Apuntes de Hidráulica Avanzada, Heredia (2022).

- a) **Condiciones iniciales:** Son los valores iniciales de las variables que se asignan a los puntos de la malla numérica. Estos valores deben ser estimados o medidos (no son la solución final).
- b) **Condiciones bordes:** Son los valores de las variables que se asignan a los puntos ubicados en los bordes. Estos valores no cambian, deben ser estimados o medidos.

Condición de borde de entrada (aguas arriba), por convección se recomienda usar:

1. Velocidades de flujo.

2. Caudales.
3. Hidrogramas de eventos o caudales.

Condición de borde de entrada (aguas arriba), por convección se recomienda usar:

1. Niveles de flujo (constante o variable)
2. Curva de descarga (H vs Q)
3. Pendiente de flujo
4. Altura normal de flujo

3.2.5 Calibración del modelo hidrodinámico.

La calibración es el procedimiento de asignar valores a los parámetros en la búsqueda de la máxima coherencia entre el objetivo planteado y la herramienta que se utilizará. En general, según el enfoque o la búsqueda de la investigación, el método propuesto permite hallar parámetros que minimicen alguna función objetivo (Gonzalez & Prieto, 2011).

Según el texto de Molina Carpio (2006), donde se menciona que se puede calibrar el coeficiente de rugosidad y coeficientes de contracción (modelación unidimensional) y para realizar esto se debe disponer de información de niveles agua correspondiente a un caudal conocido en una o más secciones del tramo de estudio.

Para verificar si el modelo es representativo, se compararán los resultados obtenidos en las secciones donde se realizaron los aforos, tanto en lo que respecta a la sección del cauce (verificación de exactitud del relieve obtenido con fotogrametría) como el tirante hidráulico y la velocidad del flujo. Si estos son significativos, se ajustará inicialmente la rugosidad hasta alcanzar una diferencia no mayor ± 20 cm entre el nivel de aguas registrado y el calculado, encontrándose calibrado el modelo de acuerdo a lo indicado por el Cuerpo de Ingenieros de EEUU (Ramos & Mejía, 2012).

En la calibración de un modelo hidrodinámico, se llevan a cabo iteraciones sucesivas ajustando gradualmente los parámetros del modelo, como el coeficiente de rugosidad de Manning. El objetivo es obtener valores simulados que se acerquen a los valores reales obtenidos reales medidos. Durante el proceso de calibración, es importante considerar la calidad del relieve obtenido del Modelo Digital de Terreno (MDT), ya que diferencias entre el relieve y el MDT pueden afectar la representatividad de los valores de rugosidad y, por ende, en los valores simulados.

3.2.6 Análisis del desempeño del modelo.

Según Molnar (2011) y Martinez Amaya y Rubio Nieto (2018) el grado de bondad del proceso de calibración del modelo se evalúa mediante la aplicación de criterios y análisis estadísticos para la evaluación del desempeño de modelos numéricos. Estos criterios estadísticos permiten comparar los resultados simulados con los datos observados y determinar la calidad de ajuste, continuación se presenta las herramientas estadísticas más utilizadas.

- **Error medio absoluto (MAE):** El error absoluto medio (MAE) tiene la misma unidad que los datos originales, tal como se ve en la ecuación (3.4), y solo se puede comparar entre los modelos cuyos errores se miden en las mismas unidades. Generalmente es similar en magnitud a RMSE, pero ligeramente más pequeño.

$$MEA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{sim,i} - Q_{obs,i}| \quad (3.4)$$

- **Error medio cuadrático (RMSE):** Es una fórmula popular para medir la tasa de error de un modelo de regresión. Sin embargo, solo se puede comparar entre modelos cuyos errores se miden en las mismas unidades.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{n}} \quad (3.5)$$

- **Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE):** Es un indicador estadístico utilizado para evaluar el desempeño de modelos hidrológicos o de simulación en la predicción de datos observados. Se utiliza para medir la precisión y la capacidad del modelo para reproducir los valores observados.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (3.6)$$

NSE mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, NSE=1; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces NSE=0.5. Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la Tabla 4.

NSE	Ajuste
< 0,2	Insuficiente
0,2 – 0,4	Satisfactorio
0,4 – 0,6	Bueno
0,6 – 0,8	Muy bueno
> 0,8	Excelente

Tabla 4. Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe

Fuente: Extraído de la investigación de Molnar (2011).

- **El coeficiente de correlación (R):** Este coeficiente expresa la dependencia lineal entre dos variables, para este estudio nos referimos a los caudales observados y los caudales simulados. Su expresión esta dada por la ecuación (3.7)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs},i} - Q_{\text{sim},i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs},i} - \bar{Q}_{\text{obs}})^2} \quad (3.7)$$

El coeficiente de correlación (R) también varía entre -1 y 1, donde un valor cercano a 1 indica una correlación positiva fuerte entre los caudales observados y simulados, un valor cercano a -1 indica una correlación negativa fuerte, y un valor cercano a 0 indica una correlación débil o nula.

3.3 Fotogrametría

La fotogrametría es una técnica de medición y generación de modelos tridimensionales a partir de imágenes capturadas desde diferentes perspectivas. Consiste en la adquisición de fotografías de un objeto o área de interés desde múltiples ángulos, utilizando cámaras o drones, y luego procesar esas imágenes para extraer información métrica precisa, como coordenadas tridimensionales y dimensiones del objeto.

Según la International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), la fotogrametría se define como “el arte, la ciencia y la tecnología de obtener información confiable sobre objetos y el medio ambiente a través del análisis, la interpretación y la medida de las imágenes fotográficas y patrones de radiación”(ISPRS, 2012). Esta técnica se basa en los principios de la geometría proyectiva y la estereoscopía para calcular la posición tridimensional de los puntos en el espacio a partir de las imágenes.

La fotogrametría se utiliza en diversos campos, como la modelación de ríos, topografía, cartografía, arquitectura e ingeniería civil. Permite generar modelos digitales de terreno, modelos 3D de edificios y estructuras, mapas de alta precisión, entre otros productos geoespaciales.

3.3.1 Fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados.

La fotogrametría es una técnica de medición y generación de modelos tridimensionales a partir de imágenes capturadas desde diferentes perspectivas. Consiste en la adquisición de fotografías de un objeto o área de interés desde múltiples ángulos, utilizando cámaras o drones, y luego procesar esas imágenes para extraer información métrica precisa, como coordenadas tridimensionales y dimensiones del objeto.

La International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), define a la fotogrametría como “el arte, la ciencia y la tecnología de obtener información confiable sobre objetos y el medio ambiente a través del análisis, la interpretación y la medida de las imágenes fotográficas y patrones de radiación”. Esta técnica se basa en los principios de la geometría proyectiva y la estereoscopía para calcular la posición tridimensional de los puntos en el espacio a partir de las imágenes (ISPRS, 2012).

La fotogrametría se utiliza en diversos campos, como la modelación de ríos, topografía, la cartografía, la arquitectura, la ingeniería civil y en diversos campos (Figura 5). Permite generar modelos digitales de terreno, modelos 3D de edificios y estructuras, mapas de alta precisión, entre otros productos geoespaciales.



Figura 5. Dron inteligente usado en diferentes campos de la ingeniería.
Fuente: Fotografía extraída de la página web, AngloAmerican (s.f.).

3.3.2 Proyecto de vuelo aerofotogrametrico.

Para garantizar la precisión en la generación del Modelo Digital de Terreno (MDT), es fundamental planificar un proyecto de vuelo fotogramétrico. Este proyecto comprende todas las

etapas de cálculo y actividades en terreno necesarias para lograr una alta precisión de los productos fotogramétricos, el proyecto de vuelo se define como el conjunto de preparativos y acciones previas a la ejecución del vuelo, que permiten obtener resultados satisfactorios (Guevara & Pacas, 2016).

Según Grijalba Luna (2018) en su trabajo sobre levantamiento fotogramétrico con drones, estos vuelos combinan la precisión y detalle de una visita al campo con la cobertura y alcance de una aeronave. Los drones vuelan por debajo de la cobertura de nubes, lo que les permite ser utilizados en diversas condiciones climáticas. Dependiendo de la plataforma aérea y las prestaciones del equipo empleado, los vuelos con drones son ideales para cubrir extensiones desde cientos hasta miles de hectáreas y desde decenas hasta cientos de kilómetros lineales. Estos vuelos se caracterizan por su eficiencia en términos de tiempo, costos de logística y reducción del trabajo de campo y el riesgo humano.

A continuación, se presenta la secuencia de pasos desde acciones previas a la planificación hasta la ejecución del vuelo:

1. **La selección del sistema de referencia:** este sistema proporciona las coordenadas necesarias para determinar la ubicación precisa de un punto en relación con un origen y una serie de ejes de referencia.
2. **Elegir la resolución espacial (GSD) de las imágenes:** el Ground Sample Distance (GSD) es la distancia entre dos centros de píxeles consecutivos medidos en el suelo. Esta medida es importante porque determina la altura de vuelo necesaria de acuerdo a las características técnicas de la cámara utilizada. Un mayor GSD significa una menor resolución espacial de la imagen, lo que implica una menor capacidad para percibir detalles más finos.
3. **Altura de vuelo:** una vez que se determina la resolución espacial deseada de la imagen (GSD), la anchura del sensor óptico y la distancia focal, se puede calcular la altura de vuelo utilizando la ecuación (3.8).

$$H = \frac{GSD \cdot d_f \cdot A_{imagen}}{A_s \cdot 100} \quad (3.8)$$

Donde:

H : es la altura de vuelo del dron en m.

GSD : es la distancia de muestreo en tierra en cm/píxel

A_s : es la anchura del sensor óptico en mm

d_f : es la distancia focal en mm

4. **Traslape longitudinal y transversal:** en la fotogrametría con drones, se aplica el principio de visión estereoscópica mediante traslapes longitudinales y transversales entre las imágenes capturadas. Estos traslapes son necesarios para crear una superposición entre las áreas comunes de las imágenes adyacentes. La cantidad de traslape requerida depende del relieve del terreno, la inclinación del eje de la cámara y las variaciones en la altura de vuelo, tal como se muestra en la Figura 6.

Para el presente proyecto se utilizará los traslapes recomendados el soporte del software Pix4D, mismo que se detallan en la Tabla 5.

Característica del terreno	Frontal (%)	Lateral (%)
General	75	60
Cultivos agrícolas	85	70
Vegetación densa con cuerpos de agua	85	70
Desértico, nieve	85	75

Tabla 5. Características General del terreno

Fuente: Elaborado a partir del manual de usuario de Pix4D

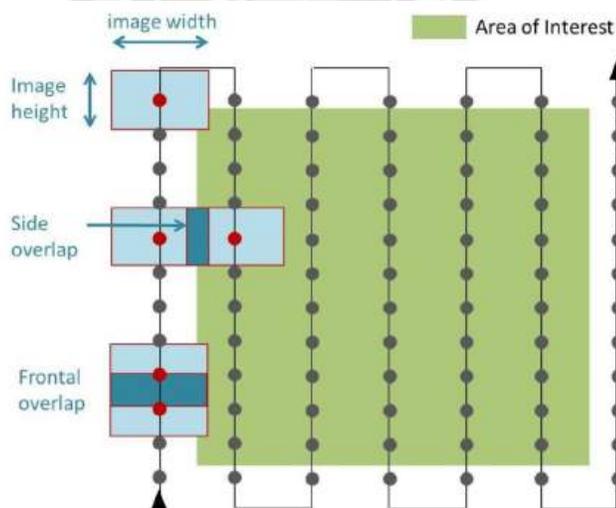


Figura 6. Traslape y líneas de vuelo unidireccional.

Fuente: Imagen extraída de la página web, Aerial Insights (s.f.)

5. **Puntos de apoyo y control terrestre:** la distribución y medición de los puntos de apoyo y control terrestre es un paso esencial en el proceso de levantamiento aerofotogramétrico. Una vez seleccionados los puntos, se deben medir con precisión utilizando un receptor GNSS-RTK, tal como se ilustra en la Figura 25. Es importante registrar

la información de cada punto, como sus coordenadas y altitudes, para lograr una georeferenciación precisa y confiable de los datos obtenidos durante el vuelo del dron.

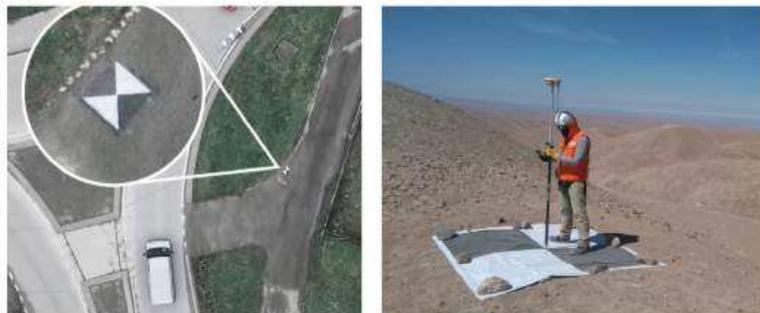


Figura 7. Vista de puntos de control de apoyo y control tierra terrestre.
Fuente: Imágenes extraídas de las webs de Linelcon S.A.C. y S.I.I.M.

6. **Planificación y ejecución del vuelo:** Existen diversas aplicaciones móviles disponibles para esta tarea, y la elección depende de los objetivos del proyecto y la marca del dron. Al planificar un vuelo, se deben tener en cuenta elementos como el número de líneas de vuelo, la altura y velocidad de la aeronave, y el traslape entre imágenes. Aunque las aplicaciones móviles ofrecen flexibilidad, es importante comprender los fundamentos fotogramétricos para obtener resultados de calidad.

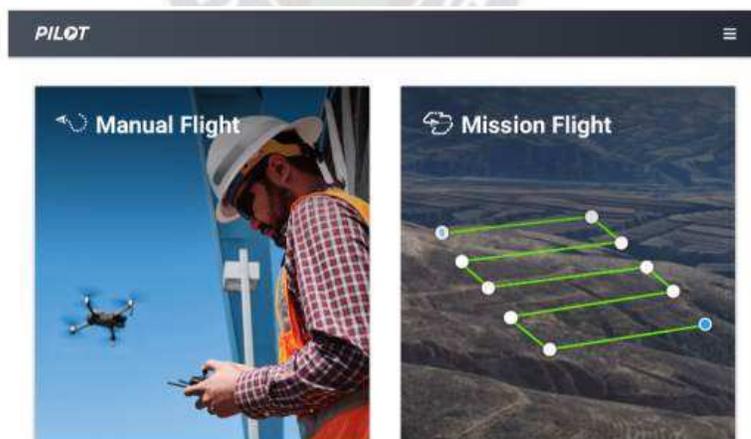


Figura 8. Aplicación DJI Pilot, utilizado en la planificación y ejecución de vuelos.
Fuente: Captura de la aplicación DJI Pilot.

Tal como se muestra en la Figura 8, la aplicación DJI Pilot está diseñada para planificar vuelos, controlar la cámara a bordo y recopilar datos en tiempo real, facilitando su uso en aplicaciones comerciales e ingenieriles.

3.3.3 Procesamiento de información aerofotogramétrica.

El procesamiento de información aerofotogramétrica involucra el uso de diversos softwares especializados para realizar el análisis y la manipulación de las imágenes capturadas por drones. Estos softwares incluyen herramientas como Agisoft Metashape, Pix4D y Context Capture, entre otros. Estas aplicaciones permiten realizar tareas como la calibración de las imágenes, la generación de modelos digitales de elevación y la ortorrectificación de las imágenes para corregir distorsiones geométricas. Además, proporcionan funciones para la extracción de información topográfica y la clasificación de la cobertura terrestre. Estos softwares son importantes para obtener resultados precisos y de alta calidad en el procesamiento de datos aerofotogramétricos, facilitando la obtención de productos para su aplicación en diversos campos de la ingeniería.

3.3.4 Procesamiento imágenes con Pix4M mapper

Pix4D mapper es un software de fotogrametría especializado que se utiliza para procesar imágenes o fotografías en modelos 3D y ortomosaicos 2D georreferenciados. Este software es capaz de procesar conjuntos de imágenes tomadas desde diferentes perspectivas, ya sea desde tierra o desde el aire, dependiendo de las necesidades del proyecto en particular. Con Pix4D mapper, es posible realizar el procesamiento y análisis de fotografías adquiridas de diversas formas.

Según Ojeda Bustamante et al. (2016), el equipo utilizado en el procesamiento de las imágenes aéreas es crucial y requiere una capacidad de cómputo adecuada. Durante el proceso fotogramétrico, el software lleva a cabo una serie de procesos internos esenciales, mismos que se detallan a continuación:

1. **La rectificación simple**, donde se pretende corregir el efecto de la inclinación de la fotografía al obtenerla y así producir una imagen a escala constante (pero aún desconocida) si el terreno u objeto fotografiado es relativamente plano.
2. **Orientación interna**, donde se recupera la geometría de cada una de las tomas fotogramétricas, utilizando las marcas fiduciales.
3. **Orientación relativa**, donde se crean modelos estereoscópicos y se encuentran las coordenadas de dichos modelos utilizando por lo general 6 puntos homólogos que se encuentren en el área de recubrimiento estereoscópico.
4. **Aerotriangulación**, consiste en la determinación de puntos en el terreno mediante

métodos fotogramétricos. La principal aplicación consiste en la determinación de los canevas de restitución, es decir, conseguir el suficiente número de puntos de apoyo para poder orientar absolutamente todos los pares estereoscópicos que intervengan en un proyecto cartográfico.

5. **Orientación absoluta**, en esta parte se da escala y se nivela el modelo estereoscópico a partir de una serie de puntos de posición conocida. Es necesario disponer de una red de puntos de partida que no es determinada obligatoriamente sobre el terreno, sino también por triangulación aérea u otro método, para poder comparar las mediciones “modelo” con los de la “realidad”.
6. **Restitución**, se obtienen detalles cartográficos de planimetría y altimetría para generar nuevos mapas o actualizar los existentes.

Los productos fotogramétricos entregados por el software Pix4D mapper son los siguientes:

1. **Modelos Digitales de Superficie (MDS)**: Estos modelos representan la superficie del terreno en forma de un modelo tridimensional, proporcionando información detallada sobre las elevaciones y características topográficas, tal como se ilustra en la Figura .

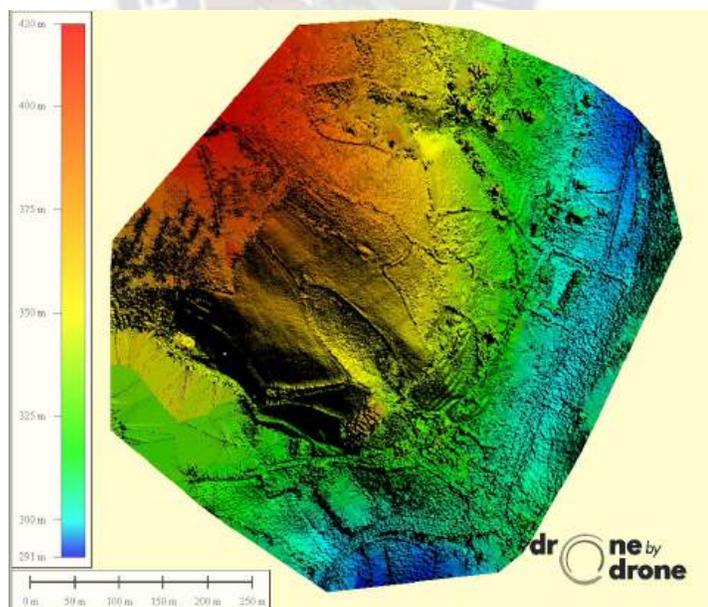


Figura 9. Modelo digital de superficie
Fuente: Imagen extraída de la página web, Drone by drone (s.f.).

2. **Ortofoto u ortomosaico georreferenciadas**: Las ortofotos u ortomosaico son imágenes corregidas geométricamente para eliminar distorsiones y proporcionar una repre-

sentación precisa del terreno.



Figura 10. Ortofoto u ortomosaico georreferenciado
Fuente: Imagen extraída de la página web de Pix4D Mapper.

3. **Nubes de puntos densa:** La nube de puntos densa, es una representación tridimensional detallada y precisa de la superficie escaneada. Consiste en millones de puntos que capturan minuciosamente la topografía, geometría y los detalles del entorno, obtenidos a través del procesamiento de imágenes desde diferentes ángulos.



Figura 11. Nube de puntos densa
Fuente: Imagen extraída de la página web de Pix4D Mapper.

3.3.5 Proyección geográfica o cartográfica.

La proyección cartográfica, también conocida como proyección geográfica, es un método gráfico que establece una correspondencia sistemática entre los puntos en la superficie curva de la Tierra y los puntos en una superficie plana, es decir, un mapa. Esta correspondencia se logra mediante la utilización de una malla compuesta por meridianos y paralelos. Es importante destacar que, para evitar distorsiones en esta proyección, sería necesario recurrir a la representación en un mapa esférico.

Elección de la proyección geográfica

Esta proyección UTM, posiblemente la más reconocida de todas, lleva el nombre de su creador, quien la introdujo en 1569. Se trata de una proyección cilíndrica que preserva la precisión en la región ecuatorial, evitando distorsiones en esa área. Un rasgo distintivo de esta proyección es que las líneas con una dirección constante se representan como segmentos rectos. En nuestro país, nos encontramos dentro de tres zonas UTM 19, 20 y 21, tal como se muestra en la Figura 12, y sus parámetros oficiales son:

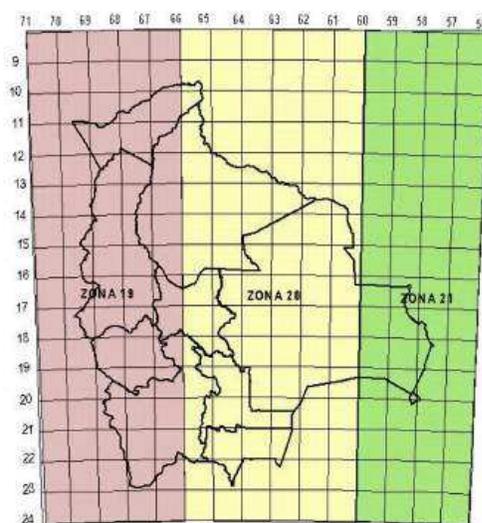


Figura 12. Zonas UTM en Bolivia

Fuente: Imagen extraída del trabajo realizado por INFOBOL (2015).

3.3.6 Network Transportation of RTCM via Internet Protocol (NTRIP)

Tal como menciona Briceño et al. (2009), NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) es un protocolo esencial en el ámbito geoespacial para transmitir datos de corrección en tiempo real desde estaciones de referencia GNSS, también conocidas como estaciones CORS (Continuously Operating Reference Stations). Estas estaciones permanentes, equipadas con receptores GNSS de alta precisión, recopilan datos de diferentes constelaciones de satelitales constantemente para determinar coordenadas precisas. Mediante NTRIP, las correcciones diferenciales de posición calculadas se envían vía internet a receptores GNSS en campo, mejorando notablemente la precisión de la ubicación en aplicaciones como la topografía precisa, en la Figura 13 se ilustra la secuencia que sigue este protocolo de corrección diferenciales.

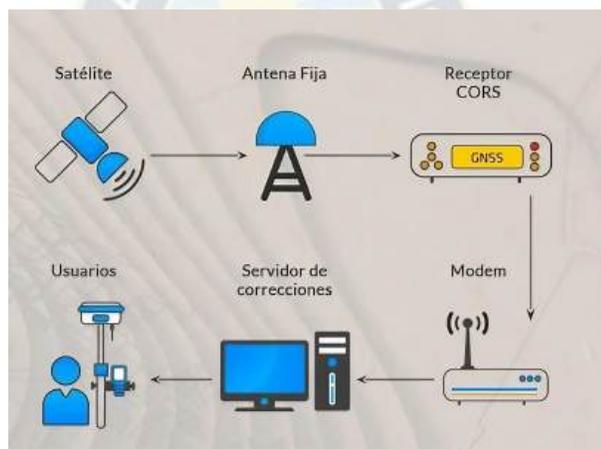


Figura 13. Zonas UTM en Bolivia

Fuente: Imagen extraída de la página web, DTM Topografía.

3.4 Hidrometría

Según Marbello Perez (2005) es la parte aplicada de la Hidrodinámica que trata de los métodos de medición de la velocidad, el caudal y las fuerzas de los líquidos en movimiento. La hidrometría comprende también las mediciones de niveles de agua, concentración y transporte de sedimentos, y los levantamientos alimétricos de los perfiles longitudinal y transversal del cauce de las corrientes naturales.

3.4.1 Estación hidrométrica.

Según Mendoza Rodriguez (s.f.), se llaman estaciones hidrométricas, a las estaciones en las cuales se practican sistemáticamente observaciones para conocer el régimen de una corriente,

obteniéndose registros continuos de variación en el nivel de las aguas y medición de caudales de flujo.

- **Caudal o gasto:** El caudal es el volumen de agua que fluye por una sección de un cauce en un lapso de tiempo. En una estación hidrométrica, se selecciona una sección de control para medirlo. Esta sección captura la velocidad promedio del flujo y el área del cauce. El caudal se calcula multiplicando estos valores. Se expresa comúnmente en metros cúbicos por segundo (m^3/s) o litros por segundo (l/s).
- **Medición de niveles:** La determinación de los niveles en mediciones de alturas de agua se relaciona estrechamente con el proceso de medición. En estaciones hidrométricas, se miden las alturas de agua en ríos mediante limnímetros. Estas mediciones, expresadas en metros y centímetros, deben referirse a un nivel cero, el cual es el nivel mínimo del agua en una sección o el nivel sin escurrimiento. Este punto de referencia es esencial para la comparación y gestión del agua. Un limnómetro es un instrumento específico utilizado para medir los niveles de agua en cuerpos de agua, como ríos y lagos, proporcionando datos precisos para el monitoreo y análisis hidrológico .
- **Hidrograma:** Es la representación del caudal en función del tiempo, expresando las variaciones temporales de los caudales o los aportes de un río en una sección determinada.

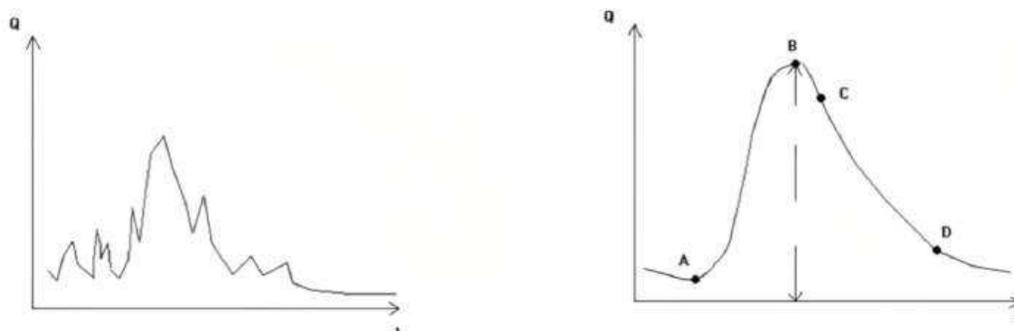


Figura 14. Variación del caudal en el tiempo
Fuente: Imagen del Manual de hidrometría básica (s.f.).

La Figura 14 muestra dos gráficos, la izquierda muestra la variación del caudal en relación al tiempo en una determinada sección del río, el gráfico de la derecha muestra las partes de las que se compone un hidrograma durante un evento. Este hidrograma de evento cuenta con cuatro puntos característicos A: Inicio del escurrimiento directo. B: Momento del caudal pico o máximo. C: Cese del escurrimiento laminar. D: Cese

del escurrimiento directo. En base a ello se definen los tiempos: Tiempo al pico entre A y B, tiempo base del hidrograma entre A y D, tiempo de vaciado del escurrimiento directo entre C y D.

Se distinguen los siguientes tipos de estaciones hidrométricas:

1. **Estaciones de primer orden:** Las estaciones de primer orden recopilan una variedad completa de datos, incluyendo mediciones precisas del nivel de agua, aforos de velocidad utilizando molinetes y muestreo de sedimentos suspendidos. Estos datos integrales permiten una comprensión completa de la dinámica del flujo de agua y son esenciales para una gestión efectiva de los recursos hídricos.
2. **Estaciones de segundo orden:** Las estaciones de segundo orden se centran en aforos a flotador y lecturas diarias de limnómetros para medir la velocidad del flujo y rastrear las fluctuaciones del nivel del agua. Aunque menos detalladas que las de primer orden, estas estaciones proporcionan información valiosa para comprender patrones de flujo y cambios en el nivel del agua.
3. **Estaciones de tercer orden:** Las estaciones de tercer orden realizan lecturas de limnómetros para medir el nivel del agua (Figura 15). Aunque la información es básica en comparación con otros tipos, estas lecturas son útiles para observar tendencias generales en el nivel del agua a lo largo del tiempo.



Figura 15. Estación hidrométrica automática y regla limnométrica
Fuente: Fotografía extraída de la página web de la Corporación Autónoma regional de Boyacá (2018).

3.4.2 Curvas de descarga o gasto H-Q.

Según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (2019), la curva de descarga, también conocida como curva altura-caudal, desempeña un papel central en la hidrometría. Esta

curva establece la relación entre los niveles de agua y los caudales medidos correspondientes en una sección transversal de un río o canal. A partir de esta relación, es posible determinar de manera precisa el caudal que fluye en un momento específico. La curva de descarga se construye mediante la calibración con registros de aforos, lo que garantiza la calidad y confiabilidad de los datos de caudales. Su forma es influenciada por diversos procesos físicos que afectan la sección de aforo, como la erosión y sedimentación en los lechos de los ríos. Para mantener su validez y precisión, es esencial realizar mediciones regulares de caudales y mantener actualizados los registros de aforos.

En la Figura 16 se muestran las diversas formas que pueden adoptar las curvas de descarga. En la curva 1, se observa una curva para una sección constante, mientras que en la curva 2 se interpreta que la sección transversal ha experimentado erosión. En el caso de la curva 3, la sección transversal parece haber experimentado sedimentación

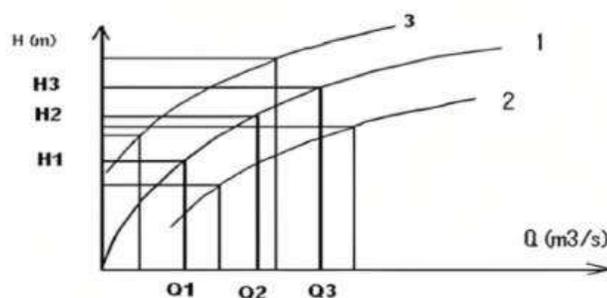


Figura 16. Formas de la curva de descarga.

Fuente: Imagen extraída del texto de Hidrología básica y aplicada (Gutiérrez, 2014)

3.4.3 Elaboración de la curva de descarga.

Según lo indicado por Gutierrez C. (2014), antes de iniciar con la elaboración de la curva de descarga, es necesario analizar los datos iniciales. Los caudales medidos con métodos detallados como el uso de molinete, caudalímetro o ADCP son considerados los más confiables en términos de precisión y exactitud en la medición de caudales. En contraste, los caudales medidos utilizando flotadores tienden a tener una menor confiabilidad debido a posibles interferencias en la medición.

El proceso de elaboración de la curva de descarga, también conocida como curva de calibración, desempeña un papel fundamental al establecer la relación entre la altura del agua H y el caudal Q en el rango de caudales o alturas que han sido aforados. Esta curva se construye en situaciones donde el río muestra un flujo constante, generalmente en condiciones de caudales medios o bajos. Es importante mencionar que la extrapolación de la curva de descarga

implica extender esta relación a rangos de caudales que no han sido directamente medidos (como caudales de crecientes), pero que podrían ocurrir dentro de la estación hidrométrica bajo análisis y sección de control o aforo.

Uno de los métodos analíticos más ampliamente utilizados y que ha demostrado tener resultados consistentes en diversas investigaciones es el siguiente:

El método logarítmico, se basa en experiencia demostrada de que la curva de descarga queda representada por una parábola de orden superior, cuya expresión es la ecuación (3.9):

$$Q = C(H - h_o)^b \quad (3.9)$$

Donde:

Q : es el caudal, en $m^3 s^{-1}$.

H : es la lectura o altura del nivel agua en la regla limnimétrica, en m.

h_o : es el nivel cuando los caudales son nulos, en m.

C, b : son constantes adimensional de la ecuación.

El valor de h_o representa la altura de la regla limnimétrica para un caudal nulo; este valor puede ser positivo o negativo, según la posición de la regla con respecto al fondo de la sección de aforo, tal como se ilustra en la Figura 23. Es por ello la importancia de una sección de control estable y así evitar las variaciones; en el caso que no sea así, se podrá determinar un valor medio.

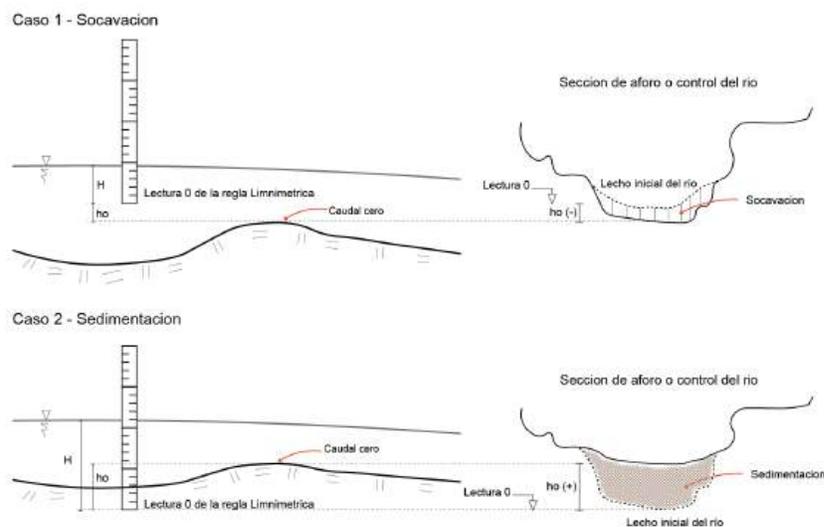


Figura 17. Representación del nivel h_o según la ubicación del nivel cero de la regla limnimétrica.
Fuente: Elaborado a partir del Manual de hidrometría (2019)

El método consiste en asumir un valor de h_o luego se plotea la diferencia ($H - h_o$) en una gráfica logarítmica doble con el caudal correspondiente al valor del nivel de agua H . Si el resultado es una curva, se deberá seguir tanteando con el valor h_o hasta obtener una línea casi recta, tal como se ilustra en la Figura 18 .

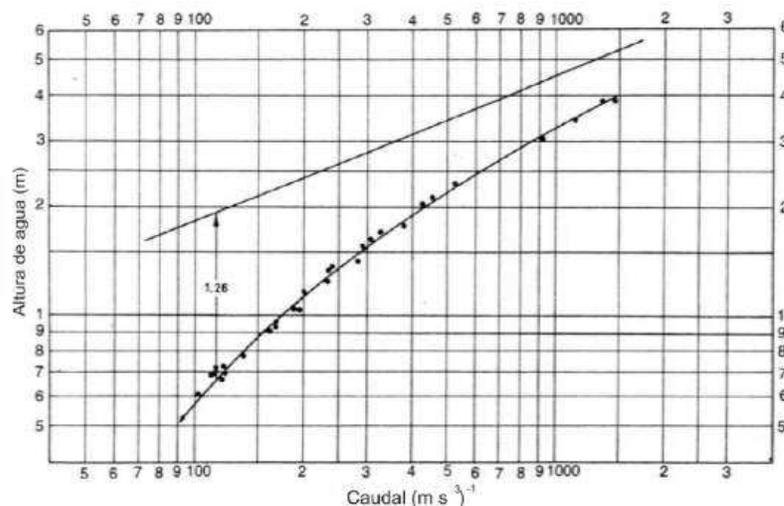


Figura 18. Representación del nivel h_o según la ubicación del nivel cero de la regla limnimétrica.

Fuente: Manual de hidrometría (2019)

3.4.4 Extrapolación de la curva de descarga.

La extrapolación de las curvas de calibración es necesaria debido a que el rango de niveles sobre el cual se ha realizado la medición no abarca la gama completa de niveles observados. La curva de calibración puede quedar incompleta tanto en el extremo inferior como en el superior. Los flujos extremos son a menudo los más relevantes para el diseño y la planificación, y es crucial realizar las estimaciones más precisas posibles.

La calibración en flujos instantáneos extremadamente altos es particularmente complicada, ya que ocurren con poca frecuencia y de corta duración. Pueden ocurrir durante la noche. La medición de flujos máximos requiere que el equipo de medición esté en el lugar cuando llegue la crecida, lo cual puede no ser posible. Además, es necesario contar con instalaciones seguras para medir durante las inundaciones. En la práctica, el sitio de medición puede ser inaccesible, las instalaciones de medición pueden estar fuera de servicio y el río puede haber inundado un llano inaccesible al haber dejado su canal confinado (*How to extrapolate rating curve*, 1999).

Uno de los métodos que ha demostrado tener buenos resultados en muchas investigaciones, para la extrapolación de la parte de alta de la curva de descarga o calibración, es el siguiente:

El método Manning, según *How to extrapolate rating curve* (1999) este método se basa en la ecuación de Manning, que se puede escribir en términos de la velocidad media, tal como se muestra a continuación con las ecuaciones (5.3), (5.4) y (5.5):

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

$$k = \frac{1}{n} S^{\frac{1}{2}} \quad (3.11)$$

$$v = k R^{\frac{2}{3}} \quad (3.12)$$

Utilizando los datos de aforo disponibles, se determinan los valores de factor k que se ajustan a la curva representada en la figura 19, permitiendo así una extrapolación hacia niveles elevados del nivel de agua. El valor de k extrapolado posibilita el cálculo de la velocidad media en condiciones de alto caudal fluvial, considerando el área de la sección transversal. Con esta velocidad y el área correspondiente, se estima el caudal mediante la multiplicación de ambos factores. Este caudal estimado se convierte en un punto adicional (Q,H) que contribuye a la extrapolar la curva de gasto. La relación entre el nivel del agua h y el factor k se grafica a partir de las mediciones de caudal, siendo notable la tendencia de esta curva a converger hacia un valor constante de k en niveles más elevados de agua en el río.

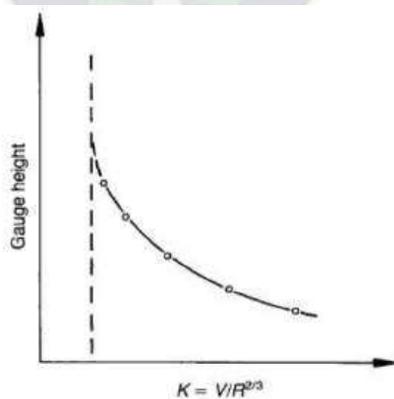


Figura 19. Grafica k versus h (altura de medición).

Fuente: Imagen obtenida de *Hydrology Project Training Module* (1999)

El USGS recomienda que la aplicación de este método es confiable para extrapolar caudales que no superan 2 veces el caudal máximo aforado. Un enfoque que ha demostrado su eficacia en numerosas investigaciones es el Método Manning.

3.5 Obras de protección en ríos.

Las obras de protección en ríos son estructuras diseñadas para resguardar las áreas ribereñas de los efectos negativos de las crecidas y la erosión. Estas incluyen técnicas como la construcción de diques, muros de contención, enrocados y plantaciones de vegetación. Su propósito es reducir los riesgos de inundación y la pérdida de tierras agrícolas y urbanas, así como preservar la estabilidad de las márgenes fluviales. Estas obras son de gran importancia en la gestión de recursos hídricos y la prevención de daños en las zonas vulnerables a inundaciones.

3.5.1 Muros de gavión longitudinal.

Los gaviones son estructuras de protección utilizadas en ingeniería hidráulica y geotécnica para controlar la erosión y estabilizar taludes y márgenes de ríos. Consisten en cestas o cajas de malla metálica rellenas de piedras u otros materiales granulares. Los gaviones ofrecen una solución efectiva y económica para prevenir la erosión del suelo y reducir el riesgo de inundaciones al restringir el flujo de agua y permitir su filtración gradual. Además, su flexibilidad y durabilidad los convierten en una opción versátil para proyectos de ingeniería civil.

Esta medida estructural de protección esta paralela a la dirección del cauce, conformado de bloques de mallas de gavión rellenas con piedra de buena calidad, bloques que se constituyen de forma escalonada para el buen funcionamiento por gravedad (Figura 20), un conjunto de estas medidas se ubica en el curso principal y afluentes en las microcuencas, que trabajan de carácter integral.



Figura 20. Muro gavión en ríos

Fuente: Fotografía extraída de la página web de Gabion Transilvania (s.f.).

3.5.2 Diseño estructural de muro de gaviones.

De acuerdo con la investigación de Luza Huilca y Santos Romero (2016), para el diseño de gaviones se deben considerar los siguientes aspectos:

- La anchura se reduce en 0.5 m en cada hilada superior.
- La hilada de la coronación deberá tener como mínimo 1 m de ancho.
- Se recomienda dejar un escalón de mínimo 0.15 m en el paramento exterior para poder utilizar encofrados en la fase de montaje.

La Figura 21 ilustra la manera en que se distribuye el muro de gaviones de acuerdo con su altura, también conocida como la configuración del muro gavión.

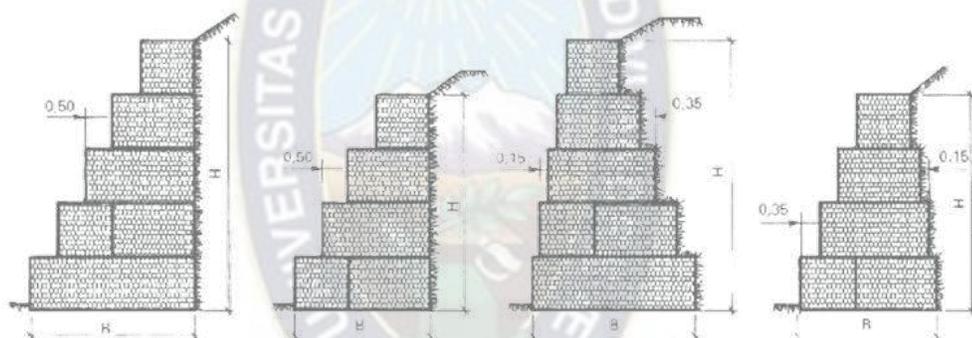


Figura 21. Configuración del muro de gaviones
Fuente: Imagen obtenida del informe técnico A6711, INGEMMET (2016)

Para determinar la base mínima del muro, está dada por la siguiente ecuación 3.13.

$$B = \frac{1}{2}(1 + H) \quad (3.13)$$

Donde

B : Base mínima del muro, en m.

H : Altura total del muro de gavión, en m.

En el diseño de gaviones, la estabilidad en términos de vuelco y deslizamiento. Para verificar la estabilidad al vuelco, se calcula la relación entre la suma de los momentos resistentes y los momentos al vuelco, esta relación debe ser igual o mayor a 1.5. En el caso de la verificación al deslizamiento, se considera el producto del coeficiente de fricción entre el suelo – estructura

(f), y la relación con la suma de las fuerzas verticales y horizontales, y esta relación debe ser igual a 1.5.

$$K_v = \frac{\sum M_r}{\sum M_v} \geq 1.5 \quad (3.14)$$

$$K_d = f \frac{\sum F_v}{\sum F_h} \geq 1.5 \quad (3.15)$$

También se debe realizar la verificación de las tensiones admisibles del suelo para que no se produzca hundimiento de la medida estructural, así mismo se debe verificar la excentricidad de las fuerzas aplicadas en el muro gavión.

3.5.3 Socavación en estructuras.

Según el texto de Control de la Erosión de Suárez Díaz (2001), define la socavación como la profundización del fondo del cauce de una corriente debido a causas como el aumento del nivel de agua en avenidas, cambios en la morfología del cauce o la construcción de estructuras. La socavación implica el levantamiento y transporte de materiales del lecho del río, especialmente durante avenidas o por construcciones dentro del cauce. Se distingue de la erosión no recuperable, ya que, tras cesar las causas, los sedimentos pueden depositarse nuevamente en un ciclo que permite la recuperación del fondo del cauce. Está controlada por características hidráulicas y propiedades de los sedimentos.

3.5.4 Socavación general

La socavación general tiene como resultado una disminución en el nivel del fondo del cauce y los niveles de agua y por otro lado puede producir exposiciones de las fundaciones, oleoductos y otras estructuras colocadas en el cauce del río (Suárez Díaz, 2001).

Este método empírico usado para la calcular la erosión general de un cauce en suelos cohesivos y suelos no cohesivos. Se requiere el caudal de diseño para un periodo de retorno dado, la sección transversal y características del material de fondo (Figura 22). Es solo aplicable a flujo subcrítico ($Fr < 1$).

La socavación se produce en cualquier parte del conducto, resultado de la fricción entre partículas líquidas y sólidas. Para cuantificar la socavación general, se recomienda el Método de Lischtvan-Lebediev, que determina, en primera instancia, las condiciones de equilibrio entre la velocidad media de la corriente y la velocidad media requerida para erosionar o trans-

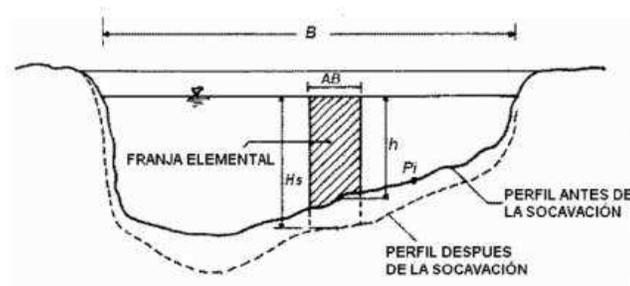


Figura 22. Socavacion general en una seccion transversal.

Fuente: Extraído de la investigación realizada por Juárez Badillo E. y Rico Rodríguez A. (1992)

portar un material de diámetro o densidad conocidos y estan dadas por las ecuaciones (3.16) y (3.17) (Rodríguez & Pérez, 2018).

$$h_s = \left(\frac{\alpha \cdot h_m^{5/3}}{0.6 \cdot \beta \cdot \gamma_s^{1.18}} \right)^{\frac{1}{x+1}} \quad (3.16)$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{\mu B_e h_m^{5/3}} \quad (3.17)$$

Donde:

h_m : es el tirante medio, en m

Q_d : es el caudal de diseño, en $m^3 s^{-1}$

B_e : es el ancho efectivo, en m

μ : es el coeficiente de contracción

β : es el coeficiente dependiente del periodo de retorno

γ_s : es el peso específico de los sedimentos cohesivos

x : es el coeficiente adimensional que depende del tipo de material

h_s : es la altura de socavacion, en m.

A continuación, se presenta las Tablas 6, 7 y 8 de valores de los coeficientes μ , x y β respectivamente.

Velocidad Media (cm/s)	Longitud libre entre estructuras (m)											
	10	13	16	18	21	25	30	42	52	63	200	
Menor de 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00	0.96	0.97	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
1.50	0.94	0.96	0.97	0.97	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00
2.00	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	1.00
2.50	0.90	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	1.00	1.00
3.00	0.89	0.91	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	1.00	1.00
3.50	0.87	0.90	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00
4.0 ó mayor	0.85	0.89	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.97	0.97	0.98	0.99	0.99

Tabla 6. Valores de coeficiente de contracción μ
 Fuente: Extraído de la investigación realizada por Maza (1967).

Suelos Cohesivos						Suelos No Cohesivos					
γ_s	x	$\frac{1}{1+x}$	γ_s	x	$\frac{1}{1+x}$	d (mm)	x	$\frac{1}{1+x}$	d (mm)	x	$\frac{1}{1+x}$
0.80	0.52	0.66	1.20	0.39	0.72	0.05	0.45	0.70	40	0.30	0.77
0.83	0.51	0.66	1.24	0.38	0.72	0.15	0.42	0.70	60	0.29	0.78
0.86	0.50	0.67	1.28	0.37	0.73	0.50	0.41	0.71	90	0.28	0.78
0.88	0.49	0.67	1.34	0.36	0.74	1.00	0.40	0.71	140	0.27	0.79
0.90	0.48	0.67	1.40	0.35	0.74	1.50	0.39	0.72	190	0.26	0.79
0.93	0.47	0.68	1.46	0.34	0.74	2.50	0.38	0.72	250	0.25	0.79
0.96	0.46	0.68	1.52	0.33	0.75	4.00	0.37	0.73	310	0.24	0.80
0.98	0.45	0.69	1.58	0.32	0.76	6.00	0.36	0.74	370	0.23	0.81
1.00	0.44	0.69	1.64	0.31	0.76	8.00	0.35	0.74	450	0.22	0.83
1.04	0.43	0.70	1.71	0.30	0.77	10.00	0.34	0.75	570	0.21	0.83
1.08	0.42	0.70	1.80	0.29	0.78	15.00	0.33	0.75	750	0.20	0.83
1.12	0.41	0.71	1.89	0.28	0.78	20.00	0.32	0.76	1000	0.19	0.84
1.16	0.40	0.71	2.00	0.27	0.79	25.00	0.31	0.76			

Tabla 7. Valores de x
 Fuente: Extraído de la investigación realizada por Maza (1967).

Prob. Ocurrencia p (%)	Período de retorno T_r (años)	Coficiente β
100	1	0.77
50	2	0.82
20	5	0.86
10	10	0.90
5	20	0.94
2	50	0.97
1	100	1.00
0.3	333	1.03
0.2	500	1.05
0.1	1000	1.07

Tabla 8. Valores del coeficiente β
 Fuente: Extraído de la investigación realizada por Maza (1967).

CAPÍTULO 4: LEVANTAMIENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO Y BATIMÉTRICO.

En la actualidad, se han producido notables mejoras en las herramientas utilizadas en los levantamientos y procesos aerofotogramétricos. Estos procedimientos combinan fotografías aéreas con puntos de control terrestre y validación, lo que facilita la generación precisa y detallada de un Modelo Digital del Terreno (MDT) y un ortomosaico georreferenciado. Estos productos son necesarios al generar una geometría para la modelación hidráulica y la digitalización de elementos importantes del terreno.

4.1 Elección de las proyecciones cartográficas y datum.

Para este proyecto, se optó por utilizar el sistema geodésico de coordenadas geográficas WGS84 junto con la proyección UTM, lo que proporciona un marco de referencia geoespacial. Es importante señalar que las alturas medidas por el equipo GNSS y la altura de cada fotografía tomada por el dron se refieren al elipsoide y no al nivel medio del mar (Figura 24). Para abordar esta diferencia, se eligió emplear el modelo geoidal EGM2008, que permite calcular altitudes ortométricas que son más apropiadas para aplicaciones de ingeniería.

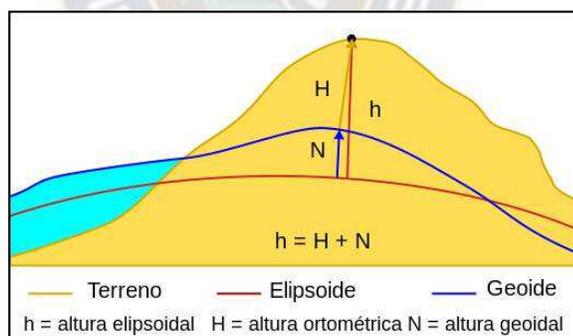


Figura 23. Representación las alturas de referencia.
Fuente: Extraído de la página web Geodesia y Topografía (s.f.).

Para determinar la altura ortométricas, se utiliza la siguiente ecuación 4.1.

$$H = h - N \quad (4.1)$$

Donde

H : es la altura ortométrica en m.s.n.m.

h : es la altura elipsoidal en m.s.n.m.

N : es la altura del geoide en m.

4.2 Planificación y altura de vuelo aerofotogramétrico.

En esta etapa, se toma en cuenta factores como la accesibilidad al área de estudio, la topografía del terreno y las rutas de vuelo planificadas. En base a estos factores, se determinan la altura de vuelo, la velocidad del UAV, los traslapes entre imágenes y los intervalos de tiempo para la toma de fotografías con la cámara, todo aquello adaptado a las especificaciones del drone y de la cámara RGB utilizada.

Como se presenta en la Figura 2 del capítulo anterior, el área de estudio comprende una longitud de 2 Km aguas arriba desde el puente Pataraya, con franjas de 100 m a cada lado del margen del Río Seco. Esta información geoespacial se agregó a la aplicación DJI Pilot en formato KML. Para la planificación de las misiones de vuelo, se emplea el modo de misión de vuelo lineal disponible en la aplicación, el cual permite una planificación y ejecución de trayectorias de vuelo rectilíneas.

Debido a la pendiente baja de la topografía del área de estudio y la ausencia de obstáculos físicos como árboles, edificaciones o redes de distribución de energía eléctrica, se estableció una altura de vuelo de 75 m, resultando en una resolución espacial de GSD (Ground Sampling Distance) igual 2.05 cm/pixel. Este valor está en función de la altura de vuelo y la distancia focal de la cámara del vehículo aéreo no tripulado. Siguiendo la Tabla 5, se estableció un traslape longitudinal y transversal del 75 % para el proceso de captura de fotografías. Todos estos parámetros de vuelo fueron introducidos y configurados en la aplicación mencionada, tal como se muestra en la Tabla 9.

Descripción	Parámetro
H: Altura de vuelo	75 metros
GSD: Resolución espacial	2.05 cm/pixel
Traslape o superposición	Longitudinal: 75 % Transversal: 75 %

Tabla 9. Descripción de parámetros

4.3 Esquema de trabajo.

Una vez definido los parámetros vuelo según el requerimiento del proyecto para la obtención de los productos aerofotogramétricos precisos, se propuso un esquema de trabajo que incluye dos etapas: una de trabajo de campo y otra de procesamiento en gabinete tal como se muestra en la Figura 28.

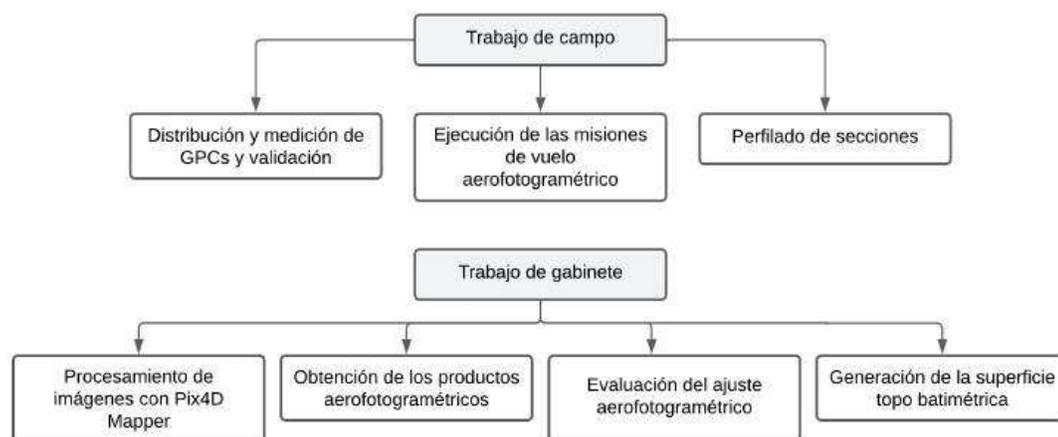


Figura 24. Esquema de trabajo

4.4 Distribución y medición de los puntos de control terrestre y validación.

La distribución de los puntos de control (GPCs) y los puntos de validación terrestre es un paso importante en el proceso de levantamiento aerofotogramétrico para obtener un MDT preciso, detallado y confiable. Estos puntos se distribuyeron a lo largo del eje principal del Río Seco en el tramo de estudio, lo que resultó en un total de 12 puntos de control y 8 puntos de validación, como se representa en la Figura 25.

La distribución y colocación de los puntos de control y validación deben realizarse antes de ejecutar el vuelo, ya que estos puntos deben mostrarse en las imágenes o fotografías capturadas por el vehículo aéreo no tripulado. Los puntos de control se añadirán en una de las fases del procesamiento de las imágenes, para ajustar el Modelo Digital de Elevación (MDE) y otros productos aerofotogramétricos. Por otro lado, los puntos de validación no se utilizarán en el procesamiento; su propósito es determinar la precisión de los productos resultantes, siendo el MDE el más importante en este proyecto.

Se utilizaron dianas como marcadores para los puntos de control terrestres (GPCs), que se identificaron mediante una combinación de colores en blanco y negro. Los puntos de validación, por otro lado, se distinguen mediante dianas con colores rojo y blanco (Fotografía 6). Todas estas dianas tienen dimensiones estándar de 1.0 m x 1.0 m. Además, se implementó una codificación específica, utilizando “PC” para los puntos de control y “PV” para los puntos de validación terrestre.

La medición de los puntos de control terrestre y puntos de validación se realizó utilizando un receptor GNSS-RTK específicamente un equipo Leica, modelo Zeno 20.

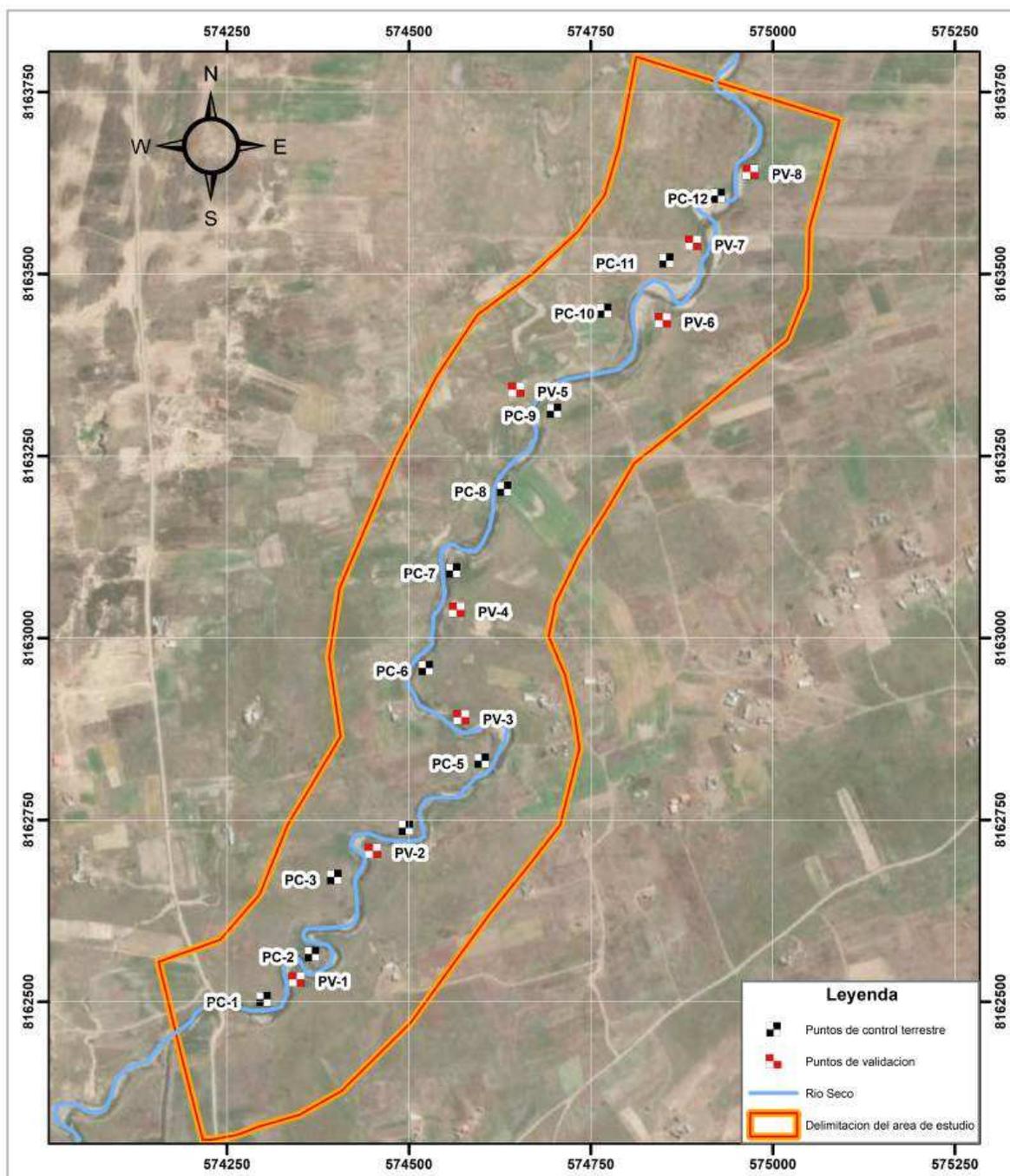


Figura 25. Mapa de ubicación de los puntos de control y validación terrestre

El equipo se configuró para recibir correcciones diferenciales a través del protocolo NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol), las cuales se transmiten vía Internet desde una estación CORS (Continuous Operating Reference Station). Para este propósito, se dio uso del servicio proporcionado por la empresa GeoBolivia SRL, que opera con su red denominada como RED-GEO 1.



Fotografía 6. Dianas de marcadores de los puntos de control y validación

Según la empresa GeoBolivia SRL, la estación GEO-1 La Paz, se encuentra empotrada en un pilar de concreto de 0.30 m de diámetro, dotado de un centrado forzoso, ubicado en la terraza de una vivienda en la zona de Achumani-Huayllani, Avenida Kellumani 2170. Misma que esta enlazada a la RED MARGEN – SIRGAS mediante las estaciones permanentes del Instituto Geográfico Militar BZLP (La Paz), URUS (Oruro) y CBMB (Cochabamba). En la Tabla 10 se detalla la ubicación de la estación CORS.

Coordenadas Geodésicas			
Latitud:	-16°30'28.44684"	Sigma:	0.002
Longitud:	-68°02'59.62355"	Sigma:	0.002
Altura Elipsoidal	3690.5279	Sigma:	0.004
Coordenadas Geodésicas			
X:	2287809.0608	Sigma:	0.004
Y:	-5676754.1434	Sigma:	0.003
Z:	-1801735.0918	Sigma:	0.004
Coordenadas UTM			
Norte:	8174643.1104	Zona UTM	19
Este:	601396.0918		

Tabla 10. Coordenadas oficiales de la estación CORS GEO1-LA PAZ

Las mediciones se realizaron en el punto central de cada diana, tal como se observa en la Fotografía 7, tanto para los puntos de control, como para los puntos de validación terrestre. Los datos obtenidos se registraron en el sistema de referencia WGS84 y proyección UTM.

Los datos obtenidos de las mediciones realizadas en campo se presentan en la Tabla 11.



Fotografía 7. Medición de las coordenadas de los GCPs y validación

Cod	Este	Norte	Altura Elipsoidal (h)	Altura Geoidal (N)	Altura Ortométrica (H)
PC-1	574300.425	8162503.941	3943.307	45.965	3897.342
PC-2	574366.745	8162565.832	3943.664	45.965	3897.699
PC-3	574397.450	8162671.685	3943.983	45.964	3898.019
PC-4	574495.875	8162739.154	3944.280	45.962	3898.318
PC-5	574600.044	8162831.376	3943.715	45.960	3897.755
PC-6	574523.216	8162959.669	3945.083	45.958	3899.125
PC-7	574560.994	8163092.690	3945.517	45.957	3899.560
PC-8	574630.769	8163209.134	3945.457	45.953	3899.504
PC-9	574699.039	8163312.244	3945.983	45.954	3900.029
PC-10	574768.115	8163449.806	3945.093	45.954	3899.140
PC-11	574853.432	8163511.865	3946.682	45.943	3900.739
PC-12	574924.087	8163607.490	3946.113	45.949	3900.164
PV-1	574345.785	8162531.115	3945.429	45.947	3899.482
PV-2	574450.901	8162707.551	3944.235	45.948	3898.290
PV-3	574572.110	8162891.205	3945.464	45.945	3899.519
PV-4	574565.499	8163038.798	3945.393	45.945	3899.448
PV-5	574647.337	8163413.102	3945.795	45.940	3899.855
PV-6	574682.641	8163456.527	3946.602	45.937	3900.669
PV-7	574890.394	8163452.857	3947.023	45.936	3901.086
PV-8	574968.944	8163640.223	3947.175	45.934	3901.241

Tabla 11. Medición de las coordenadas de los puntos de control terrestre

4.5 Ejecución de las misiones vuelo aerofotogramétrico.

Para este propósito se utilizó un dron multirrotor modelo “Phantom 4 Pro”, equipo fabricado por la empresa DJI, debido a las características del estudio este equipo es suficiente para abarcar el mismo de manera óptima, lo que permitió alcanzar una precisión del levantamiento precisión Previo a la ejecución de las misiones vuelo, se procedió a realizar la calibración completa del dron Phantom 4 Pro, que incluyó la calibración de la IMU, el giroscopio y el compás.

La actividad fue realizada el 18 de junio de 2023. Esta fecha fue seleccionada debido al régimen hidrológico del Río Seco, el cual corresponde a una época seca o estiaje. Esta condición resultó favorable, ya que durante este período no se presenta mucha vegetación en el área de estudio.

Para llevar a cabo las misiones de vuelo en el tramo de estudio, se dividió el área en 5 segmentos, como se ilustra en la Figura 26. Esta división se basó en la disponibilidad de las baterías inteligentes necesarias para la captura de fotografías o imágenes con el vehículo aéreo no tripulado. Cada segmento se cubrió utilizando una batería individual, lo que permitió una gestión eficiente de los recursos y una optimización del proceso. Tanto la planificación como la ejecución de las misiones de vuelo se realizaron a través de la aplicación DJI Pilot en un dispositivo móvil con sistema operativo Android.



Figura 26. Trayectoria del plan de vuelo ejecutado por segmento

En el desarrollo de la ejecución del vuelo aerofotogramétrico, se mantuvieron condiciones climáticas favorables. La velocidad del viento se mantuvo constantemente por debajo de los 25 Kilómetros por hora, lo que aseguró una estabilidad del dron durante toda la ejecución

del vuelo (Fotografía 8).



Fotografía 8. Levantamiento aerofotogramétrico del área de estudio

Además, cabe mencionar que no se registró la presencia de nubosidad en el cielo, lo que garantizó una buena visibilidad y condiciones ideales para la captura de fotografías o imágenes y datos en toda el área de estudio. Estas condiciones climáticas favorables contribuyeron a la ejecución del levantamiento aerofotogramétrico planificado (Figura 27). Durante la ejecución del vuelo, el dron mantuvo la ruta planificada para uno de los segmentos ya definidos previamente y se sostuvo comunicación a través del control remoto sin interrupciones. Las fotografías capturadas en este proceso se almacenaron en una memoria microSD.



Figura 27. Ejecución de la misión de vuelo del segmento 4 y toma área del tramo de estudio

El resumen de la ejecución de las misiones de vuelo aerofotogramétrico, se presenta en la Tabla 12.

Fecha	Equipo utilizado y cámara	Área Cubierta	Nº de imágenes	Nº de puntos de control	Nº de puntos de validación	Tiempo total de vuelo
18/06/23	Phantom 4 Pro FC6310.8.8 4864x3648 (RGB)	38.59 Has	1205	12	8	87 min

Tabla 12. Resumen de la ejecución del vuelo

4.6 Perfilado de secciones (batimetría).

Es importante explicar que el levantamiento aerofotogramétrico, captura la información del terreno visible, pero no puede proporcionar información sobre el lecho del río que se encuentra por debajo de la superficie de agua (espejo de agua). Por esta razón, es necesario realizar un levantamiento batimétrico, que implica medir la profundidad del agua en varios puntos sobre el lecho del río.

Para el levantamiento batimétrico, se utilizó la técnica de perfilado de secciones transversales, la cual consiste en la recolección de información primaria del lecho del río. A partir de esta técnica es posible generar una superficie batimétrica que complementa la superficie topográfica obtenida mediante aerofotogrametría, generando así una representación integral del área de estudio, que incluye tanto la llanura de inundación como el cauce del río. Esta superficie es importante para la implementación modelo hidrodinámico, ya que facilitará analizar el comportamiento del flujo y la identificación de zonas propensas a inundaciones.

Para esta actividad, se dio inicio el 16 de junio y se finalizó el 18 de junio de 2023, haciendo uso del equipo GNSS de la marca Leica, modelo Zeno 20, con configuración RTK-NRTIP. Se tomó en cuenta una distancia entre secciones de perfilaje de 5 a 10 metros en tramos con curvas o sinuosos, y de 20 metros en tramos rectos.

Debido al régimen hidrológico del río Seco durante estas fechas en que se llevó a cabo el perfilaje batimétrico, se registró un tirante de agua promedio de 15 a 20 cm y un espejo de agua promedio del río que variaba entre 2 y 10 metros (Fotografía 9). Para tener una representatividad de las condiciones geométricas del río en cada sección, se consideró la medición de 7 puntos en cada de estas. Los datos recopilados incluyeron coordenadas este, norte y elevación de referencia.



Fotografía 9. Vista del río y prefijale batimétrico

Se realizaron un total de 202 secciones de perfilaje, lo que resultó en una nube de puntos que registró 1414 puntos de medición. Estos datos fueron necesarios para la generación de una superficie topo batimétrica, permitiendo así la construcción de un modelo digital de terreno del área de estudio.

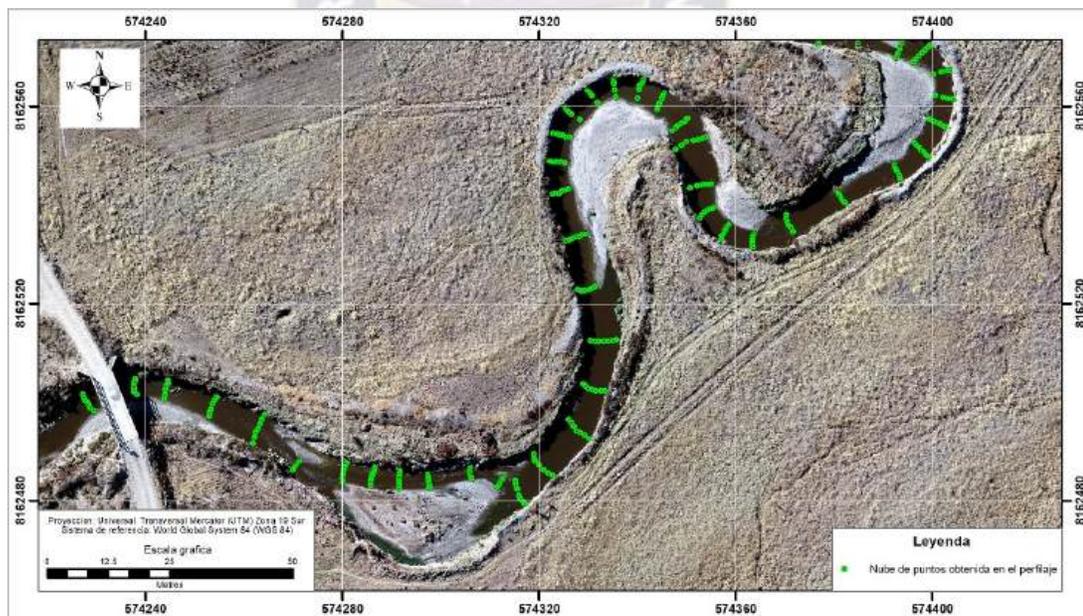


Figura 28. Muestra de la nube de puntos obtenida del perfilaje batimétrico

4.7 Procesamiento de imágenes con Pix4D Mapper.

Para el procesamiento de información recopilada del levantamiento con el vehículo aéreo no tripulado, se utilizó el software Pix4D Mapper con licencia (Figura 29), lo que permitió usar

Después de la introducción de los puntos de control en el software, se procede a realizar un segundo procesamiento inicial, esta vez incorporando la información de los puntos de control. Este paso adicional de procesamiento permite al software ajustar y corregir las imágenes de manera más precisa, mejorando la calidad y la precisión de los productos resultantes.

Generación de nube de puntos y malla: Se generan una nube de puntos tridimensionales y una malla tridimensional. Estas representan de forma detallada la topografía del terreno, así como estructuras adicionales (Figura 31).



Figura 31. Nube de puntos densa

Creación del modelo digital de superficie y ortomosaico: En esta etapa se generan dos productos importantes: el Modelo Digital del Superficie (MDS), que representa la topografía del área del proyecto y el ortomosaico u ortofoto, esta es una imagen georreferenciadas y ortorrectificadas, adecuadas para la aplicación en el área de la cartográfica.

Después de finalizar las tres etapas del procesamiento fotogramétrico, el software entrega tres productos. Estos productos incluyen una nube de puntos densa, que representa un conjunto tridimensional de puntos de interés en el área; ortomosaico georreferenciado (Figura 32), que es una imagen ortorrectificada que se ajusta al sistema de coordenadas ya establecido previamente; y un modelo digital de superficie, que describe con precisión la topografía del área de estudio definido.

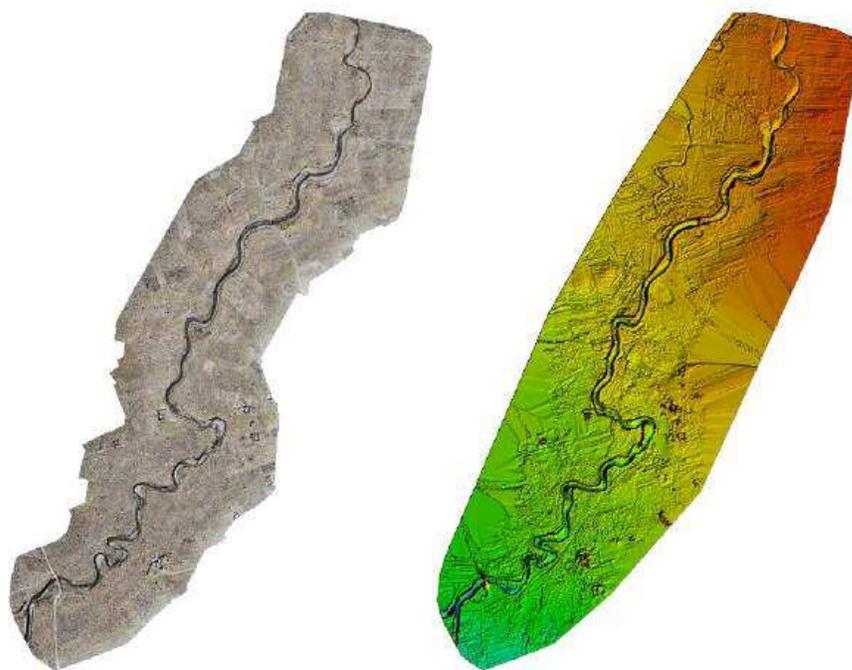


Figura 32. Ortomasico y Modelo Digital de Superficie (DSM)

4.8 Evaluación del ajuste aerofotogramétrico.

La evaluación del ajuste aerofotogramétrico en el área de estudio se llevó a cabo mediante la comparación de las altitudes de los puntos de validación terrestre distribuidos y medidos en campo con las altitudes observadas dadas por el modelo digital de elevación entregado. Los resultados de esta evaluación se detallan en la Tabla 13. Los valores de error absoluto varían desde un mínimo de 1.06 centímetros hasta un máximo de 4.60 centímetros.

Cod	Este	Norte	Altura Medida	Altura MDE	Error abs. cm
PV-1	574345.785	8162531.115	3897.469	3897.514	4.50
PV-2	574450.901	8162707.551	3898.290	3898.310	2.02
PV-3	574572.110	8162891.205	3898.977	3898.959	1.76
PV-4	574565.499	8163038.798	3899.131	3899.089	4.22
PV-5	574647.337	8163341.202	3899.855	3899.809	4.60
PV-6	574848.621	8163436.527	3900.669	3900.685	1.58
PV-7	574890.394	8163542.857	3901.087	3901.121	3.40
PV-8	574968.944	8163640.223	3901.241	3901.252	1.06

Tabla 13. Evaluación del ajuste aerofotogramétrico

El análisis gráfico de las altitudes medidas y observadas muestra una línea de tendencia ima-

ginaria que se ajusta a un ángulo de 45 grados (Figura 33), lo que indica una buena correlación cercana la unidad ($R^2 = 1$).

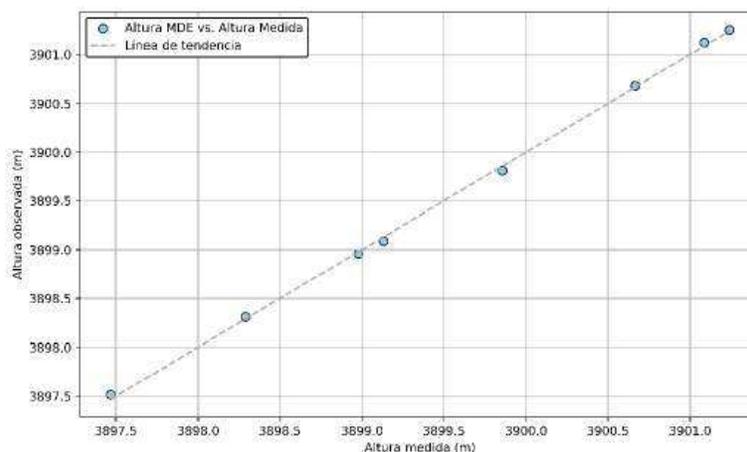


Figura 33. Comparación de alturas medidas y observadas

4.9 Procesamiento de imágenes sin puntos de control.

A continuación, se describe el procesamiento de fotografías utilizando la herramienta **iTwin Capture Modeler** de Bentley. Esta herramienta, al igual que otras disponibles en el mercado, emplea algoritmos avanzados para el procesamiento y la restitución fotogramétrica, permitiendo la generación de productos fotogramétricos, tales como modelos tridimensionales, nubes de puntos densas y modelos digitales del terreno (MDT), a partir de fotografías capturadas por drones.

Para el procesamiento de las fotografías, se utilizó una licencia estudiantil de iTwin Capture Modeler de Bentley. Esta licencia permitió acceder a las funcionalidades del software.

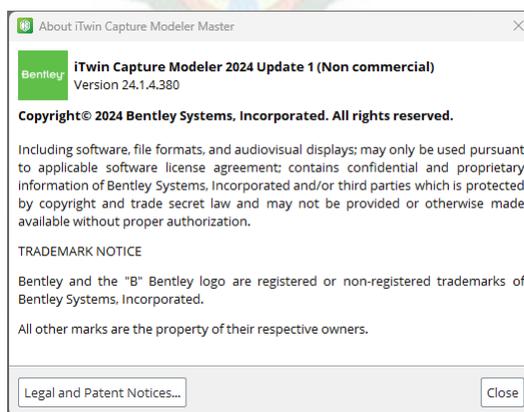


Figura 34. Licencia estudiantil iTwin Capture modeler

El proceso se inició con la importación de las 1205 fotografías capturadas a iTwin Capture, donde el software alineó automáticamente las fotografías mediante la identificación de puntos de coincidencia. Aunque en este procesamiento no se utilizaron puntos de control terrestre (GCPs), el programa generó un modelo 3D basado en los metadatos de cada fotografía capturada con el dron, calculando las coordenadas espaciales. Para optimizar el rendimiento del software, se utilizó la técnica de tiling que se tiene dentro del software, que consiste en dividir el área de estudio en secciones más pequeñas y manejables, denominadas "tiles". Este enfoque no solo facilitó el procesamiento fotogramétrico, sino que también permitió una mejor gestión de los recursos computacionales, al procesar cada tile de manera independiente.



Figura 35. Captura del modelo tridimensional generado del área de estudio

Una vez completado el procesamiento, se generaron los siguientes productos fotogramétricos: modelo tridimensional, nube de puntos densa, ortofoto y modelo digital de superficie (MDS).

4.10 Comparación de procesamientos con y sin puntos de control

Para esta comparación, se utilizaron las mismas fotografías en ambos casos, lo que permitió evaluar cómo la presencia o ausencia de puntos de control afecta la calidad y precisión final de los productos aerofotogramétricos. Las fotografías obtenidas por el dron fueron procesadas de dos maneras: una con puntos de control y otra sin ellos. El procesamiento con puntos de control se llevó a cabo utilizando el software Pix4D Mapper, lo que permitió cargar los datos de las mediciones de los puntos de control en el programa. Por otro lado, el procesamiento sin puntos de control terrestre se realizó con iTwin Capture, lo que resultó en un tiempo de procesamiento más corto de las fotografías.

Se emplearon las coordenadas medidas de los puntos de validación para evaluar la precisión de los resultados obtenidos mediante dos maneras de procesamiento. Al comparar las mediciones obtenidas en ambos casos, se detalla en la Tabla 14, se analizó el efecto de los puntos de control en la precisión final de los productos generados.

Punto validación	Medición		con GCPs		sin GCPs	
	Este	Norte	Este	Norte	Este	Norte
PV-1	574345.785	8162531.115	574345.8016	8162531.146	574347.168	8162534.184
PV-2	574450.901	8162707.551	574450.8979	8162707.591	574451.602	8162709.414
PV-3	574572.11	8162891.205	574572.0543	8162891.222	574572.028	8162891.855
PV-4	574565.499	8163038.798	574565.4186	8163038.794	574565.387	8163038.498
PV-5	574647.337	8163341.202	574647.3391	8163341.24	574646.608	8163339.063
PV-6	574848.621	8163436.527	574848.6128	8163436.512	574846.327	8163433.856
PV-7	574890.394	8163542.857	574890.3625	8163542.838	574887.895	8163539.523
PV-8	574968.944	8163640.223	574968.9373	8163640.177	574965.851	8163636.309

Tabla 14. Errores de validación en coordenadas Este y Norte con y sin GCPs.

La Tabla 15 muestra los errores calculados para cada punto de validación al comparar las mediciones obtenidas con el procesamiento que incluyó puntos de control terrestre (GCPs) y aquellas que no los consideraron. Al analizar los errores en las coordenadas Este y Norte, se observa que los errores asociados con el procesamiento utilizando GCPs son significativamente menores, alcanzando solo algunos centímetros. En comparación, los errores calculados sin estos puntos de control llegan a ser de varios metros

Punto validación	con GCPs		sin GCPs	
	Error Este	Error Norte	Error Este	Error Norte
PV-1	-0.017	-0.031	-1.383	-3.069
PV-2	0.003	-0.040	-0.701	-1.863
PV-3	0.056	-0.017	0.082	-0.650
PV-4	0.080	0.004	0.112	0.300
PV-5	-0.002	-0.038	0.729	2.139
PV-6	0.008	0.015	2.094	2.671
PV-7	0.029	0.019	2.499	3.334
PV-8	0.007	0.046	3.093	3.914

Tabla 15. Errores de validación con y sin GCPs.

Por lo tanto, se observa que la precisión de los levantamientos fotogramétricos depende de la inclusión de puntos de control, lo que garantiza a una mayor confiabilidad y calidad en los productos generados.

4.11 Generación de la superficie topo batimétrica.

Para la generación de la superficie topo batimétrica se seguirá la siguiente secuencia de pasos, tal como se detalla en la Figura 36.



Figura 36. Secuencia de pasos

Inicialmente, la nube de puntos densa generada por Pix4D Mapper se exportó al software ReCap, donde se llevó a cabo la clasificación de la nube de puntos. Esto fue necesario debido a que Pix4D Mapper no realizó una clasificación adecuada de elementos como construcciones y vegetación. Luego, la información se exportó al software Civil 3D, donde se creó una superficie TIN (Triangular Irregular Network) y se incorporaron los datos obtenidos del perfilaje batimétrico realizado en campo. Este proceso permitió integrar los datos topográficos y batimétricos para generar una superficie topo batimétrica. Finalmente, se exportó el Modelo Digital de Terreno (MDT) con una resolución de 5 cm.

En la Figura 37 se presenta un segmento del río, junto con su sección transversal, que representa la continuidad entre ambas superficies generadas.

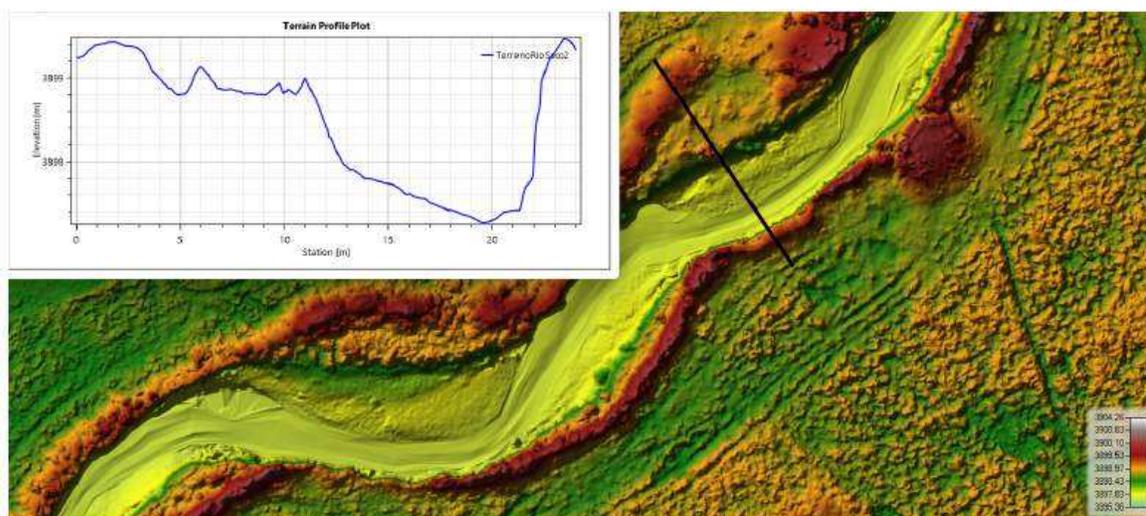


Figura 37. Unión de las superficies generadas



CAPÍTULO 5: TRATAMIENTO Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA.

5.1 Información hidrométrica recolectada.

La Unidad de Gestión de la Cuenca Katari (UGCK), dependiente del Ministerio del Medio Ambiente y Agua (MMAyA), en el marco de la implementación del Plan Director de la Cuenca Katari y Lago Menor del Titicaca (PDCKyLMT), ha establecido una red hidrológica para el monitoreo de varios ríos, incluyendo el Seco, Seque, Pallina, Katari, Sehuenca, Desaguadero, Tiahuanaco y Batallas. Para este proyecto en particular, se utilizará la información recolectada y almacenada por la estación instalada en el Río Seco, que tiene el código de identificación Viacha KH-05. La información hidrométrica recolectada fue proporcionada en formato digital (archivos en formato .dat y planillas Excel), tanto de niveles de agua y de medición de aforos realizados, esta información comprende al periodo 2019-2023.

Según el informe SNMH/REDES/INF-006/2022 (SENAMHI, 2022), la estación hidrométrica automática se encuentra debajo del puente vehicular Pataraya del camino a Laja (Incerpaz) hasta Viacha, misma que cuenta con una estructura metálica que actúa como protección para la gaveta donde se encuentra el datalogger y transmisor, así también de soporte para el sensor radar de nivel y los paneles solares. La estación consta de: un datalogger CR300 Wifi de la marca CAMPBELL, con un transmisor SIERRA, batería, sensor de radar de nivel, paneles solares y antena omnidireccional. La información complementaria se describe en la Tabla 16.

Coordenada Este	Coordenada Norte	Río	Administrador	Código	Marca	Datalogger	Estado	Registro de disponibles
574094.7	8162494.5	Seco	UGCK	KH-05	Campbell Scientific	CR300 WiFi	Funcional	2019-2023

Tabla 16. Ubicación geográfica y registros disponibles de la estación automática

Así también la estación automática cuenta con reglas limnimétricas que están instaladas debajo del puente vehicular, tal como se muestra en la Fotografía 10, misma que es utilizada para registrar las variaciones del nivel de agua al momento de realizar el aforo de caudal del río. El monitoreo de aguas superficiales es realizado por personal técnico de la UGCK.



Fotografía 10. Estación hidrométrica y regla limnimétrica

Los elementos de medición de la estación hidrométrica están establecidos a un datum vertical de referencia en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Esto significa que tanto el sensor de nivel de agua como el nivel cero de la regla limnimétrica están referidos a este datum, como se detalla en la Tabla 17.

Cero de la regla limnimétrica	Sensor de nivel de agua
Cota ortométrica: 3895.937 m.s.n.m.	Cota ortométrica: 3899.406 m.s.n.m.

Tabla 17. Datum de referencia vertical de la estación hidrométrica

5.2 Análisis de la información hidrométrica.

El Río Seco es un río perenne, lo que significa que mantiene un flujo continuo a lo largo del año hidrológico. Durante la época de lluvias, se observa un incremento significativo en los niveles registrados por la estación, provocado por las precipitaciones que generan una mayor escorrentía superficial. Por otro lado, durante la época de estiaje, el río sigue presentando caudal debido a los aportes de aguas residuales domésticas e industriales provenientes del área urbana de la ciudad de El Alto, así como las aguas tratadas por la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Puchukollo, tal como se demuestra en la Figura 38.

Para identificar posibles errores en el registro, se analizó la concordancia de los niveles registrados por la estación en el momento de las lecturas realizadas con la regla limnimétrica. Dado que se encontró consistencia en las mediciones, se descarta la posibilidad de una descalibración del sensor de nivel. En la Figura 38 se presenta la serie de tiempo de los niveles de flujo registrados en la estación automática KH-05. Se observa que los registros son continuos, sin interrupciones durante el período analizado. Asimismo, los niveles varían entre 3895.795 y 3897.015.

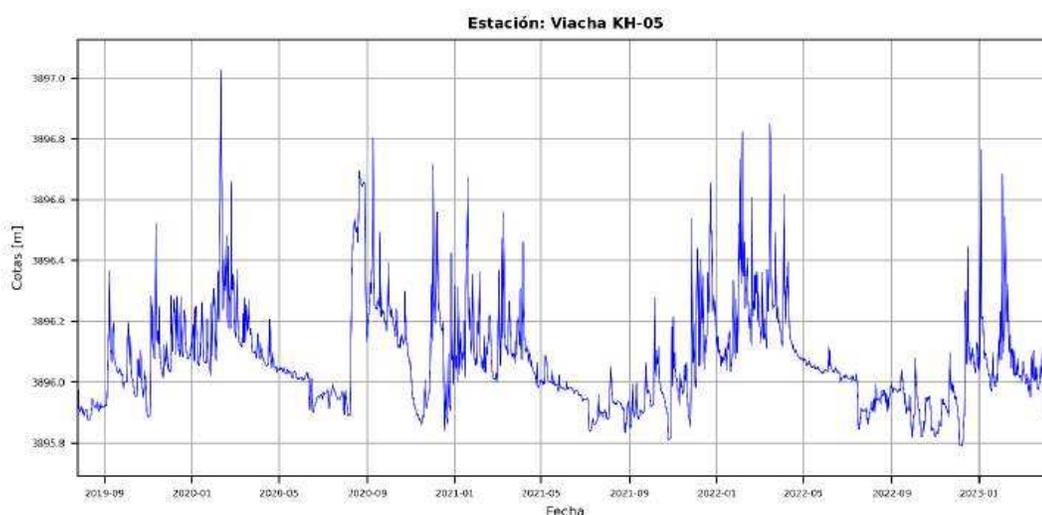


Figura 38. Serie de tiempo de niveles de agua registros (2019-2023)

Con base en los datos proporcionados que fueron recopilados por la Unidad de Gestión de la Cuenca Katari (UGCK), tal como se detalla en la Tabla 18, se puede observar que solo se dispone de un único dato de aforo de caudal para niveles altos. Esta falta de información representa una limitación significativa generar una curva de descarga confiable.

Nº	Fecha [dd/mm/aa]	Lectura de la regla H [m]	Caudal Q [m³/s]	Hora de la lectura de la regla	Método de aforo
1	17/12/2019	0.13	0.608	08:20	Área velocidad
2	30/01/2020	0.28	1.972	10:30	ADCP
3	30/01/2020	1.21	16.286	10:00	ADCP
4	27/02/2020	0.25	1.563	09:35	ADCP
5	11/03/2020	0.30	2.126	12:30	ADCP
6	17/09/2020	0.32	2.342	11:10	ADCP
7	11/11/2020	0.09	0.312	09:50	Área velocidad
8	07/12/2020	0.35	2.435	08:45	ADCP
9	09/04/2021	0.36	3.254	11:15	ADCP
10	03/12/2021	0.22	1.125	09:20	ADCP
11	12/05/2022	0.13	0.420	12:35	Vadeo
12	21/07/2022	0.05	0.194	15:10	Área velocidad
13	05/08/2022	0.04	0.436	14:45	Área velocidad
14	21/12/2022	0.15	1.350	10:50	Área velocidad

Tabla 18. Lectura de niveles de agua y aforos de caudales recolectados

5.3 Análisis de la curva de descarga y elaboración de hidrogramas.

La elaboración de las curvas de descarga es uno de los pasos más importantes y a la vez complicado de todo el análisis. Importante debido a que las series de caudales producidos dependen totalmente de la calidad de esas curvas y se complica porque frecuentemente no se tienen bastantes aforos para poder definir estas curvas de manera consistente ((Quisbert Morillas et al., 2021)).

A continuación, se describe la metodología a seguir para el análisis de esta información y la elaboración de los hidrogramas.

- a) **Realización de campañas de monitoreo:** Se llevarán a cabo mediciones de niveles de agua y medición de caudales en la sección de aforo, estación hidrométrica Viacha (KH-05).
- b) **Construcción de la curva de descarga H vs Q:** Utilizando la serie de datos disponibles de lecturas de niveles y caudales, se procederá a elaborar la curva de descarga para la estación Viacha KH-05. Este proceso implica ajustar los datos de caudales medidos mediante una función característica.
- c) **Extrapolación de la curva de descarga:** Utilizando el método de Manning se realizará la extrapolación de los caudales correspondientes a niveles de agua que no han sido medidos o registrados durante las actividades de campo. Con base en esta combinación de datos medidos y datos teóricos extrapolados, se procederá a elaborar la curva de descarga.
- d) **Selección de eventos de crecidas:** Se procederá a la identificación y selección de tres eventos específicos registrados en la estación Viacha KH-05. Dichos eventos deben ser crecidas o eventos hidrológicos relevantes.
- e) **Elaboración de hidrogramas:** Utilizando los niveles de agua registrados por la estación Viacha KH-05, con intervalos de mediciones de 15 minutos y la curva de descarga elaborada en el paso anterior, se calcularán los caudales instantáneos correspondientes para los tres eventos seleccionados. Estos caudales se utilizarán para conformar los hidrogramas, que representan la variación temporal del caudal durante cada evento de crecida. Estos hidrogramas obtenidos serán de gran utilidad en el proceso de modelación hidrodinámica.

5.3.1 Realización campañas de monitoreo.

La actividad de monitoreo se realizó con el propósito de obtener información hidrométrica a través de campañas de medición de caudales y niveles de agua, en la sección de control o también llamada sección aforo de la estación Viacha KH-05. En colaboración con el personal técnico de la Unidad de Gestión de la Cuenca Katari, se llevaron a cabo mediciones utilizando un equipo especializado, mismo que se describe a continuación.

El proceso de medición con el equipo ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) inicia con la calibración, seguida de la configuración del equipo y su conexión a una computadora portátil mediante el software “WinRiver II”. A continuación de esto, se ubica el equipo en un margen del río y, mediante una cuerda sujetada por dos técnicos, se desplaza el equipo lentamente a lo largo de cada margen de la sección de aforo de control. Mientras tanto, una persona realiza el seguimiento en tiempo real de las mediciones de las propiedades hidráulicas, como la velocidad y propiedades geométricas como el área de la sección del río.

Las mediciones se realizaron en la sección de control establecida por el personal técnico de la Unidad de Gestión de la Cuenca Katari, como se ilustra en la Fotografía 11, esta sección se ubica aproximadamente a 20 metros aguas abajo del Puente Pataraya. Además, las lecturas de la regla limnimétrica se la realizo antes y después de las mediciones con el equipo ADCP. Durante el procedimiento de medición, la variación de los caudales y lectura del nivel del flujo fue mínima.



Fotografía 11. Medición del caudal con ADCP en la sección de aforo

A continuación, la Tabla 19 muestra un resumen de los resultados de las mediciones de niveles de agua y caudales.

N°	Fecha [dd/mm/aa]	Lectura de la regla H [m]	Caudal Q [m³/s]	Hora de la lectura de la regla	Campaña
1	07/05/2023	0.10	1.045	11:40	Nro 1
2	09/05/2023	0.08	0.815	16:15	Nro 2

Tabla 19. Resumen de niveles y caudales de las campañas de monitoreo

5.3.2 Construcción de la curva de descarga.

Se dispone de un total de 16 datos de mediciones de niveles de agua y caudales en la sección de control, lo cual proporciona una base para el análisis y la elaboración de la curva de descarga. Sin embargo, la disponibilidad limitada de datos puede afectar la confiabilidad y precisión de la curva. A continuación, se presenta la Figura 39 que incluye todos los datos disponibles.

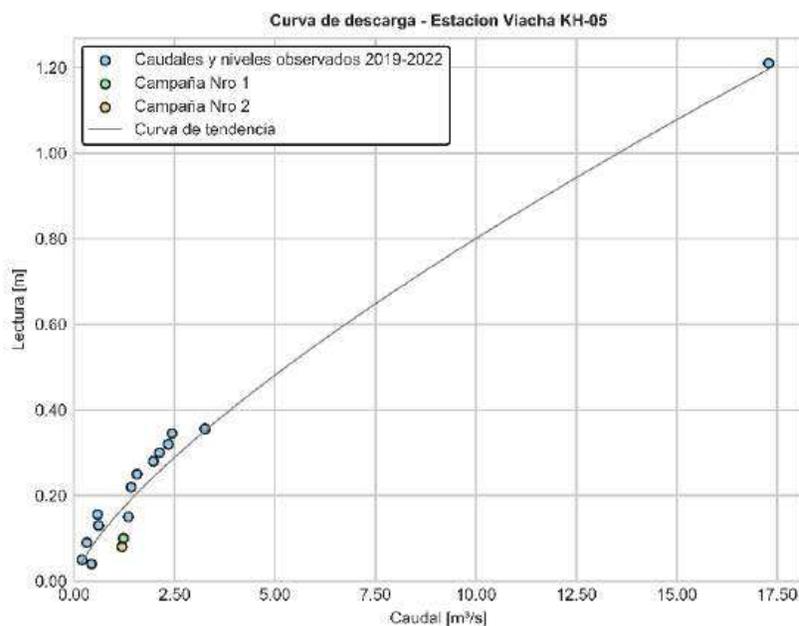


Figura 39. Curva de descarga

El proceso de elaboración de la curva de descarga, también conocida como curva de calibración, se representará utilizando una ecuación de parábola de orden superior, esta función tiene buenos resultados para la descripción de las curvas de descarga en cauces naturales, cuya expresión se describió anteriormente y está dada por la ecuación 5.1.

$$Q = C(H - h)^b \quad (5.1)$$

Este método implica suponer un valor para h_o y luego trazar la diferencia $(H - h_o)$ en una gráfica doble logarítmica con el caudal correspondiente al valor de H . Si el resultado muestra una curva, se ajusta el valor de h_o iterativamente hasta encontrar un valor óptimo que resulte en una línea que se asemeje a una recta. Este proceso de prueba y error se repite hasta lograr el mejor ajuste posible de la curva de calibración (Figura 40). Posteriormente, para evaluar el grado de ajuste de la curva de calibración se utilizaron herramientas estadísticas como el error medio cuadrático (RMSE) y el coeficiente de correlación (R).

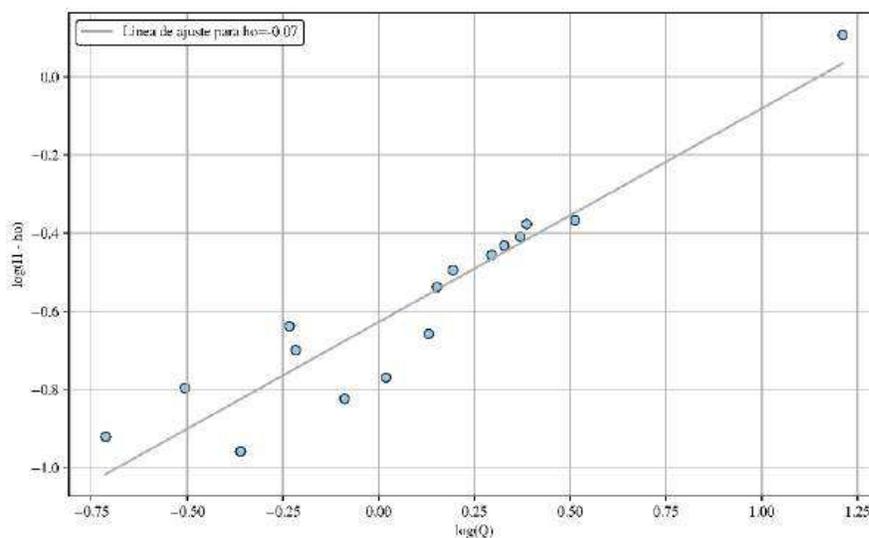


Figura 40. Ajuste logarítmico de los datos.

Evaluando diferentes valores de h_o dentro de un rango que varía entre -0.05 a -0.20, se determinó que el valor óptimo que se ajusta de forma adecuada a la ecuación de orden superior es el valor de $h_o = -0.07$ m, en la Tabla 20 se detallan los valores obtenidos del procedimiento.

Nº	h_o	C	b	R ²	RMSE
1	-0.05	10.607	1.5086	0.8879	0.40933
2	-0.07	10.817	1.6293	0.8896	0.26467
3	-0.10	10.851	1.7967	0.8894	0.42883
4	-0.15	10.399	2.0516	0.8857	0.86129
5	-0.20	9.5768	2.2866	0.8804	1.21796

Tabla 20. Resultados de la regresión y error

En la Figura 41 se muestra un gráfico junto con su correspondiente ecuación de ajuste de orden superior. Es evidente que los datos se ajustan de manera satisfactoria a esta curva de orden superior. Además, se proporciona la ecuación (5.2) correspondiente al ajuste de los datos.

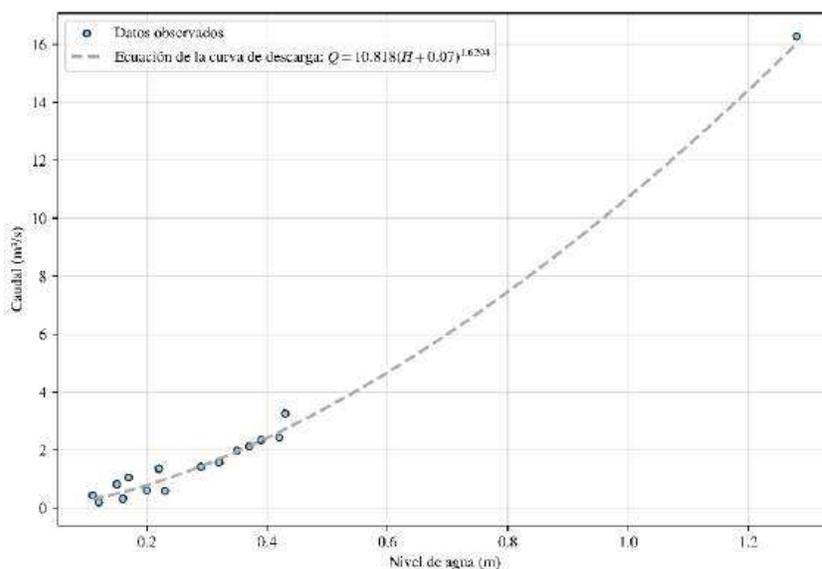


Figura 41. Curva de calibración ajustada

$$Q = 10.818(H + 0.07)^{1.6294} \quad (5.2)$$

5.3.3 Extrapolación de la curva de descarga

La información REG indica que en la estación Viacha KH-05 se registró un nivel máximo de 3897.687, lo que equivale aproximadamente a 1.75 metros en la regla limnimétrica. Con base en estos datos, se procederá a realizar la extrapolación de la curva de descarga. Este proceso permitirá extender la curva de calibración más allá de los caudales medidos, lo que resulta útil para estimar el flujo en situaciones en las que el nivel del agua supera los registros disponibles en la regla limnimétrica.

Según el trabajo de investigación de Pastora Flores (2010), menciona que; la fórmula de Manning, aunque originalmente se desarrolló para canales y bajo condiciones de flujo uniforme, ha demostrado ser una herramienta valiosa en la evaluación de las características hidráulicas y geométricas en secciones donde se realiza los aforos. Esta metodología se ha utilizado con éxito en la práctica, incluso en situaciones donde las condiciones de flujo no son completamente uniformes. En particular, cuando se enfrentan crecidas en ríos o canales, la pendiente del eje hidráulico tiende a promediarse, lo que permite superar pequeñas variaciones en la pendiente del lecho. Las siguientes ecuaciones (5.3), (5.4) y (5.5) se describieron en el capítulo 3.

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (5.3)$$

La fórmula de Manning se destaca por su simplicidad y la calidad de los resultados obtenidos al extrapolar la parte superior de la curva de calibración. Además, esta metodología asume que el coeficiente k permanece constante en niveles de flujo altos.

$$k = \frac{1}{n} S^{\frac{1}{2}} \quad (5.4)$$

$$v = k R^{\frac{2}{3}} \quad (5.5)$$

Para aplicar esta metodología, es necesario contar con el perfil topográfico de la sección transversal de control, el cual se generó a partir del Modelo Digital de Terreno (MDT) anteriormente creado (Figura 42). Este perfil topográfico proporcionará las propiedades geométricas de la sección necesarias para llevar a cabo el proceso de extrapolación de la curva de calibración.



Figura 42. Perfil topográfico de la sección de aforo

Para obtener las propiedades geométricas de la sección de control, se empleó la herramienta FlowMaster. Este programa se destaca por su capacidad de cálculo de propiedades geométricas e hidráulicas en secciones geométricas irregulares que son característicos en ríos. Los valores de velocidad para cada aforo realizado se lo definen a partir de la ecuación (5.6). Los valores de las propiedades geométricas se presentan en la Tabla 21.

$$Q = v \cdot A \quad \rightarrow \quad v = \frac{Q}{A} \quad (5.6)$$

H [m]	Cota m.s.n.m	A [m ²]	P [m]	R [m]	B [m]	Q [m ³ /s]	V [m/s]
0.13	3896.067	2.3385	7.86	0.2975	7.56	0.61	0.3359
0.28	3896.217	3.5804	9.18	0.3902	8.81	1.97	0.5476
1.21	3897.147	13.418	12.57	1.0671	11.18	16.29	1.2164
0.25	3896.187	3.3187	8.99	0.3692	8.64	1.56	0.5103
0.30	3896.237	3.7579	9.31	0.4037	8.93	2.13	0.5713
0.32	3896.257	3.9377	9.43	0.4174	9.05	2.34	0.5942
0.09	3896.027	2.0444	7.45	0.2743	7.16	0.31	0.2668
0.345	3896.282	4.1657	9.6	0.4341	9.2	2.44	0.6217
0.356	3896.293	4.268	9.83	0.434	9.43	3.25	0.6333
0.156	3896.093	2.5378	8.1	0.3134	7.79	0.59	0.3780
0.22	3896.157	3.0615	8.84	0.3462	8.51	1.42	0.4709
0.05	3895.987	1.7658	7.06	0.2502	6.77	0.19	0.1930
0.04	3895.977	1.6988	6.9	0.2461	6.62	0.44	0.1740
0.15	3896.087	2.4913	8.04	0.3099	7.73	1.35	0.3684
0.10	3896.037	2.1165	7.57	0.2797	7.27	1.05	0.2846
0.08	3896.01	1.9732	7.37	0.2676	7.08	0.82	0.2488

Tabla 21. Propiedades geométricas de la sección de control

Con base en los datos de la Tabla 21, se grafica los niveles (H) y las velocidades (v) correspondientes. A través de un ajuste, se obtuvo la ecuación (5.7) que mejor se adecua a los datos, lo cual se muestra en la Figura 43.

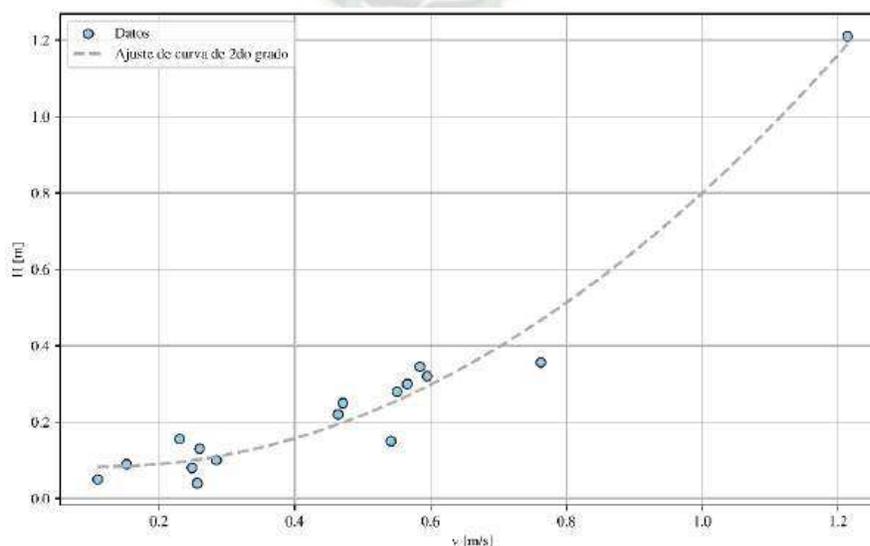


Figura 43. Ajuste logarítmico de los datos.

$$H = 0.7368v^2 + 0.087v + 0.0118 \quad (5.7)$$

A partir de la ecuación (5.7) y del perfil topográfico de la sección de control (Figura 42), se determinaron la velocidad y las propiedades geométricas para los siguientes valores de lectura de la regla: 1.25, 1.50 y 1.75 metros, el cual se presenta en la Tabla 22.

H [m]	Cota [m.s.n.m]	A [m ²]	P [m]	R [m]	B [m]	V [m/s]
1.25	3897.187	13.865	12.66	1.10	11.21	1.239
1.50	3897.437	16.696	13.23	1.26	11.44	1.363
1.75	3897.687	19.742	15.39	1.28	13.31	1.478

Tabla 22. Parámetros extrapolados

De la ecuación (5.4), se determinan los valores de k tanto para los valores medidos como para su extrapolación.

H	A	V	R	k	Q
0.13	2.338	0.3359	0.4456	0.753	0.61
0.28	3.580	0.5476	0.5340	1.025	1.97
1.21	13.418	1.2164	1.0442	1.164	16.29
0.25	3.319	0.5103	0.5146	0.991	1.56
0.30	3.758	0.5713	0.5462	1.045	2.13
0.32	3.938	0.5942	0.5585	1.063	2.34
0.09	2.044	0.2668	0.4222	0.632	0.31
0.345	4.166	0.6217	0.5733	1.084	2.44
0.356	4.268	0.6333	0.5732	1.104	3.25
0.156	2.537	0.3780	0.4614	0.819	0.59
0.22	3.061	0.4709	0.4930	0.955	1.42
0.05	1.765	0.1930	0.3971	0.486	0.19
0.04	1.698	0.1740	0.3927	0.443	0.44
0.15	2.491	0.3684	0.4579	0.804	1.35
0.10	2.116	0.2846	0.4277	0.665	1.05
0.08	1.973	0.2488	0.4153	0.599	0.82
1.25	13.865	1.2390	1.0624	1.194	17.59
1.50	16.696	1.3630	1.1678	1.196	23.28
1.75	19.742	1.4780	1.1804	1.193	27.83

Tabla 23. Parámetros hidráulicos y geométricos extrapolados

Partiendo de la información de la Tabla 23, se representan gráficamente los valores de H y k

obtenidos. Esto permite identificar el valor de k que se mantiene constante para niveles altos. Según la Figura 44, dicho valor es $k = 1.194$ y a partir de este valor de k y las ecuaciones (5.3), (5.4) y (5.5), se obtuvieron los caudales extrapolados correspondientes a niveles no medidos.

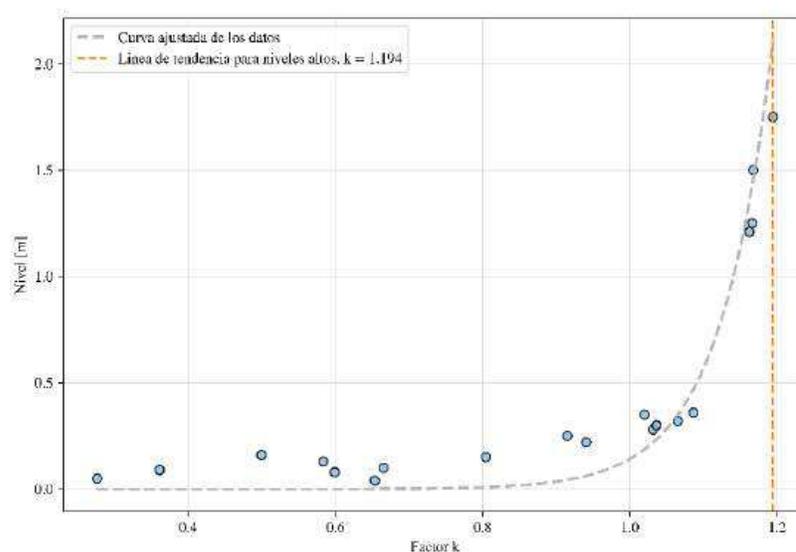


Figura 44. Nivel de agua vs factor k

La curva de descarga resultante contiene información de datos medidos y teóricos extrapolados tanto de niveles y caudales. Se ha mantenido el valor previamente encontrado de $h = -0.07$ m utilizando los datos medidos. Dando como resultado el grafico mostrado en la Figura 45 y su respectiva ecuación (5.8) de ajuste a una curva de orden superior.

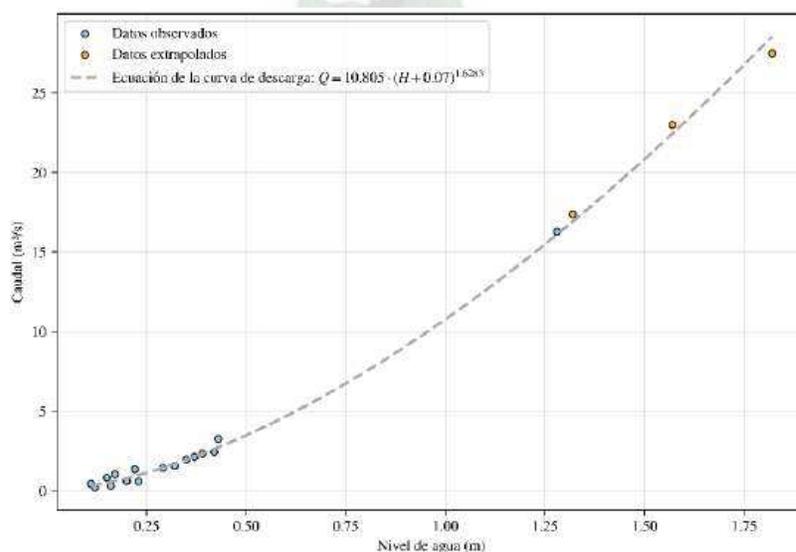


Figura 45. Curva de descarga extrapolada

$$Q = 10.805 \cdot (H + 0.07)^{1.6283} \quad (5.8)$$

La relación entre el caudal de flujo y la rugosidad del lecho, permite analizar cómo varían estos para diferentes valores. Con este propósito, se elaboró una curva teórica que correlaciona los caudal medidos y extrapolados con el coeficiente de Manning, utilizando datos de la Estación Viacha KH-05 y la superficie topo batimetría generada mediante aerofotogrametría y batimetría. Esta superficie permitió determinar el Thalweg (línea más profunda en el lecho de un río) en el tramo de estudio $S_o = 0.0024$ m/m. Para obtener estos valores, se utilizó las expresiones dadas por las ecuaciones (5.3) y (5.6).

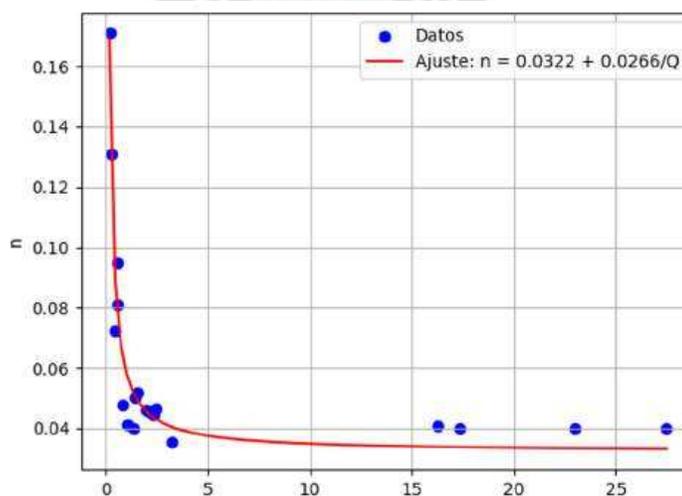


Figura 46. Curva teórica n vs Q

La curva teórica obtenida (Figura 46) muestra que, para valores altos de caudal, el coeficiente de Manning se mantiene constante. Esta tendencia es similar al análisis realizado en la extrapolación de la curva de descarga (Figura 44), dado que ambos se fundamentan en la misma formulación. Este análisis sirve como base para la calibración del modelo hidrodinámico, en el cual el coeficiente de Manning se define como el parámetro a calibrar, procedimiento que se desarrolla en el siguiente capítulo.

5.3.4 Selección de eventos de crecidas

Para la calibración del modelo hidrodinámico, se eligieron tres eventos hidrológicos que fueron registrados por la estación Viacha KH-05. Esta selección se llevó a cabo con el objetivo de obtener información necesaria para las condiciones de borde en el modelo HEC-RAS. La siguiente Tabla 24 se presentan los tres eventos seleccionados.

Evento	Fecha	Caudal m ³ /s	Nivel del flujo msnm
E1	08/02/2020	19.371	3896.596
E2	04/02/2023	19.790	3896.453
E3	10/12/2019	18.099	3896.272

Tabla 24. Datos de eventos hidrológicos con caudal y nivel del flujo.

5.3.5 Elaboración de hidrogramas

A partir de los tres eventos seleccionados y datos registrados con un paso de tiempo de 15 minutos de la estación Viacha KH-05, se elaboraron tres hidrogramas utilizando la ecuación (5.8) previamente determinada. Los hidrogramas resultantes están representados en la Figura 47.

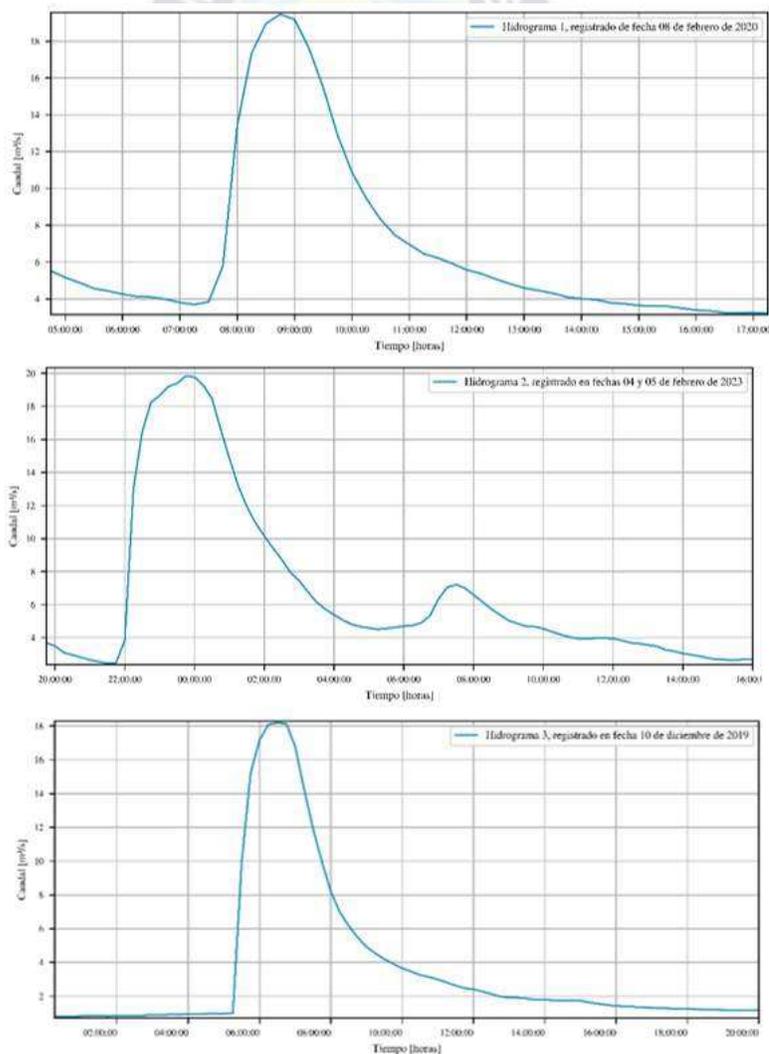


Figura 47. Hidrogramas de los eventos de crecidas seleccionados

5.4 Determinación de hidrogramas de entrada para la modelación

Debido a que solo se cuenta con hidrogramas a la salida (estación Viacha KH-05) del tramo de estudio y no a la entrada del mismo, esta falta de información dificulta la aplicación del método de solución (Tabla 4), ya que para un flujo no permanente se requiere un hidrograma de entrada para el modelo HEC-RAS, para abordar esta dificultad se utilizó el método Muskingum Cunge.

Según la investigación de Fuentes Mariles et al. (2006), indica que el tránsito de avenidas en cauces implica calcular los caudales en diferentes secciones transversales de un tramo de río, utilizando un hidrograma conocido en su extremo. Este proceso permite determinar la forma del hidrograma en varios puntos a lo largo del cauce. El método de Muskingum-Cunge es una técnica utilizada en hidrología e hidráulica para el enrutamiento de avenidas en ríos. Combina el método de Muskingum, que describe la propagación de avenidas en un tramo de río (Figura 48), con el método de Cunge, que es un enfoque hidráulico para resolver las ecuaciones de movimiento de aguas superficiales.

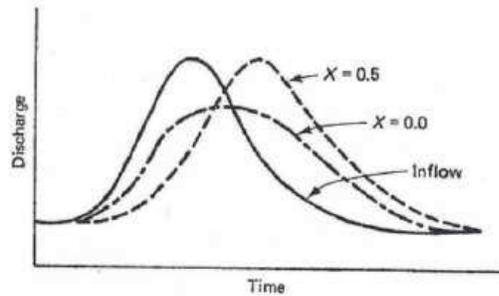


Figura 48. Propagación de avenidas

Fuente: Extraído de la investigación de Viessman y Lewis (1996).

Estas ecuaciones representan el modelo lineal de almacenamiento para la propagación de avenidas en cauces por el método de Muskingum, analizando el volumen de almacenamiento en dos instantes, 1 y 2, al comienzo y al final de un intervalo de tiempo Δt , éstos pueden determinarse como:

$$Q_{t+1} = C_1 \cdot I_{t+1} + C_2 \cdot I_t + C_3 \cdot Q_t \quad (5.9)$$

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t}, \quad C_2 = \frac{\Delta t + 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t}, \quad C_3 = \frac{2 \cdot K \cdot X - \Delta t}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t} \quad (5.10)$$

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1 \quad (5.11)$$

Para la obtención de las constantes K y X , Cunge combinó parámetros hidráulicos del cauce, lo que resultó en las siguientes ecuaciones (26) y (27):

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (5.12)$$

$$X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{B \cdot c \cdot S_o \cdot \Delta x} \right) \quad (5.13)$$

Donde:

K : Parámetro de almacenamiento, unidades de tiempo

X : Parámetro adimensional, que varía entre 0 a 0.5.

Q : Caudal

B : Ancho medio del cauce

c : Celeridad promedio del pico de avenida, puede aproximarse a $5/3$ veces v_{media}

S_o : Pendiente media del cauce

Δx : Longitud del tramo considerado.

Para evitar la posibilidad de errores numéricos de las constantes K y X se debe satisfacer el siguiente criterio, dada por la ecuación (28).

$$X \leq \frac{\Delta t}{2 \cdot K} \leq (1 - X) \quad (5.14)$$

Este método se basa en la determinación de los hidrogramas aguas abajo. Sin embargo, en nuestro caso, lo utilizaremos de manera inversa para calcular el hidrograma aguas arriba, a una distancia de 2.0 Km aguas arriba de la estación Viacha KH-05.

Para la determinación de las constantes K y X , se utilizó el MDT previamente generado, dando como pendiente media del cauce $S_o = 0.0022$ y se determinó que el ancho promedio B del cauce varía entre 15 a 25 metros, y que la longitud del tramo Δx es de 2000 m. Además, se estableció que el intervalo de tiempo Δt es de 15 minutos. y para la determinación de la celeridad que está en función de la velocidad media, esta se la estableció a partir de la ecuación de Manning.

Evento	K	X
1	0.428	0.275
2	0.420	0.280
3	0.430	0.271
Promedio	0.428	0.275

Tabla 25. Valores de Hidrograma, K y X

Con los valores promedios de K y X (Tabla 25), se calcularon las constantes C_1 , C_2 y C_3 utilizando la ecuación (5.10). Asimismo, los valores calculados cumplen con el criterio establecido en la ecuación (5.14)

$$C_1 = 0.0258 \quad C_2 = 0.8606 \quad C_3 = 0.1136$$

$$0.275 \leq 0.455 \leq 0.572$$

A partir de estos coeficientes C_1 , C_2 y C_3 calculados y de la ecuación (5.9) se determinaron los hidrogramas de entrada para el modelo hidrodinámico a partir de los hidrogramas de salida generados (estación KH-05). Este proceso se realizó de forma iterativa, dando como resultado los hidrogramas mostrados en la Figura 49.

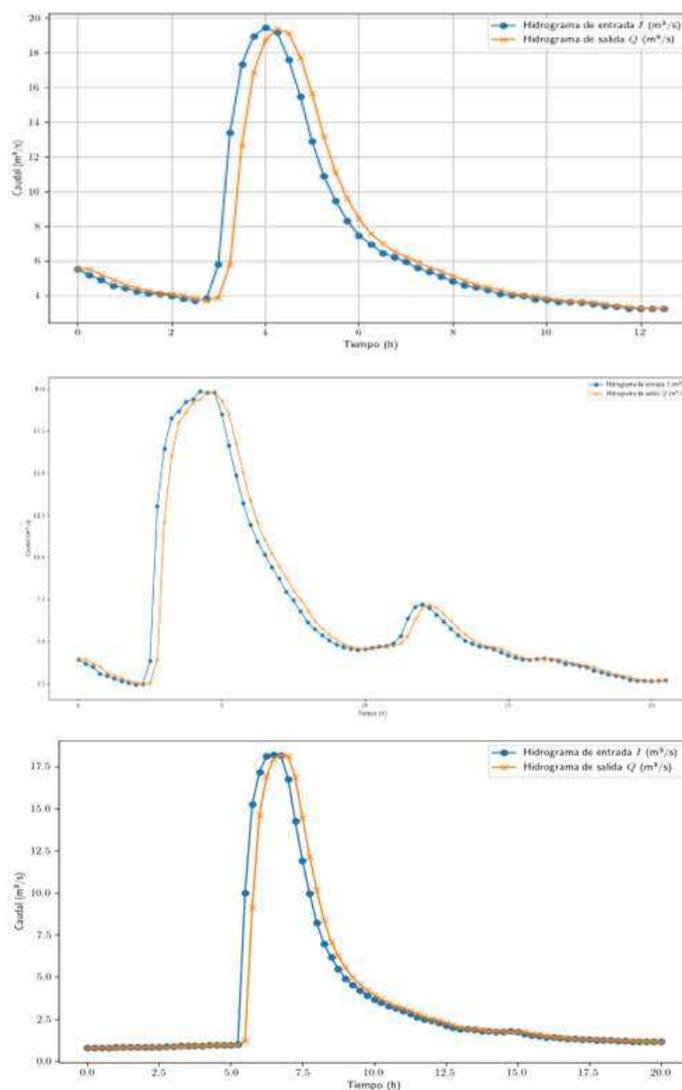


Figura 49. Hidrograma de entrada para la modelación hidrodinámica

CAPÍTULO 6: MODELACIÓN HIDRODINÁMICA.

El modelo computacional HEC-RAS en su versión 6.4.1 permite llevar a cabo modelación bidimensional para flujo de régimen no permanente en cauces de lecho natural. Esto facilita simular diversos escenarios hidrológicos y la identificación zonas de desborde y áreas de inundación.

Los pasos necesarios para realizar una modelación bidimensional utilizando HEC-RAS son los siguientes:

- * Creación del proyecto.
- * Creación de la geometría: generación del terreno, malla computacional, refinamiento de la malla y línea de condiciones de borde.
- * Selección del coeficiente de rugosidad de Manning.
- * Introducción de datos de flujo: hidrogramas, curvas de descarga y condiciones de contorno.
- * Ejecución del plan de simulación del modelo.
- * Calibración del modelo hidrodinámico.
- * Implementación del modelo.
- * Análisis de resultados.

6.1 Creación del proyecto.

El primer paso en la configuración de un proyecto en HEC-RAS es crear una carpeta para almacenar todos los archivos y datos del proyecto. Es importante que el nombre de la carpeta sea sencillo y sin caracteres especiales para evitar problemas durante la ejecución del plan de modelación. Además, se debe seleccionar el sistema de unidades a utilizar, ya sea métrico o imperial.

Para la modelación del caso de estudio, se ha seleccionado el Sistema Internacional (S.I.) como el sistema de unidades del proyecto.

6.2 Creación de la geometría.

El módulo RAS Mapper incorporado dentro de HEC-RAS, tiene las herramientas necesarias para la generación de la geometría a partir de un Modelo Digital de Elevación o secciones transversales. Además de la generación mallas computacionales estructuradas y no estructu-

radas y refinamiento de las mismas. Este módulo permite la visualización de resultados como la profundidad, velocidad y nivel del agua.

6.3 Generación del terreno.

A partir del Modelo Digital de Terreno (MDT) creado por CIVIL 3D (en formato .tif), RAS Mapper genera el terreno correspondiente, guardándolo (en formato .hdf). Esta transformación del archivo no solo reduce significativamente el tamaño del mismo, sino que también conserva la resolución original de 5 cm. Este enfoque eficiente facilita la manipulación y el análisis de datos en etapas posteriores del proyecto.

6.4 Malla computacional.

La malla computacional cubre toda el área de estudio, extendiéndose 100 metros a cada lado de los márgenes y a lo largo de 2.0 Km del río. Esto incluye tanto el cauce principal como las llanuras de inundación.

La elección del tamaño de la malla computacional se basó en topografía del terreno caracterizada por una pendiente baja, el tamaño de la malla influye en el tiempo de cómputo del modelo. La malla computación se generó a partir de la geometría predefinida, utilizando un tamaño de malla de 4x4 metros. En la siguiente Figura 50 se muestra una captura de la generación de la malla.

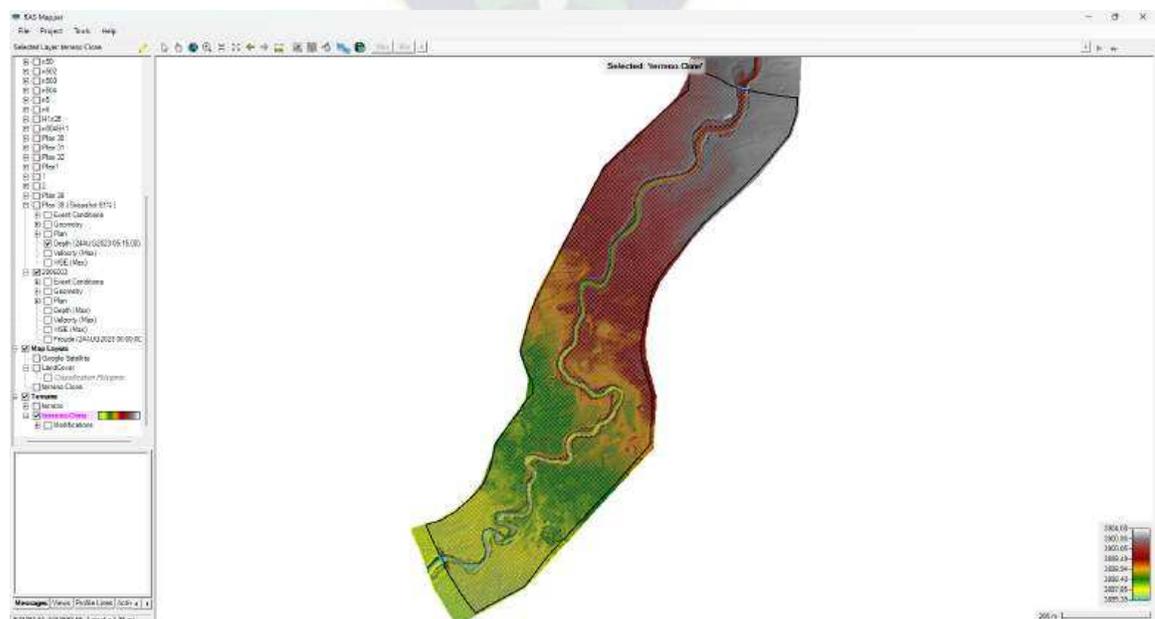


Figura 50. Malla computacional del proyecto

6.4.1 Refinamiento de la malla computacional.

El refinamiento de la malla computacional se realizó en el cauce principal del río mediante la herramienta *Breakline* de RAS Mapper. Dada la baja pendiente del río y las condiciones del terreno, se adoptó un tamaño de malla de 0.5 x 0.5 metros para el refinamiento. Se procuró que la *Breakline* sea lo más suave posible, evitando puntos angulosos y asegurándose de que iniciara y finalizara de forma perpendicular al perímetro de la geometría (Figura 51). Esto con el objetivo de evitar posibles errores en la convergencia y estabilidad del modelo.

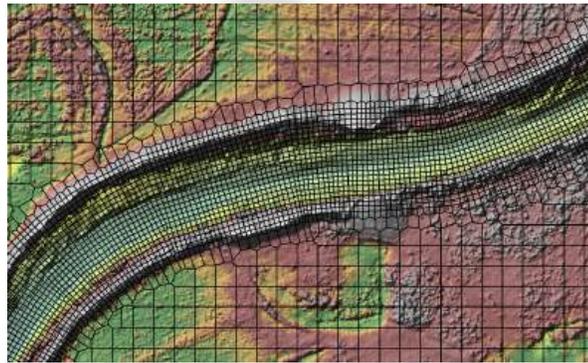


Figura 51. Refinamiento de la malla computacional

6.4.2 Líneas de condición de borde.

Estas líneas de condición de borde externa deben ubicarse lo más cerca posible y ser paralela al perímetro de la malla computacional, además de ser perpendicular a la línea *Breakline*. En la Figura 52, a la izquierda se muestra la línea de condición de borde de entrada, mientras que a la derecha muestra la línea de condición de borde de salida. El cargado de información para las líneas de borde se detalla más adelante.

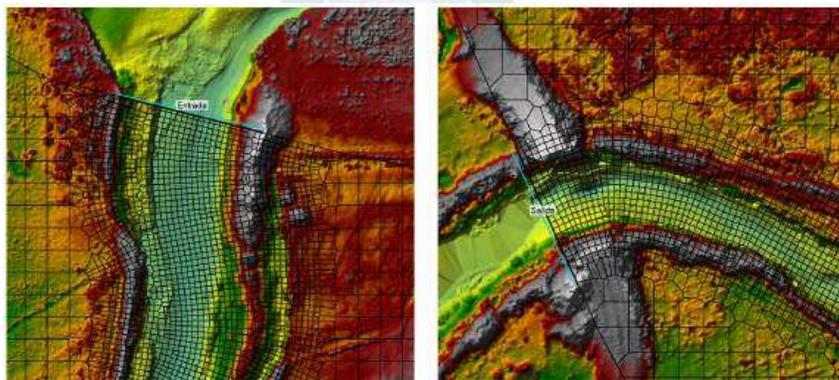


Figura 52. Condiciones de borde de entrada y salida

6.5 Selección del coeficiente de rugosidad de Manning.

El coeficiente de rugosidad debe ser estimado para cada sitio específico, ya que este valor depende en gran medida de las características y composiciones materiales, vegetación, sinuosidad, lo que ocasiona un valor variable del n de Manning. Para estimarlo, se emplean diversas técnicas, como la revisión de mapas de uso del suelo, imágenes satelitales, entre otras alternativas. En el caso de este proyecto, se utilizará el ortomosaico generado. En este contexto, se identificaron dos áreas de mayor relevancia que son el cauce principal y la planicie de inundación.



Fotografía 12. Materiales en el cauce principal y llanura de inundación

La selección del coeficiente de Manning se basó en el reconocimiento de campo y vuelo realizado con dron en el área de estudio. Se identificó en el cauce principal la presencia de material granular cubierto de material fino con vegetación y sinuosidad del río, mientras que en la llanura de inundación se observaron sembradíos y en mayor cobertura pastizales y pajonales característicos del altiplano boliviano, como se observa en la Fotografía 12.

En el régimen impermanente y variado el cambio de la n se produce de forma similar al permanente variado, pero ahora la variable tiempo tiene un papel protagónico y el efecto del tránsito de las ondas de flujo, cada una de ellas con características propias de profundidad y velocidad, repercute, a veces significativamente, sobre los valores de la variable n que se necesita para simular acertadamente en tránsito (Fernández de Córdova Webster et al. (2018).

Según la Tabla 26, el valor del coeficiente de Manning seleccionado para el cauce principal n es de 0.040, correspondiente a meandros con algunas piedras y pastos, este valor alto del coeficiente n se debe a las características del material y geometría del cauce. Para la llanura de inundación, se asignó un valor de 0.050, también considerado normal, y se refiere a escasos arbustos y pasto abundante.

Descripción de la corriente	Mínimo	Normal	Máximo
A. Causas naturales			
A.1 Cursos secundarios (ancho de la superficie libre en crecida < 30 m)			
A.1.1 Cursos en planicies			
- Limpios, rectos, sin pozos	0.025	0.030	0.033
- Rectos con algunas piedras y pastos	0.033	0.040	0.045
- Limpios con meandros, con algunos pozos y bancos	0.050	0.070	0.100
- Meandros con algunas piedras y pastos	0.035	0.045	0.050
A.1.2 Cursos montañosos			
- Cauces de gravilla, cantos rodados y algunos rocas	0.030	0.040	0.050
- Cauces de cantos rodados, con grandes rocas	0.040	0.050	0.070
A.2 Cursos en planicies inundadas			
A.2.1 Zonas de pastos, sin arbustos			
- Pasto corto	0.025	0.030	0.035
- Pasto alto	0.020	0.030	0.050
A.2.2 Zona cultivada			
- Sin cultivo	0.020	0.025	0.045
- Cultivos sembrados en línea en fase de madurez fisiológica	0.030	0.040	0.050
A.2.3 Zonas arbustivas			
- Escasos arbustos en línea en fase de madurez fisiológica	0.030	0.035	0.050
- Pequeños árboles y arbustos sin foliación (parda invernal)	0.045	0.050	0.060
- Pequeños arbustos y árboles en foliación (flor vegetativa)	0.045	0.050	0.070
A.2.4 Zonas áridas			
- Secos densos, temporada invernal	0.050	0.060	0.080
- Terreno claro con ramas sin brotes	0.050	0.060	0.080
A.3 Cursos importantes (ancho de la superficie libre en crecida > 30 m)			
- En este caso, los valores de coeficiente n son inferiores a los correspondientes de cauces secundarios	0.025	0.030	0.035
- Sección regular sin rocas	0.035	0.040	0.100

Tabla 26. Valores del coeficiente de Manning en canales naturales

Fuente: Extraído de Hidrología Aplicada de Chow, V.T. (2004).

Los valores teóricos del coeficiente n de Manning seleccionados se utilizan como referencia inicial para calibrar el modelo hidrodinámico, cubriendo tanto el cauce principal como la llanura de inundación.

6.6 Introducción de datos de flujo

La introducción de datos para un flujo no permanente (*Unsteady Flow*) es importante para establecer condiciones de borde externas y condiciones iniciales, asegurando una simulación de los eventos hidrológicos. Siguiendo las convenciones recomendadas por diversos autores, se utilizan los hidrogramas como condiciones de entrada, mientras que los niveles de agua se emplean como condiciones de salida.

Las condiciones de borde se definieron en base a la información generada. Para el análisis

bidimensional, se consideraron las siguientes condiciones:

Condición de entrada – Hidrograma (Flow Hydrograph)

Condición de salida – Curva de descarga (Rating Curve)

La condición inicial (Initial Conditions) se estableció con una profundidad de flujo de 0.5 m, indicando al modelo que comience con este valor de profundidad de agua (Figura 53). Este valor es necesario como punto de partida en el momento cero del proceso de cómputo del modelo, proporcionando una referencia para el flujo de agua al inicio de la simulación.

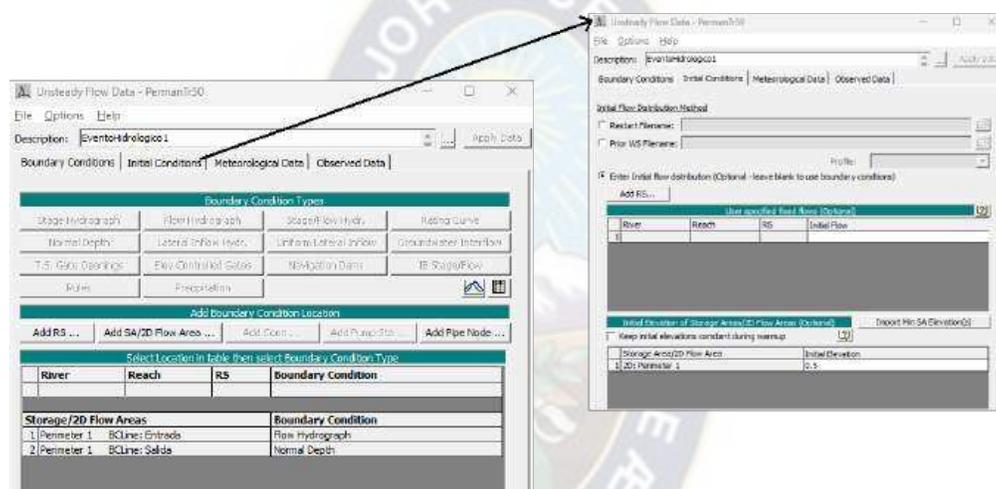


Figura 53. Introducción de condiciones de flujo al modelo

6.7 Corrida del plan de simulación del modelo.

La información de entrada del plan de simulación, conforma tanto los datos geométricos como las condiciones de flujo. En cuanto a los datos geométricos, se incluyen parámetros como la topografía del terreno a partir del modelo digital del terreno. Por otro lado, las condiciones de flujo comprenden datos hidrométricos, hidrogramas y niveles iniciales de agua.

6.7.1 Paso del tiempo computacional.

Uno de los parámetros relevantes dentro del *plan de simulación* es la determinación del paso o intervalo de tiempo de cómputo (Δt). Este valor se obtiene a partir del concepto del número de Courant, que tiene un papel importancia en la convergencia y estabilidad de los cálculos de la modelación. La selección adecuada de Δt para un tamaño de malla computacional Δx , asegura una optimización de los recursos computacionales utilizados durante la simulación.

$$C = v \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad \rightarrow \quad \Delta t = \frac{C}{v} \Delta x \quad (6.1)$$

Donde:

C : Número de Courant

v : Velocidad del flujo en m/s.

Δt : Intervalo computo en s

Δx : Tamaño de la malla o celda en m

Es importante que el número de Courant sea menor a 1, lo que indica que la velocidad de cómputo en cada celda de la malla es mayor que la velocidad del flujo. El intervalo de cómputo (Δt) se determina a través de la ecuación (6.1), donde la velocidad del flujo (v) se calcula a través de la ecuación de Manning. Según el manual de usuario de HEC-RAS, recomiendan estimar una velocidad máxima como primera aproximación, la cual se establece para el caudal pico del hidrograma. Considerando un tamaño de celda (Δx) de 1.0 m para el cauce principal, esto resulta en un intervalo de cómputo de $\Delta t = 1.37$ segundos; por lo tanto, el Δt introducido en el modelo HEC-RAS es de 1.0 segundo, asegurando así que el número de Courant sea menor a 1. En siguiente Figura 54 se muestra la inclusión del intervalo de tiempo dentro del módulo Unsteady Flow Analysis.

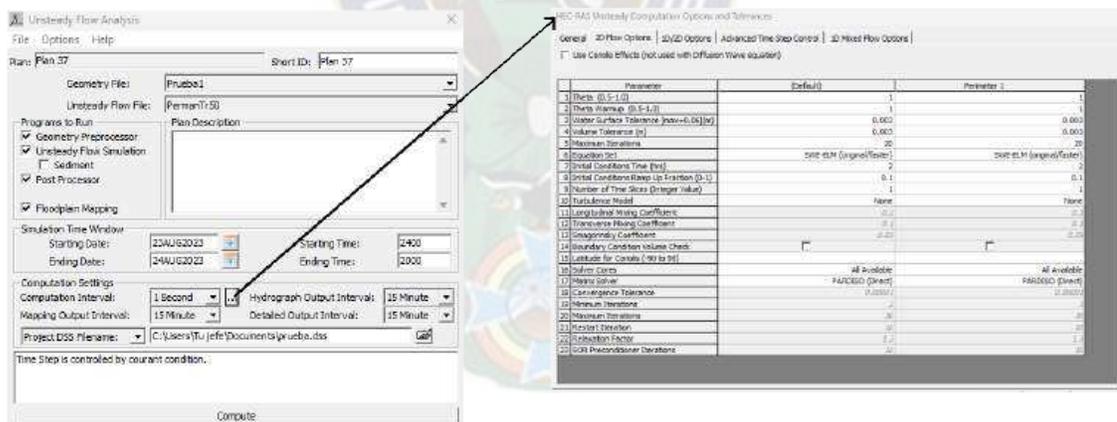


Figura 54. Asignación del intervalo de cómputo al modelo

Asimismo, dentro de la configuración del plan de simulación, se cuentan diferentes opciones para la solución de las ecuaciones de Saint Venant o ecuaciones de aguas poco profundas, tales como:

- Diffusion Wave - Onda de Difusión
- Shallow Water Equation - SWE ELM (original-Faster)

Las ecuaciones de *Onda de difusión* ignoran los términos de aceleración local (cambio de velocidad con respecto al tiempo) y convectiva (cambio de velocidad con respecto a la distancia) presentes en las ecuaciones (3.3) y (3.4) del principio de conservación del momentum de Saint-Venant. Por lo tanto, solo considera términos de gravedad, fricción y pendiente para la solución de las ecuaciones (6.2) y (6.3). Esta simplificación tiene como resultado una reducción significativa en el tiempo de cómputo, ya que omite varios términos que pueden requerir más recursos computacionales.

$$c_f u + g \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (6.2)$$

$$c_f u + g \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (6.3)$$

Al considerar solamente esos términos, su aplicación es ideal para la modelación en problemas donde la pendiente del río es predominante y varía desde pronunciadas a moderadas. También, es óptima para la modelación en flujos de régimen permanente y variado donde el ascenso y descenso del hidrograma son lentos, lo que indica que el cambio de velocidad con respecto al tiempo es pequeño.

En el manual de usuario del U.S. Army Corps of Engineers (2022) se menciona que las ecuaciones de Shallow Water Equation son recomendables en situaciones específicas que presentan condiciones como:

1. **Ondas de inundación:** Si se está realizando análisis de rotura de presa o de inundación repentina.
2. **Contracciones y expansiones en el canal del río:** En zonas donde hay contracciones y expansiones muy abruptas.
3. **Sistemas fluviales de baja pendiente:** En ríos con pendientes muy planas (menos de 1 pie/milla), la gravedad y la fricción pueden no ser las fuerzas dominantes. En estos casos, las fuerzas asociadas con cambios de velocidad en términos de tiempo y distancia son más significativas en la forma y movimiento de una onda de inundación.
4. **Modelado de propagación de ondas:** En modelaciones donde la propagación de ondas se debe a la rápida apertura o cierre de estructuras cerradas, o al avance de las ondas en una pared o alrededor de un objeto (por ejemplo, pilares de puentes, edificios, etc.).
5. **Regímenes mixtos de flujo:** Permite modelar con precisión las transiciones de flujo subcrítico a supercrítico y de flujo supercrítico a subcrítico (saltos hidráulicos).

Siendo esta última la opción más adecuada para resolver las ecuaciones del principio de conservación del momentum, dado que la pendiente del cauce principal es baja, existen contracciones y expansiones debido a los meandros y ondas de inundación.

La última configuración dentro de este módulo consiste en establecer un período de calentamiento del modelo, lo cual contribuye a su estabilidad y la entrada de flujo al iniciar la simulación. El valor adoptado para este periodo es de 2.0 horas.

6.8 Calibración del modelo hidrodinámico.

La calibración del modelo implica ajustar de manera iterativa el valor del parámetro de rugosidad de Manning en el cauce principal, para lograr una adecuada correspondencia entre los niveles de agua simulados por el modelo y observados en campo.

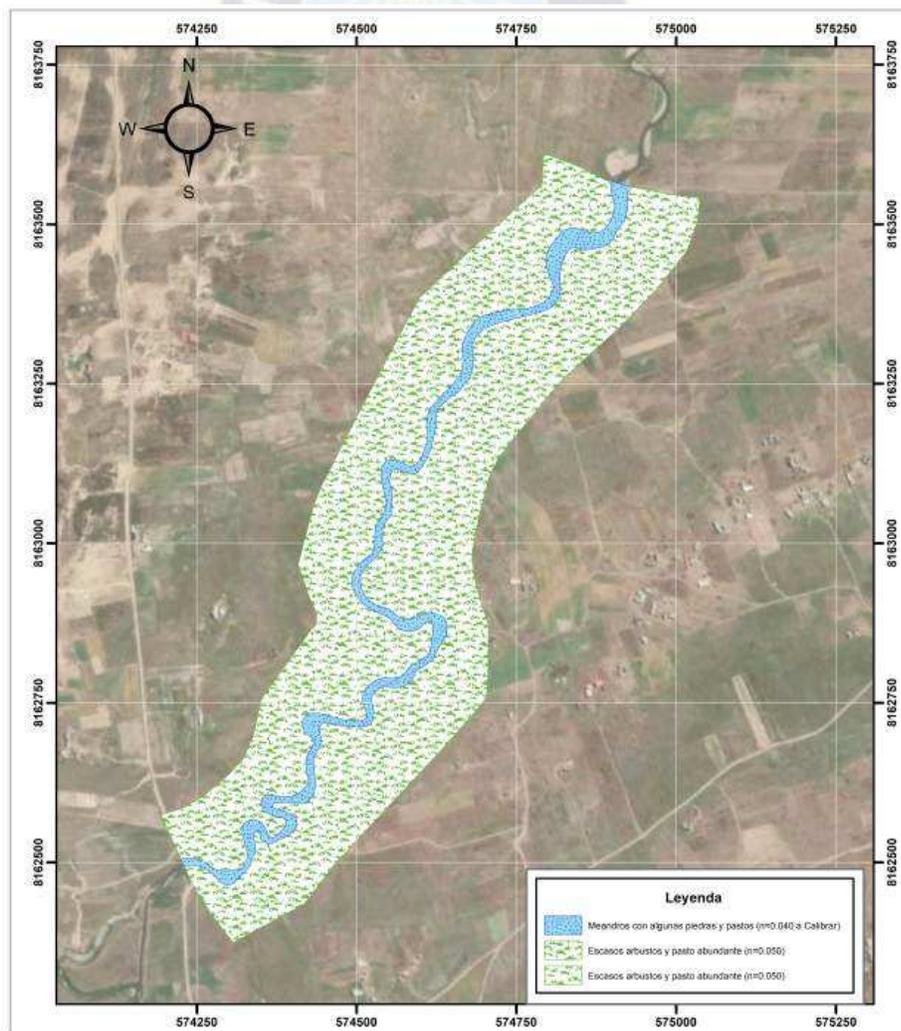


Figura 55. Mapa de valores de coeficientes de Manning

En la Figura 55 se representan los valores asignados a las coberturas representativas del área del proyecto. El coeficiente de rugosidad a calibrar corresponde al cauce principal, con un valor inicial de $n = 0.040$, mientras que el valor de la llanura de inundación se mantiene constante en $n = 0.050$.

A partir del valor inicial seleccionado del coeficiente de rugosidad de Manning de 0.040, se realizaron cuatro corridas del plan de simulación, variando este parámetro para cada uno de los tres eventos de crecida registrados. En la Tabla 27 se presentan los coeficientes de rugosidad de Manning utilizados en cada corrida, lo que permitió una mejor representación del comportamiento del flujo y cómo estas variaciones afectaron la respuesta del modelo.

Corrida	Calibración 1	Calibración 2	Calibración 3
C1	0.040	0.040	0.040
C2	0.050	0.060	0.025
C3	0.045	0.035	0.030
C4	0.0441	0.0452	0.0434

Tabla 27. Valores de calibración para diferentes corridas

6.8.1 Resultados de la calibración del modelo hidrodinámico.

Los niveles de agua fueron comparados con los valores registrados por la estación hidrométrica Viacha KH-05 y los niveles de agua simulados en cada corrida. Para evaluar la precisión de la calibración, se utilizaron diversos indicadores o herramientas estadísticas, tales como: el error cuadrático medio (MAE), error medio cuadrático (RMSE), eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE) y el coeficiente de correlación (R).

En la Tabla 26, se detallan los diferentes valores del parámetro n utilizados en cada corrida del plan de simulación. Los valores óptimos de este coeficiente son: 0.0441, 0.0432 y 0.0434, seleccionados a partir de los indicadores estadísticos, como el MAE y el RMSE, que presentan el menor error. Además, el NSE clasificó los valores como 'excelentes', demostrando una correlación 'satisfactoria' entre los valores observados y simulados para los tres eventos de crecida analizados.

El valor promedio obtenido para el coeficiente de rugosidad de Manning es de 0.0436. Este valor n alto se debe por la composición de los materiales del cauce principal y a la sinuosidad del río en el tramo estudio.

Corrida	MAE	RMSE	R	NSE
Resultados de las corridas del plan de simulación - Corrida 1				
C1	0.1455	0.1639	0.9835	0.6927
C2	0.1145	0.1964	0.9704	0.5587
C3	0.0527	0.0635	0.9849	0.9539
C4	0.0729	0.1076	0.9835	0.8674
Resultados de las corridas del plan de simulación - Corrida 2				
C1	0.1263	0.1609	0.9492	0.7249
C2	0.2531	0.2985	0.9548	0.0533
C3	0.1185	0.1466	0.9557	0.7717
C4	0.0461	0.1016	0.9582	0.8903
Resultados de las corridas del plan de simulación - Corrida 3				
C1	0.0631	0.1350	0.9280	0.8273
C2	0.1849	0.2584	0.8916	0.3668
C3	0.0995	0.1639	0.9182	0.7452
C4	0.0373	0.1216	0.9280	0.8598

Tabla 28. Resultados combinados de las corridas del plan de simulación

Los resultados, presentados en la Figura 56 para los tres eventos hidrológicos simulados, resalta que el coeficiente de rugosidad de Manning es un parámetro sensible en la calibración del modelo. Se observa que, al utilizar valores inferiores a los óptimos, los niveles de agua simulados tienden a ser subestimados, mientras que valores superiores generan sobreestimaciones en los niveles simulados. Esto denota la importancia de una determinación adecuada del coeficiente de rugosidad.

Además, se debe notar que los valores obtenidos se aproximan al coeficiente de rugosidad de Manning teórico de 0.040, previamente establecido en el análisis en capítulos anteriores, lo que valida la consistencia y fiabilidad de la calibración del modelo.

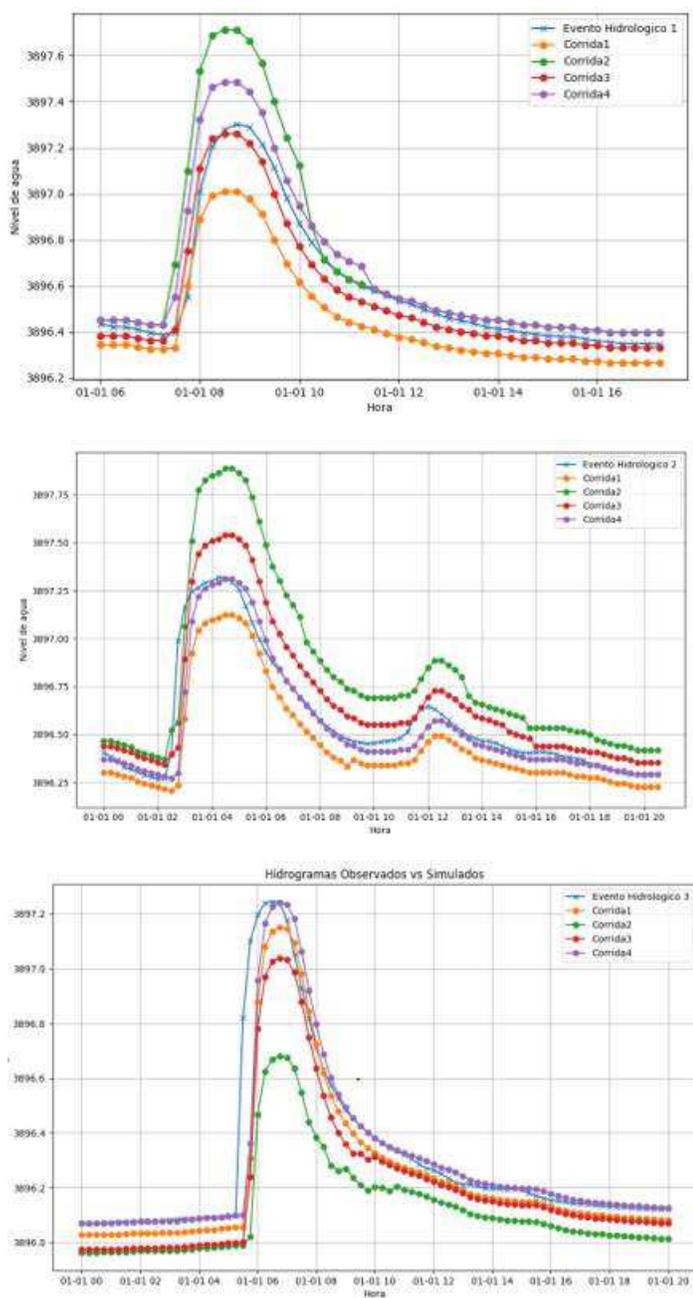


Figura 56. Mapa de valores de coeficientes de Manning

6.9 Implementación del modelo.

Para la implementación del modelo hidrodinámico con HEC RAS, se utilizaron los resultados obtenidos del estudio hidrológico del proyecto "Mejoramiento y Ampliación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Puchukollo – El Alto". Mismo que fue revisado y aprobado por profesionales de la Empresa Pública Social de Agua y Saneamiento – EPSAS.

El objetivo principal del estudio fue “determinar la cota máxima de inundación para un periodo de retorno definido en el cauce principal del Río Seco, en el punto de descarga del efluente de la PTAR Puchukollo”, dicho punto se encuentra a una distancia aproximada de 7.0 Km del área de estudio del presente proyecto (Figura 2).

Para su desarrollo, se llevó a cabo un análisis de la información hidrológica de las estaciones pluviométricas cercanas y dentro del área de aporte de la cuenca del Río Seco. Este análisis permitió la determinación de los hietogramas de precipitación mediante el método de bloques alternos para diferentes periodos de retorno. Asimismo, se identificó que el Río Seco cuenta con puntos de descarga de agua residual o industrial, además de dos embovedados de drenaje pluvial, siendo este último un afluente de caudal significativo.

A través del modelo hidrológico HEC-HMS, el estudio determinó caudales para periodos de retorno de 50 y 100 años. Este análisis consideró todos los afluentes al Río Seco, los valores totales se detallan en la Tabla 29 correspondiente

N	Método	Valor (m ³ /s)
1	Caudal total Tr=50 años	30.69
2	Caudal total Tr=100 años	35.49

Tabla 29. Caudales totales para diferentes periodos de retorno
Fuente: Extraído del estudio hidrológico, MMAyA (2019).

A continuación, se presenta en la Figura 57 el hidrograma de crecida para un periodo de retorno de 100 años.

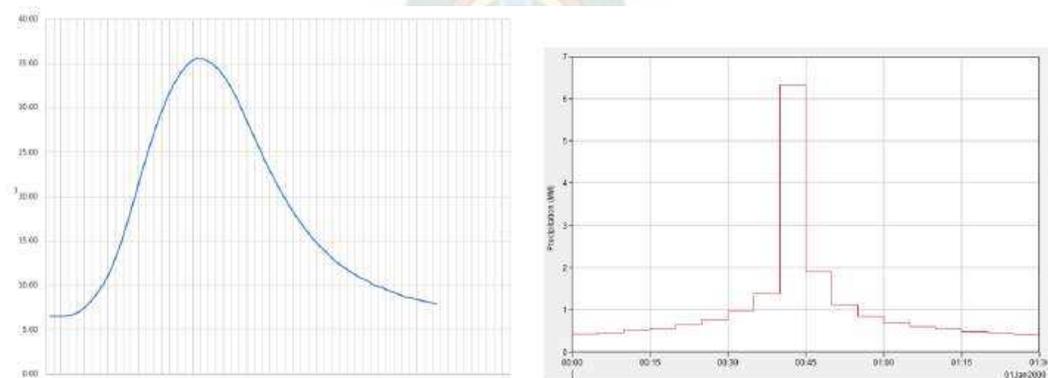


Figura 57. Hidrograma de crecida y hietograma de precipitación (Tr=100 años)
Fuente: Elaborado a partir del estudio hidrológico, MMAyA (2019).

Finalmente, en la Tabla 30 se presentan los valores de los parámetros adoptados para la implementación del modelo HEC-RAS.

Parámetro	Valor	Unidades
Tamaño de la malla $\Delta x/\Delta y$ (llanura de inundación)	4.0	metros
Tamaño de la malla $\Delta x/\Delta y$ (cauce principal)	1.0	metros
Intervalo de cómputo Δt	1.0	segundos
Coefficiente de rugosidad Manning n	0.0436	
Periodo de calentamiento del modelo	2.0	horas
Altura de agua inicial (condición inicial)	0.5	metros

Tabla 30. Parámetros del modelo

6.9.1 Resultados de la modelación.

Los resultados obtenidos de la modelación bidimensional en régimen de flujo no permanente, para simulaciones de crecidas con periodos de retorno de 50 y 100 años, proporcionaron información gráfica de velocidades, profundidades y niveles de flujo en distintos instantes de tiempo.

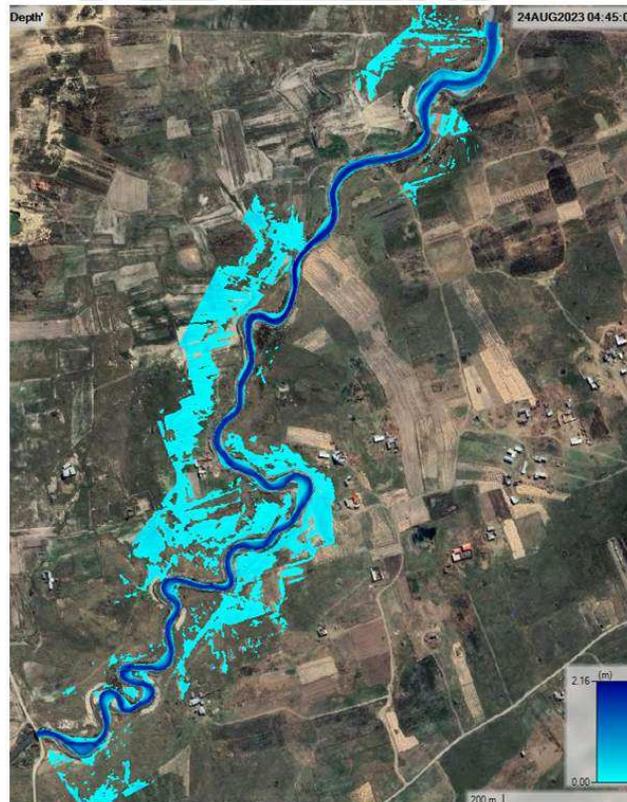


Figura 58. Resultado de las profundidades de flujo ($Tr= 50$ años)

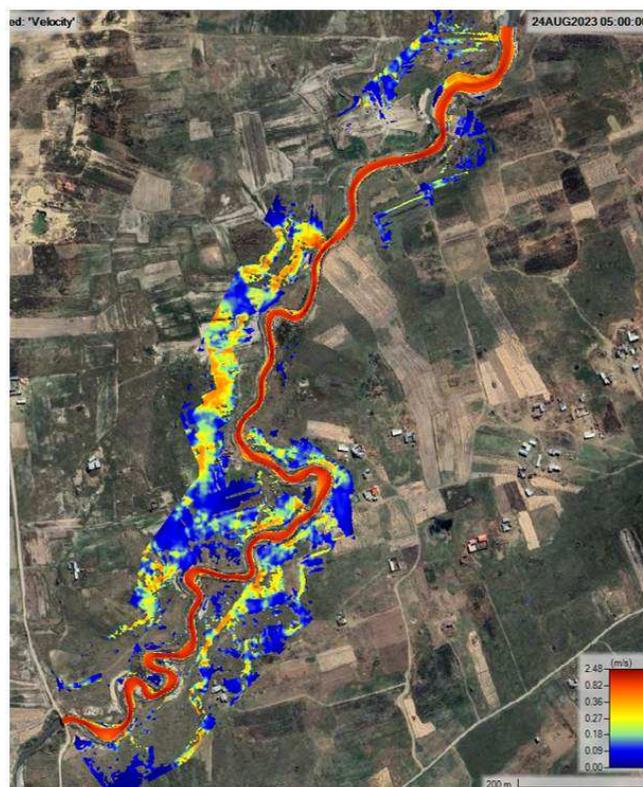


Figura 59. Resultado de las velocidades de flujo ($Tr= 50$ años)

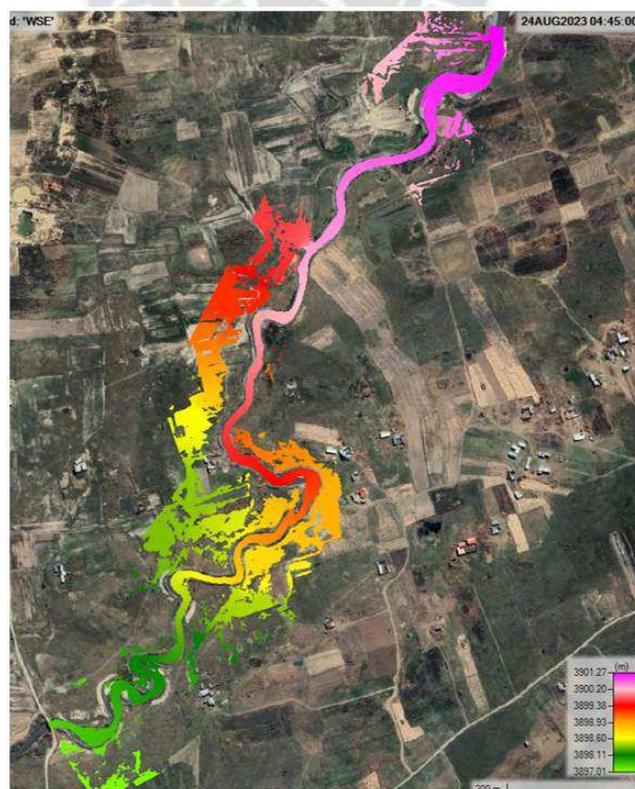


Figura 60. Resultado de los niveles de flujo ($Tr= 50$ años)

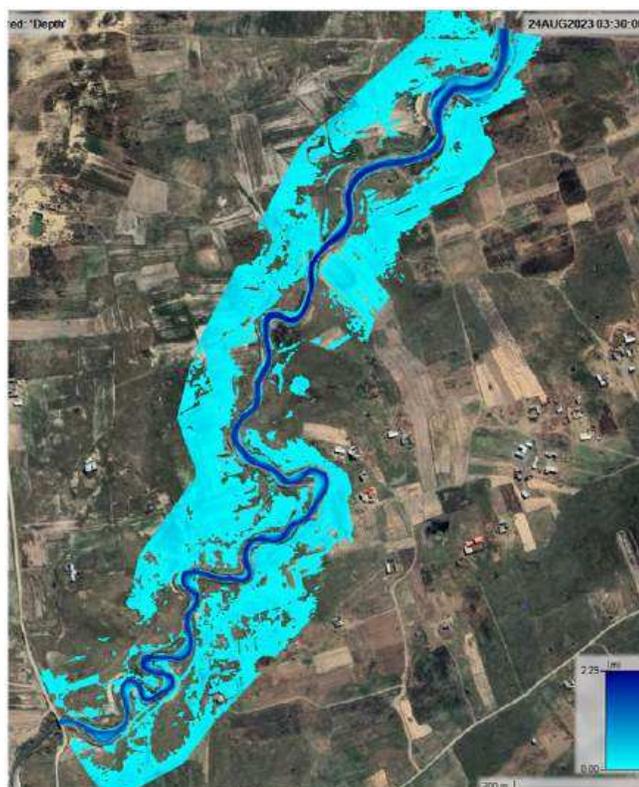


Figura 61. Resultado de las profundidades de flujo ($Tr= 100$ años)

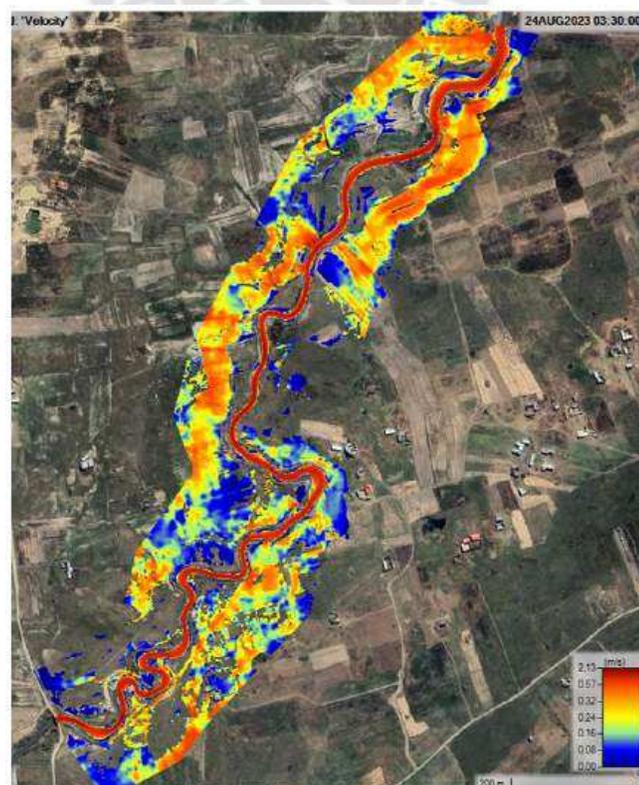


Figura 62. Resultado de las velocidades de flujo ($Tr= 100$ años)

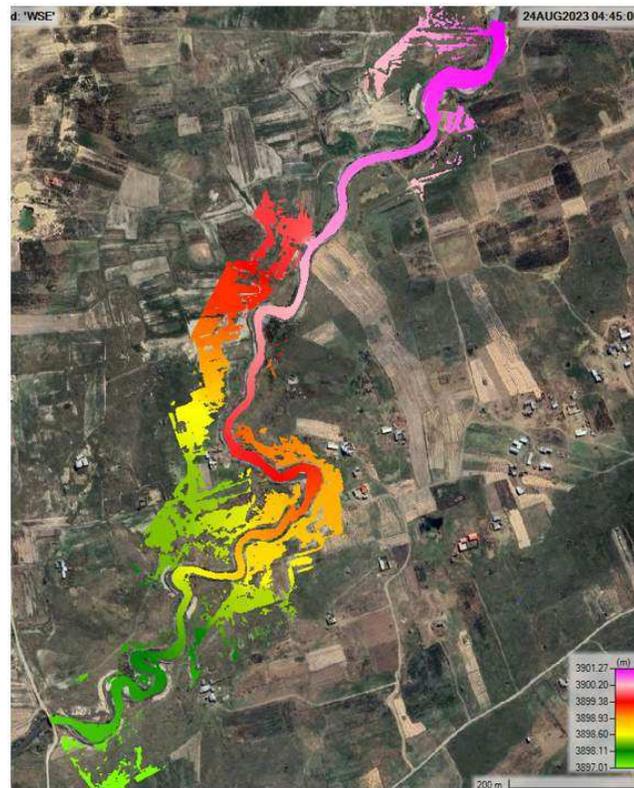


Figura 63. Resultado de las niveles de flujo ($T_r=100$ años)

Además, es importante mencionar que los parámetros del modelo determinados anteriormente resultaron ser los adecuados, lo que evito errores comunes durante la corrida del plan de simulación, dando como resultado una modelación estable (Figura 64).

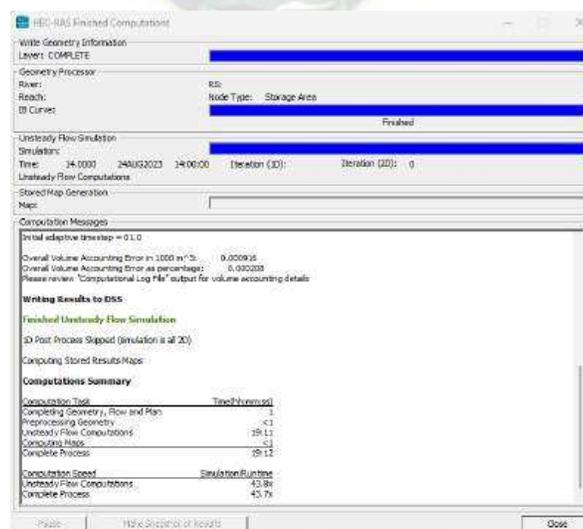


Figura 64. Captura del plan de simulación finalizado

6.10 Identificación de tramos críticos de desbordamiento.

El criterio para identificar tramos propensos a desbordamientos e inundaciones se basa en los resultados obtenidos de la de la modelación de eventos hidrológicos extremos. Estos resultados muestran que los desbordamientos tienden a concentrarse en tramos específicos, donde el nivel del agua supera los bordes del cauce. Para fines prácticos se denominarán tramos críticos.

A partir de la modelación hidrodinámica para un evento hidrológico y régimen de flujo no permanente con periodo de retorno de 100 años, se identificaron 19 tramos críticos de desborde del cauce del Río Seco. Estos tramos de desbordamiento provocarían inundación afectando a viviendas, áreas de cultivos y pastoreo adyacentes. En la Tabla 31 se detalla la localización de los tramos identificados.

N°	Progresivo Inicio	Progresivo Final	Descripción
1	0+010	0+025	Margen izquierdo
2	0+020	0+062	Margen derecho
3	0+090	0+180	Margen derecho
4	0+154	0+214	Margen izquierdo
5	0+195	0+242	Margen izquierdo
6	0+510	0+578	Margen derecho
7	0+720	0+743	Margen derecho
8	0+892	0+987	Margen derecho
9	0+970	1+031	Margen izquierdo
10	1+073	1+112	Margen izquierdo
11	1+140	1+165	Margen izquierdo
12	1+190	1+217	Margen izquierdo
13	1+380	1+415	Margen derecho
14	1+448	1+463	Margen derecho
15	1+487	1+509	Margen derecho
16	1+555	1+584	Margen izquierdo
17	1+690	1+722	Margen derecho
18	1+727	1+778	Margen derecho
19	1+810	1+875	Margen izquierdo

Tabla 31. Tramos críticos de desbordamiento

En la siguiente Figura 65 se muestran algunos de los puntos de críticos desbordamiento.

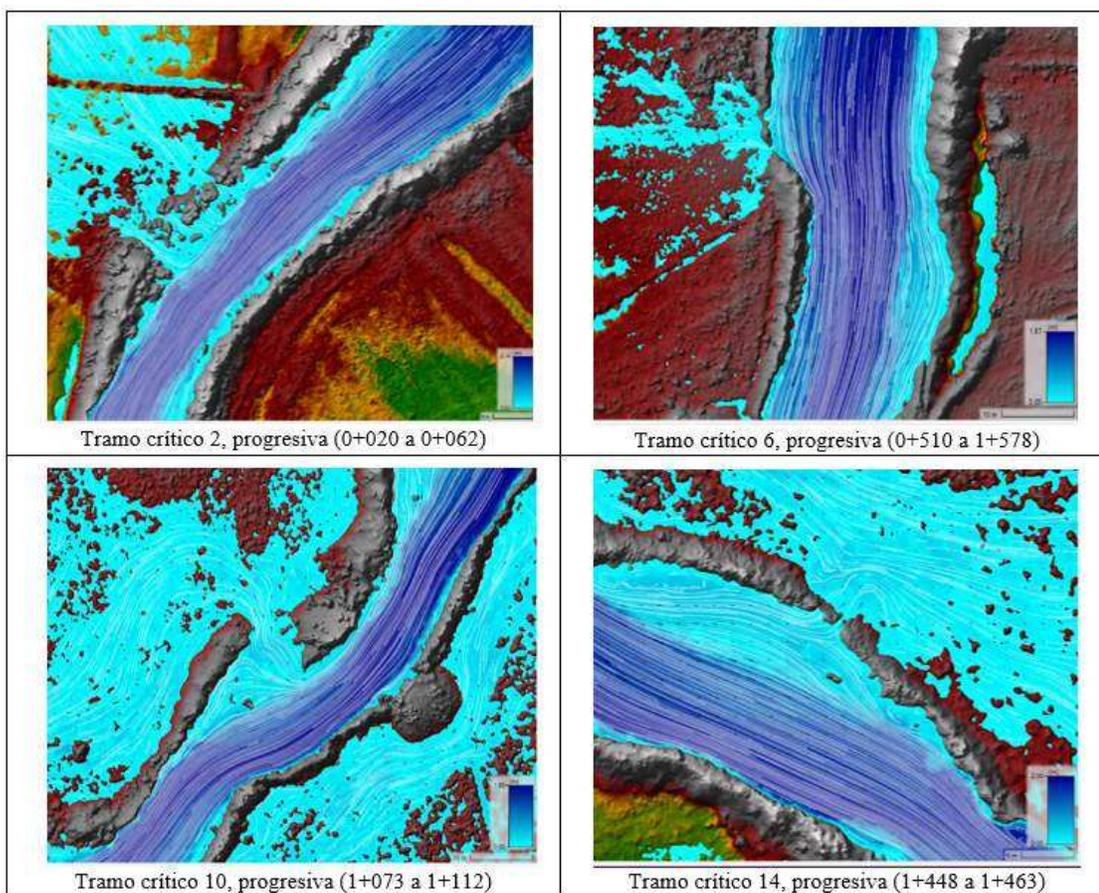


Figura 65. Tramos críticos de desbordamiento del río

CAPÍTULO 7: OBRAS DE PROTECCIÓN.

En este apartado, tiene por objetivo es el diseño hidráulico y estructural de una medida de protección de mitigación el riesgo de desbordamientos e inundaciones. Como medida estructural de mitigación en los tramos críticos identificados, se propone el muro de gavión como defensivo en sectores vulnerables, como aquellos afectados por erosiones constantes e inundaciones recurrentes. Los gaviones representan una de las mejores opciones para la protección de márgenes fluviales, ya que ofrecen numerosas ventajas, tales como una estructura flexible compuesta por una pared de malla hexagonal, bajo impacto ambiental, y facilidad de construcción e implementación.

7.1 Predimensionamiento del muro de gavión

El prediseño implica definir la altura y la base del muro de gavión, así como calcular el empotramiento mínimo requerido según las características del lugar. La literatura técnica ofrece criterios para llevar a cabo un predimensionamiento. Según el manual técnico de Maccaferri (2008), es importante establecer una altura mínima del gavión en función del objetivo que se busca con la estructura de protección.

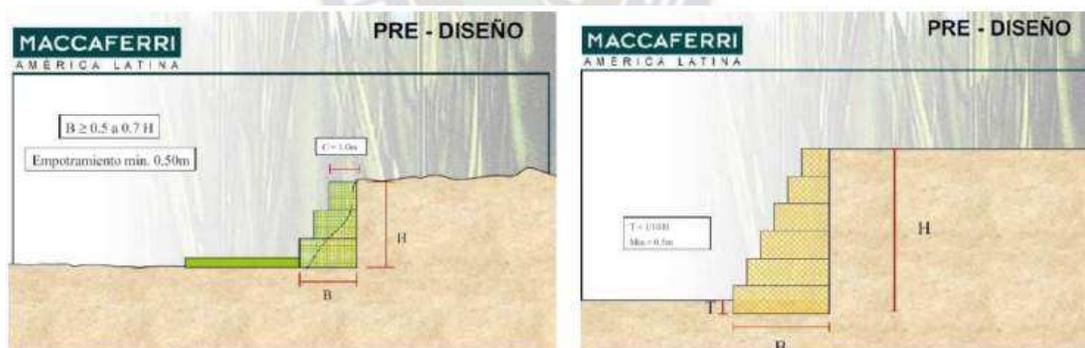


Figura 66. Parámetros para el predimensionamiento de muro de gaviones
Fuente: Extraído del Manual Técnico de obras de contención, Maccaferri (2008).

En la Figura 67 se presentan la configuraciones del muro de gaviones propuestos como medida estructural, establecida de acuerdo con la ecuación (13). Se consideraron dos tipos de configuraciones: la primera con una altura de 3 metros y una base de 2 metros, y la segunda con una altura de 3.5 metros y una base de 2.5 metros.

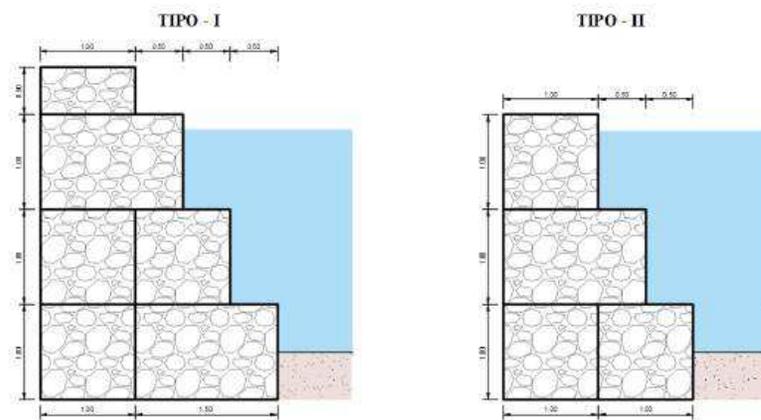


Figura 67. Configuración de los tipos de muro de gaviones

Para el predimensionamiento, se utilizan los resultados obtenidos de las simulaciones con el modelo HEC-RAS para el periodo de retorno analizado. Se identificaron 19 tramos críticos en los cuales se observan desbordamientos e inundaciones. La siguiente Tabla 32 resume el prediseño de cada gavión en función de la altura del muro de gavión.

N°	Tipo	Longitud m	Altura del muro de gavión [m]	Profundidad del flujo Tr=100 años [m]
1	1	25	3.0	1.69
2	1	42	3.0	1.68
3	1	40	3.0	1.74
4	1	60	3.0	1.82
5	1	47	3.0	1.87
6	2	68	3.5	2.22
7	2	23	3.5	2.01
8	2	95	3.5	2.00
9	2	61	3.5	1.96
10	2	39	3.5	1.94
11	2	25	3.5	1.97
12	2	27	3.5	2.01
13	2	35	3.5	2.00
14	2	15	3.5	2.01
15	2	22	3.5	2.00
16	2	29	3.5	2.07
17	2	32	3.5	2.08
18	2	51	3.5	2.11
19	2	65	3.5	2.14

Tabla 32. Resumen del predimensionamiento del muro de gavión

7.2 Diseño hidráulico.

Para el diseño hidráulico del muro de gavión, son necesarios los parámetros hidráulicos y geométricos de los tramos críticos. Estos parámetros se analizan para determinar la configuración del muro que mejor se adecue a los requerimientos, además de considerar la profundidad de socavación y las propiedades granulométricas del lecho del río.

7.2.1 Propiedades granulométricas

La información granulométrica utilizada proviene del trabajo de Pérez (2015), en el que se realizaron diferentes ensayos de laboratorio del lecho del Río Seco, ubicado aguas arriba y próximo al área de estudio del presente proyecto. Se consideraron los resultados obtenidos a una profundidad de 1.50 m. La curva granulométrica correspondiente se presenta en la Figura 68.



Figura 68. Información granulométrica

Fuente: Elaborado a partir de los ensayos de laboratorio, Flores (2015).

7.2.2 Parámetros hidráulicos y geométricos.

Los parámetros hidráulicos y geométricos se obtienen de las secciones transversales trazadas al centro de los tramos críticos, considerando que son perpendiculares al eje del río y a los resultados de la modelación con HEC-RAS para un evento de crecida con un período de retorno de 100 años.

En la Figura 69 se muestra la ubicación en planta de los muros de gavión en los tramos críticos identificados. A partir de estas secciones transversales, se obtienen parámetros hidráulicos y geométricos, tales como la profundidad del flujo, el espejo de agua, el área mojada, el número de Froude y el régimen del flujo.

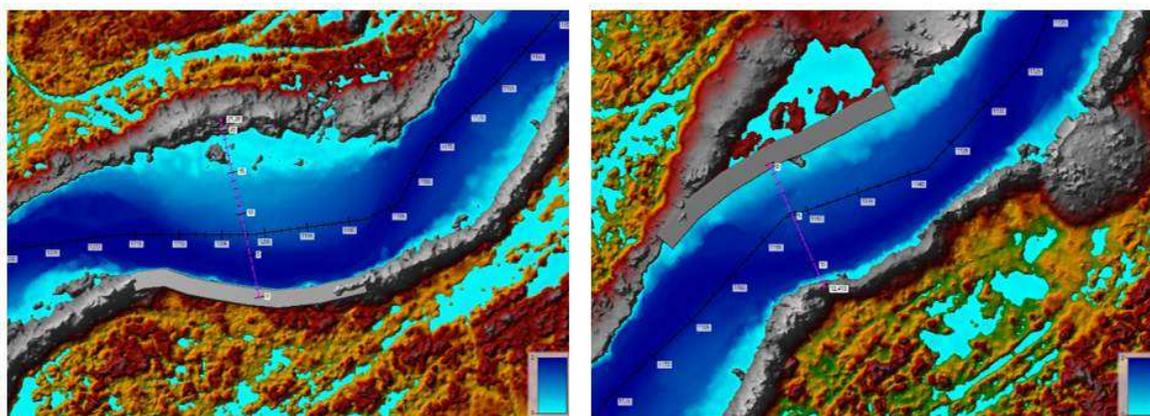


Figura 69. Disposición de los muros de gaviones

En la Tabla 33 se presenta un resumen de los parámetros hidráulicos y geométricos correspondientes a cada tramo crítico.

N°	Velocidad en [m/s]	Nivel tirante de agua [msnm]	Cota lecho de agua [msnm]	Profundidad del flujo [m]	Ancho del río [m]	Área mojada m ²	N° de Froude	Régimen de flujo
1	1.11	3901.26	3899.57	1.69	19.65	25.71	0.21	Subcrítico
2	1.40	3901.24	3899.54	1.70	18.54	21.12	0.30	Subcrítico
3	1.45	3901.11	3899.36	1.75	29.08	24.88	0.35	Subcrítico
4	1.42	3901.04	3899.22	1.82	25.89	31.20	0.36	Subcrítico
5	2.07	3901.00	3899.12	1.88	17.42	20.87	0.34	Subcrítico
6	2.10	3900.42	3898.20	2.22	10.57	15.18	0.34	Subcrítico
7	2.11	3900.06	3898.02	2.04	11.69	14.84	0.38	Subcrítico
8	1.43	3899.59	3897.58	2.02	16.43	19.35	0.31	Subcrítico
9	1.58	3899.47	3897.50	1.97	14.55	18.06	0.27	Subcrítico
10	1.60	3899.29	3897.34	1.95	22.36	22.20	0.40	Subcrítico
11	1.85	3899.17	3897.19	1.98	11.40	16.40	0.41	Subcrítico
12	1.34	3899.08	3897.07	2.01	18.28	19.65	0.39	Subcrítico
13	1.60	3898.64	3896.63	2.01	21.13	19.51	0.44	Subcrítico
14	1.99	3898.49	3896.49	2.00	11.10	16.35	0.35	Subcrítico
15	1.91	3898.38	3896.38	2.00	10.65	15.78	0.32	Subcrítico
16	1.75	3898.12	3896.05	2.07	13.86	18.60	0.26	Subcrítico
17	1.83	3897.97	3895.89	2.08	18.75	17.45	0.39	Subcrítico
18	1.65	3897.88	3895.77	2.11	18.75	19.42	0.40	Subcrítico
19	1.14	3897.66	3895.52	2.14	28.59	32.02	0.31	Subcrítico

Tabla 33. Resumen de los parámetros hidráulicos de los tramos críticos

7.2.3 Cálculo de la socavación general

Para la determinación de la socavación general, uno de los métodos más reconocidos es el de **Lischenko y Levediev**, ya que considera tanto la geometría del canal como las propiedades granulométricas del material del fondo del lecho.

A continuación, se presenta la memoria de cálculo de la socavación general del tramo crítico 1, la cual se basó en la información previamente desarrollada.

SOCAVACION GENERAL GAV-01
MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV

Nombre del río o cauce:	Seco
Gavión analizado:	Tipo II
Nro de gavión:	1

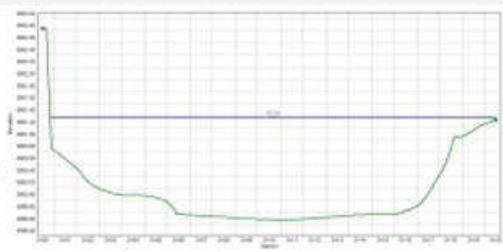
Propiedades geométricas hidráulicas

$y_0 = 1.69$ m Profundidad inicial
 $Qd = 50.00$ m³/s Caudal de diseño
 $B_e = 19.65$ m Ancho efectivo
 $A = 25.71$ m² Área hidráulica
 $\mu = 1.00$ Coeficiente de contracción lateral

Parámetros de cálculo

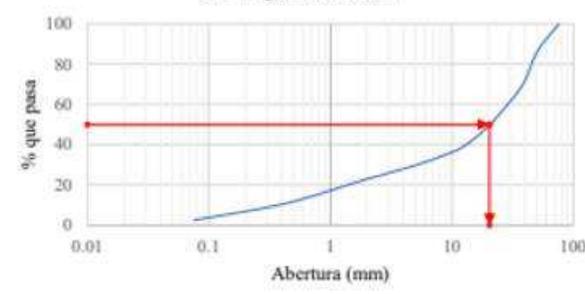
$$d_m = \frac{A}{B_e} \rightarrow d_m = 1.31 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{Qd}{d_m^{5/3} \cdot B_e \cdot \mu} \rightarrow \alpha = 1.63$$



Propiedades del material de arrastre

Curva granulométrica



Procedencia : Lecho del Río Seco
 Profundidad: 1.60 metros

Clasificación

ASTM D 2484 -SUCS:
 GP (Grava pobremente gradada)

AASHTO M-145
 A-1a (0)

Diametro medio D₅₀
 $D_{50} = D_m = 20.39 \text{ mm}$

Coefficientes adaptados - Suelos Granulares

Se obtiene los valores de z a partir de la tabla xx, a partir del diametro medio $D_{50} = 20.39 \text{ mm} \rightarrow z = 0.32 \rightarrow \frac{1}{1+z} = 0.76$

Se obtiene los valores de β a partir de la tabla xx, a partir del periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia. $T_r = 100 \text{ años} \rightarrow p(\%) = 1.0\% \rightarrow \beta = 1.00$

Cálculo de la socavación general para suelos granulares $y_s = \left(\frac{\alpha \cdot y_0^{5/3}}{0.68 \cdot D_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+z}} \rightarrow y_s = 1.98 \text{ m}$

Socavación neta $d_s = y_0 - y_s \rightarrow d_s = 0.29 \text{ m}$

Los resultados de los cálculos de la socavación general se resumen en la siguiente Tabla 34.

Nº	Profundidad media [dm]	Coficiente α	Diámetro medio [D ₅₀]	Factor z	Coficiente β	Socavación general [ys]	Socavación neta [ds]
1	1.31	1.15	20.39	0.76	1.00	1.53	0.29
2	1.14	1.54	20.39	0.76	1.00	1.92	0.22
3	0.86	1.58	20.39	0.76	1.00	2.03	0.28
4	1.21	1.00	20.39	0.76	1.00	1.51	0.31
5	1.20	1.51	20.39	0.76	1.00	2.14	0.26
6	1.44	1.84	20.39	0.76	1.00	3.08	0.86
7	1.27	2.04	20.39	0.76	1.00	2.99	0.95
8	1.18	1.64	20.39	0.76	1.00	2.51	0.49
9	1.24	1.70	20.39	0.76	1.00	2.49	0.52
10	0.99	1.61	20.39	0.76	1.00	2.36	0.41
11	1.44	1.70	20.39	0.76	1.00	2.51	0.53
12	1.07	1.72	20.39	0.76	1.00	2.58	0.57
13	0.92	1.92	20.39	0.76	1.00	2.80	0.79
14	1.47	1.68	20.39	0.76	1.00	2.52	0.52
15	1.48	1.73	20.39	0.76	1.00	2.58	0.58
16	1.34	1.57	20.39	0.76	1.00	2.50	0.43
17	0.93	2.13	20.39	0.76	1.00	3.17	1.09
18	1.04	1.79	20.39	0.76	1.00	2.82	0.71
19	1.12	1.03	20.39	0.76	1.00	1.89	0.25

Tabla 34. Resumen de parámetros hidráulicos

De los resultados de la Tabla 34 se puede observar que las estimaciones de socavación presentan variaciones significativas, debido a los cambios propiedades hidráulicas, geométricas y granulométricas de las secciones analizadas. Estos valores varían desde 0.22 m hasta 1.09 m en términos de socavación neta, considerando el valor mas desfavorable como socavacion promedio.

7.3 Diseño y análisis estructural.

El diseño estructural consiste en garantizar la estabilidad del muro de gaviones, realizando una verificación de las posibles fallas que podrían producirse. Esto incluye la verificación del fallo de volteo, desplazamiento, presión en la base y el análisis interno de la estructura. Este análisis se lleva a cabo considerando el escenario de mayor riesgo para la falla, que ocurre cuando se combina el empuje activo del suelo con el empuje hidrostático del agua.

A continuación, se presenta la memoria de cálculo del análisis y diseño estructural del muro para el tramo crítico 1.

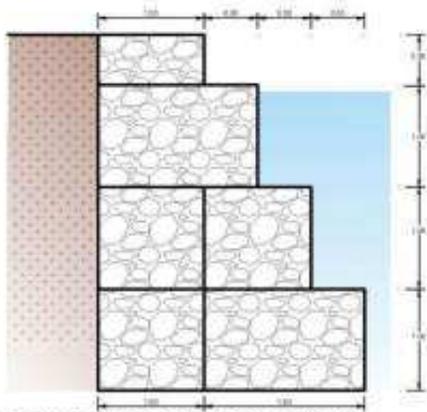
DISEÑO DE MURO DE GAVIONES

PROYECTO :
 UBICACIÓN :

DATOS PARA EL DISEÑO:

- Peso específico del suelo	: $\gamma_s = 2.24 \text{ tn/m}^3$	- Peso específico del agua	: $\gamma_a = 1.00 \text{ tn/m}^3$
- Peso específico del gavión	: $\gamma_r = 2.70 \text{ tn/m}^3$	- Tirante de agua	: $y_a = 2.65 \text{ m}$
- Ángulo de fricción	: $\phi = 40.00^\circ$		
- Capacidad portante	: $\sigma_r = 1.50 \text{ kg/cm}^2$		

GEOMETRÍA DEL MURO:



Altura de cada bloque	: $h_B = 1.00 \text{ m}$
Ancho de cada bloque	: $b_B = 1.00 \text{ m}$
Altura total del muro	: $H_T = 3.50 \text{ m}$

Predimensionado de la base: $B = \frac{1}{2}(1 + H_T)$

Dimensión de la base	: $A_B = 2.25 \text{ m}$
Adoptamos una base de	: $B = 2.50 \text{ m}$

CÁLCULO DEL EMPUJE ACTIVO:

- EMPUJE ACTIVO:

Coefficiente de empuje activo:

$$K_a = \tan\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)^2 = 0.217$$

Cálculo del empuje activo del suelo

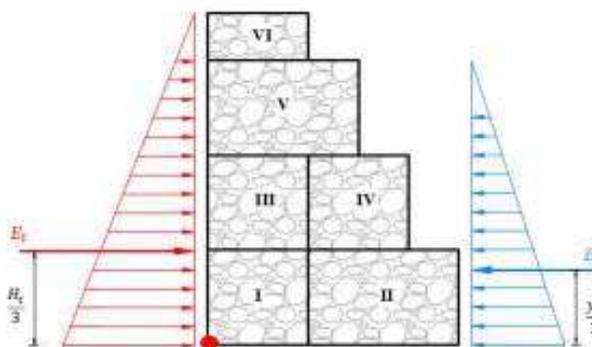
$$E_T = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma_s \cdot H_T^2 = 2.983 \text{ tn}$$

Altura de aplicación del empuje activo:

$$y = \frac{H_T}{3} = 1.167 \text{ m}$$

Cálculo del empuje del hidrostático:

$$E_A = \frac{1}{2} \cdot \gamma_a \cdot y_a^2 = 3.511 \text{ tn}$$



Altura de aplicación del empuje hidrostático:

$$y_a = \frac{y_a}{3} = 0.883 \text{ m}$$

ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD:

- CÁLCULO DEL PESO TOTAL Y MOMENTO PRODUCIDO POR EL MURO GAVION:

GAV.	TIPO	ÁREA (m ²)	PESO UNITARIO	PESO PARCIAL	BRAZO X (m)	MOMENTO (tn-m)
I	Gavión	1.000	2.70 tn/m ³	2.70 tn/m	0.500	1.3500
II	Gavión	1.500	2.70 tn/m ³	4.05 tn/m	1.250	5.0625
III	Gavión	1.000	2.70 tn/m ³	2.70 tn/m	0.500	1.3500
IV	Gavión	1.000	2.70 tn/m ³	2.70 tn/m	1.500	4.0500
V	Gavión	1.500	2.70 tn/m ³	4.05 tn/m	0.750	3.0375
VI	Gavión	0.500	2.70 tn/m ³	1.35 tn/m	0.500	0.6750
			Σ =	17.55 tn/m	Σ =	15.525

$P = 17.55 \text{ tn}$

$M_r = 15.5 \text{ tn-m}$

- CÁLCULO DE LOS MOMENTOS ACTUANTES EN EL MURO DE GAVION

Momento producido por el empuje activo: $M_A = E_T \cdot Y$ $M_A = 3.481 \text{ tn-m}$

Momento producido por el empuje hidrostático: $M_H = E_A \cdot Y_A$ $M_H = 3.102 \text{ tn-m}$

- VERIFICACIÓN POR DESLIZAMIENTO: FSD = 1.50

$\frac{f \cdot P}{E_A - E_H} \geq \text{FSD}$; donde: $f = \text{tg}\phi \rightarrow f = 0.839$ Coeficiente de fricción suelo - estructura

$\text{FSD} = 2.27 > 1.50$... Cumple

- VERIFICACIÓN POR VOLTEO: FSD = 2.00

$\frac{M_r + M_H}{M_A} \geq \text{FSV}$ $\text{FSV} = 3.57 > 2.00$... Cumple

- VERIFICACIÓN DE PRESIONES SOBRE EL TERRENO:

Punto de aplicación de la fuerza resultante:

$X_0 = \frac{M_r - M_A - M_H}{P} = 0.91 \text{ m}$

Excentricidad de la fuerza resultante:

$e = \frac{B}{2} - X_0$ $e = 0.344 \text{ m}$ Se debe cumplir que: $e < \frac{B}{6} = 0.42 \text{ m}$... Ok: cae dentro del tercio central

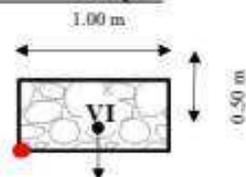
Verificamos las presiones de contacto entre el suelo - estructura

$\sigma = \frac{P}{B} \left[1 \pm \frac{6 \cdot e}{B} \right]$ $\sigma_1 = 1.28 \text{ kg/cm}^2 < \sigma_s = 1.50 \text{ kg/cm}^2$... Cumple

$\sigma_2 = 0.12 \text{ kg/cm}^2 < \sigma_s = 1.50 \text{ kg/cm}^2$... Cumple

VERIFICACIÓN ENTRE BLOQUE Y BLOQUE:

- PRIMER BLOQUE:



Fuerzas estabilizantes:

Peso (VI) = 1.35 tn

Momento (VI) = 0.675 tn-m

Fuerzas desestabilizantes:

$$E_A = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma_S \cdot H_{IV}^2 = 0.061 \text{ tn}$$

$$M_A = E_A \cdot Y = 0.010 \text{ tn-m}$$

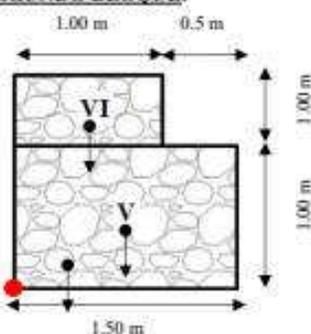
Verificación por deslizamiento: FSD = 1.50

$$\frac{f \cdot P}{E_A} \geq FSD \quad \boxed{FSD = 18.61 > 1.50}$$

Verificación por volteo: FSV = 2.00

$$\frac{M_r}{M_A} \geq FSV \quad \boxed{FSV = 66.52 > 2.00}$$

- SEGUNDO BLOQUE:



Fuerzas estabilizantes:

Peso (VI) = 1.35 tn

Momento (VI) = 0.68 tn-m

Peso (V) = 5.55 tn

Momento (V) = 4.16 tn-m

$\Sigma = 6.90 \text{ tn}$

$\Sigma = 4.84 \text{ tn-m}$

$$E_H = \frac{1}{2} \cdot \gamma_a \cdot H_a^2 = 0.21 \text{ tn}$$

$$M_A = E_A \cdot \frac{H_a}{3} = 0.046 \text{ tn-m}$$

Fuerzas desestabilizantes:

$$E_A = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma_S \cdot H_T^2 = 0.974 \text{ tn}$$

$$M_A = E_A \cdot Y = 0.649 \text{ tn-m}$$

Verificación por deslizamiento: FSD = 1.50

$$\frac{f \cdot P}{E_A - E_H} \geq FSD \quad f = 0.839$$

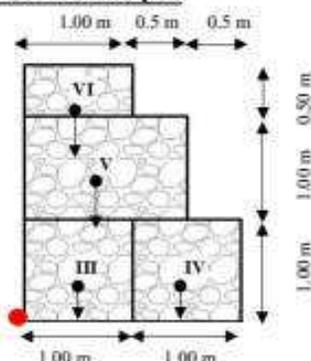
$$\boxed{FSD = 4.88 > 1.50} \quad \dots \text{ Conforme}$$

Verificación por volteo: FSV = 2.00

$$\frac{M_r + M_H}{M_A} \geq FSV$$

$$\boxed{FSV = 7.38 > 2.00} \quad \dots \text{ Conforme}$$

SEGUNDO BLOQUE:



Fuerzas estabilizantes:

Peso (III) = 3.70 tn

Momento (III) = 1.85 tn-m

Peso (IV) = 3.70 tn

Momento (IV) = 5.55 tn-m

Peso (V) = 5.55 tn

Momento (V) = 4.16 tn-m

Peso (VI) = 1.35 tn

Momento (VI) = 0.68 tn-m

$\Sigma = 14.30 \text{ tn}$

$\Sigma = 12.24 \text{ tn-m}$

$$E_H = \frac{1}{2} \cdot \gamma_a \cdot H_a^2 = 0.50 \text{ tn}$$

$$M_A = E_A \cdot \frac{H_a}{3} = 0.28 \text{ tn-m}$$

Fuerzas desestabilizantes:

$$E_A = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma_S \cdot H_T^2 = 1.522 \text{ tn}$$

$$M_A = E_A \cdot Y = 1.268 \text{ tn-m}$$

Verificación por deslizamiento: FSD = 1.50

$$\frac{f \cdot P}{E_A - E_H} \geq FSD \quad f = 0.839$$

$$\boxed{FSD = 5.93 > 1.50} \quad \dots \text{ Conforme}$$

Verificación por volteo: FSV = 2.00

$$\frac{M_r + M_H}{M_A} \geq FSV$$

$$\boxed{FSV = 9.43 > 2.00} \quad \dots \text{ Conforme}$$

7.4 Emplazamiento de los muros gaviones.

Con base en los diseños hidráulico y estructural, se determinó la configuración adecuada del muro de gavión planteada en el predimensionamiento. El emplazamiento del muro debe realizarse considerando la socavación promedio determinada, asegurando que se ubique por debajo de este perfil de socavación de profundidad 1.09 m . Esta ubicación es necesaria para evitar que la estructura se vea afectada por los procesos de erosión y socavación del lecho del río.

En la Figura 70 se las muestra secciones transversales y en la Figura 71 una vista en planta del emplazamiento del muro de gavión para el tramo de crítico 1.

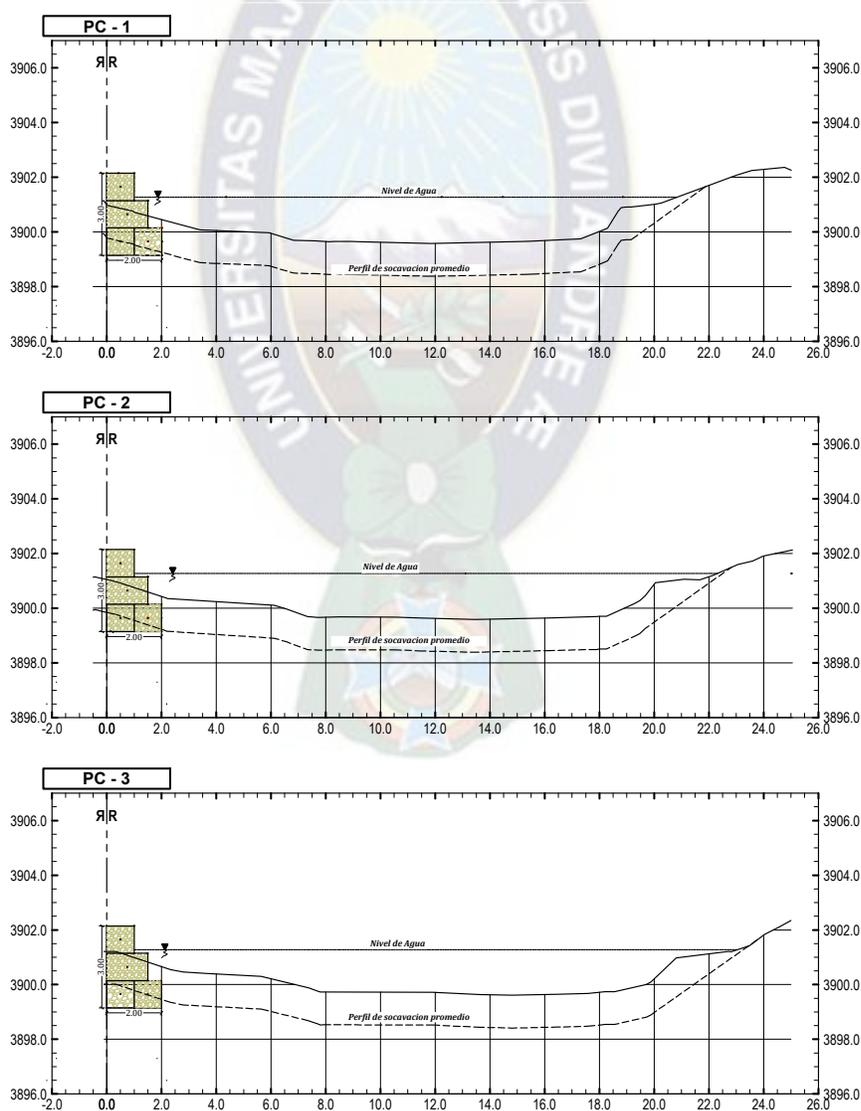


Figura 70. Secciones transversales del emplazamiento del muro de gavión

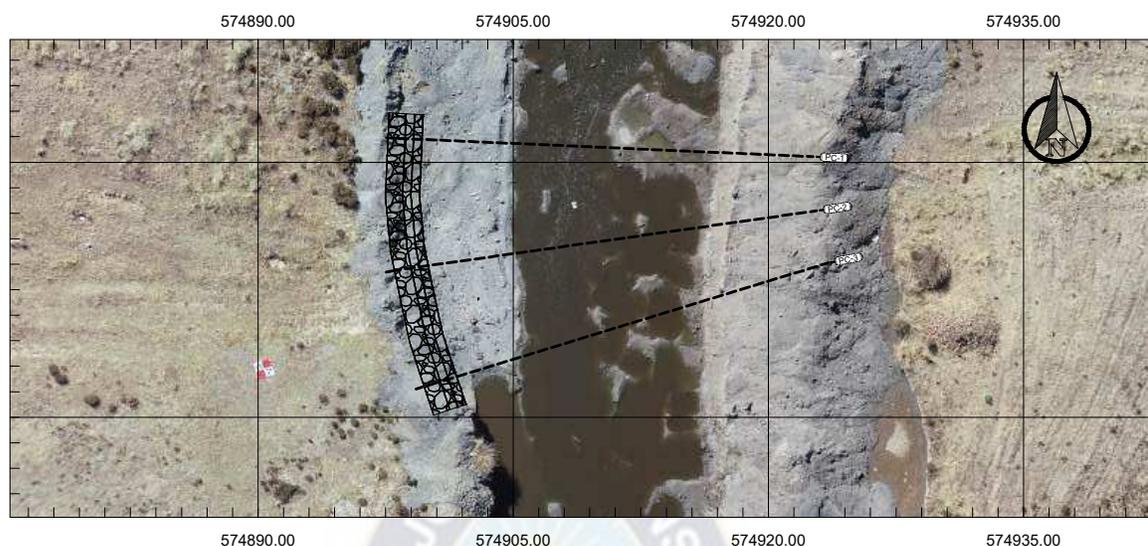


Figura 71. Vista en planta del emplazamiento del muro de gavión

N	Tipo	Progr. inicio	Progr. final	Longitud muro [m]	Base muro [m]	Altura muro [m]	Prof. del flujo [m]	Socavación muro [m]
1	1	0+010	0+025	25	2.5	3.0	1.69	1.09
2	1	0+020	0+062	42	2.5	3.0	1.68	1.09
3	1	0+090	0+180	40	2.5	3.0	1.74	1.09
4	1	0+154	0+214	60	2.5	3.0	1.82	1.09
5	1	0+195	0+242	47	2.5	3.0	1.87	1.09
6	2	0+510	0+578	68	3.0	3.5	2.22	1.09
7	2	0+720	0+743	23	3.0	3.5	2.01	1.09
8	2	0+892	0+987	95	3.0	3.5	2.00	1.09
9	2	0+970	1+031	61	3.0	3.5	1.96	1.09
10	2	1+073	1+112	39	3.0	3.5	1.94	1.09
11	2	1+140	1+165	25	3.0	3.5	1.97	1.09
12	2	1+190	1+217	27	3.0	3.5	2.01	1.09
13	2	1+380	1+415	35	3.0	3.5	2.00	1.09
14	2	1+448	1+463	15	3.0	3.5	2.01	1.09
15	2	1+487	1+509	22	3.0	3.5	2.00	1.09
16	2	1+555	1+584	29	3.0	3.5	2.07	1.09
17	2	1+690	1+722	32	3.0	3.5	2.08	1.09
18	2	1+727	1+778	51	3.0	3.5	2.11	1.09
19	2	1+810	1+875	65	3.0	3.5	2.14	1.09

Tabla 35. Detalles de las obras y sus características

En la Tabla 35 se presenta la información sobre el tipo de configuración del muro de gaviones utilizado en cada uno de los tramos críticos identificados en el análisis. Esta información considera aspectos como la profundidad promedio de socavación y la profundidad de flujo para un periodo de retorno de 100 años. Además, en la Figura 73 correspondiente se muestra la ubicación de los muros de gaviones.

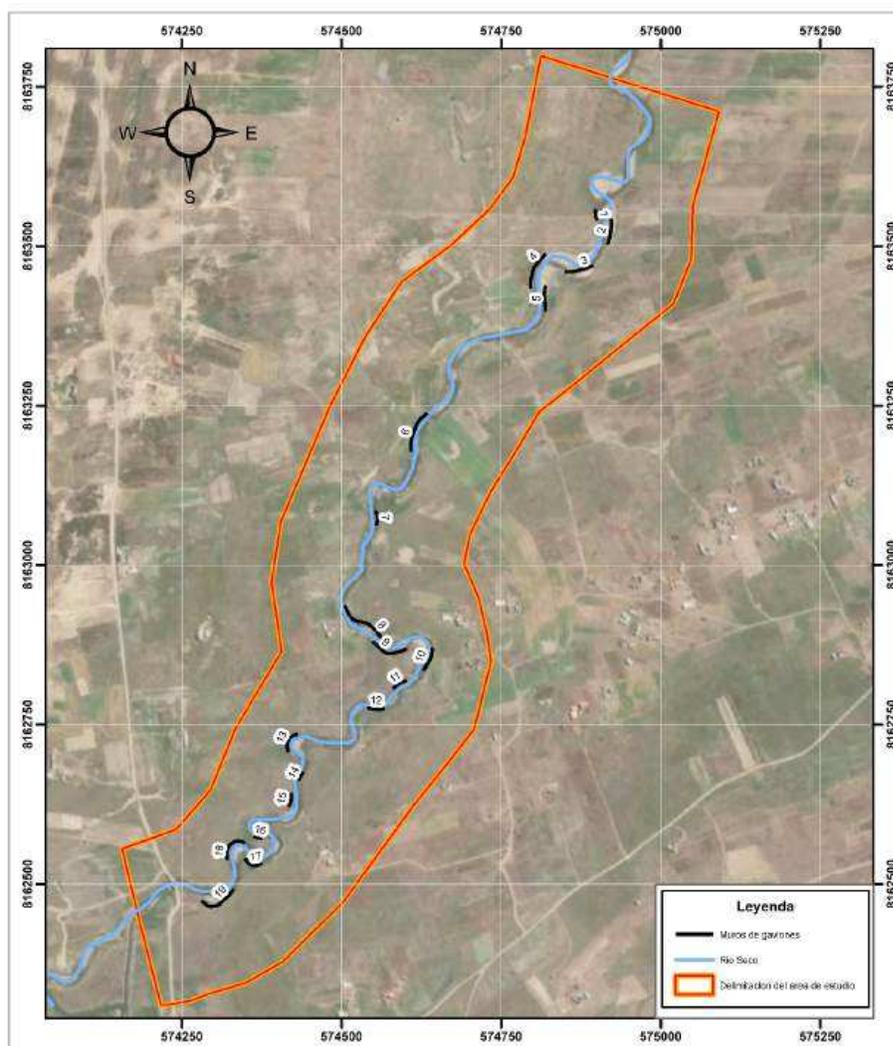


Figura 72. Simulación con obras de protección

7.5 Simulación con obras de protección

La geometría de la obra de protección se generó en el software Civil 3D mediante la herramienta de **corredor**, y a partir de esta se creó su superficie para cada uno de los tramos críticos analizados en el apartado del emplazamiento de los muros de gaviones. Finalmente, dicha superficie fue exportada como un Modelo Digital de Elevación (en formato .tif), con

una resolución de 5.0 cm. El módulo RAS Mapper permite la modificación del modelo del terreno a partir de la integración de diferentes DEMs. Para la simulación con obras, se integraron tanto el DEM generado mediante fotogrametría como el DEM correspondiente a las obras de protección propuesta por muro de gaviones.

En la Figura 73 se presenta el Tramo Crítico 1, donde se observa la modificación del terreno como resultado de la implementación de las obras de protección. El gráfico superior muestra el perfil del terreno modificado, mientras que la imagen inferior corresponde a la visualización en el entorno de RAS Mapper.

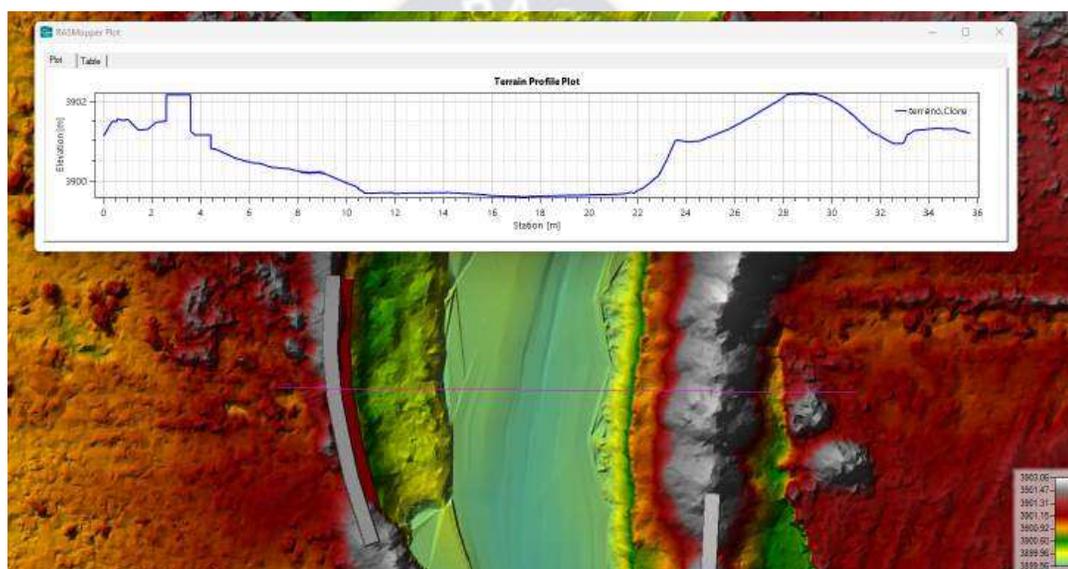


Figura 73. Simulación con obras de protección

Para la simulación de un escenario de crecida con un periodo de retorno de 100 años, se establecieron los parámetros del modelo (Tabla 36). Para las condiciones de borde de entrada, se empleó el hidrograma de crecida correspondiente a este periodo (Figura 55), y para la condición de borde de salida, se empleó la curva de descarga calibrada (Figura 39).

Parámetro	Valor	Unidades
Tamaño de la malla $\Delta x/\Delta y$ (llanura de inundación)	4.0	m
Tamaño de la malla $\Delta x/\Delta y$ (cauce principal)	0.5	m
Intervalo de cómputo Δt	1.0	s
Coefficiente de rugosidad Manning n	0.0436	
Periodo de calentamiento del modelo	2.0	hr
Altura de agua inicial (condición inicial)	1.8	m
Caudal de crecida para un $Tr=100$ años	35.49	m^3/s

Tabla 36. Parámetros de simulación con obras de protección

Los resultados obtenidos de la simulación bidimensional para un régimen de flujo no permanente, basados en los parámetros del modelo descritos y las condiciones de borde establecidas, muestran que los muros de gaviones lograron controlar el desbordamiento del río y la inundación en las planicies del área de estudio, alcanzando profundidades de flujo de 2.24 metros (Figura 74) y velocidades máximas de 2.56 m/s (Figura 75), lo que indicaría que las velocidades altas podrían ocasionar la erosión del cauce.

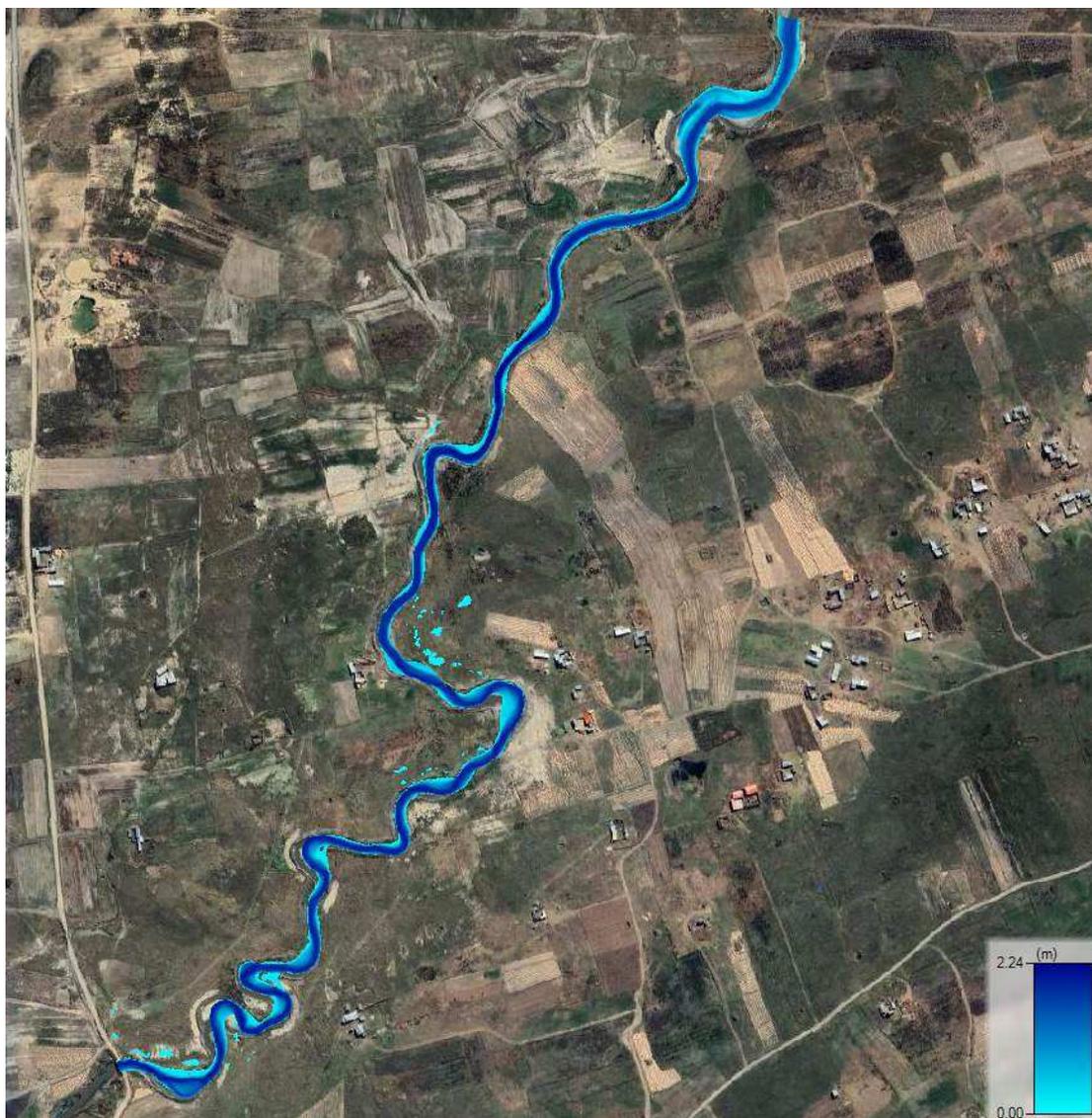


Figura 74. Simulación con obras de protección

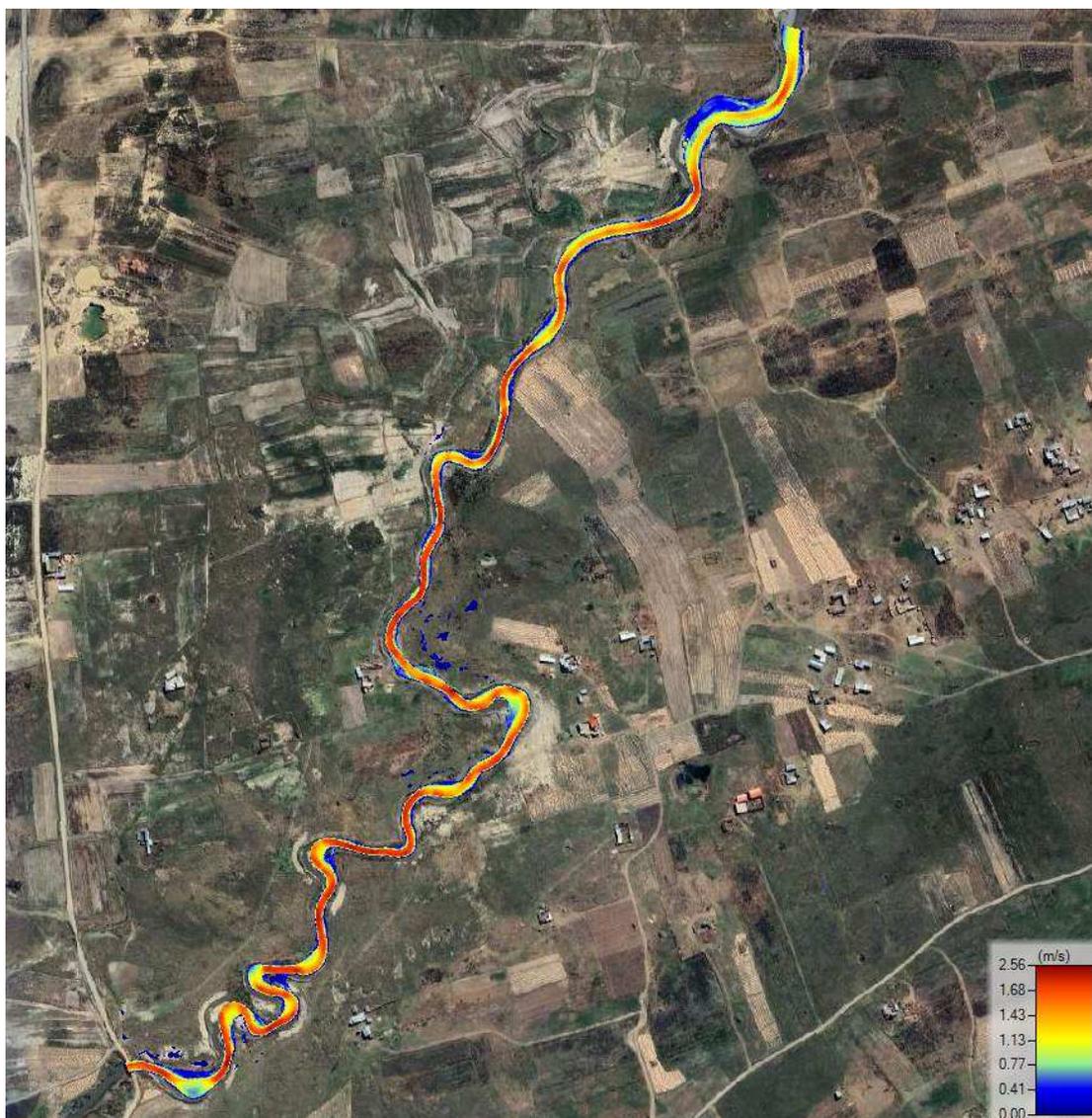


Figura 75. Simulación con obras de protección

7.6 Presupuesto del muro de gaviones

El presupuesto elaborado consideró los precios unitarios de la base de datos del Gobierno Autónomo Municipal de Viacha de la gestión 2024, los cuales se presentan a continuación en la Figura 76. En este presupuesto, se detallan los costos asociados a diversos ítems del proyecto, incluyendo obras preliminares, movimiento de tierras, obras de drenaje y obras complementarias. El presupuesto general es de Bs. 3,595,948.55 (Tres millones noventa y cinco mil novecientos cuarenta y ocho con 55/100).

PROYECTO: MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RIO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA

LOCALIZACIÓN: COMUNIDAD MAMANI
 DISTRITO: VIACHA

N° ITEM	DESCRIPCIÓN DEL ÍTEM	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO UNITARIO LITERAL	PRECIO TOTAL (NUMERAL)
OBRAS PRELIMINARES						
1	INST. DE FAENAS D/OFICINA, DEPOSITO DE MATERIALES Y MAQUINARIA	GLB	1.00	16,401.63	Dieciséis Mil Cuatrocientos Un 63/100	16,401.63
MOVIMIENTO DE TIERRAS						
2	REPLANTEO Y TRAZADO DE EJE	M	791.00	3.80	Tres 80/100	3,005.80
3	EXCAVACION CON RETROEXCAVADORA	M3	2,474.11	33.08	Treinta y Tres 09/100	81,868.30
4	CONFORMACION DE CAPA BASE (S/PROVISION)	M3	240.64	39.83	Treinta y Nueve 83/100	9,584.70
5	RELLENO Y COMPACTADO CON TIERRA COMUN	M3	744.69	74.27	Setenta y Cuatro 27/100	55,308.41
OBRAS DE DRENAJE						
6	ARMADO DE GAVIONES TIPO CAJA 1X1X2 M C/DIAFRAGMA	M3	3,967.50	859.64	Ochocientos Cincuenta y Nueve 64/100	3,410,621.70
OBRAS COMPLEMENTARIAS						
7	RETIRO DE ESCOMBROS C/CARGUO	M3	274.47	69.90	Setenta y Nueve 90/100	19,158.01

PRECIO TOTAL (Numeral) EN Bs.
 PRECIO TOTAL (Literal) EN Bs.

3,595,948.55
Tres Millones Quinientos Noventa y Cinco Mil Novecientos Cuarenta y Ocho 55/100

Figura 76. Presupuesto general de las obras protección



CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

8.1 Conclusiones

En este proyecto de grado, se modeló el comportamiento hidrodinámico de un tramo del Río Seco mediante el uso de fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados e información hidrométrica disponible. La importancia del uso de los drones en la obtención de una superficie detallada y precisa combinada con datos batimétricos e información de caudales y niveles de flujo, permitió simular el comportamiento agua mediante el modelo computacional HEC-RAS 2D. El modelo hidrodinámico calibrado facilitó la simulación de diferentes escenarios de crecida de periodos de retorno 50 y 100 años, para la identificación de tramos críticos de desbordamientos.

El levantamiento aerofotogramétrico realizado con un vehículo aéreo no tripulado (drone) y el levantamiento batimétrico del área de estudio han permitido generar un modelo digital de terreno con precisión centimétrica. Esta metodología resalta la importancia de utilizar puntos de control y validación terrestre en proyectos de modelación computacional, ya que una superficie detallada y precisa es necesaria para simular el comportamiento hidrodinámico de los ríos.

En la Tabla 37 se presenta la comparación de la precisión en metros de los productos fotogramétricos obtenidos del procesamiento de las fotografías, tanto con puntos de control terrestre (GCP) como sin ellos.

Punto validación	con GCPs		sin GCPs	
	Error Este	Error Norte	Error Este	Error Norte
PV-1	-0.017	-0.031	-1.383	-3.069
PV-2	0.003	-0.040	-0.701	-1.863
PV-3	0.056	-0.017	0.082	-0.650
PV-4	0.080	0.004	0.112	0.300
PV-5	-0.002	-0.038	0.729	2.139
PV-6	0.008	0.015	2.094	2.671
PV-7	0.029	0.019	2.499	3.334
PV-8	0.007	0.046	3.093	3.914

Tabla 37. Errores de validación con y sin GCPs.

La modelación hidrodinámica del tramo del Río Seco, realizada mediante un análisis bidimensional para un flujo de régimen no permanente utilizando el modelo HEC-RAS, basado en la información hidrométrica analizada del periodo 2019-2023, ha permitido estudiar el comportamiento del río a través de la calibración del coeficiente de Manning como parámetro de sensibilidad, para diferentes eventos de crecida seleccionados del registro por la Estación Hidrométrica Viacha KH-05.

Se probaron diferentes valores del coeficiente n de Manning para el cauce principal, partiendo de valores teóricos de tablas, y se utilizaron varios indicadores estadísticos. Se obtuvo un valor óptimo de n que se ajusta a las condiciones hidrodinámicas del río, siendo el valor promedio obtenido para el coeficiente de Manning de 0.0436. Este valor alto de n se debe a la composición de los materiales del cauce principal y a la sinuosidad del río en el tramo de estudio.

En la Tabla 38 muestra el error absoluto medio (MAE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) obtenido de las diferentes corridas realizadas para cada evento seleccionado. Los resultados demuestran que los datos simulados se aproximan de forma adecuada a los datos observados por la estación.

Evento	Corrida	n	MAE	RMSE
E1	C3	0.0441	0.0527	0.0635
E2	C4	0.0452	0.0461	0.1016
E3	C4	0.0434	0.0373	0.1216

Tabla 38. Resultados de las corridas para cada evento.

A partir de los resultados de la simulación del modelo hidrodinámico calibrado, se identificaron 19 tramos críticos de desbordamiento del río para un evento de crecida de periodo de retorno de 100 años, provocando inundaciones en gran parte del área de estudio ocasionando pérdidas de áreas de cultivo, reducción de área de pastoreo para la actividad ganadera y daños en viviendas.

La medida estructural de mitigación elegida es el muro de gaviones, el diseño esta medida consistió en el diseño hidráulico dando como resultado una socavación promedio de la sección de 1.09 m y un diseño y análisis estructural verificándose que el muro de gaviones cumpla a deslizamiento, volcamiento y tensiones admisibles. La configuración del muro de gaviones es de 3.0 y 3.5 metros de altura, con una longitud total de 791 metros en los

márgenes del río. Finalmente, el presupuesto general elaborado es de Bs. 3,595,948.55 (Tres millones noventa y cinco mil novecientos cuarenta y ocho con 55/100).

Esto destaca la importancia de implementar técnicas de relevamiento de información en la ingeniería hidráulica, contribuyendo al diseño de diversas soluciones estructurales para mitigar el desbordamiento de los ríos.

8.2 Recomendaciones

Se recomienda establecer esquema de trabajo en la planificación y ejecución del vuelo aerofotogramétrico, considerando las condiciones climáticas antes y durante la ejecución del vuelo para proteger el equipo y evitar interrupciones o daños que puedan afectar la captura de fotografías.

Implementar puntos de control terrestre (GCP) y puntos de validación para mejorar la precisión de los productos fotogramétricos, estableciendo un mínimo de 4 GCP y al menos un punto de validación para su evaluación.

Se sugiere que las instituciones involucradas en la generación y recolección de información hidrométrica mantengan esta actividad, considerándola importante en la elaboración de proyectos relacionados con la gestión de los recursos hídricos.

Calibrar el modelo hidrodinámico, ya que este servirá como base para el análisis de calidad del agua y la fluviomorfología de los sedimentos. Esta calibración permitirá evaluar el impacto de diferentes condiciones de flujo y posibles escenarios de contaminación, convirtiéndose en una herramienta valiosa para la toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos.

Finalmente, se recomienda analizar la rectificación del trazado del Río Seco en el tramo de estudio debido a su alta sinuosidad. Esta modificación tiene como objetivo alinear el cauce y mejorar la capacidad hidráulica, logrando así un curso más lineal y adecuado.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia de Noticias Fides. (2018, marzo). *Desborde de río provoca inundación en el Penal de Chonchocoro*. <https://www.noticiasfides.com/nacional/seguridad/desborde-de-río-provoca-inundacion-en-el-penal-de-chonchocoro-386387>
- Briceño, A., RUBI, L., Cioce, V., Royero, G., Bacaicoa, L., WILDERMANN, M., & Barrios, M. (2009). GPS NTRIP observations: A new alternative for precise positioning in Venezuela. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, 32(3), 200-209.
- Castillo Chuquimia, I. M. (2019). *Análisis del grado de contaminación ambiental del río Katari y sus efectos en la producción lechera en cuatro comunidades de la bahía de Cohana del lago Titicaca*.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill.
- Contra Parte. (2024, marzo). *La Zona Cabaña de la Comunidad de Chonchocoro en Viacha hace un llamado a la emergencia ante el desbordamiento del Río Seco*. <https://www.facebook.com/watch/?v=703371596864616>
- Fernández de Córdova Webster, C. J., León Méndez, A. J., Rodríguez López, Y., Martínez Ramírez, P. G., & Meneses Meneses, D. M. (2018). Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1), 17-31.
- Fuentes Mariles, Ó. A., Ravelo García, A., & Ávila Licon, A. A. (2006). Método para determinar los parámetros K, X y los coeficientes de tránsito del método de Muskingum-Cunge. *XIX Congreso Nacional de Hidráulica*.
- Gonzalez, A., & Prieto, J. (2011). Método numérico para la calibración de un modelo. *Desarrollo y Sociedad*.
- Grijalba Luna, P. (2018). *Fotogrametría aérea con Drones*.
- Guevara, C., & Pacas, N. (2016). Aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados.
- Gutierrez C., C. (2014). *Hidrología Básica y Aplicada*.
- Heredia, M., Romero, M., & Muñoz, G. (2023). Desafíos en la modelación numérica hidrodinámica de ríos morfológicamente activos: Caso de estudio del Río Pilcomayo, Bolivia, 109.
- Heredia Gomez, M. (2022). *Modelos matemáticos en la dinámica de fluidos* [Apuntes de un diplomado no publicados].
- How to extrapolate rating curve*. (1999). Hydrology Project Training Model.
- IDEAM. (2018). Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica.

- Luza Huillca, C. A., & Santos Romero, B. L. (2016). Peligro de Inundación en los sectores Albertha y Unión Capiri. Distrito Río Negro, provincia Satipo, región Junín.
- Maccaferri. (2008). Manual técnico de obras de Contención. *Maccaferri do*.
- Marbello Perez, R. (2005). *Manual de prácticas de laboratorio*.
- Martínez A., J. D., & Rubio N., A. I. (2018). Modelo de inundación mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados en la cuenca media del Río Magdalena, en el municipio de La Dorada, Caldas.
- Martinez Amaya, J., & Rubio Nieto, A. (2018). Modelo de inundación mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados en la cuenca media del Río Magdalena, en el municipio de La Dorada, Caldas.
- Mendoza Rodriguez, J. (s.f.). *Manual de hidrometría básica*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2020). *Diseño y construcción de obras civiles para el mejoramiento y ampliación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Puchukollo - El Alto*.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2021). *Catálogo de medidas de protección y mitigación para reducir riesgos para eventos de inundación*.
- Molina Carpio, J. (2006). *Temas especiales de hidráulica*.
- Molnar, P. (2011). Calibration. Watershed Modelling, SS 2011. *Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich, Switzerland*.
- Ochoa, S., Reyna, T., Reyna, S., García, M., Labaque, M., & Díaz, J. M. (2016). Modelación hidrodinámica del tramo medio del río Ctalamochita, Provincia de Córdoba. *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 3(2), 95-101.
- Ojeda Bustamante, W., Flores Velázquez, J., Ontiveros Capurata, R., et al. (2016). *Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Pastora Flores, D. (2010). *Evaluación de la Fórmula de Manning en el Río Ostua*.
- Pérez, F. (2015). *Ensayos de laboratorio para los agregados de los ríos Seco, Seke y Negro de la ciudad de El Alto*.
- Quisbert Morillas, M. C., et al. (2021). *Actualización y análisis de la información hidrométrica y régimen hidrológico de la cuenca alta del Río Pilcomayo*.
- Ramos, T., & Mejía, M. (2012). Modelamiento hidráulico del río Tumbes con influencia del ENSO y las mareas.

- Rodríguez, J. A., & Pérez, G. B. (2018). *Ingeniería de ríos* [Tesis doctoral, Tesis Doctoral. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo].
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2019). *Manual de hidrometría*.
- Suárez Díaz, J. (2001). *Control de la Erosión en zonas tropicales (Universidad Industrial de Santander ed.)*
- U.S. Army Corps of Engineers. (2022). *HEC-RAS 6.4.1 User's Manual*. Hydrologic Engineering Center.

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

PROYECTO DE GRADO:

**MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO
FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO
TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RÍO SECO – MUNICIPIO DE
VIACHA**

ANEXOS

Autor:

Edgar Choque Tumiri

Tutor:

Dr. Ing. José Antonio Luna Vera



**MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA
CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO:
RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA**



CAMPAÑA DE MONITOREO

01

DATOS GENERALES

NOMBRE ESTACION:	VIACHA	CODIGO:	KH-05	TIPO:	AUTOMATICA
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LOCALIDAD:	COMUNIDAD MAMANI	FECHA DE MEDICION:	17/06/2023		
COTA CERO REGLA LIMN:	3895.937 m.s.n.m.	COTA SENSOR DE NIVEL:	3895.937 m.s.n.m.		

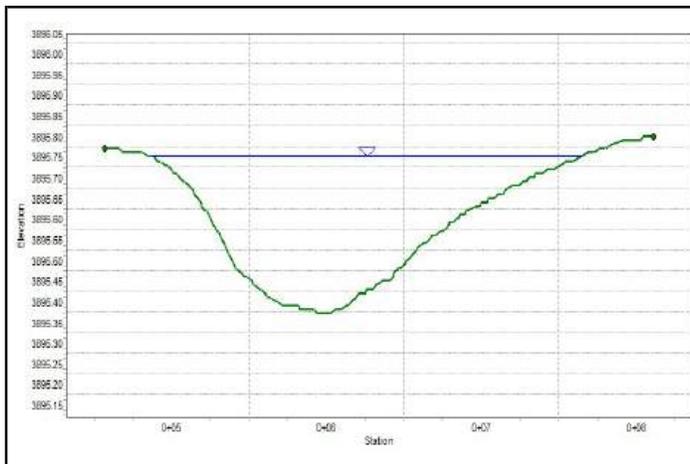
DESCRIPCION DEL CAUCE

NOMBRE DEL RIO:	SECO	TIPO DE CAUCE:	LECHO NATURAL	HORA INICIO:	11:25
COORDENADAS (UTM):	ESTE: 574094.70	NORTE:	8162494.50	HORA FINAL:	11:40

RESULTADOS DE LA MEDICION

CAUDAL AFORADO:	0.351 m ³ /s	VELOCIDAD MEDIA:	0.255 m/s	AREA SECCION:	0.255 m/s
OPERADOR:	EDGAR CHOQUE TUMIRI	LECT. REGLA INICIO:	10 cm	LECT. REGLA FINAL:	11 cm
TIPO DE AFORO:	Equipo ADCP	MARCA:	Teledyne RD Instruments	MODELO:	Stream Pro

PERFIL DEL RIO



FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El proceso de medición con el equipo ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) modelo Stream Pro inicia con la calibración, seguida de la configuración del equipo y su conexión a una computadora portátil mediante el software “WinRiver II”. A continuación de esto, se ubica el equipo en un margen del río y, mediante una cuerda sujetada por dos técnicos, se desplaza el equipo lentamente a lo largo de cada margen de la sección de aforo de control. Mientras tanto, una persona realiza el seguimiento en tiempo real de las mediciones de las propiedades hidráulicas, como la velocidad y propiedades geométricas como el área de la sección del río. La sección de aforo se encuentra a 20 metros aguas abajo del Puente Pataraya. Además, las lecturas de la regla limnimétrica se la realizo antes y después de las mediciones con el equipo ADCP. Durante el procedimiento de medición, la variación de los caudales y lectura del nivel del flujo fue mínima o nula.



**MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA
CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO:
RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA**



CAMPAÑA DE MONITOREO

02

DATOS GENERALES

NOMBRE ESTACION:	VIACHA	CODIGO:	KH-05	TIPO:	AUTOMATICA
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LOCALIDAD:	COMUNIDAD MAMANI	FECHA DE MEDICION:	17/06/2023		
COTA CERO REGLA LIMN:	3895.937 m.s.n.m.	COTA SENSOR DE NIVEL:	3895.937 m.s.n.m.		

DESCRIPCION DEL CAUCE

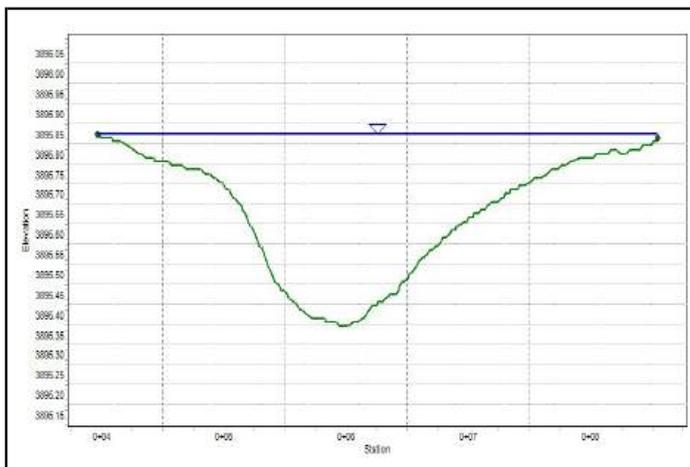
NOMBRE DEL RIO:	SECO	TIPO DE CAUCE:	LECHO NATURAL	HORA INICIO:	8:20
COORDENADAS (UTM):	ESTE: 574094.70	NORTE: 8162494.50	HORA FINAL:	8:30	

RESULTADOS DE LA MEDICION

CAUDAL AFORADO:	1.045 m ³ /s	VELOCIDAD MEDIA:	0.255 m/s	AREA SECCION:	0.255 m/s
OPERADOR:	EDGAR CHOQUE TUMIRI	LECT. REGLA INICIO:	10 cm	LECT. REGLA FINAL:	10 cm
TIPO DE AFORO:	Equipo ADCP	MARCA:	Teledyne RD Instruments	MODELO:	Stream Pro

SECCION DE AFORO

FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El proceso de medición con el equipo ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) modelo Stream Pro inicia con la calibración, seguida de la configuración del equipo y su conexión a una computadora portátil mediante el software “WinRiver II”. A continuación de esto, se ubica el equipo en un margen del río y, mediante una cuerda sujetada por dos técnicos, se desplaza el equipo lentamente a lo largo de cada margen de la sección de aforo de control. Mientras tanto, una persona realiza el seguimiento en tiempo real de las mediciones de las propiedades hidráulicas, como la velocidad y propiedades geométricas como el área de la sección del río. La sección de aforo se encuentra a 20 metros aguas abajo del Puente Pataraya. Además, las lecturas de la regla limnimétrica se la realizo antes y después de las mediciones con el equipo ADCP. Durante el procedimiento de medición, la variación de los caudales y lectura del nivel del flujo fue mínima o nula.

Quality Report



Generated with Pix4Dmapper version 4.5.6



Important: Click on the different icons for:



Help to analyze the results in the Quality Report



Additional information about the sections



Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary



Project	RioSeco
Processed	2023-06-20 22:16:17
Camera Model Name(s)	FC6310_8.8_4864x3648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.88 cm / 0.74 in
Area Covered	0.616 km ² / 61.6395 ha / 0.24 sq. mi. / 152.3934 acres
Time for Initial Processing (without report)	01h:01m:02s

Quality Check



Images	median of 70746 keypoints per image	
Dataset	1205 out of 1205 images calibrated (100%), all images enabled	
Camera Optimization	0.35% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
Matching	median of 22748.7 matches per calibrated image	
Georeferencing	yes, 11 GCPs (11 3D), mean RMS error = 0.011 m	

Preview

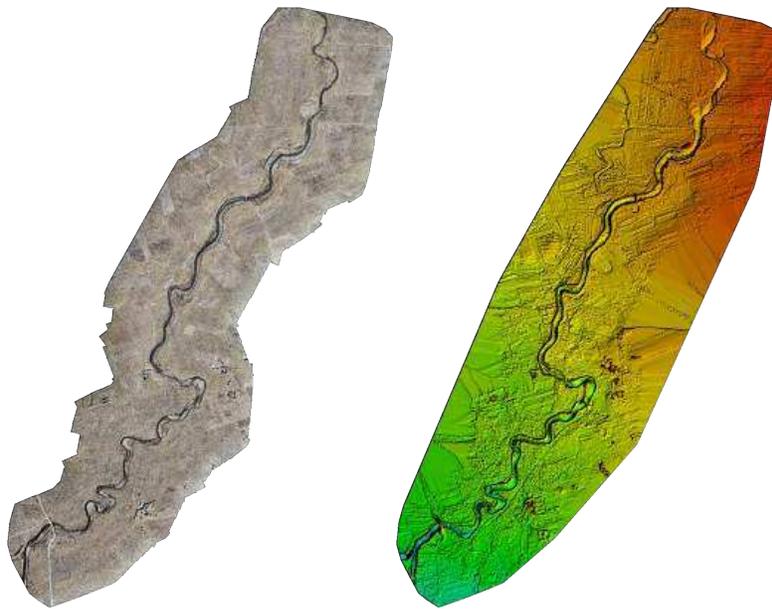


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details



Number of Calibrated Images	1205 out of 1205
Number of Geolocated Images	1205 out of 1205

? Initial Image Positions

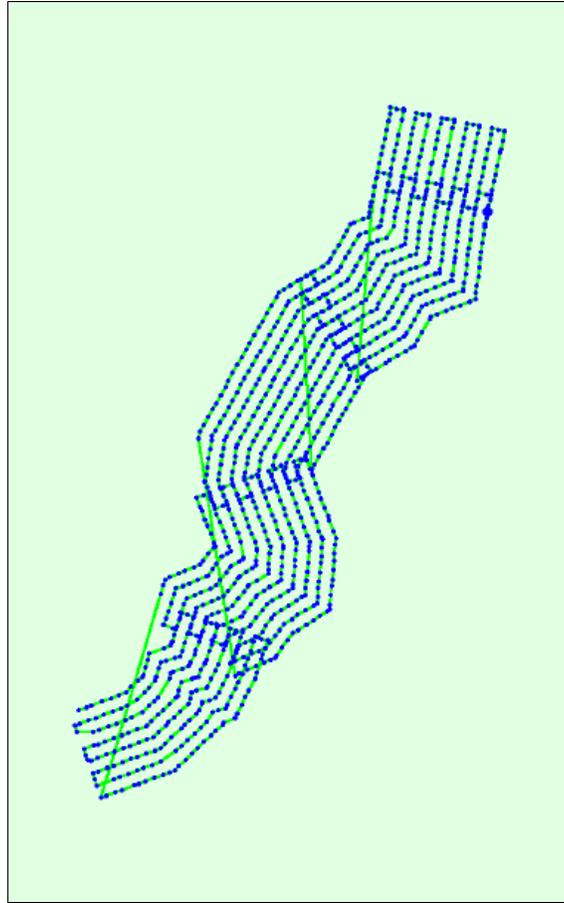
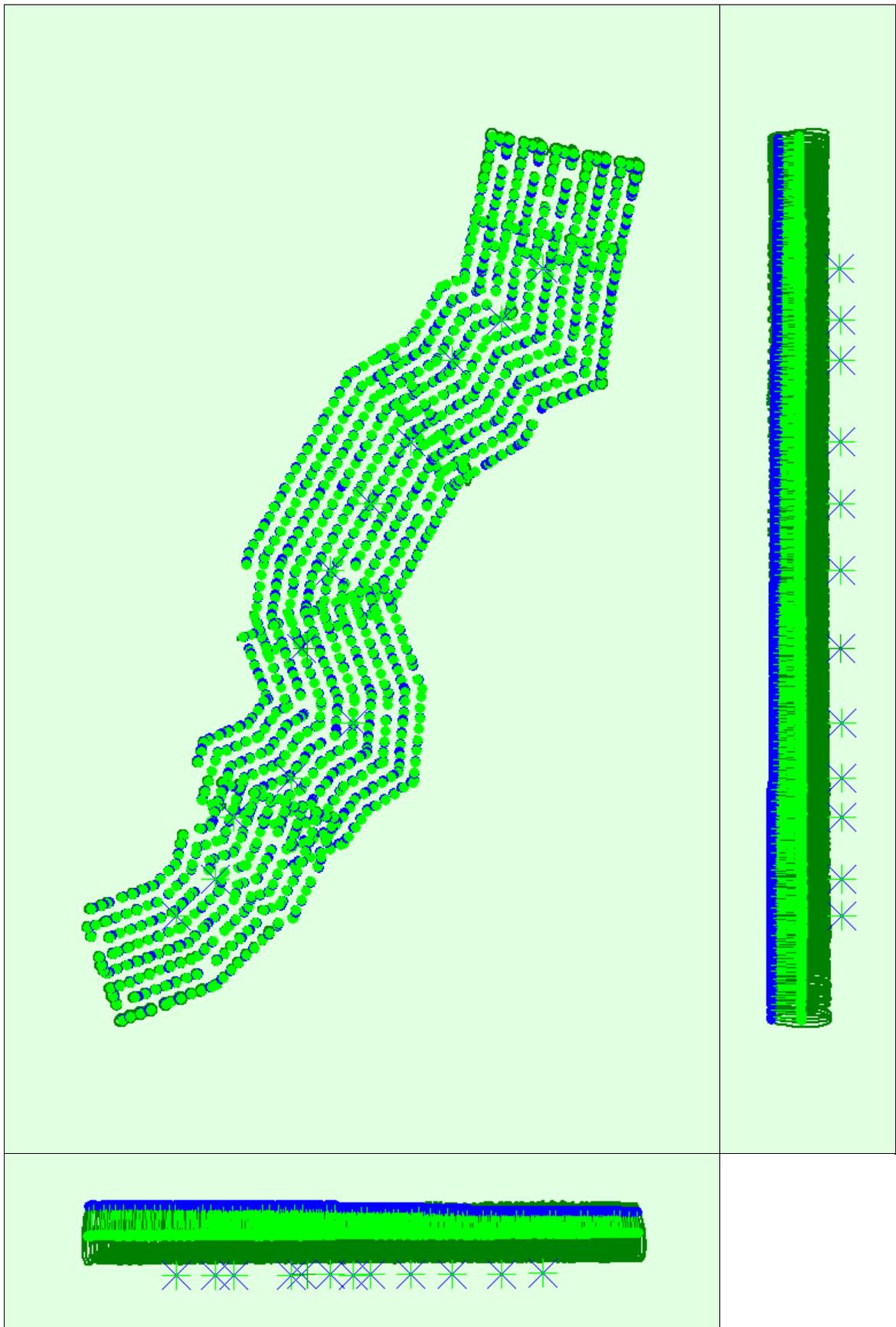


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

? Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions

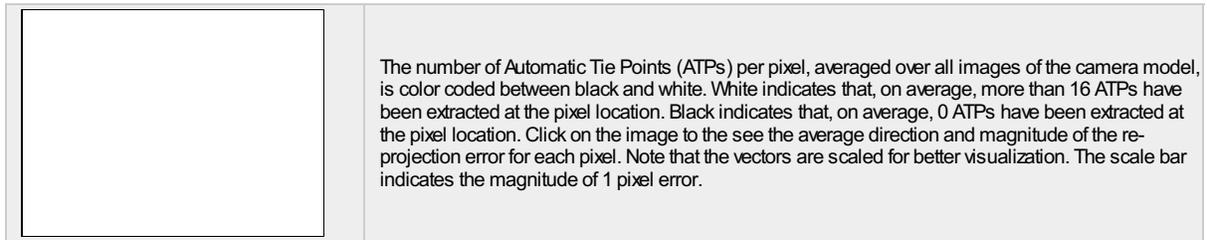
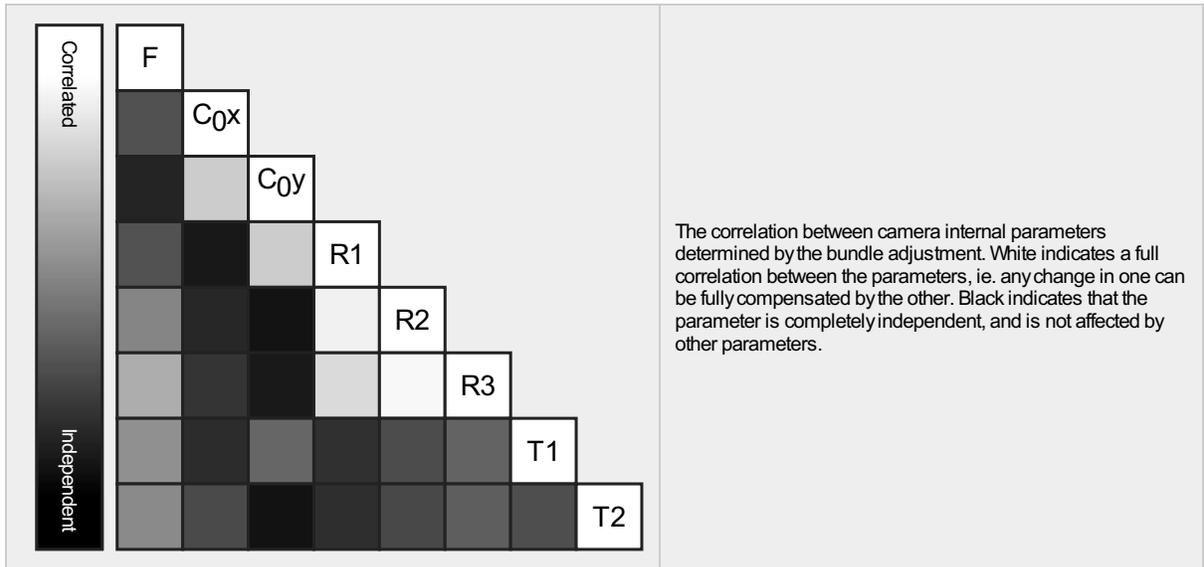




Uncertainty ellipses 500x magnified

Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Initial Values	3666.955 [pixel] 8.600 [mm]	2432.001 [pixel] 5.704 [mm]	1823.999 [pixel] 4.278 [mm]	0.004	-0.017	0.019	-0.000	0.000
Optimized Values	3654.030 [pixel] 8.570 [mm]	2429.849 [pixel] 5.699 [mm]	1824.399 [pixel] 4.279 [mm]	0.008	-0.023	0.023	-0.001	0.002
Uncertainties (Sigma)	4.991 [pixel] 0.012 [mm]	0.242 [pixel] 0.001 [mm]	0.225 [pixel] 0.001 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



? 2D Keypoints Table



	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	70746	22749
Min	51816	3578
Max	80121	45667
Mean	70461	23804

? 3D Points from 2D Keypoint Matches



	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	6204619
In 3 Images	1878372
In 4 Images	795675
In 5 Images	401566
In 6 Images	233209
In 7 Images	145687
In 8 Images	94349
In 9 Images	62016
In 10 Images	43129
In 11 Images	30272
In 12 Images	20703
In 13 Images	13492
In 14 Images	9052
In 15 Images	6106
In 16 Images	4250

In 17 Images	3026
In 18 Images	2230
In 19 Images	1786
In 20 Images	1316
In 21 Images	1065
In 22 Images	856
In 23 Images	636
In 24 Images	439
In 25 Images	316
In 26 Images	228
In 27 Images	169
In 28 Images	83
In 29 Images	54
In 30 Images	26
In 31 Images	13
In 32 Images	3
In 33 Images	2
In 34 Images	4
In 35 Images	1

 **2D Keypoint Matches**



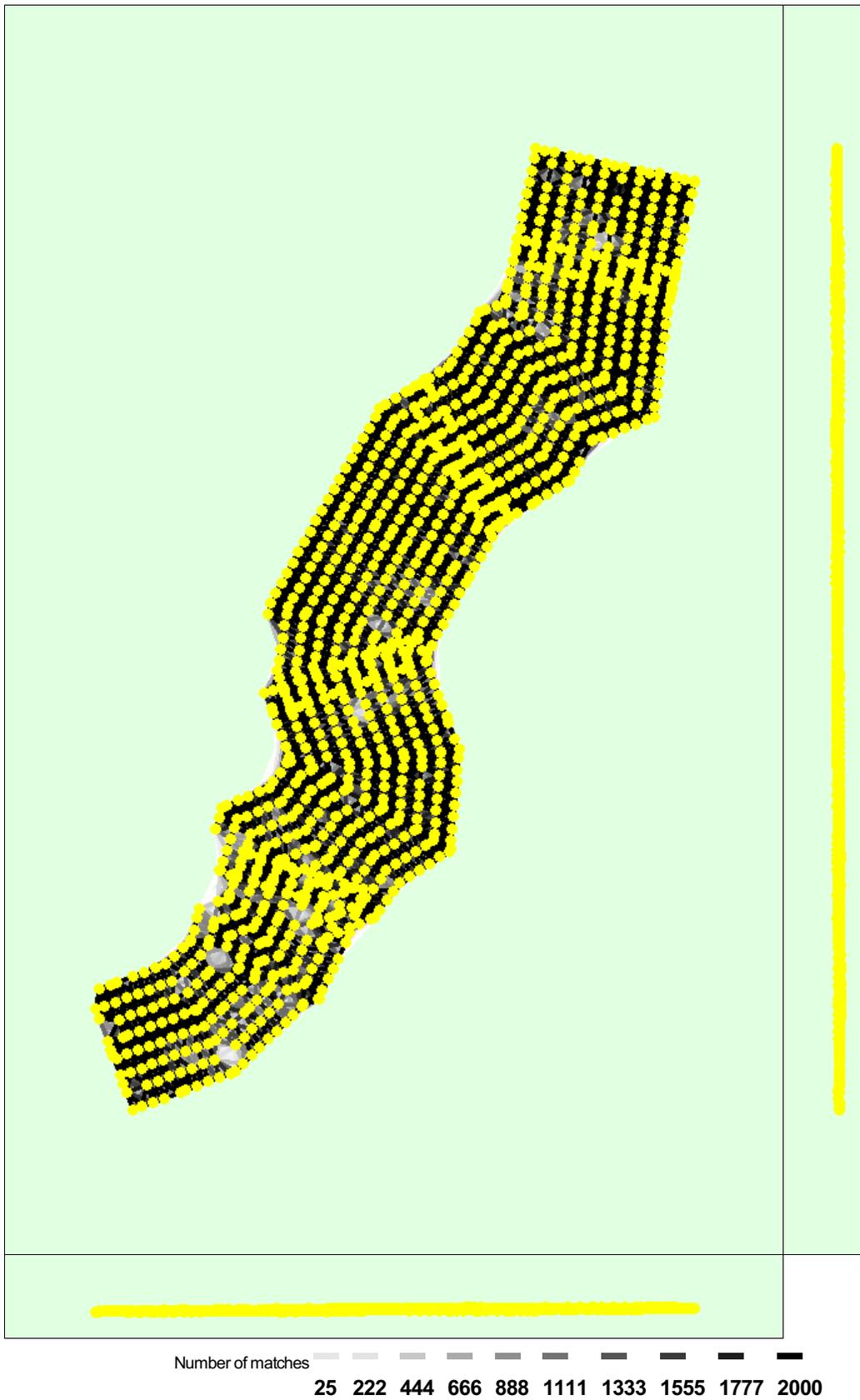


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images.

Ground Control Points



GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X[m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
PC_1 (3D)	0.020/ 0.020	0.006	-0.006	-0.008	0.683	11 / 11
PC_2 (3D)	0.020/ 0.020	-0.022	0.003	0.002	0.567	14 / 14
PC_3 (3D)	0.020/ 0.020	0.022	0.005	0.009	0.742	24 / 25
PC_4 (3D)	0.020/ 0.020	-0.006	-0.010	-0.014	1.157	13 / 13
PC_5 (3D)	0.020/ 0.020	-0.001	0.011	0.006	0.878	13 / 13
PC_6 (3D)	0.020/ 0.020	-9.656	-0.042	-0.278	0.447	4 / 20
PC_7 (3D)	0.020/ 0.020	0.029	0.003	0.006	0.544	12 / 12
PC_8 (3D)	0.020/ 0.020	-0.026	-0.021	-0.009	0.802	12 / 12
PC_9 (3D)	0.020/ 0.020	0.027	0.021	0.011	0.723	20 / 20
PC_12 (3D)	0.020/ 0.020	0.004	-0.002	-0.002	0.568	20 / 20
PC_11 (3D)	0.020/ 0.020	-0.002	0.003	0.005	0.586	14 / 14
PC_10 (3D)	0.020/ 0.020	-0.011	0.001	0.007	0.981	12 / 13
Mean [m]		0.001879	0.000611	0.000994		
Sigma [m]		0.017657	0.010369	0.007877		
RMS Error [m]		0.017757	0.010387	0.007940		

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.

Absolute Geolocation Variance



Mn Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	0.00	0.00	0.00
-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.00
-12.00	-9.00	0.00	0.00	0.66
-9.00	-6.00	0.00	1.33	14.36
-6.00	-3.00	4.32	10.46	16.60
-3.00	0.00	47.97	38.67	22.32
0.00	3.00	42.90	36.76	15.44
3.00	6.00	4.81	12.03	13.44
6.00	9.00	0.00	0.75	16.51
9.00	12.00	0.00	0.00	0.66
12.00	15.00	0.00	0.00	0.00
15.00	-	0.00	0.00	0.00
Mean [m]		-0.450308	0.099442	42.469326
Sigma [m]		1.759724	2.592902	5.106465
RMS Error [m]		1.816427	2.594809	42.775223

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Geolocation Bias	X	Y	Z
Translation [m]	-0.450308	0.099442	42.469326

Bias between image initial and computed geolocation given in output coordinate system.

Relative Geolocation Variance



Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	98.59	94.44	100.00
[-2.00, 2.00]	100.00	100.00	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00

Mean of Geolocation Accuracy [m]	5.000000	5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	0.508
Phi	0.507
Kappa	3.639

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: AMD Ryzen 7 5800X8-Core Processor RAM: 16GB GPU: NVIDIA GeForce RTX3060 (Driver: 31.0.15.3623)
Operating System	Windows 10 Pro, 64-bit

Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS 84 (EGM2008 Geoid)
Ground Control Point (GCP) Coordinate System	WGS 84 / UTMzone 19S (EGM2008 Geoid)
Output Coordinate System	WGS 84 / UTMzone 19S (EGM2008 Geoid)

Processing Options

Detected Template	3D Maps
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, no

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: Medium Resolution (default) Color Balancing: no
LOD	Generated: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	57m:25s

Time for Point Cloud Classification	08m:28s
Time for 3D Textured Mesh Generation	17m:46s

Results



Number of Processed Clusters	38
Number of Generated Tiles	6
Number of 3D Densified Points	129293841
Average Density (per m ³)	523.92

DSM, Orthomosaic and Index Details



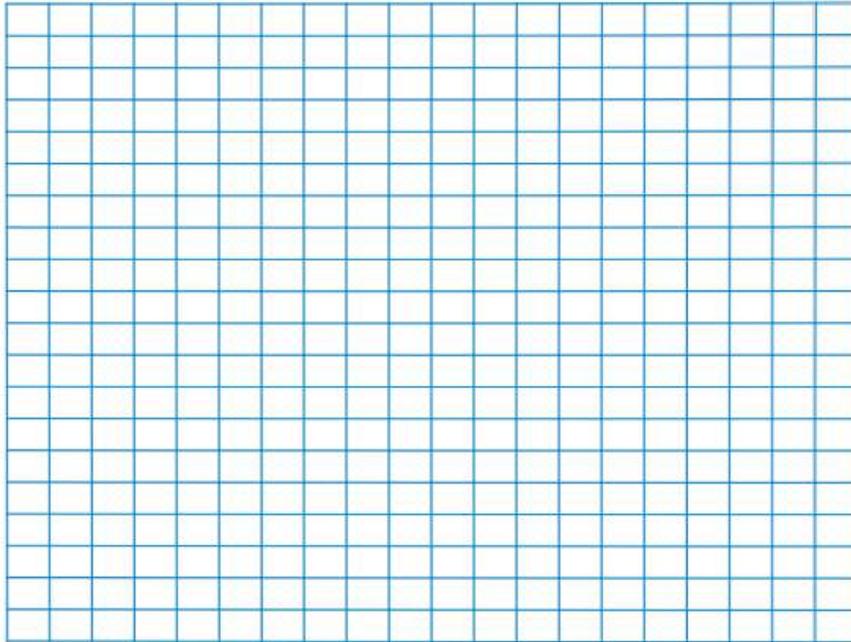
Processing Options



DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (1.88 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Raster DTM	Generated: yes Merge Tiles: yes
DTM Resolution	5 x GSD (1.88 [cm/pixel])
Time for DSM Generation	44m:48s
Time for Orthomosaic Generation	01h:25m:03s
Time for DTM Generation	01h:22m:28s
Time for Contour Lines Generation	00s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s

		35 mm [mm]							
Previous Values	10.0813	27.4945	2436.60	1807.94	0.0109672	-0.029117	0.0305558	-0.000888461	-0.00286061
Optimized Values	9.88441	26.9575	2429.41	1823.44	0.00980064	-0.0250816	0.0252766	0.00171973	-0.00139836
Difference Previous / Optimized	-0.19689	-0.537	-7.19	15.50	-0.00116656	0.0040354	-0.0052792	0.00260819	0.00146225

Distortion Grid



Camera Lens Distortion: Gray lines represent the zero distortion grid, and blue lines represent the real camera values.

DJI FC6310 8.8mm 4864x3648

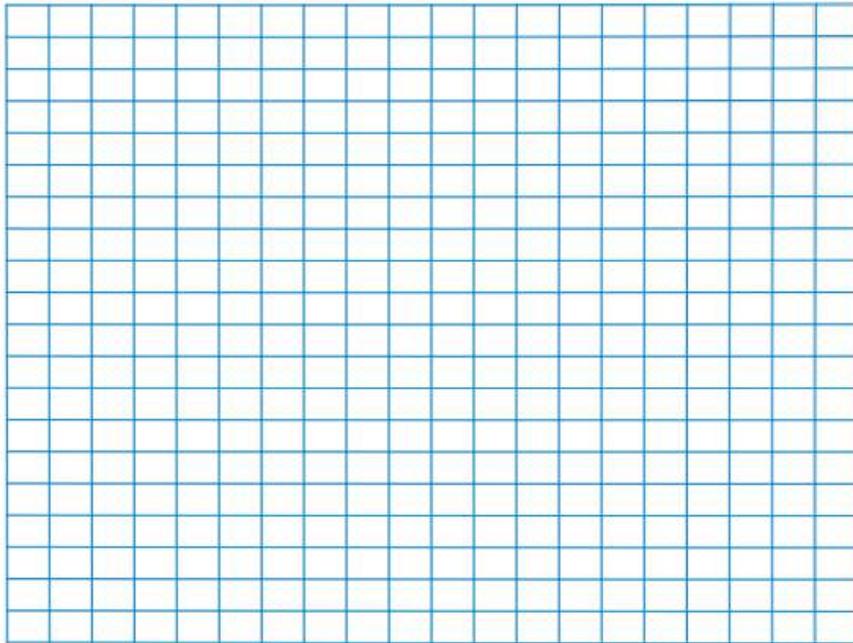
Name:	DJI FC6310
Model type:	Perspective
Image dimensions:	4864x3648 pixels
Sensor size:	13.2 mm
Number of photos:	427

Calibration Results

	Focal Length [mm]	Focal Length Equivalent 35 mm [mm]	Principal Point X [pixels]	Principal Point Y [pixels]	K1	K2	K3	P1	P2
Previous Values	10.0813	27.4945	2436.60	1807.94	0.0109672	-0.029117	0.0305558	-0.000888461	-0.00286061
Optimized Values	9.87667	26.9364	2430.40	1823.86	0.00991774	-0.025238	0.0254005	0.0016914	-0.00140243

Difference Previous / Optimized	-0.20463	-0.5581	-6.20	15.92	-0.00104946	0.003879	-0.0051553	0.00257986	0.00145818
--	----------	---------	-------	-------	-------------	----------	------------	------------	------------

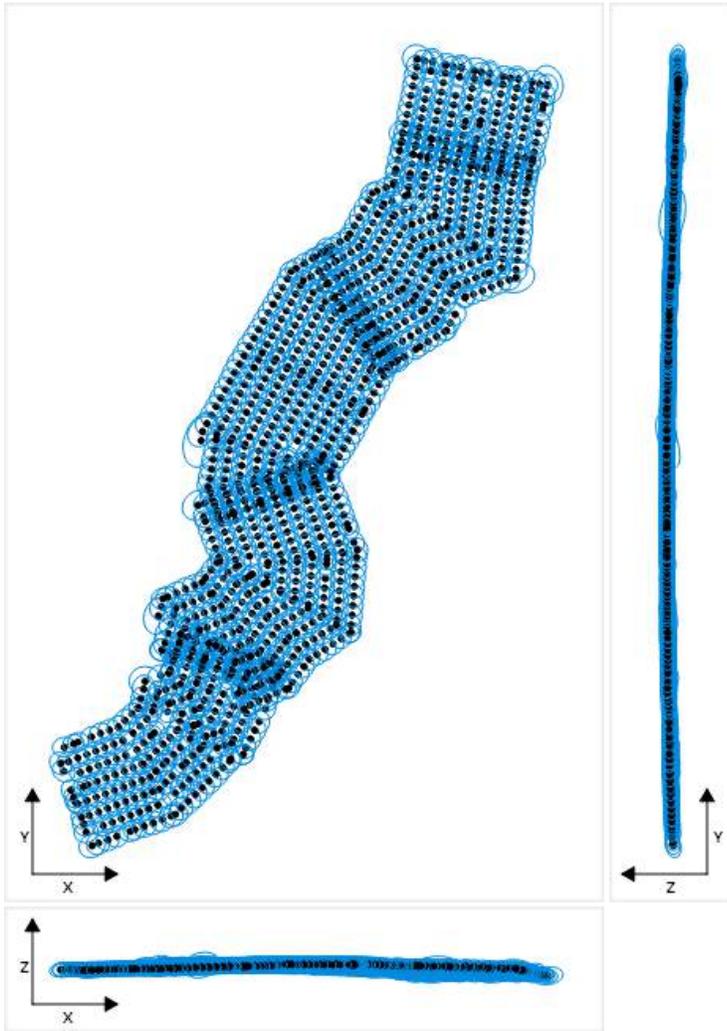
Distortion Grid



Camera Lens Distortion: *Gray lines represent the zero distortion grid, and blue lines represent the real camera values.*

Photo Positions

Photo Position Uncertainties

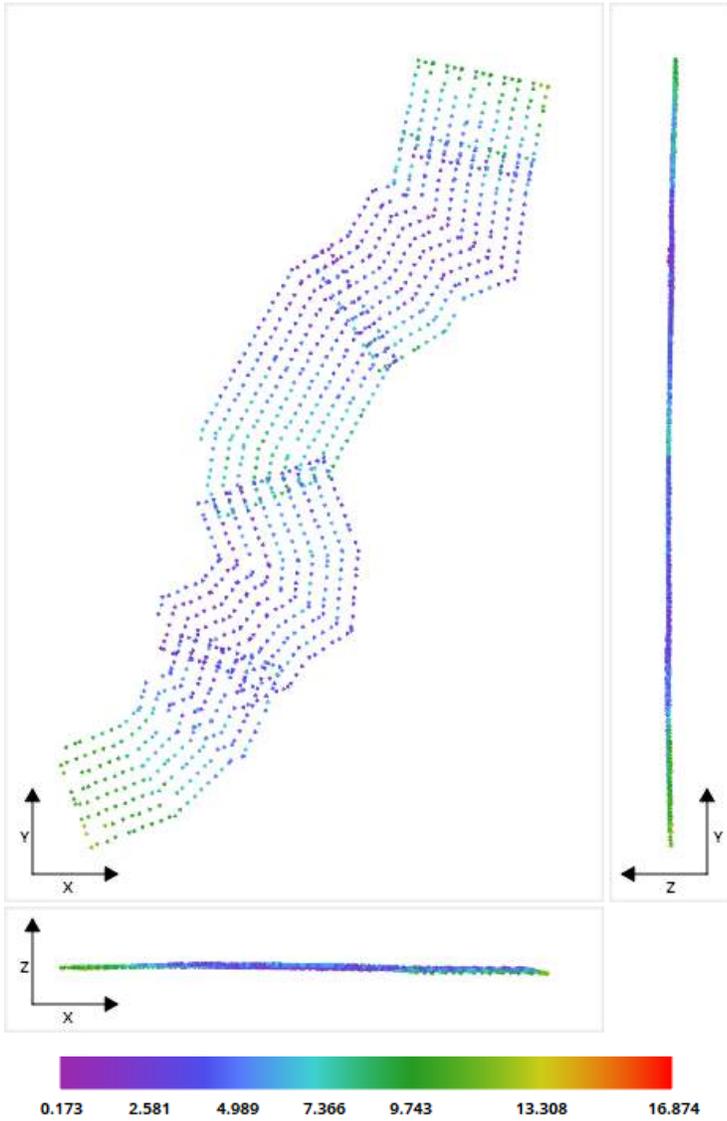


Position Uncertainties: Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane) of computed photo positions (black dots). Blue ellipses indicate the position uncertainty, scaled for readability. The minimum and maximum values, as well as the average value, can be found in the table below.

Position Uncertainties			
	X [meters]	Y [meters]	Z [meters]
Minimum	0.0019	0.002	0.0006
Mean	0.003	0.0032	0.0009
Maximum	0.0126	0.0145	0.0049

For more information on individual photos, please refer to the [Photos Report](#).

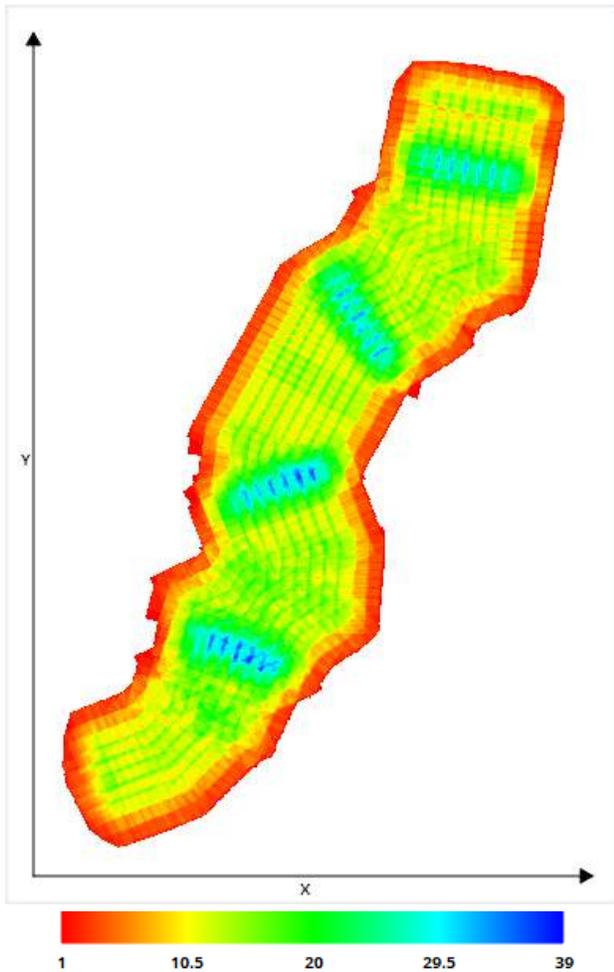
Distance to Input Positions



Position Distance to Metadata: Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane), with arrows indicating the offset between the metadata positions and the computed photo positions; all arrows start from the metadata positions and point toward the computed positions. Gray points \bullet indicate uncalibrated photos that have metadata. Pink points \bullet indicate calibrated photos that have no metadata.

The values are in meters, with a minimum distance of **0.1733 meters** and a maximum of **12.4382 meters**. The median position distance equals **4.989 meters**.

Scene Coverage



Number of photos seeing the scene: Top view (XY plane) display of the scene, with colors indicating the **number of photos** that potentially see each area.

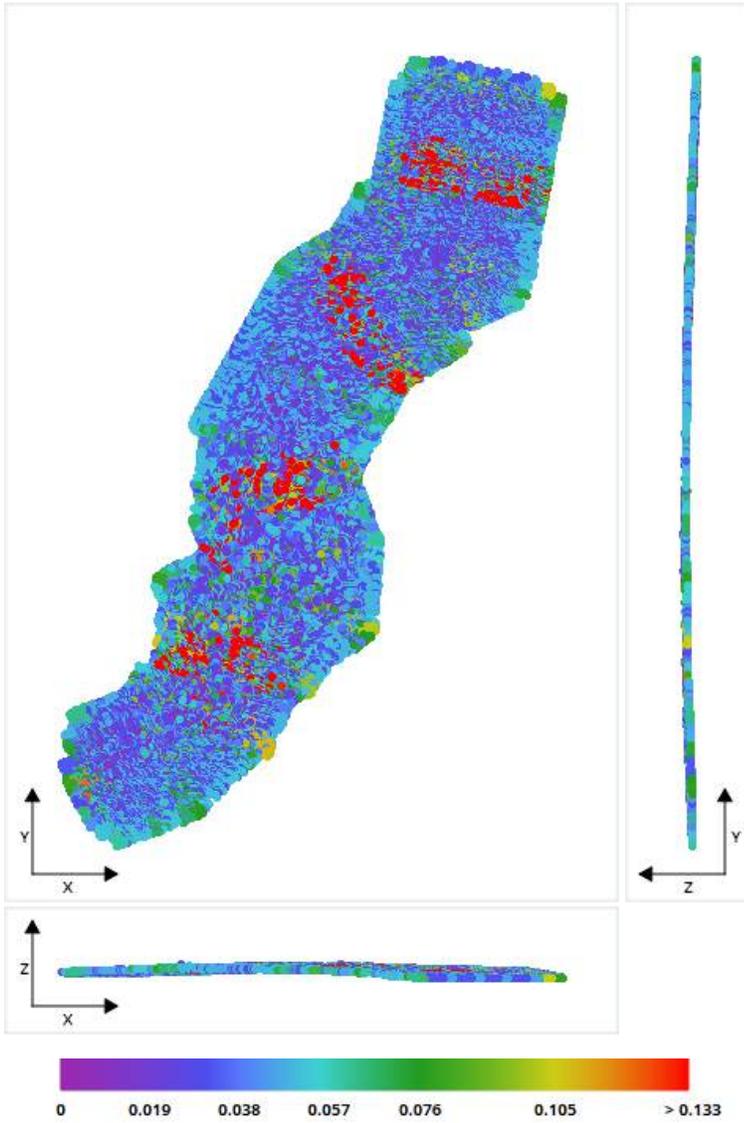
Photo Matching

Quality Measures on Tie Points

Generated Tie Points					
Number of Points	Median Number of Photos per Point	Median Number of Points per Photo	Median Reprojection Error [pixels]	RMS of Reprojection Error [pixels]	RMS of Distances to Rays [meters]
636047	4	2558	0.35	0.48	0.0785

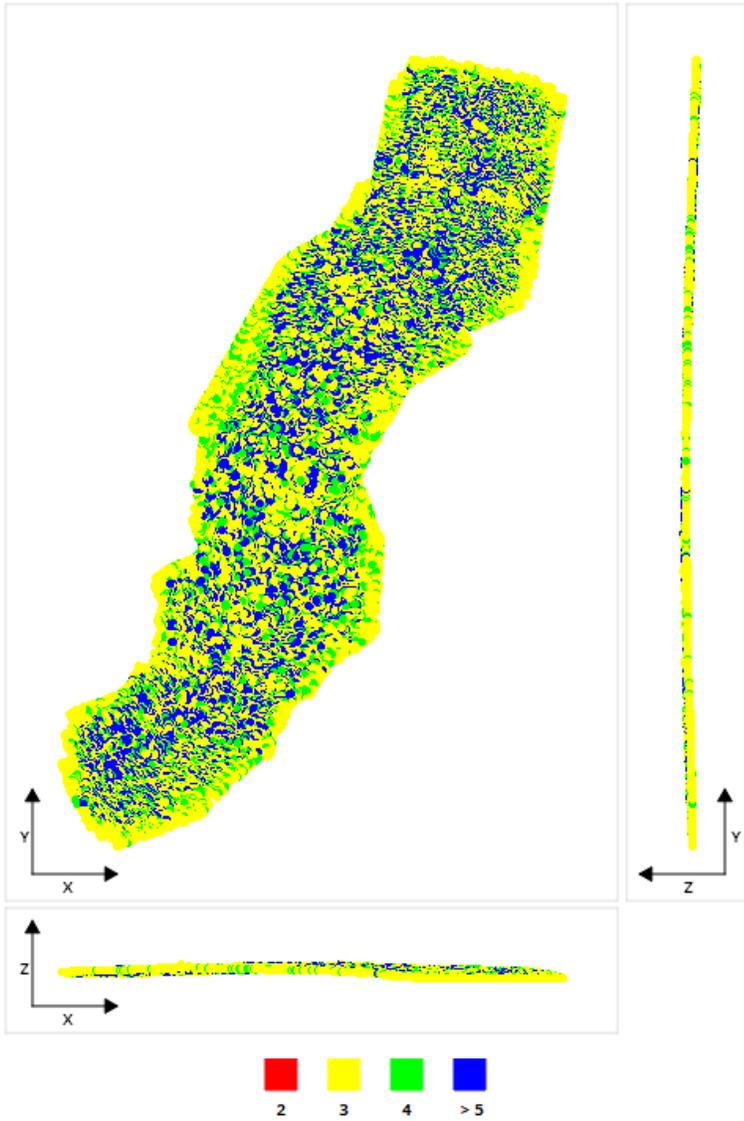
For more information on individual photos, please refer to the [Photos Report](#).

Tie Point Position Uncertainties



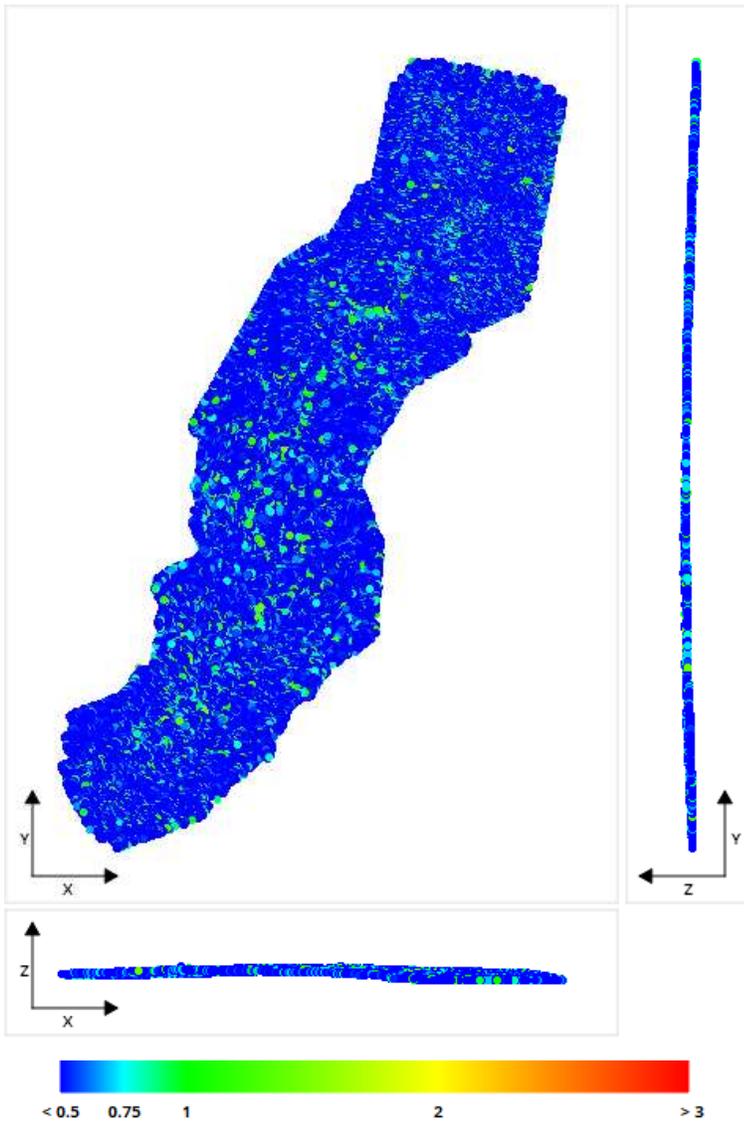
Position Uncertainties: Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane) displays of all tie points, with colors representing uncertainty in the individual point position. The values are in meters, with a minimum uncertainty of **0.0061 meters** and a maximum of **0.6741 meters**. The median position uncertainty equals **0.0378 meters**.

Number of Photos Observing the Tie Points



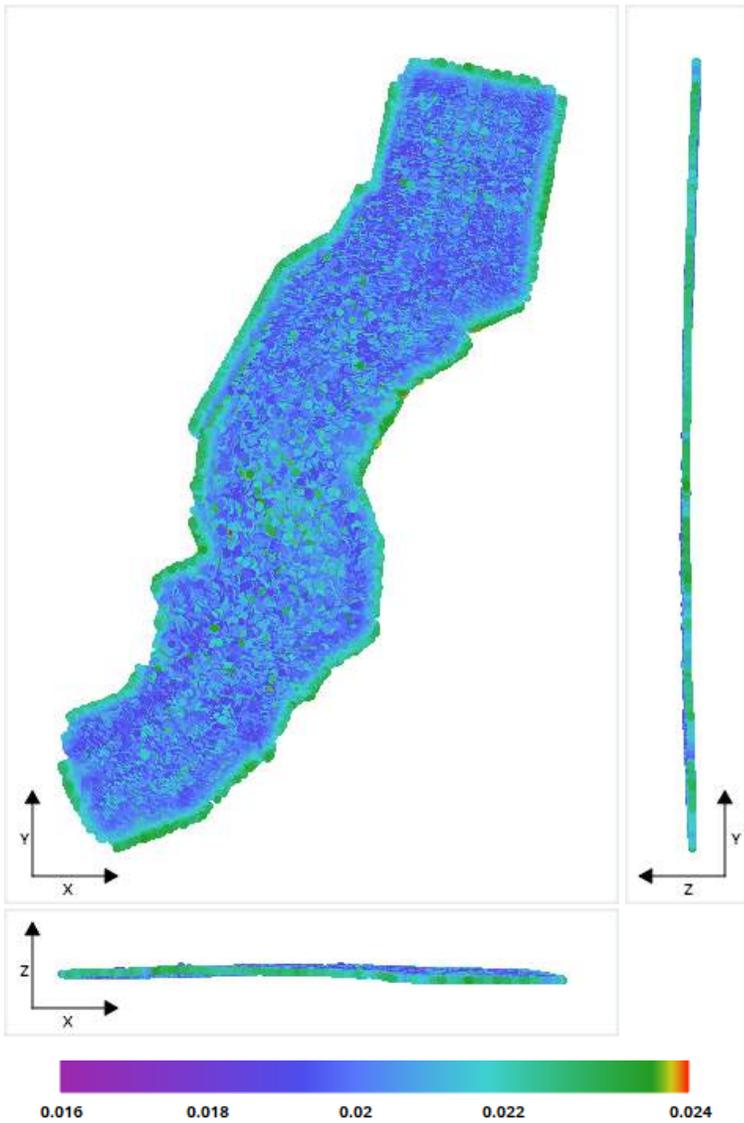
Number of Observations per Tie Point: Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane) displays of all tie points, with colors representing the number of photos that have been used to define each point. The minimum number of photos per tie point is 3 and the maximum is 38. The average number of photos observing a tie point is 5.

Reprojection Error



Reprojection Errors per Tie Point: Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane) displays of all tie points, with colors representing the reprojection error in pixels. The minimum reprojection error is **0.00 pixels** and the maximum is **1.78 pixels**. The average reprojection error is **0.42 pixels**.

Tie Point Resolution



Resolution: Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane) displays of all tie points, with colors representing resolution in the individual point position. The values are in meters/pixel, with a minimum resolution of **0.0178 meters/pixel** and a maximum of **0.0245 meters/pixel**. The median resolution equals **0.02 meters/pixel**.

Surveys

No survey points available.



MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA



PUNTOS DE APOYO CONTROL FOTOGRAMETRICO

DATOS GENERALES

CODIGO DEL PUNTO:	PC-01	SEÑALIZACION:	TIPO DIANA - COLOR NEGRO - BLANCO		
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LUGAR DEL PROYECTO:	COMUNIDAD MANANI			FECHA:	17/06/2023

REGISTRO OBSERVADOS

SISTEMA DE REFERENCIA:	WGS-84	ZONA (UTM):	19 SUR	MODELO GEOIDAL:	EGM 2008
COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE	ALTURA ELIPSOIDAL	ALT. ORTOMETRICA	
	574300.425	8162503.941	3943.307	3897.342	
COORDENADAS GEOGRAFICAS	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	ALT. GEOIDAL	
	16° 37' 7.072" S	68° 18' 12.166" W	3943.307	45.965	
INFORMACION DEL EQUIPO	MARCA	MODELO	ALTURA DEL EQUIPO		
	LEICA	ZENO 20	2.0 metros		

UBICACION



FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El punto de control se ubicó en la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha del Departamento. Para el punto de control terrestre, se utilizó dianas de color blanco y negro con dimensión estándar de 1 m x 1 m, codificadas como "PC". La medición de estos puntos se la hizo utilizando un receptor GNSS-RTK de la marca Leica, modelo Zeno 20, colocado en el punto central de cada diana.



MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA



PUNTOS DE APOYO CONTROL FOTOGRAMETRICO

DATOS GENERALES

CODIGO DEL PUNTO:	PC-02	SEÑALIZACION:	TIPO DIANA - COLOR NEGRO - BLANCO		
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LUGAR DEL PROYECTO:	COMUNIDAD MANANI			FECHA:	17/06/2023

REGISTRO OBSERVADOS

SISTEMA DE REFERENCIA:	WGS-84	ZONA (UTM):	19 SUR	MODELO GEOIDAL:	EGM 2008
COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE	ALTURA ELIPSOIDAL	ALT. ORTOMETRICA	
	574366.745	8162565.832	3943.664	3897.699	
COORDENADAS GEOGRAFICAS	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	ALT. GEOIDAL	
	16° 37' 5.05" S	68° 18' 9.935" W	3943.664	45.965	
INFORMACION DEL EQUIPO	MARCA	MODELO	ALTURA DEL EQUIPO		
	LEICA	ZENO 20	2.0 metros		

UBICACION



FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El punto de control se ubicó en la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha del Departamento. Para el punto de control terrestre, se utilizó dianas de color blanco y negro con dimensión estándar de 1 m x 1 m, codificadas como "PC". La medición de estos puntos se la hizo utilizando un receptor GNSS-RTK de la marca Leica, modelo Zeno 20, colocado en el punto central de cada diana.



**MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA
CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO:
RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA**



PUNTOS DE APOYO CONTROL FOTOGRAMETRICO

DATOS GENERALES

CODIGO DEL PUNTO:	PC-01	SEÑALIZACION:	TIPO DIANA - COLOR NEGRO - BLANCO		
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LUGAR DEL PROYECTO:	COMUNIDAD MANANI		FECHA:	17/06/2023	

REGISTRO OBSERVADOS

SISTEMA DE REFERENCIA:	WGS-84	ZONA (UTM):	19 SUR	MODELO GEOIDAL:	EGM 2008
COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE	ALTURA ELIPSOIDAL	ALT. ORTOMETRICA	
	574397.45	8162671.685	3943.983	3898.02	
COORDENADAS GEOGRAFICAS	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	ALT. GEOIDAL	
	16° 37' 1.602" S	68° 18' 8.911" W	3943.983	45.963	
INFORMACION DEL EQUIPO	MARCA	MODELO	ALTURA DEL EQUIPO		
	LEICA	ZENO 20	2.0 metros		

UBICACION

FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El punto de control se ubicó en la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha del Departamento. Para el punto de control terrestre, se utilizó dianas de color blanco y negro con dimensión estándar de 1 m x 1 m, codificadas como "PC". La medición de estos puntos se la hizo utilizando un receptor GNSS-RTK de la marca Leica, modelo Zeno 20, colocado en el punto central de cada diana.



**MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA
CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO:
RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA**



PUNTOS DE APOYO CONTROL FOTOGRAMETRICO

DATOS GENERALES

CODIGO DEL PUNTO:	PC-04	SEÑALIZACION:	TIPO DIANA - COLOR NEGRO - BLANCO		
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LUGAR DEL PROYECTO:	COMUNIDAD MANANI			FECHA:	17/06/2023

REGISTRO OBSERVADOS

SISTEMA DE REFERENCIA:	WGS-84	ZONA (UTM):	19 SUR	MODELO GEOIDAL:	EGM 2008
COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE	ALTURA ELIPSOIDAL	ALT. ORTOMETRICA	
	574495.875	8162739.154	3944.28	3898.318	
COORDENADAS GEOGRAFICAS	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	ALT. GEOIDAL	
	16° 36' 59.395" S	68° 18' 5.597" W	3944.28	45.962	
INFORMACION DEL EQUIPO	MARCA	MODELO	ALTURA DEL EQUIPO		
	LEICA	ZENO 20	2.0 metros		

UBICACION



FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El punto de control se ubicó en la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha del Departamento. Para el punto de control terrestre, se utilizó dianas de color blanco y negro con dimensión estándar de 1 m x 1 m, codificadas como "PC". La medición de estos puntos se la hizo utilizando un receptor GNSS-RTK de la marca Leica, modelo Zeno 20, colocado en el punto central de cada diana.



MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA



PUNTOS DE APOYO CONTROL FOTOGRAMETRICO

DATOS GENERALES

CODIGO DEL PUNTO:	PC-05	SEÑALIZACION:	TIPO DIANA - COLOR NEGRO - BLANCO		
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LUGAR DEL PROYECTO:	COMUNIDAD MANANI			FECHA:	17/06/2023

REGISTRO OBSERVADOS

SISTEMA DE REFERENCIA:	WGS-84	ZONA (UTM):	19 SUR	MODELO GEOIDAL:	EGM 2008
COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE	ALTURA ELIPSOIDAL	ALT. ORTOMETRICA	
	574600.044	8162831.376	3944.731	3898.771	
COORDENADAS GEOGRAFICAS	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	ALT. GEOIDAL	
	16° 36' 56.383" S	68° 18' 2.092" W	3944.731	45.96	
INFORMACION DEL EQUIPO	MARCA	MODELO	ALTURA DEL EQUIPO		
	LEICA	ZENO 20	2.0 metros		

UBICACION



FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El punto de control se ubicó en la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha del Departamento. Para el punto de control terrestre, se utilizó dianas de color blanco y negro con dimensión estándar de 1 m x 1 m, codificadas como "PC". La medición de estos puntos se la hizo utilizando un receptor GNSS-RTK de la marca Leica, modelo Zeno 20, colocado en el punto central de cada diana.



MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA



PUNTOS DE APOYO CONTROL FOTOGRAMETRICO

DATOS GENERALES

CODIGO DEL PUNTO:	PC-06	SEÑALIZACION:	TIPO DIANA - COLOR NEGRO - BLANCO		
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LUGAR DEL PROYECTO:	COMUNIDAD MANANI			FECHA:	17/06/2023

REGISTRO OBSERVADOS

SISTEMA DE REFERENCIA:	WGS-84	ZONA (UTM):	19 SUR	MODELO GEOIDAL:	EGM 2008
COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE	ALTURA ELIPSOIDAL	ALT. ORTOMETRICA	
	574523.216	8162958.669	3945.083	3899.125	
COORDENADAS GEOGRAFICAS	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	ALT. GEOIDAL	
	16° 36' 52.249" S	68° 18' 4.7" W	3945.083	45.958	
INFORMACION DEL EQUIPO	MARCA	MODELO	ALTURA DEL EQUIPO		
	LEICA	ZENO 20	2.0 metros		

UBICACION



FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El punto de control se ubicó en la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha del Departamento. Para el punto de control terrestre, se utilizó dianas de color blanco y negro con dimensión estándar de 1 m x 1 m, codificadas como "PC". La medición de estos puntos se la hizo utilizando un receptor GNSS-RTK de la marca Leica, modelo Zeno 20, colocado en el punto central de cada diana.



**MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA
CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO:
RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA**



PUNTOS DE APOYO CONTROL FOTOGRAMETRICO

DATOS GENERALES

CODIGO DEL PUNTO:	PC-07	SEÑALIZACION:	TIPO DIANA - COLOR NEGRO - BLANCO		
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LUGAR DEL PROYECTO:	COMUNIDAD MANANI			FECHA:	17/06/2023

REGISTRO OBSERVADOS

SISTEMA DE REFERENCIA:	WGS-84	ZONA (UTM):	19 SUR	MODELO GEOIDAL:	EGM 2008
COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE	ALTURA ELIPSOIDAL	ALT. ORTOMETRICA	
	574560.994	8163092.69	3945.517	3899.56	
COORDENADAS GEOGRAFICAS	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	ALT. GEOIDAL	
	16° 36' 47.884" S	68° 18' 3.441" W	3945.517	45.957	
INFORMACION DEL EQUIPO	MARCA	MODELO	ALTURA DEL EQUIPO		
	LEICA	ZENO 20	2.0 metros		

UBICACION



FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El punto de control se ubicó en la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha del Departamento. Para el punto de control terrestre, se utilizó dianas de color blanco y negro con dimensión estándar de 1 m x 1 m, codificadas como "PC". La medición de estos puntos se la hizo utilizando un receptor GNSS-RTK de la marca Leica, modelo Zeno 20, colocado en el punto central de cada diana.



MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA



PUNTOS DE APOYO CONTROL FOTOGRAMETRICO

DATOS GENERALES

CODIGO DEL PUNTO:	PC-08	SEÑALIZACION:	TIPO DIANA - COLOR NEGRO - BLANCO		
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LUGAR DEL PROYECTO:	COMUNIDAD MANANI			FECHA:	17/06/2023

REGISTRO OBSERVADOS

SISTEMA DE REFERENCIA:	WGS-84	ZONA (UTM):	19 SUR	MODELO GEOIDAL:	EGM 2008
COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE	ALTURA ELIPSOIDAL	ALT. ORTOMETRICA	
	574630.769	8163204.973	3945.776	3899.821	
COORDENADAS GEOGRAFICAS	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	ALT. GEOIDAL	
	16° 36' 44.2" S	68° 18' 1.01" W	3945.776	45.955	
INFORMACION DEL EQUIPO	MARCA	MODELO	ALTURA DEL EQUIPO		
	LEICA	ZENO 20	2.0 metros		

UBICACION



FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El punto de control se ubicó en la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha del Departamento. Para el punto de control terrestre, se utilizó dianas de color blanco y negro con dimensión estándar de 1 m x 1 m, codificadas como "PC". La medición de estos puntos se la hizo utilizando un receptor GNSS-RTK de la marca Leica, modelo Zeno 20, colocado en el punto central de cada diana.



**MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA
CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO:
RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA**



PUNTOS DE APOYO CONTROL FOTOGRAMETRICO

DATOS GENERALES

CODIGO DEL PUNTO:	PC-09	SEÑALIZACION:	TIPO DIANA - COLOR NEGRO - BLANCO		
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LUGAR DEL PROYECTO:	COMUNIDAD MANANI			FECHA:	17/06/2023

REGISTRO OBSERVADOS

SISTEMA DE REFERENCIA:	WGS-84	ZONA (UTM):	19 SUR	MODELO GEOIDAL:	EGM 2008
COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE	ALTURA ELIPSOIDAL	ALT. ORTOMETRICA	
	574699.039	8163312.244	3945.983	3900.029	
COORDENADAS GEOGRAFICAS	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	ALT. GEOIDAL	
	16° 36' 40.723" S	68° 17' 58.808" W	3945.983	45.954	
INFORMACION DEL EQUIPO	MARCA	MODELO	ALTURA DEL EQUIPO		
	LEICA	ZENO 20	2.0 metros		

UBICACION



FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El punto de control se ubicó en la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha del Departamento. Para el punto de control terrestre, se utilizó dianas de color blanco y negro con dimensión estándar de 1 m x 1 m, codificadas como "PC". La medición de estos puntos se la hizo utilizando un receptor GNSS-RTK de la marca Leica, modelo Zeno 20, colocado en el punto central de cada diana.



MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA



PUNTOS DE APOYO CONTROL FOTOGRAMETRICO

DATOS GENERALES

CODIGO DEL PUNTO:	PC-10	SEÑALIZACION:	TIPO DIANA - COLOR NEGRO - BLANCO		
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LUGAR DEL PROYECTO:	COMUNIDAD MANANI			FECHA:	17/06/2023

REGISTRO OBSERVADOS

SISTEMA DE REFERENCIA:	WGS-84	ZONA (UTM):	19 SUR	MODELO GEOIDAL:	EGM 2008
COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE	ALTURA ELIPSOIDAL	ALT. ORTOMETRICA	
	574768.115	8163449.806	3946.379	3900.426	
COORDENADAS GEOGRAFICAS	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	ALT. GEOIDAL	
	16° 36' 36.239" S	68° 17' 56.493" W	3946.379	45.953	
INFORMACION DEL EQUIPO	MARCA	MODELO	ALTURA DEL EQUIPO		
	LEICA	ZENO 20	2.0 metros		

UBICACION



FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El punto de control se ubicó en la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha del Departamento. Para el punto de control terrestre, se utilizó dianas de color blanco y negro con dimensión estándar de 1 m x 1 m, codificadas como "PC". La medición de estos puntos se la hizo utilizando un receptor GNSS-RTK de la marca Leica, modelo Zeno 20, colocado en el punto central de cada diana.



MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA



PUNTOS DE APOYO CONTROL FOTOGRAMETRICO

DATOS GENERALES

CODIGO DEL PUNTO:	PC-11	SEÑALIZACION:	TIPO DIANA - COLOR NEGRO - BLANCO		
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LUGAR DEL PROYECTO:	COMUNIDAD MANANI			FECHA:	17/06/2023

REGISTRO OBSERVADOS

SISTEMA DE REFERENCIA:	WGS-84	ZONA (UTM):	19 SUR	MODELO GEOIDAL:	EGM 2008
COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE	ALTURA ELIPSOIDAL	ALT. ORTOMETRICA	
	574853.432	8163518.665	3946.682	3900.731	
COORDENADAS GEOGRAFICAS	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	ALT. GEOIDAL	
	16° 36' 33.989" S	68° 17' 53.621" W	3946.682	45.951	
INFORMACION DEL EQUIPO	MARCA	MODELO	ALTURA DEL EQUIPO		
	LEICA	ZENO 20	2.0 metros		

UBICACION



FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El punto de control se ubicó en la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha del Departamento. Para el punto de control terrestre, se utilizó dianas de color blanco y negro con dimensión estándar de 1 m x 1 m, codificadas como "PC". La medición de estos puntos se la hizo utilizando un receptor GNSS-RTK de la marca Leica, modelo Zeno 20, colocado en el punto central de cada diana.



MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA



PUNTOS DE APOYO CONTROL FOTOGRAMETRICO

DATOS GENERALES

CODIGO DEL PUNTO:	PC-12	SEÑALIZACION:	TIPO DIANA - COLOR NEGRO - BLANCO		
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LUGAR DEL PROYECTO:	COMUNIDAD MANANI			FECHA:	17/06/2023

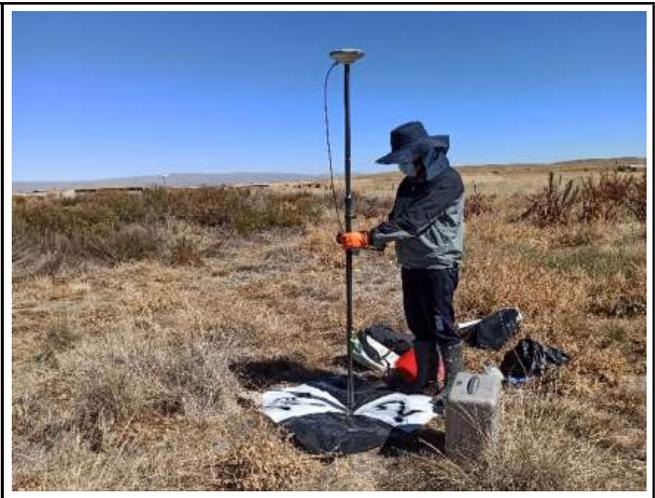
REGISTRO OBSERVADOS

SISTEMA DE REFERENCIA:	WGS-84	ZONA (UTM):	19 SUR	MODELO GEOIDAL:	EGM 2008
COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE	ALTURA ELIPSOIDAL	ALT. ORTOMETRICA	
	574924.087	8163607.49	3947.113	3901.164	
COORDENADAS GEOGRAFICAS	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	ALT. GEOIDAL	
	16° 36' 31.09" S	68° 17' 51.247" W	3947.113	45.949	
INFORMACION DEL EQUIPO	MARCA	MODELO	ALTURA DEL EQUIPO		
	LEICA	ZENO 20	2.0 metros		

UBICACION



FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El punto de control se ubicó en la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha del Departamento. Para el punto de control terrestre, se utilizó dianas de color blanco y negro con dimensión estándar de 1 m x 1 m, codificadas como "PC". La medición de estos puntos se la hizo utilizando un receptor GNSS-RTK de la marca Leica, modelo Zeno 20, colocado en el punto central de cada diana.



MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA



PUNTOS DE VALIDACION FOTOGRAMETRICO

DATOS GENERALES

CODIGO DEL PUNTO:	PV-01	SEÑALIZACION:	TIPO DIANA - COLOR ROJO - BLANCO		
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LUGAR DEL PROYECTO:	COMUNIDAD MANANI			FECHA:	17/06/2023

REGISTRO OBSERVADOS

SISTEMA DE REFERENCIA:	WGS-84	ZONA (UTM):	19 SUR	MODELO GEOIDAL:	EGM 2008
COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE	ALTURA ELIPSOIDAL	ALT. ORTOMETRICA	
	574345.785	8162531.115	3943.416	3897.469	
COORDENADAS GEOGRAFICAS	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	ALT. GEOIDAL	
	16° 37' 6.182" S	68° 18' 10.638" W	3943.416	45.947	
INFORMACION DEL EQUIPO	MARCA	MODELO	ALTURA DEL EQUIPO		
	LEICA	ZENO 20	2.0 metros		

UBICACION



FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El punto de control se ubicó en la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha del Departamento. Para el punto de control terrestre, se utilizó dianas de color blanco y rojo con dimensión estándar de 1 m x 1 m, codificadas como "PV". La medición de estos puntos se la hizo utilizando un receptor GNSS-RTK de la marca Leica, modelo Zeno 20, colocado en el punto central de cada diana.



MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA



PUNTOS DE VALIDACION FOTOGRAMETRICO

DATOS GENERALES

CODIGO DEL PUNTO:	PV-02	SEÑALIZACION:	TIPO DIANA - COLOR ROJO - BLANCO		
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LUGAR DEL PROYECTO:	COMUNIDAD MANANI			FECHA:	17/06/2023

REGISTRO OBSERVADOS

SISTEMA DE REFERENCIA:	WGS-84	ZONA (UTM):	19 SUR	MODELO GEOIDAL:	EGM 2008
COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE	ALTURA ELIPSOIDAL	ALT. ORTOMETRICA	
	574450.901	8162707.551	3944.235	3898.29	
COORDENADAS GEOGRAFICAS	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	ALT. GEOIDAL	
	16° 37' 0.429" S	68° 18' 7.111" W	3944.235	45.945	
INFORMACION DEL EQUIPO	MARCA	MODELO	ALTURA DEL EQUIPO		
	LEICA	ZENO 20	2.0 metros		

UBICACION



FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El punto de control se ubicó en la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha del Departamento. Para el punto de control terrestre, se utilizó dianas de color blanco y rojo con dimensión estándar de 1 m x 1 m, codificadas como "PV". La medición de estos puntos se la hizo utilizando un receptor GNSS-RTK de la marca Leica, modelo Zeno 20, colocado en el punto central de cada diana.



MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA



PUNTOS DE VALIDACION FOTOGRAMETRICO

DATOS GENERALES

CODIGO DEL PUNTO:	PV-03	SEÑALIZACION:	TIPO DIANA - COLOR ROJO - BLANCO		
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LUGAR DEL PROYECTO:	COMUNIDAD MANANI			FECHA:	17/06/2023

REGISTRO OBSERVADOS

SISTEMA DE REFERENCIA:	WGS-84	ZONA (UTM):	19 SUR	MODELO GEOIDAL:	EGM 2008
COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE	ALTURA ELIPSOIDAL	ALT. ORTOMETRICA	
	574572.11	8162891.205	3944.922	3898.977	
COORDENADAS GEOGRAFICAS	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	ALT. GEOIDAL	
	16° 36' 54.439" S	68° 18' 3.042" W	3944.922	45.945	
INFORMACION DEL EQUIPO	MARCA	MODELO	ALTURA DEL EQUIPO		
	LEICA	ZENO 20	2.0 metros		

UBICACION



FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El punto de control se ubicó en la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha del Departamento. Para el punto de control terrestre, se utilizó dianas de color blanco y rojo con dimensión estándar de 1 m x 1 m, codificadas como "PV". La medición de estos puntos se la hizo utilizando un receptor GNSS-RTK de la marca Leica, modelo Zeno 20, colocado en el punto central de cada diana.



MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA



PUNTOS DE VALIDACION FOTOGRAMETRICO

DATOS GENERALES

CODIGO DEL PUNTO:	PV-04	SEÑALIZACION:	TIPO DIANA - COLOR ROJO - BLANCO		
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LUGAR DEL PROYECTO:	COMUNIDAD MANANI			FECHA:	17/06/2023

REGISTRO OBSERVADOS

SISTEMA DE REFERENCIA:	WGS-84	ZONA (UTM):	19 SUR	MODELO GEOIDAL:	EGM 2008
COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE	ALTURA ELIPSOIDAL	ALT. ORTOMETRICA	
	574565.499	8163038.798	3945.072	3899.131	
COORDENADAS GEOGRAFICAS	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	ALT. GEOIDAL	
	16° 36' 49.637" S	68° 18' 3.282" W	3945.072	45.941	
INFORMACION DEL EQUIPO	MARCA	MODELO	ALTURA DEL EQUIPO		
	LEICA	ZENO 20	2.0 metros		

UBICACION



FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El punto de control se ubicó en la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha del Departamento. Para el punto de control terrestre, se utilizó dianas de color blanco y rojo con dimensión estándar de 1 m x 1 m, codificadas como "PV". La medición de estos puntos se la hizo utilizando un receptor GNSS-RTK de la marca Leica, modelo Zeno 20, colocado en el punto central de cada diana.



MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA



PUNTOS DE VALIDACION FOTOGRAMETRICO

DATOS GENERALES

CODIGO DEL PUNTO:	PV-05	SEÑALIZACION:	TIPO DIANA - COLOR ROJO - BLANCO		
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LUGAR DEL PROYECTO:	COMUNIDAD MANANI			FECHA:	17/06/2023

REGISTRO OBSERVADOS

SISTEMA DE REFERENCIA:	WGS-84	ZONA (UTM):	19 SUR	MODELO GEOIDAL:	EGM 2008
COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE	ALTURA ELIPSOIDAL	ALT. ORTOMETRICA	
	574647.337	8163341.202	3945.795	3899.855	
COORDENADAS GEOGRAFICAS	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	ALT. GEOIDAL	
	16° 36' 39.787" S	68° 18' 0.556" W	3945.795	45.94	
INFORMACION DEL EQUIPO	MARCA	MODELO	ALTURA DEL EQUIPO		
	LEICA	ZENO 20	2.0 metros		

UBICACION



FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El punto de control se ubicó en la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha del Departamento. Para el punto de control terrestre, se utilizó dianas de color blanco y rojo con dimensión estándar de 1 m x 1 m, codificadas como "PV". La medición de estos puntos se la hizo utilizando un receptor GNSS-RTK de la marca Leica, modelo Zeno 20, colocado en el punto central de cada diana.



MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA



PUNTOS DE VALIDACION FOTOGRAMETRICO

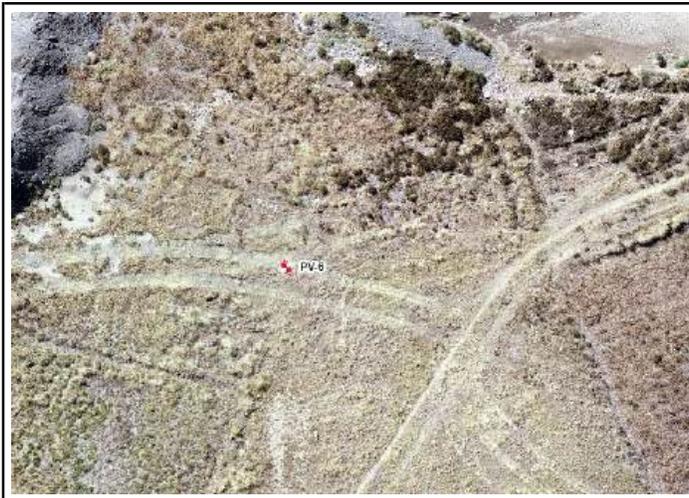
DATOS GENERALES

CODIGO DEL PUNTO:	PV-06	SEÑALIZACION:	TIPO DIANA - COLOR ROJO - BLANCO		
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LUGAR DEL PROYECTO:	COMUNIDAD MANANI			FECHA:	17/06/2023

REGISTRO OBSERVADOS

SISTEMA DE REFERENCIA:	WGS-84	ZONA (UTM):	19 SUR	MODELO GEOIDAL:	EGM 2008
COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE	ALTURA ELIPSOIDAL	ALT. ORTOMETRICA	
	574848.621	8163436.527	3946.606	3900.669	
COORDENADAS GEOGRAFICAS	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	ALT. GEOIDAL	
	16° 36' 36.662" S	68° 17' 53.774" W	3946.606	45.937	
INFORMACION DEL EQUIPO	MARCA	MODELO	ALTURA DEL EQUIPO		
	LEICA	ZENO 20	2.0 metros		

UBICACION



FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El punto de control se ubicó en la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha del Departamento. Para el punto de control terrestre, se utilizó dianas de color blanco y rojo con dimensión estándar de 1 m x 1 m, codificadas como "PV". La medición de estos puntos se la hizo utilizando un receptor GNSS-RTK de la marca Leica, modelo Zeno 20, colocado en el punto central de cada diana.



MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA



PUNTOS DE VALIDACION FOTOGRAMETRICO

DATOS GENERALES

CODIGO DEL PUNTO:	PV-01	SEÑALIZACION:	TIPO DIANA - COLOR ROJO - BLANCO		
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LUGAR DEL PROYECTO:	COMUNIDAD MANANI			FECHA:	17/06/2023

REGISTRO OBSERVADOS

SISTEMA DE REFERENCIA:	WGS-84	ZONA (UTM):	19 SUR	MODELO GEOIDAL:	EGM 2008
COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE	ALTURA ELIPSOIDAL	ALT. ORTOMETRICA	
	574890.394	8163542.857	3947.023	3901.087	
COORDENADAS GEOGRAFICAS	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	ALT. GEOIDAL	
	16° 36' 33.197" S	68° 17' 52.377" W	3947.023	45.936	
INFORMACION DEL EQUIPO	MARCA	MODELO	ALTURA DEL EQUIPO		
	LEICA	ZENO 20	2.0 metros		

UBICACION



FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El punto de control se ubicó en la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha del Departamento. Para el punto de control terrestre, se utilizó dianas de color blanco y rojo con dimensión estándar de 1 m x 1 m, codificadas como "PV". La medición de estos puntos se la hizo utilizando un receptor GNSS-RTK de la marca Leica, modelo Zeno 20, colocado en el punto central de cada diana.



MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RÍO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA



PUNTOS DE VALIDACION FOTOGRAMETRICO

DATOS GENERALES

CODIGO DEL PUNTO:	PV-08	SEÑALIZACION:	TIPO DIANA - COLOR ROJO - BLANCO		
DEPARTAMENTO:	LA PAZ	PROVINCIA:	MURILLO	MUNICIPIO:	VIACHA
LUGAR DEL PROYECTO:	COMUNIDAD MANANI			FECHA:	17/06/2023

REGISTRO OBSERVADOS

SISTEMA DE REFERENCIA:	WGS-84	ZONA (UTM):	19 SUR	MODELO GEOIDAL:	EGM 2008
COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE	ALTURA ELIPSOIDAL	ALT. ORTOMETRICA	
	574968.944	8163640.223	3947.175	3901.241	
COORDENADAS GEOGRAFICAS	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	ALT. GEOIDAL	
	16° 36' 30.02" S	68° 17' 49.737" W	3947.175	45.934	
INFORMACION DEL EQUIPO	MARCA	MODELO	ALTURA DEL EQUIPO		
	LEICA	ZENO 20	2.0 metros		

UBICACION



FOTOGRAFIA



DESCRIPCION

El punto de control se ubicó en la Comunidad Mamani del Municipio de Viacha del Departamento. Para el punto de control terrestre, se utilizó dianas de color blanco y rojo con dimensión estándar de 1 m x 1 m, codificadas como "PV". La medición de estos puntos se la hizo utilizando un receptor GNSS-RTK de la marca Leica, modelo Zeno 20, colocado en el punto central de cada diana.

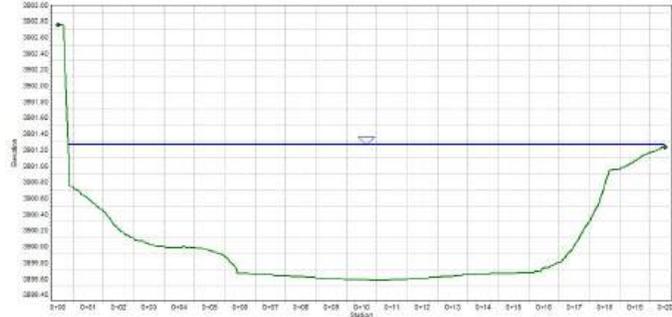
SOCAVACION GENERAL GAV-01
MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV

TC-01

Nombre del rio o cauce: Seco
 Gavion analizado: Tipo I
 Nro de gavion: 1

Propiedades geometricas hidraulicas

$y_o = 1.69$ m Profundidad inicial
 $Q_d = 35.49$ m³/s Caudal de diseño
 $B_e = 19.65$ m Ancho efectivo
 $A = 25.71$ m² Area hidraulica
 $\mu = 1.00$ Coeficiente de contraccion lateral



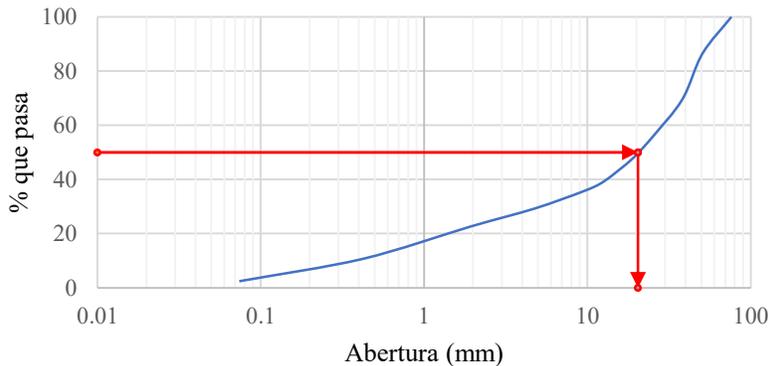
Parametros de calculo

$$d_m = \frac{A}{B_e} \rightarrow d_m = 1.31 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{d_m^{5/3} \cdot B_e \cdot \mu} \rightarrow \alpha = 1.15$$

Propiedades del material de arrastre

Curva granulometrica



Procedencia : Lecho del Rio Seco
Profundidad: 1.60 metros

Clasificacion

ASTM D 2484 -SUCS:
 GP (Grava pobremente gradada)
AASHTO M-145
 A-1a (0)

Diamentro medio D₅₀
 $D_{50} = D_m = 20.39 \text{ mm}$

Coefficientes adaptados - Suelos Granulares

Se obtiene los valores de z a partir de la tabla xx, a partir del diametro medio

$$D_{50} = 20.39 \text{ mm} \rightarrow z = 0.32 \rightarrow \frac{1}{1+z} = 0.76$$

Se obtiene los valores de β a partir de la tabla xx, a partir del periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia.

$$T_r = 100 \text{ años} \rightarrow p(\%) = 1.0\% \rightarrow \beta = 1.00$$

Calculo de la socavacion general para suelos granulares

$$y_s = \left(\frac{\alpha \cdot y_o^{5/3}}{0.68 \cdot D_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+z}} \rightarrow y_s = 1.53 \text{ m}$$

Socavacion neta $d_s = y_o - y_s \rightarrow d_s = 0.29 \text{ m}$

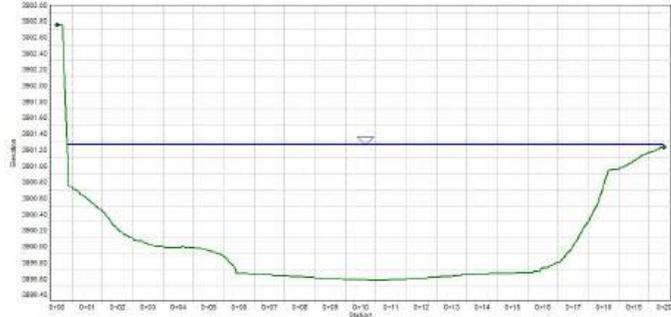
SOCAVACION GENERAL GAV-02
MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV

TC-02

Nombre del rio o cauce: Seco
Gavion analizado: Tipo I
Nro de gavion: 1

Propiedades geometricas hidraulicas

$y_o = 1.70$ m Profundidad inicial
 $Q_d = 35.49$ m³/s Caudal de diseño
 $B_e = 18.54$ m Ancho efectivo
 $A = 21.12$ m² Area hidraulica
 $\mu = 1.00$ Coeficiente de contraccion lateral



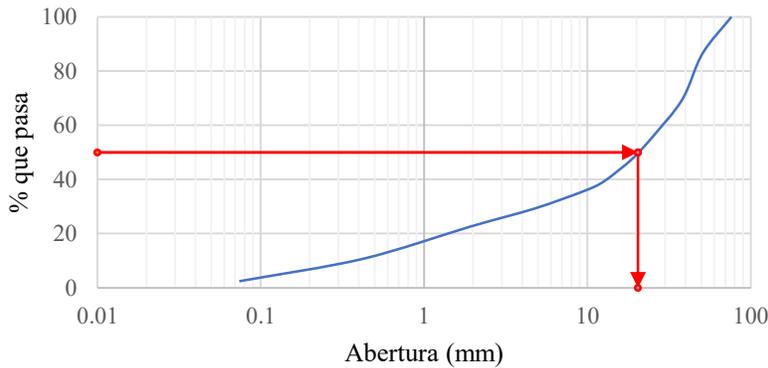
Parametros de calculo

$$d_m = \frac{A}{B_e} \rightarrow d_m = 1.14 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{d_m^{5/3} \cdot B_e \cdot \mu} \rightarrow \alpha = 1.54$$

Propiedades del material de arrastre

Curva granulometrica



Procedencia : Lecho del Rio Seco
Profundidad: 1.60 metros

Clasificacion

ASTM D 2484 -SUCS:
GP (Grava pobremente gradada)
AASHTO M-145
A-1a (0)

Diamentro medio D₅₀
 $D_{50} = D_m = 20.39 \text{ mm}$

Coefficientes adaptados - Suelos Granulares

Se obtiene los valores de z a partir de la tabla xx, a partir del diametro medio

$$D_{50} = 20.39 \text{ mm} \rightarrow z = 0.32 \rightarrow \frac{1}{1+z} = 0.76$$

Se obtiene los valores de β a partir de la tabla xx, a partir del periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia.

$$T_r = 100 \text{ años} \rightarrow p(\%) = 1.0\% \rightarrow \beta = 1.00$$

Calculo de la socavacion general para suelos granulares

$$y_s = \left(\frac{\alpha \cdot y_o^{5/3}}{0.68 \cdot D_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+z}} \rightarrow y_s = 1.92 \text{ m}$$

Socavacion neta $d_s = y_o - y_s \rightarrow d_s = 0.22 \text{ m}$

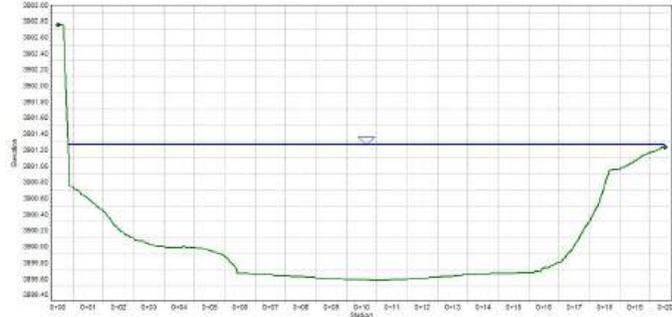
SOCAVACION GENERAL GAV-03
MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV

TC-03

Nombre del rio o cauce: Seco
Gavion analizado: Tipo I
Nro de gavion: 1

Propiedades geometricas hidraulicas

$y_o = 1.75$ m Profundidad inicial
 $Q_d = 35.49$ m³/s Caudal de diseño
 $B_e = 29.08$ m Ancho efectivo
 $A = 24.88$ m² Area hidraulica
 $\mu = 1.00$ Coeficiente de contraccion lateral



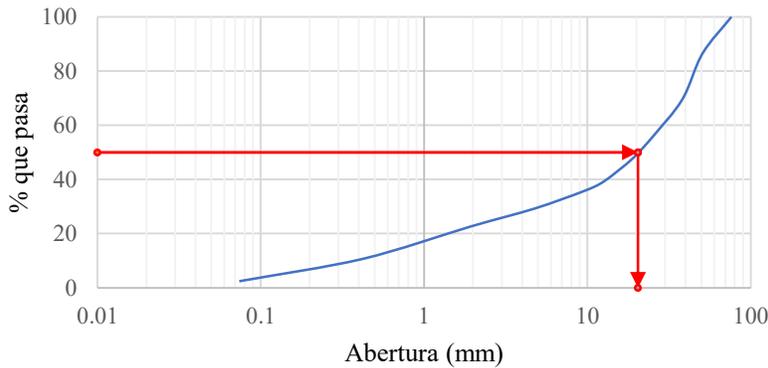
Parametros de calculo

$$d_m = \frac{A}{B_e} \rightarrow d_m = 0.86 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{d_m^{5/3} \cdot B_e \cdot \mu} \rightarrow \alpha = 1.58$$

Propiedades del material de arrastre

Curva granulometrica



Procedencia : Lecho del Rio Seco
Profundidad: 1.60 metros

Clasificacion

ASTM D 2484 -SUCS:
GP (Grava pobremente gradada)
AASHTO M-145
A-1a (0)

Diamentro medio D₅₀
 $D_{50} = D_m = 20.39 \text{ mm}$

Coefficientes adaptados - Suelos Granulares

Se obtiene los valores de z a partir de la tabla xx, a partir del diametro medio

$$D_{50} = 20.39 \text{ mm} \rightarrow z = 0.32 \rightarrow \frac{1}{1+z} = 0.76$$

Se obtiene los valores de β a partir de la tabla xx, a partir del periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia.

$$T_r = 100 \text{ años} \rightarrow p(\%) = 1.0\% \rightarrow \beta = 1.00$$

Calculo de la socavacion general para suelos granulares

$$y_s = \left(\frac{\alpha \cdot y_o^{5/3}}{0.68 \cdot D_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+z}} \rightarrow y_s = 2.03 \text{ m}$$

Socavacion neta $d_s = y_o - y_s \rightarrow d_s = 0.28 \text{ m}$

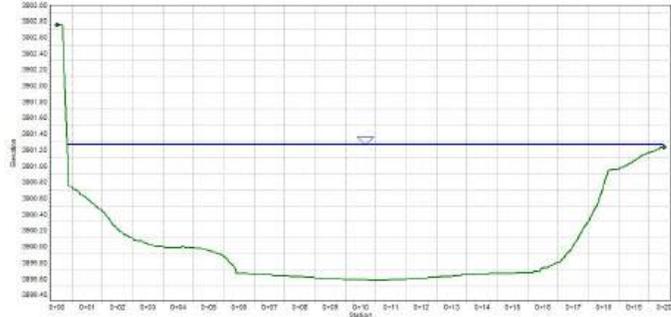
SOCAVACION GENERAL GAV-04
MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV

TC-04

Nombre del rio o cauce: Seco
Gavion analizado: Tipo I
Nro de gavion: 1

Propiedades geometricas hidraulicas

$y_o = 1.82$ m Profundidad inicial
 $Q_d = 35.49$ m³/s Caudal de diseño
 $B_e = 25.89$ m Ancho efectivo
 $A = 31.2$ m² Area hidraulica
 $\mu = 1.00$ Coeficiente de contraccion lateral



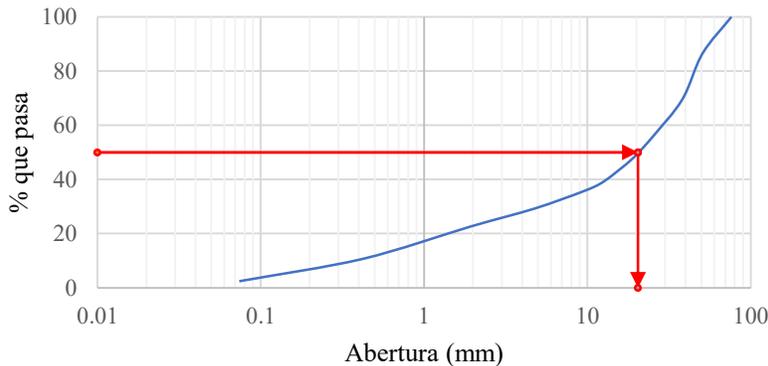
Parametros de calculo

$$d_m = \frac{A}{B_e} \rightarrow d_m = 1.21 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{d_m^{5/3} \cdot B_e \cdot \mu} \rightarrow \alpha = 1.00$$

Propiedades del material de arrastre

Curva granulometrica



Procedencia : Lecho del Rio Seco
Profundidad: 1.60 metros

Clasificacion

ASTM D 2484 -SUCS:
GP (Grava pobremente gradada)
AASTHO M-145
A-1a (0)

Diamentro medio D₅₀
 $D_{50} = D_m = 20.39 \text{ mm}$

Coefficientes adaptados - Suelos Granulares

Se obtiene los valores de z a partir de la tabla xx, a partir del diametro medio

$$D_{50} = 20.39 \text{ mm} \rightarrow z = 0.32 \rightarrow \frac{1}{1+z} = 0.76$$

Se obtiene los valores de β a partir de la tabla xx, a partir del periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia.

$$T_r = 100 \text{ años} \rightarrow p(\%) = 1.0\% \rightarrow \beta = 1.00$$

Calculo de la socavacion general para suelos granulares

$$y_s = \left(\frac{\alpha \cdot y_o^{5/3}}{0.68 \cdot D_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+z}} \rightarrow y_s = 1.51 \text{ m}$$

Socavacion neta $d_s = y_o - y_s \rightarrow d_s = 0.31 \text{ m}$

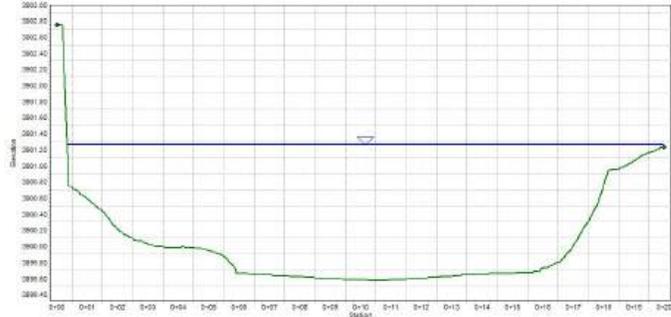
SOCAVACION GENERAL GAV-05
MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV

TC-05

Nombre del río o cauce: Seco
Gavión analizado: Tipo I
Nro de gavión: 1

Propiedades geométricas hidráulicas

$y_o = 1.88$ m Profundidad inicial
 $Q_d = 35.49$ m³/s Caudal de diseño
 $B_e = 17.42$ m Ancho efectivo
 $A = 20.87$ m² Área hidráulica
 $\mu = 1.00$ Coeficiente de contracción lateral



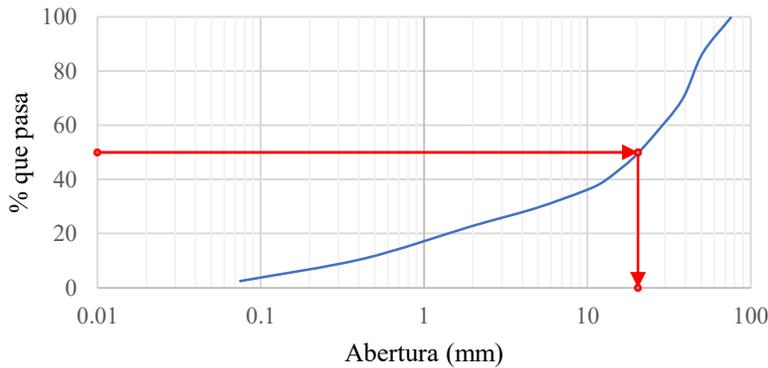
Parametros de calculo

$$d_m = \frac{A}{B_e} \rightarrow d_m = 1.2 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{d_m^{5/3} \cdot B_e \cdot \mu} \rightarrow \alpha = 1.51$$

Propiedades del material de arrastre

Curva granulometrica



Procedencia : Lecho del Río Seco
Profundidad: 1.60 metros

Clasificacion

ASTM D 2484 -SUCS:
GP (Grava pobremente gradada)
AASHTO M-145
A-1a (0)

Diamentro medio D₅₀
 $D_{50} = D_m = 20.39 \text{ mm}$

Coefficientes adaptados - Suelos Granulares

Se obtiene los valores de z a partir de la tabla xx, a partir del diámetro medio

$$D_{50} = 20.39 \text{ mm} \rightarrow z = 0.32 \rightarrow \frac{1}{1+z} = 0.76$$

Se obtiene los valores de β a partir de la tabla xx, a partir del periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia.

$$T_r = 100 \text{ años} \rightarrow p(\%) = 1.0\% \rightarrow \beta = 1.00$$

Calculo de la socavacion general para suelos granulares

$$y_s = \left(\frac{\alpha \cdot y_o^{5/3}}{0.68 \cdot D_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+z}} \rightarrow y_s = 2.14 \text{ m}$$

Socavacion neta $d_s = y_o - y_s \rightarrow d_s = 0.26 \text{ m}$

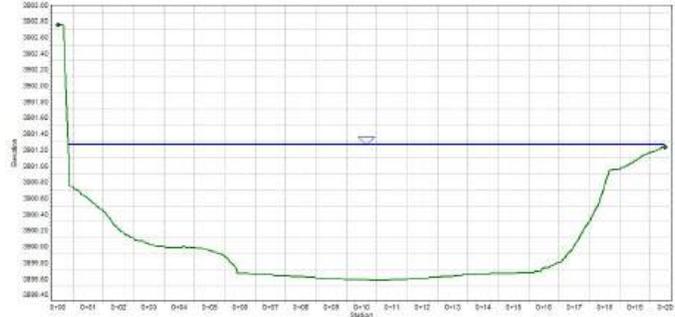
SOCAVACION GENERAL GAV-06
MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV

TC-06

Nombre del rio o cauce: Seco
Gavion analizado: Tipo II
Nro de gavion: 1

Propiedades geometricas hidraulicas

$y_o = 2.22$ m Profundidad inicial
 $Q_d = 35.49$ m³/s Caudal de diseño
 $B_e = 10.57$ m Ancho efectivo
 $A = 15.18$ m² Area hidraulica
 $\mu = 1.00$ Coeficiente de contraccion lateral



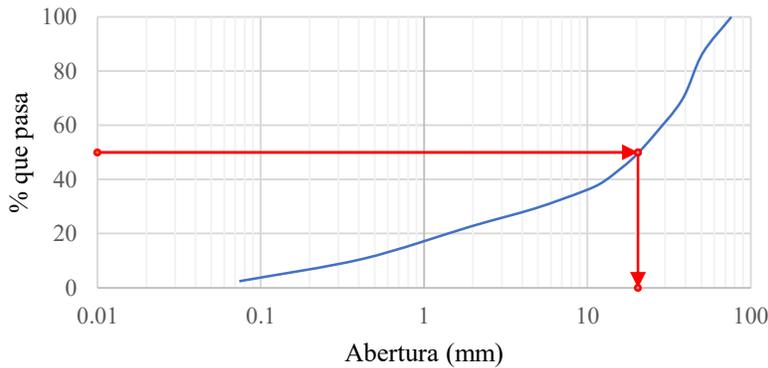
Parametros de calculo

$$d_m = \frac{A}{B_e} \rightarrow d_m = 1.44 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{d_m^{5/3} \cdot B_e \cdot \mu} \rightarrow \alpha = 1.84$$

Propiedades del material de arrastre

Curva granulometrica



Procedencia : Lecho del Rio Seco
Profundidad: 1.60 metros

Clasificacion

ASTM D 2484 -SUCS:
GP (Grava pobremente gradada)
AASTHO M-145
A-1a (0)

Diamentro medio D₅₀
 $D_{50} = D_m = 20.39 \text{ mm}$

Coefficientes adaptados - Suelos Granulares

Se obtiene los valores de z a partir de la tabla xx, a partir del diametro medio

$$D_{50} = 20.39 \text{ mm} \rightarrow z = 0.32 \rightarrow \frac{1}{1+z} = 0.76$$

Se obtiene los valores de β a partir de la tabla xx, a partir del periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia.

$$T_r = 100 \text{ años} \rightarrow p(\%) = 1.0\% \rightarrow \beta = 1.00$$

Calculo de la socavacion general para suelos granulares

$$y_s = \left(\frac{\alpha \cdot y_o^{5/3}}{0.68 \cdot D_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+z}} \rightarrow y_s = 3.08 \text{ m}$$

Socavacion neta $d_s = y_o - y_s \rightarrow d_s = 0.86 \text{ m}$

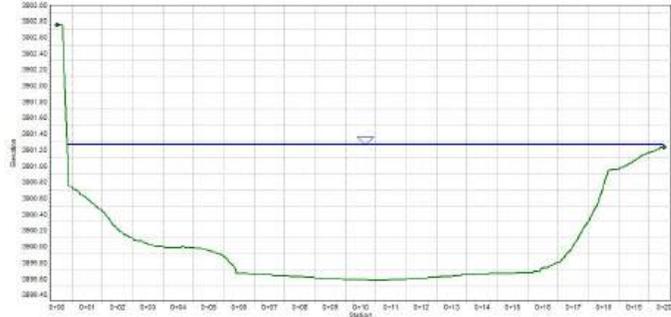
SOCAVACION GENERAL GAV-07
MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV

TC-07

Nombre del rio o cauce: Seco
Gavion analizado: Tipo II
Nro de gavion: 1

Propiedades geometricas hidraulicas

$y_o = 2.04$ m Profundidad inicial
 $Q_d = 35.49$ m³/s Caudal de diseño
 $B_e = 11.69$ m Ancho efectivo
 $A = 14.84$ m² Area hidraulica
 $\mu = 1.00$ Coeficiente de contraccion lateral



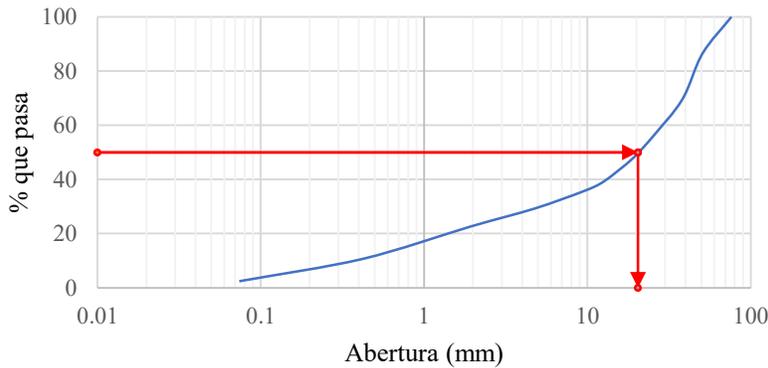
Parametros de calculo

$$d_m = \frac{A}{B_e} \rightarrow d_m = 1.27 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{d_m^{5/3} \cdot B_e \cdot \mu} \rightarrow \alpha = 2.04$$

Propiedades del material de arrastre

Curva granulometrica



Procedencia : Lecho del Rio Seco
Profundidad: 1.60 metros

Clasificacion

ASTM D 2484 -SUCS:
GP (Grava pobremente gradada)
AASHTO M-145
A-1a (0)

Diamentro medio D₅₀
 $D_{50} = D_m = 20.39 \text{ mm}$

Coefficientes adaptados - Suelos Granulares

Se obtiene los valores de z a partir de la tabla xx, a partir del diametro medio

$$D_{50} = 20.39 \text{ mm} \rightarrow z = 0.32 \rightarrow \frac{1}{1+z} = 0.76$$

Se obtiene los valores de β a partir de la tabla xx, a partir del periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia.

$$T_r = 100 \text{ años} \rightarrow p(\%) = 1.0\% \rightarrow \beta = 1.00$$

Calculo de la socavacion general para suelos granulares

$$y_s = \left(\frac{\alpha \cdot y_o^{5/3}}{0.68 \cdot D_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+z}} \rightarrow y_s = 2.99 \text{ m}$$

Socavacion neta $d_s = y_o - y_s \rightarrow d_s = 0.95 \text{ m}$

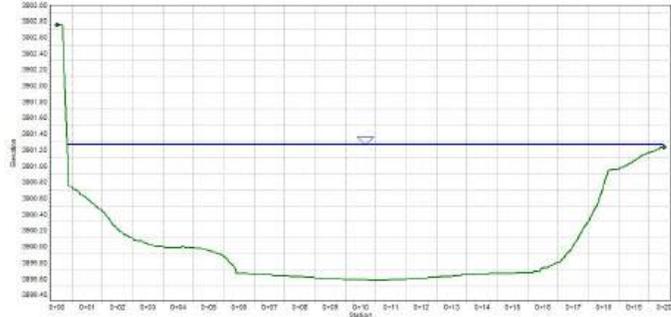
SOCAVACION GENERAL GAV-08
MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV

TC-08

Nombre del rio o cauce: Seco
Gavion analizado: Tipo II
Nro de gavion: 1

Propiedades geometricas hidraulicas

$y_o = 2.02$ m Profundidad inicial
 $Q_d = 35.49$ m³/s Caudal de diseño
 $B_e = 16.43$ m Ancho efectivo
 $A = 19.35$ m² Area hidraulica
 $\mu = 1.00$ Coeficiente de contraccion lateral



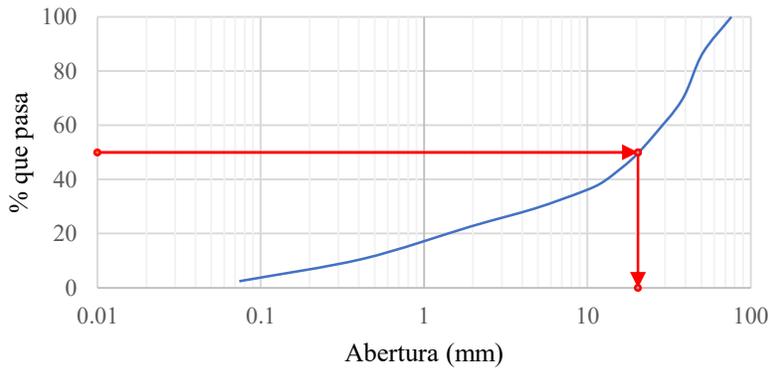
Parametros de calculo

$$d_m = \frac{A}{B_e} \rightarrow d_m = 1.18 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{d_m^{5/3} \cdot B_e \cdot \mu} \rightarrow \alpha = 1.64$$

Propiedades del material de arrastre

Curva granulometrica



Procedencia : Lecho del Rio Seco
Profundidad: 1.60 metros

Clasificacion

ASTM D 2484 -SUCS:
GP (Grava pobremente gradada)
AASTHO M-145
A-1a (0)

Diamentro medio D₅₀
 $D_{50} = D_m = 20.39 \text{ mm}$

Coefficientes adaptados - Suelos Granulares

Se obtiene los valores de z a partir de la tabla xx, a partir del diametro medio

$$D_{50} = 20.39 \text{ mm} \rightarrow z = 0.32 \rightarrow \frac{1}{1+z} = 0.76$$

Se obtiene los valores de β a partir de la tabla xx, a partir del periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia.

$$T_r = 100 \text{ años} \rightarrow p(\%) = 1.0\% \rightarrow \beta = 1.00$$

Calculo de la socavacion general para suelos granulares

$$y_s = \left(\frac{\alpha \cdot y_o^{5/3}}{0.68 \cdot D_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+z}} \rightarrow y_s = 2.51 \text{ m}$$

Socavacion neta $d_s = y_o - y_s \rightarrow d_s = 0.49 \text{ m}$

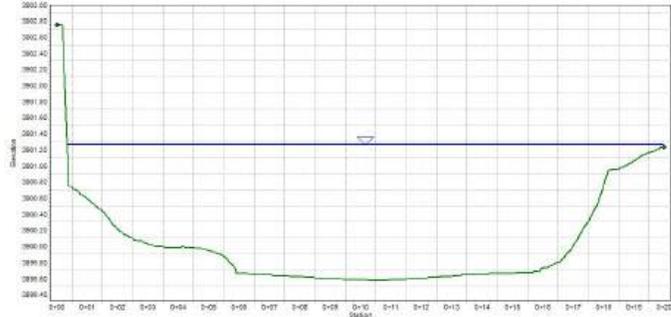
SOCAVACION GENERAL GAV-09
MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV

TC-09

Nombre del río o cauce: Seco
Gavión analizado: Tipo II
Nro de gavión: 1

Propiedades geométricas hidráulicas

$y_o = 1.97$ m Profundidad inicial
 $Q_d = 35.49$ m³/s Caudal de diseño
 $B_e = 14.55$ m Ancho efectivo
 $A = 18.06$ m² Área hidráulica
 $\mu = 1.00$ Coeficiente de contracción lateral



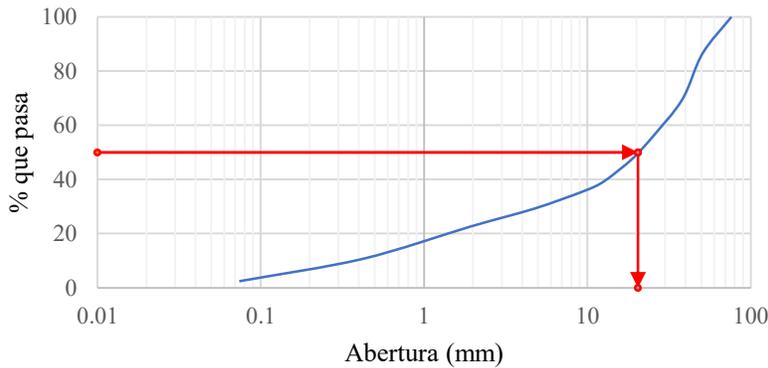
Parametros de calculo

$$d_m = \frac{A}{B_e} \rightarrow d_m = 1.24 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{d_m^{5/3} \cdot B_e \cdot \mu} \rightarrow \alpha = 1.70$$

Propiedades del material de arrastre

Curva granulometrica



Procedencia : Lecho del Río Seco
Profundidad: 1.60 metros

Clasificacion

ASTM D 2484 -SUCS:
GP (Grava pobremente gradada)
AASTHO M-145
A-1a (0)

Diámetro medio D₅₀
 $D_{50} = D_m = 20.39 \text{ mm}$

Coefficientes adaptados - Suelos Granulares

Se obtiene los valores de z a partir de la tabla xx, a partir del diámetro medio

$$D_{50} = 20.39 \text{ mm} \rightarrow z = 0.32 \rightarrow \frac{1}{1+z} = 0.76$$

Se obtiene los valores de β a partir de la tabla xx, a partir del periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia.

$$T_r = 100 \text{ años} \rightarrow p(\%) = 1.0\% \rightarrow \beta = 1.00$$

Calculo de la socavacion general para suelos granulares

$$y_s = \left(\frac{\alpha \cdot y_o^{5/3}}{0.68 \cdot D_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+z}} \rightarrow y_s = 2.49 \text{ m}$$

Socavacion neta $d_s = y_o - y_s \rightarrow d_s = 0.52 \text{ m}$

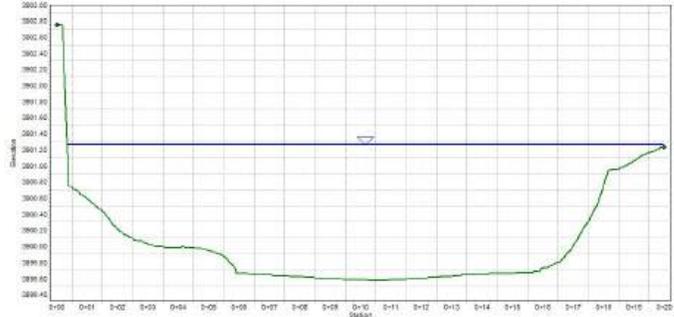
SOCAVACION GENERAL GAV-10
MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV

TC-10

Nombre del rio o cauce: Seco
Gavion analizado: Tipo II
Nro de gavion: 1

Propiedades geometricas hidraulicas

$y_o = 1.95$ m Profundidad inicial
 $Q_d = 35.49$ m³/s Caudal de diseño
 $B_e = 22.36$ m Ancho efectivo
 $A = 22.2$ m² Area hidraulica
 $\mu = 1.00$ Coeficiente de contraccion lateral



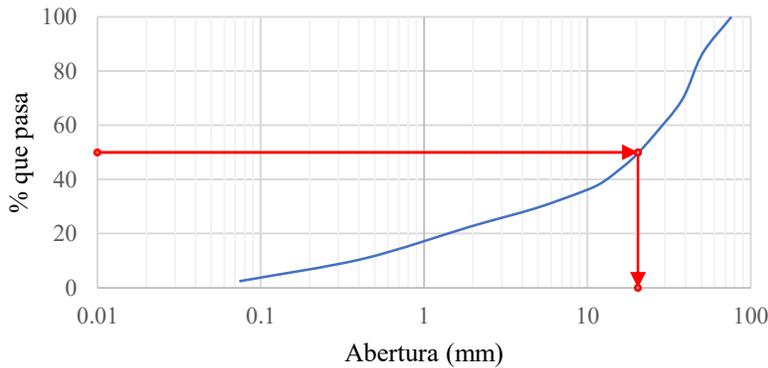
Parametros de calculo

$$d_m = \frac{A}{B_e} \rightarrow d_m = 0.99 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{d_m^{5/3} \cdot B_e \cdot \mu} \rightarrow \alpha = 1.61$$

Propiedades del material de arrastre

Curva granulometrica



Procedencia : Lecho del Rio Seco
Profundidad: 1.60 metros

Clasificacion

ASTM D 2484 -SUCS:
GP (Grava pobremente gradada)
AASTHO M-145
A-1a (0)

Diamentro medio D₅₀
 $D_{50} = D_m = 20.39 \text{ mm}$

Coefficientes adaptados - Suelos Granulares

Se obtiene los valores de z a partir de la tabla xx, a partir del diametro medio

$$D_{50} = 20.39 \text{ mm} \rightarrow z = 0.32 \rightarrow \frac{1}{1+z} = 0.76$$

Se obtiene los valores de β a partir de la tabla xx, a partir del periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia.

$$T_r = 100 \text{ años} \rightarrow p(\%) = 1.0\% \rightarrow \beta = 1.00$$

Calculo de la socavacion general para suelos granulares

$$y_s = \left(\frac{\alpha \cdot y_o^{5/3}}{0.68 \cdot D_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+z}} \rightarrow y_s = 2.36 \text{ m}$$

Socavacion neta $d_s = y_o - y_s \rightarrow d_s = 0.41 \text{ m}$

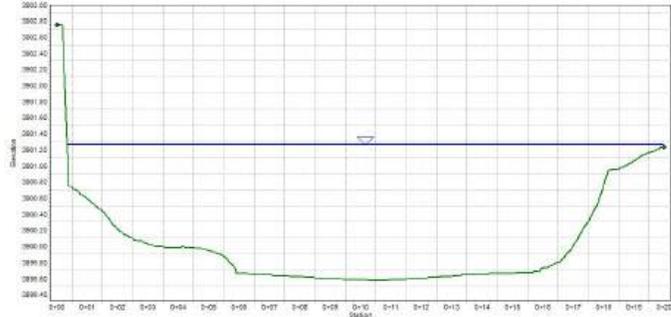
SOCAVACION GENERAL GAV-11
MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV

TC-11

Nombre del rio o cauce: Seco
Gavion analizado: Tipo II
Nro de gavion: 1

Propiedades geometricas hidraulicas

$y_o = 1.98$ m Profundidad inicial
 $Q_d = 35.49$ m³/s Caudal de diseño
 $B_e = 11.4$ m Ancho efectivo
 $A = 16.4$ m² Area hidraulica
 $\mu = 1.00$ Coeficiente de contraccion lateral



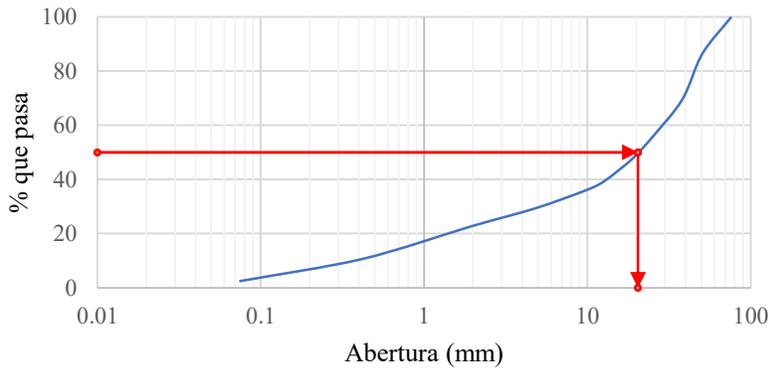
Parametros de calculo

$$d_m = \frac{A}{B_e} \rightarrow d_m = 1.44 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{d_m^{5/3} \cdot B_e \cdot \mu} \rightarrow \alpha = 1.70$$

Propiedades del material de arrastre

Curva granulometrica



Procedencia : Lecho del Rio Seco
Profundidad: 1.60 metros

Clasificacion

ASTM D 2484 -SUCS:
GP (Grava pobremente gradada)
AASHTO M-145
A-1a (0)

Diamentro medio D₅₀
 $D_{50} = D_m = 20.39 \text{ mm}$

Coefficientes adaptados - Suelos Granulares

Se obtiene los valores de z a patir de la tabla xx, a partir del diametro medio

$$D_{50} = 20.39 \text{ mm} \rightarrow z = 0.32 \rightarrow \frac{1}{1+z} = 0.76$$

Se obtiene los valores de β a patir de la tabla xx, a partir del periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia.

$$T_r = 100 \text{ años} \rightarrow p(\%) = 1.0\% \rightarrow \beta = 1.00$$

Calculo de la socavacion general para suelos granulares

$$y_s = \left(\frac{\alpha \cdot y_o^{5/3}}{0.68 \cdot D_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+z}} \rightarrow y_s = 2.51 \text{ m}$$

Socavacion neta $d_s = y_o - y_s \rightarrow d_s = 0.53 \text{ m}$

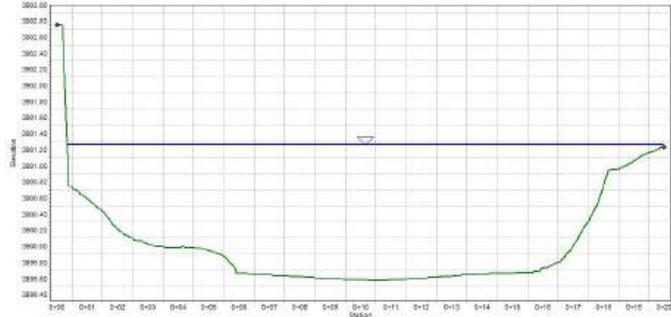
SOCAVACION GENERAL GAV-12
MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV

TC-12

Nombre del rio o cauce: Seco
Gavion analizado: Tipo II
Nro de gavion: 1

Propiedades geometricas hidraulicas

$y_o = 2.01$ m Profundidad inicial
 $Q_d = 35.49$ m³/s Caudal de diseño
 $B_e = 18.28$ m Ancho efectivo
 $A = 19.65$ m² Area hidraulica
 $\mu = 1.00$ Coeficiente de contraccion lateral



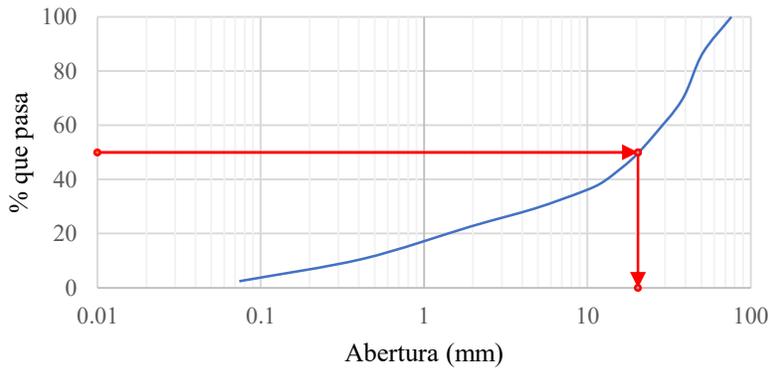
Parametros de calculo

$$d_m = \frac{A}{B_e} \rightarrow d_m = 1.07 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{d_m^{5/3} \cdot B_e \cdot \mu} \rightarrow \alpha = 1.72$$

Propiedades del material de arrastre

Curva granulometrica



Procedencia : Lecho del Rio Seco
Profundidad: 1.60 metros

Clasificacion

ASTM D 2484 -SUCS:
GP (Grava pobremente gradada)
AASTHO M-145
A-1a (0)

Diametro medio D₅₀
 $D_{50} = D_m = 20.39 \text{ mm}$

Coefficientes adaptados - Suelos Granulares

Se obtiene los valores de z a partir de la tabla xx, a partir del diametro medio

$$D_{50} = 20.39 \text{ mm} \rightarrow z = 0.32 \rightarrow \frac{1}{1+z} = 0.76$$

Se obtiene los valores de β a partir de la tabla xx, a partir del periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia.

$$T_r = 100 \text{ años} \rightarrow p(\%) = 1.0\% \rightarrow \beta = 1.00$$

Calculo de la socavacion general para suelos granulares

$$y_s = \left(\frac{\alpha \cdot y_o^{5/3}}{0.68 \cdot D_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+z}} \rightarrow y_s = 2.58 \text{ m}$$

Socavacion neta $d_s = y_o - y_s \rightarrow d_s = 0.57 \text{ m}$

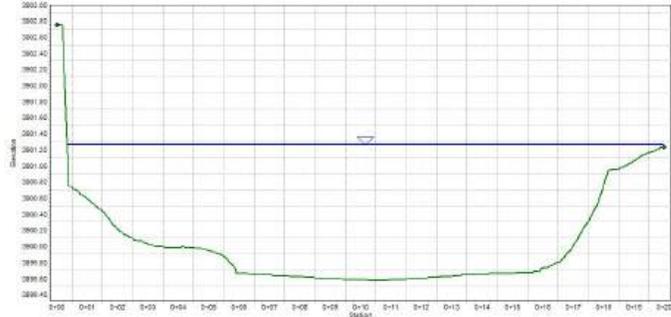
SOCAVACION GENERAL GAV-13
MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV

TC-13

Nombre del rio o cauce: Seco
Gavion analizado: Tipo II
Nro de gavion: 1

Propiedades geometricas hidraulicas

$y_o = 2.01$ m Profundidad inicial
 $Q_d = 35.49$ m³/s Caudal de diseño
 $B_e = 21.13$ m Ancho efectivo
 $A = 19.51$ m² Area hidraulica
 $\mu = 1.00$ Coeficiente de contraccion lateral



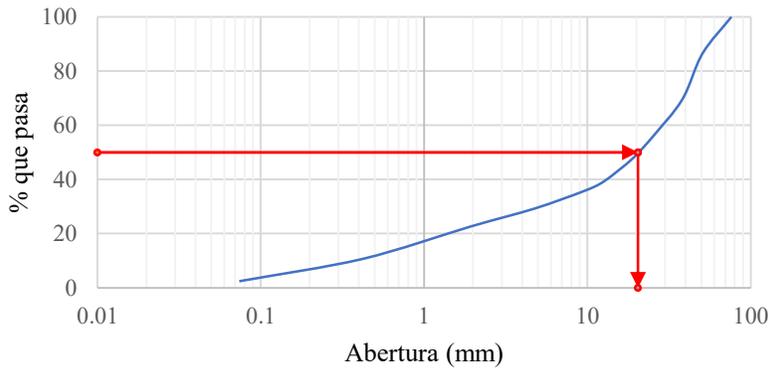
Parametros de calculo

$$d_m = \frac{A}{B_e} \rightarrow d_m = 0.92 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{d_m^{5/3} \cdot B_e \cdot \mu} \rightarrow \alpha = 1.92$$

Propiedades del material de arrastre

Curva granulometrica



Procedencia : Lecho del Rio Seco
Profundidad: 1.60 metros

Clasificacion

ASTM D 2484 -SUCS:
GP (Grava pobremente gradada)
AASTHO M-145
A-1a (0)

Diamentro medio D₅₀
 $D_{50} = D_m = 20.39 \text{ mm}$

Coefficientes adaptados - Suelos Granulares

Se obtiene los valores de z a partir de la tabla xx, a partir del diametro medio

$$D_{50} = 20.39 \text{ mm} \rightarrow z = 0.32 \rightarrow \frac{1}{1+z} = 0.76$$

Se obtiene los valores de β a partir de la tabla xx, a partir del periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia.

$$T_r = 100 \text{ años} \rightarrow p(\%) = 1.0\% \rightarrow \beta = 1.00$$

Calculo de la socavacion general para suelos granulares

$$y_s = \left(\frac{\alpha \cdot y_o^{5/3}}{0.68 \cdot D_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+z}} \rightarrow y_s = 2.80 \text{ m}$$

Socavacion neta $d_s = y_o - y_s \rightarrow d_s = 0.79 \text{ m}$

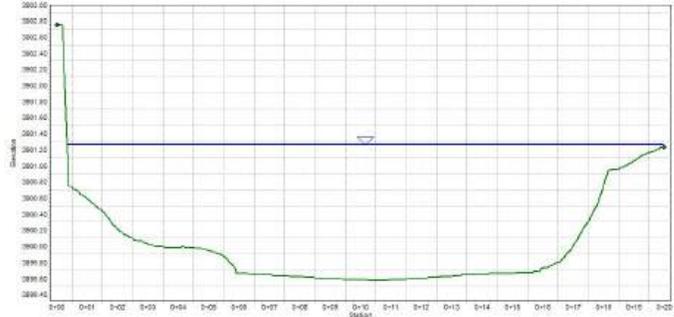
SOCAVACION GENERAL GAV-14
MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV

TC-14

Nombre del río o cauce: Seco
Gavión analizado: Tipo II
Nro de gavión: 1

Propiedades geométricas hidráulicas

$y_o = 2$ m Profundidad inicial
 $Q_d = 35.49$ m³/s Caudal de diseño
 $B_e = 11.1$ m Ancho efectivo
 $A = 16.35$ m² Área hidráulica
 $\mu = 1.00$ Coeficiente de contracción lateral



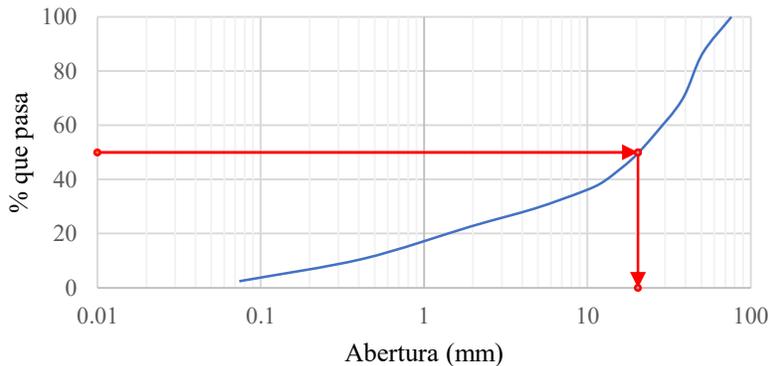
Parametros de calculo

$$d_m = \frac{A}{B_e} \rightarrow d_m = 1.47 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{d_m^{5/3} \cdot B_e \cdot \mu} \rightarrow \alpha = 1.68$$

Propiedades del material de arrastre

Curva granulometrica



Procedencia : Lecho del Río Seco
Profundidad: 1.60 metros

Clasificacion

ASTM D 2484 -SUCS:
GP (Grava pobremente gradada)
AASTHO M-145
A-1a (0)

Diamentro medio D₅₀
 $D_{50} = D_m = 20.39 \text{ mm}$

Coefficientes adaptados - Suelos Granulares

Se obtiene los valores de z a partir de la tabla xx, a partir del diametro medio

$$D_{50} = 20.39 \text{ mm} \rightarrow z = 0.32 \rightarrow \frac{1}{1+z} = 0.76$$

Se obtiene los valores de β a partir de la tabla xx, a partir del periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia.

$$T_r = 100 \text{ años} \rightarrow p(\%) = 1.0\% \rightarrow \beta = 1.00$$

Calculo de la socavacion general para suelos granulares

$$y_s = \left(\frac{\alpha \cdot y_o^{5/3}}{0.68 \cdot D_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+z}} \rightarrow y_s = 2.52 \text{ m}$$

Socavacion neta $d_s = y_o - y_s \rightarrow d_s = 0.52 \text{ m}$

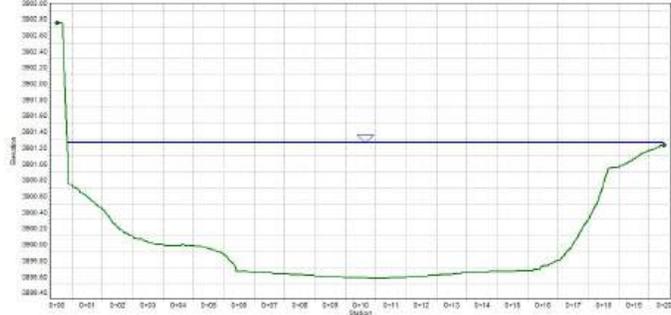
SOCAVACION GENERAL GAV-15
MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV

TC-15

Nombre del rio o cauce: Seco
Gavion analizado: Tipo II
Nro de gavion: 1

Propiedades geometricas hidraulicas

$y_o = 2$ m Profundidad inicial
 $Q_d = 35.49$ m³/s Caudal de diseño
 $B_e = 10.65$ m Ancho efectivo
 $A = 15.78$ m² Area hidraulica
 $\mu = 1.00$ Coeficiente de contraccion lateral



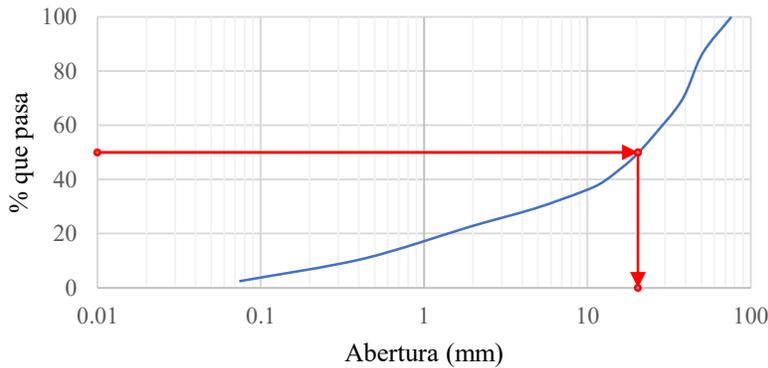
Parametros de calculo

$$d_m = \frac{A}{B_e} \rightarrow d_m = 1.48 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{d_m^{5/3} \cdot B_e \cdot \mu} \rightarrow \alpha = 1.73$$

Propiedades del material de arrastre

Curva granulometrica



Procedencia : Lecho del Rio Seco
Profundidad: 1.60 metros

Clasificacion

ASTM D 2484 -SUCS:
GP (Grava pobremente gradada)
AASTHO M-145
A-1a (0)

Diamentro medio D₅₀
 $D_{50} = D_m = 20.39 \text{ mm}$

Coefficientes adaptados - Suelos Granulares

Se obtiene los valores de z a partir de la tabla xx, a partir del diametro medio

$$D_{50} = 20.39 \text{ mm} \rightarrow z = 0.32 \rightarrow \frac{1}{1+z} = 0.76$$

Se obtiene los valores de β a partir de la tabla xx, a partir del periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia.

$$T_r = 100 \text{ años} \rightarrow p(\%) = 1.0\% \rightarrow \beta = 1.00$$

Calculo de la socavacion general para suelos granulares

$$y_s = \left(\frac{\alpha \cdot y_o^{5/3}}{0.68 \cdot D_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+z}} \rightarrow y_s = 2.58 \text{ m}$$

Socavacion neta $d_s = y_o - y_s \rightarrow d_s = 0.58 \text{ m}$

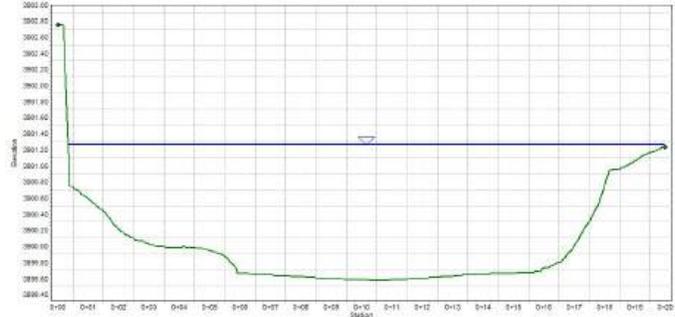
SOCAVACION GENERAL GAV-16
MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV

TC-16

Nombre del rio o cauce: Seco
Gavion analizado: Tipo II
Nro de gavion: 1

Propiedades geometricas hidraulicas

$y_o = 2.07$ m Profundidad inicial
 $Q_d = 35.49$ m³/s Caudal de diseño
 $B_e = 13.86$ m Ancho efectivo
 $A = 18.6$ m² Area hidraulica
 $\mu = 1.00$ Coeficiente de contraccion lateral



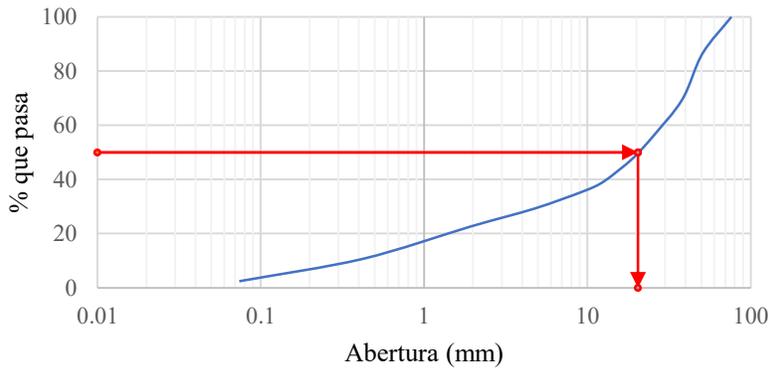
Parametros de calculo

$$d_m = \frac{A}{B_e} \rightarrow d_m = 1.34 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{d_m^{5/3} \cdot B_e \cdot \mu} \rightarrow \alpha = 1.57$$

Propiedades del material de arrastre

Curva granulometrica



Procedencia : Lecho del Rio Seco
Profundidad: 1.60 metros

Clasificacion

ASTM D 2484 -SUCS:
GP (Grava pobremente gradada)
AASTHO M-145
A-1a (0)

Diamentro medio D₅₀
 $D_{50} = D_m = 20.39 \text{ mm}$

Coefficientes adaptados - Suelos Granulares

Se obtiene los valores de z a partir de la tabla xx, a partir del diametro medio

$$D_{50} = 20.39 \text{ mm} \rightarrow z = 0.32 \rightarrow \frac{1}{1+z} = 0.76$$

Se obtiene los valores de β a partir de la tabla xx, a partir del periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia.

$$T_r = 100 \text{ años} \rightarrow p(\%) = 1.0\% \rightarrow \beta = 1.00$$

Calculo de la socavacion general para suelos granulares

$$y_s = \left(\frac{\alpha \cdot y_o^{5/3}}{0.68 \cdot D_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+z}} \rightarrow y_s = 2.50 \text{ m}$$

Socavacion neta $d_s = y_o - y_s \rightarrow d_s = 0.43 \text{ m}$

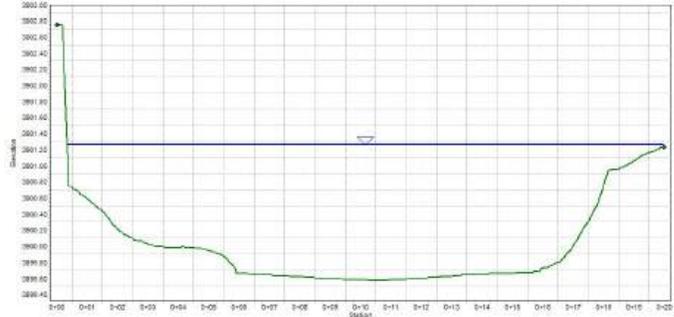
SOCAVACION GENERAL GAV-17
MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV

TC-17

Nombre del río o cauce: Seco
 Gavion analizado: Tipo II
 Nro de gavion: 1

Propiedades geométricas hidráulicas

$y_o = 2.08$ m Profundidad inicial
 $Q_d = 35.49$ m³/s Caudal de diseño
 $B_e = 18.75$ m Ancho efectivo
 $A = 17.45$ m² Área hidráulica
 $\mu = 1.00$ Coeficiente de contracción lateral



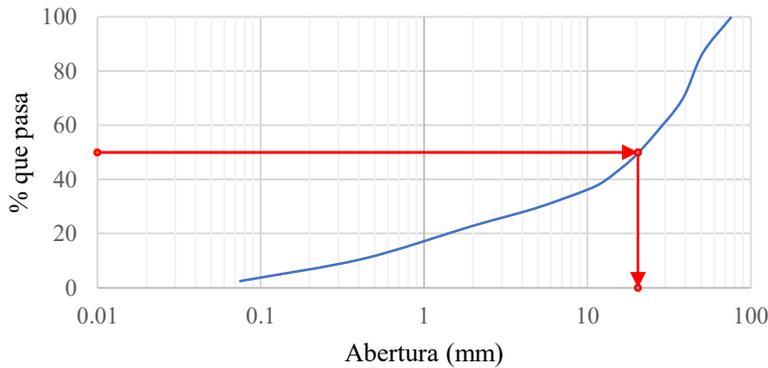
Parámetros de cálculo

$$d_m = \frac{A}{B_e} \rightarrow d_m = 0.93 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{d_m^{5/3} \cdot B_e \cdot \mu} \rightarrow \alpha = 2.13$$

Propiedades del material de arrastre

Curva granulométrica



Procedencia : Lecho del Río Seco
Profundidad: 1.60 metros

Clasificación

ASTM D 2484 -SUCS:
 GP (Grava pobremente gradada)
AASTHO M-145
 A-1a (0)

Diámetro medio D₅₀
 $D_{50} = D_m = 20.39 \text{ mm}$

Coefficientes adaptados - Suelos Granulares

Se obtiene los valores de z a partir de la tabla xx, a partir del diámetro medio

$$D_{50} = 20.39 \text{ mm} \rightarrow z = 0.32 \rightarrow \frac{1}{1+z} = 0.76$$

Se obtiene los valores de β a partir de la tabla xx, a partir del periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia.

$$T_r = 100 \text{ años} \rightarrow p(\%) = 1.0\% \rightarrow \beta = 1.00$$

Calculo de la socavacion general para suelos granulares

$$y_s = \left(\frac{\alpha \cdot y_o^{5/3}}{0.68 \cdot D_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+z}} \rightarrow y_s = 3.17 \text{ m}$$

Socavacion neta $d_s = y_o - y_s \rightarrow d_s = 1.09 \text{ m}$

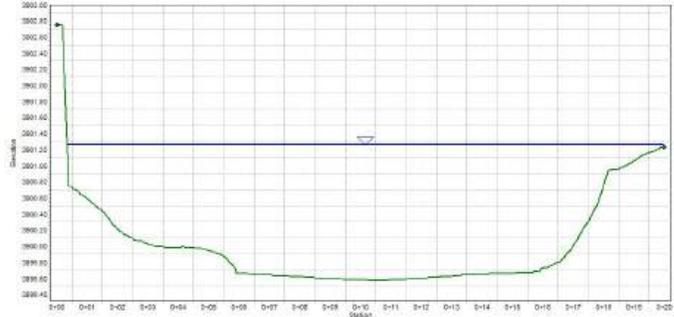
SOCAVACION GENERAL GAV-18
MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV

TC-18

Nombre del río o cauce: Seco
Gavión analizado: Tipo II
Nro de gavión: 1

Propiedades geométricas hidráulicas

$y_o = 2.11$ m Profundidad inicial
 $Q_d = 35.49$ m³/s Caudal de diseño
 $B_e = 18.75$ m Ancho efectivo
 $A = 19.42$ m² Área hidráulica
 $\mu = 1.00$ Coeficiente de contracción lateral



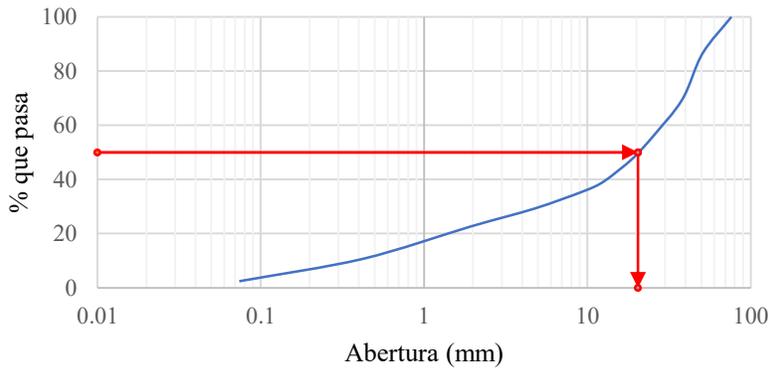
Parametros de calculo

$$d_m = \frac{A}{B_e} \rightarrow d_m = 1.04 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{d_m^{5/3} \cdot B_e \cdot \mu} \rightarrow \alpha = 1.79$$

Propiedades del material de arrastre

Curva granulometrica



Procedencia : Lecho del Río Seco
Profundidad: 1.60 metros

Clasificacion

ASTM D 2484 -SUCS:
GP (Grava pobremente gradada)
AASTHO M-145
A-1a (0)

Diamentro medio D₅₀
 $D_{50} = D_m = 20.39 \text{ mm}$

Coefficientes adaptados - Suelos Granulares

Se obtiene los valores de z a partir de la tabla xx, a partir del diametro medio

$$D_{50} = 20.39 \text{ mm} \rightarrow z = 0.32 \rightarrow \frac{1}{1+z} = 0.76$$

Se obtiene los valores de β a partir de la tabla xx, a partir del periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia.

$$T_r = 100 \text{ años} \rightarrow p(\%) = 1.0\% \rightarrow \beta = 1.00$$

Calculo de la socavacion general para suelos granulares

$$y_s = \left(\frac{\alpha \cdot y_o^{5/3}}{0.68 \cdot D_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+z}} \rightarrow y_s = 2.82 \text{ m}$$

Socavacion neta $d_s = y_o - y_s \rightarrow d_s = 0.71 \text{ m}$

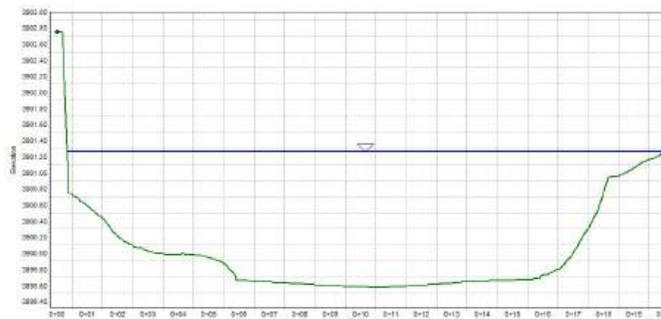
SOCAVACION GENERAL GAV-19
MÉTODO DE LISCHTVAN-LEBEDIEV

TC-19

Nombre del rio o cauce: Seco
Gavion analizado: Tipo II
Nro de gavion: 1

Propiedades geometricas hidraulicas

$y_o = 2.14$ m Profundidad inicial
 $Q_d = 35.49$ m³/s Caudal de diseño
 $B_e = 28.59$ m Ancho efectivo
 $A = 32.02$ m² Area hidraulica
 $\mu = 1.00$ Coeficiente de contraccion lateral



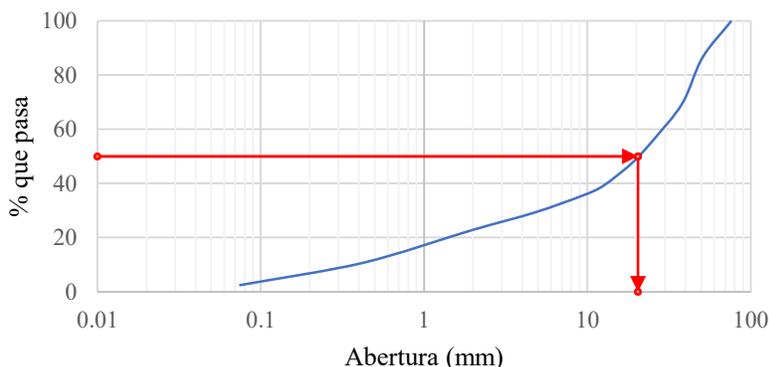
Parametros de calculo

$$d_m = \frac{A}{B_e} \rightarrow d_m = 1.12 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{d_m^{5/3} \cdot B_e \cdot \mu} \rightarrow \alpha = 1.03$$

Propiedades del material de arrastre

Curva granulometrica



Procedencia : Lecho del Rio Seco
Profundidad: 1.60 metros

Clasificacion

ASTM D 2484 -SUCS:
GP (Grava pobremente gradada)
AASTHO M-145
A-1a (0)

Diamentro medio D₅₀
 $D_{50} = D_m = 20.39 \text{ mm}$

Coefficientes adaptados - Suelos Granulares

Se obtiene los valores de z a partir de la tabla xx, a partir del diametro medio

$$D_{50} = 20.39 \text{ mm} \rightarrow z = 0.32 \rightarrow \frac{1}{1+z} = 0.76$$

Se obtiene los valores de β a partir de la tabla xx, a partir del periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia.

$$T_r = 100 \text{ años} \rightarrow p(\%) = 1.0\% \rightarrow \beta = 1.00$$

Calculo de la socavacion general para suelos granulares

$$y_s = \left(\frac{\alpha \cdot y_o^{5/3}}{0.68 \cdot D_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+z}} \rightarrow y_s = 1.89 \text{ m}$$

Socavacion neta $d_s = y_o - y_s \rightarrow d_s = 0.25 \text{ m}$

DISEÑO DE MURO DE GAVIONES

PROYECTO : MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RIO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA

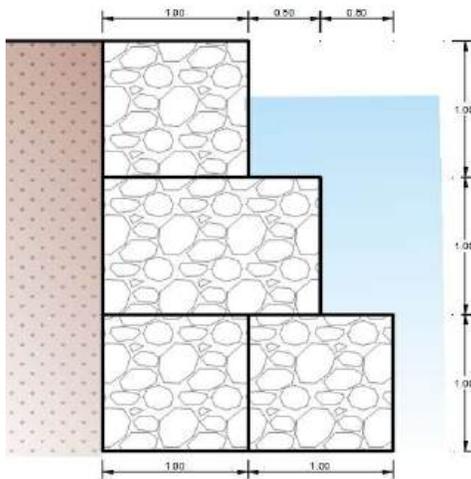
UBICACIÓN : COMUNIDAD MAMANI - MUNICIPIO DE VIACHA

GAV-TIPO I

DATOS PARA EL DISEÑO:

- Peso específico del suelo :	$\gamma_s = 2.24 \text{ tn/m}^3$	- Peso específico del agua :	$\gamma_a = 1.00 \text{ tn/m}^3$
- Peso específico del gavion :	$\gamma_r = 2.70 \text{ tn/m}^3$	- Tirante de agua :	$y_a = 2.05 \text{ m}$
- Ángulo de fricción :	$\phi = 40.00^\circ$		
- Capacidad portante :	$\sigma_s = 0.85 \text{ kg/cm}^2$		

GEOMETRÍA DEL MURO:



Altura de cada bloque :	$h_B = 1.00 \text{ m}$
Ancho de cada bloque :	$b_B = 1.00 \text{ m}$
Altura total del muro :	$H_T = 3.00 \text{ m}$

Predimensionado de la base: $B = \frac{1}{2}(1 + H_T)$

Dimensión de la base :	$A_B = 2.00 \text{ m}$
Adoptamos una base de :	$B = 2.00 \text{ m}$

CÁLCULO DEL EMPUJE ACTIVO:

- EMPUJE ACTIVO:

Coefficiente de empuje activo:

$$K_a = \tan\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)^2 = 0.217$$

Cálculo del empuje activo del suelo

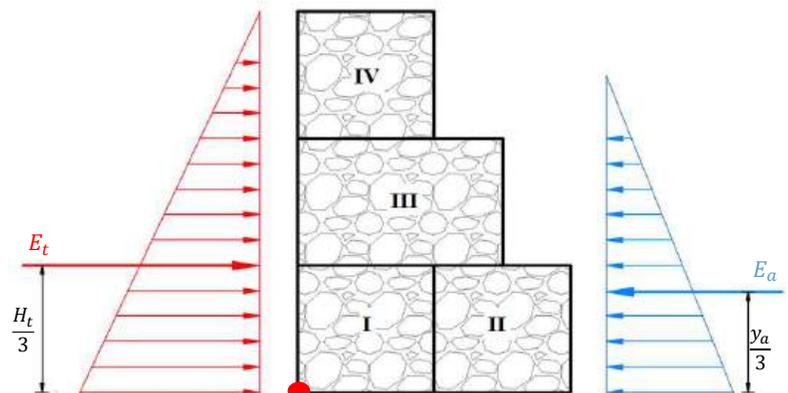
$$E_T = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma_s \cdot H_T^2 = 2.192 \text{ tn}$$

Altura de aplicación del empuje activo:

$$Y = \frac{H_T}{3} = 1.000 \text{ m}$$

Cálculo del empuje del hidrostático:

$$E_A = \frac{1}{2} \cdot \gamma_a \cdot y_a^2 = 2.101 \text{ tn}$$



Altura de aplicación del empuje hidrostático:

$$Y_a = \frac{y_a}{3} = 0.683 \text{ m}$$

ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD:

- CÁLCULO DEL PESO TOTAL Y MOMENTO PRODUCIDO POR EL MURO GAVION:

GAV.	TIPO	ÁREA (m ²)	PESO UNITARIO	PESO PARCIAL	BRAZO X (m)	MOMENTO (tn-m)
I	Gavión	1.000	2.70 tn/m ³	2.70 tn/m	0.500	1.3500
II	Gavión	1.000	2.70 tn/m ³	2.70 tn/m	1.500	4.0500
III	Gavión	1.000	2.70 tn/m ³	2.70 tn/m	1.250	3.3750
IV	Gavión	1.000	2.70 tn/m ³	2.70 tn/m	1.500	4.0500
			Σ =	10.80 tn/m	Σ =	12.825

$$P = 10.80 \text{ tn}$$

$$M_r = 12.8 \text{ tn-m}$$

- CÁLCULO DE LOS MOMENTOS ACTUANTES EN EL MURO DE GAVION

Momento producido por el empuje activo: $M_A = E_T \cdot Y$ $M_A = 2.192 \text{ tn-m}$

Momento producido por el empuje hidrostático: $M_H = E_A \cdot Y_A$ $M_H = 1.436 \text{ tn-m}$

- VERIFICACIÓN POR DESLIZAMIENTO: FSD = 1.50

$$\frac{f \cdot P}{E_A - E_H} \geq FSL \quad ; \quad \text{donde: } f = tg\phi \rightarrow f = 0.839 \quad \text{Coeficiente de fricción suelo - estructura}$$

$$FSD = 2.11 > 1.50$$

... Cumple

- VERIFICACIÓN POR VOLTEO: FSD = 2.00

$$\frac{M_r + M_H}{M_A} \geq FSV$$

$$FSV = 6.51 > 2.00$$

... Cumple

- VERIFICACIÓN DE PRESIONES SOBRE EL TERRENO:

Punto de aplicación de la fuerza resultante:

$$X_0 = \frac{M_r - M_A - M_H}{P} = 0.85 \text{ m}$$

Excentricidad de la fuerza resultante:

$$e = \frac{B}{2} - X_0 = 0.148 \text{ m} \quad \text{Se debe cumplir que: } e < \frac{B}{6} = 0.33 \text{ m} \quad \text{... Ok: cae dentro del tercio central}$$

Verificamos las presiones de contacto entre el suelo y el muro:

$$\sigma = \frac{P}{B} \left[1 \pm \frac{6 \cdot e}{B} \right]$$

$$\sigma_1 = 0.78 \text{ kg/cm}^2 < \sigma_s = 0.85 \text{ kg/cm}^2$$

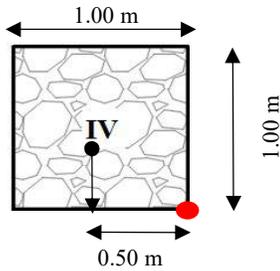
... Cumple

$$\sigma_2 = 0.30 \text{ kg/cm}^2 < \sigma_s = 0.85 \text{ kg/cm}^2$$

... Cumple

VERIFICACIÓN ENTRE BLOQUE Y BLOQUE:

- PRIMER BLOQUE:



Fuerzas estabilizantes :

Peso (IV) = 2.70 tn

Momento (IV) = 1.350 tn-m

Fuerzas desestabilizantes :

$$E_A = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma_S \cdot H_{IV}^2 = 0.244 \text{ tn}$$

$$M_A = E_A \cdot Y = 0.081 \text{ tn-m}$$

Verificación por deslizamiento : FSD = 1.50

$$\frac{f \cdot P}{E_A} \geq FSD \quad f = 0.839$$

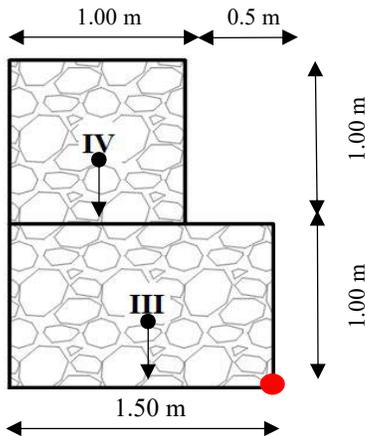
FSD = 9.30 > 1.50 ... **Cumple**

Verificación por volteo : FSV = 2.00

$$\frac{M_r}{M_A} \geq FSV$$

FSV = 16.63 > 2.00 ... **Cumple**

- SEGUNDO BLOQUE:



Fuerzas estabilizantes :

Peso (IV) = 2.70 tn

Momento (IV) = 2.70 tn-m

Peso (III) = 4.05 tn

Momento (III) = 3.04 tn-m

$$\Sigma = 6.75 \text{ tn}$$

$$\Sigma = 5.74 \text{ tn-m}$$

$$E_H = \frac{1}{2} \cdot \gamma_a \cdot H_a^2 = 0.55 \text{ tn}$$

$$M_A = E_A \cdot \frac{H_a}{3} = 0.38 \text{ tn}$$

Fuerzas desestabilizantes :

$$E_A = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma_S \cdot H_T^2 = 0.974 \text{ tn}$$

$$M_A = E_A \cdot Y = 0.649 \text{ tn-m}$$

Verificación por deslizamiento : FSD = 1.50

$$\frac{f \cdot P}{E_A - E_H} \geq FSL \quad f = 0.839$$

FSD = 3.71 > 1.50 ... **Cumple**

Verificación por volteo : FSV = 2.00

$$\frac{M_r + M_H}{M_A} \geq FSV$$

FSV = 8.25 > 2.00 ... **Cumple**

DISEÑO DE MURO DE GAVIONES

PROYECTO : MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RIO SECO – MUNICIPIO DE VIACHA

UBICACIÓN : COMUNIDAD MAMANI - MUNICIPIO DE VIACHA

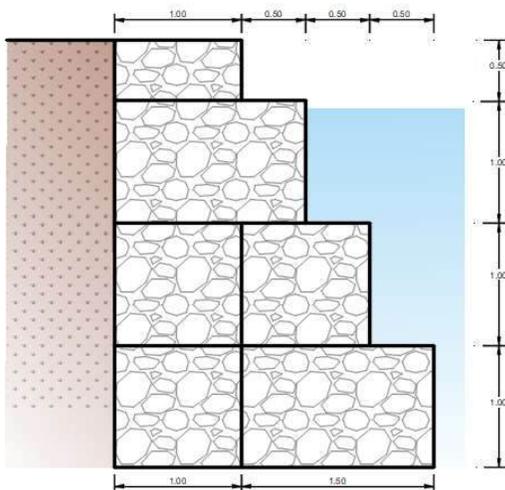
DATOS PARA EL DISEÑO:

GAV-TIPO II

- Peso específico del suelo : $\gamma_s = 2.24 \text{ tn/m}^3$
 - Peso específico del gavion : $\gamma_r = 2.70 \text{ tn/m}^3$
 - Ángulo de fricción : $\phi = 40.00^\circ$
 - Capacidad portante : $\sigma_s = 1.50 \text{ kg/cm}^2$

- Peso específico del agua : $\gamma_a = 1.00 \text{ tn/m}^3$
 - Tirante de agua : $y_a = 2.65 \text{ m}$

GEOMETRÍA DEL MURO:



Altura de cada bloque : $h_B = 1.00 \text{ m}$
 Ancho de cada bloque : $b_B = 1.00 \text{ m}$
 Altura total del muro : $H_T = 3.50 \text{ m}$

Predimensionado de la base: $B = \frac{1}{2}(1 + H_T)$

Dimensión de la base : $A_B = 2.25 \text{ m}$
 Adoptamos una base de : $B = 2.50 \text{ m}$

CÁLCULO DEL EMPUJE ACTIVO:

- EMPUJE ACTIVO:

Coefficiente de empuje activo:

$$K_a = \tan\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)^2 = 0.217$$

Cálculo del empuje activo del suelo

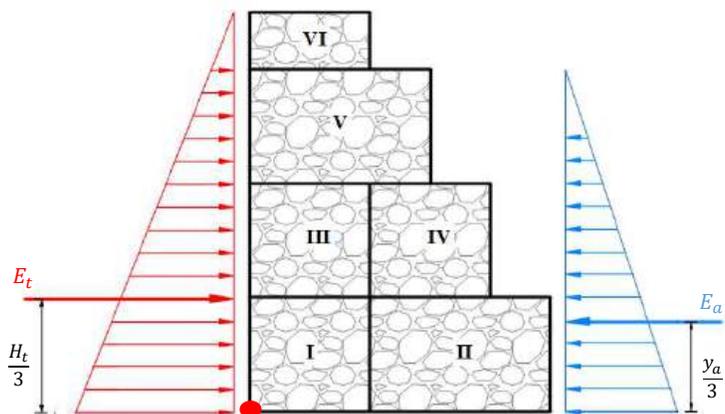
$$E_T = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma_s \cdot H_T^2 = 2.983 \text{ tn}$$

Altura de aplicación del empuje activo:

$$Y = \frac{H_T}{3} = 1.167 \text{ m}$$

Cálculo del empuje del hidrostático:

$$E_A = \frac{1}{2} \cdot \gamma_a \cdot y_a^2 = 3.511 \text{ tn}$$



Altura de aplicación del empuje hidrostático:

$$Y_a = \frac{y_a}{3} = 0.883 \text{ m}$$

ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD:

- CÁLCULO DEL PESO TOTAL Y MOMENTO PRODUCIDO POR EL MURO GAVION:

GAV.	TIPO	ÁREA (m ²)	PESO UNITARIO	PESO PARCIAL	BRAZO X (m)	MOMENTO (tn-m)
I	Gavión	1.000	2.70 tn/m ³	2.70 tn/m	0.500	1.3500
II	Gavión	1.500	2.70 tn/m ³	4.05 tn/m	1.250	5.0625
III	Gavión	1.000	2.70 tn/m ³	2.70 tn/m	0.500	1.3500
IV	Gavión	1.000	2.70 tn/m ³	2.70 tn/m	1.500	4.0500
V	Gavión	1.500	2.70 tn/m ³	4.05 tn/m	0.750	3.0375
VI	Gavión	0.500	2.70 tn/m ³	1.35 tn/m	0.500	0.6750
			Σ =	17.55 tn/m	Σ =	15.525

$$P = 17.55 \text{ tn}$$

$$M_r = 15.5 \text{ tn-m}$$

- CÁLCULO DE LOS MOMENTOS ACTUANTES EN EL MURO DE GAVION

Momento producido por el empuje activo: $M_A = E_T \cdot Y$ $M_A = 3.481 \text{ tn-m}$

Momento producido por el empuje hidrostático: $M_H = E_A \cdot Y_A$ $M_H = 3.102 \text{ tn-m}$

- VERIFICACIÓN POR DESLIZAMIENTO: FSD = 1.50

$$\frac{f \cdot P}{E_A - E_H} \geq FSD \quad ; \quad \text{donde: } f = tg\phi \rightarrow f = 0.839 \quad \text{Coeficiente de fricción suelo - estructura}$$

$$FSD = 2.27 > 1.50 \quad \dots \text{ Cumple}$$

- VERIFICACIÓN POR VOLTEO: FSD = 2.00

$$\frac{M_r + M_H}{M_A} \geq FSV \quad FSV = 3.57 > 2.00 \quad \dots \text{ Cumple}$$

- VERIFICACIÓN DE PRESIONES SOBRE EL TERRENO:

Punto de aplicación de la fuerza resultante:

$$X_0 = \frac{M_r - M_A - M_H}{P} = 0.91 \text{ m}$$

Excentricidad de la fuerza resultante:

$$e = \frac{B}{2} - X_0 = 0.344 \text{ m} \quad \text{Se debe cumplir que: } e < \frac{B}{6} = 0.42 \text{ m} \quad \text{ok}$$

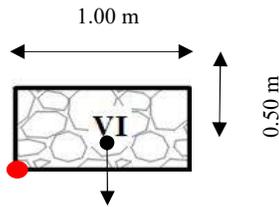
Verificamos las presiones de contacto entre el suelo - estructura

$$\sigma = \frac{P}{B} \left[1 \pm \frac{6 \cdot e}{B} \right] \quad \sigma_1 = 1.28 \text{ kg/cm}^2 < \sigma_s = 1.50 \text{ kg/cm}^2 \quad \dots \text{ Cumple}$$

$$\sigma_2 = 0.12 \text{ kg/cm}^2 < \sigma_s = 1.50 \text{ kg/cm}^2 \quad \dots \text{ Cumple}$$

VERIFICACIÓN ENTRE BLOQUE Y BLOQUE:

- PRIMER BLOQUE:



Fuerzas estabilizantes :

$$\text{Peso (VI)} = 1.35 \text{ tn}$$

$$\text{Momento (VI)} = 0.675 \text{ tn-m}$$

Fuerzas desestabilizantes :

$$E_A = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma_S \cdot H_{IV}^2 = 0.061 \text{ tn}$$

$$M_A = E_A \cdot Y = 0.010 \text{ tn-m}$$

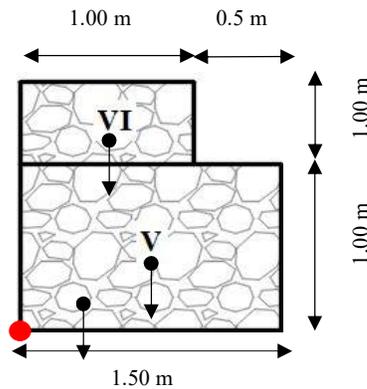
Verificación por deslizamiento : FSD = 1.50

$$\frac{f \cdot P}{E_A} \geq FSD \quad \boxed{\text{FSD} = 18.61 > 1.50}$$

Verificación por volteo : FSV = 2.00

$$\frac{M_r}{M_A} \geq FSV \quad \boxed{\text{FSV} = 66.52 > 2.00}$$

- SEGUNDO BLOQUE:



Fuerzas estabilizantes :

$$\text{Peso (VI)} = 1.35 \text{ tn}$$

$$\text{Momento (VI)} = 0.68 \text{ tn-m}$$

$$\text{Peso (V)} = 5.55 \text{ tn}$$

$$\text{Momento (V)} = 4.16 \text{ tn-m}$$

$$\Sigma = 6.90 \text{ tn}$$

$$\Sigma = 4.84 \text{ tn-m}$$

$$E_H = \frac{1}{2} \cdot \gamma_a \cdot H_a^2 = 0.21 \text{ tn}$$

$$M_A = E_A \cdot \frac{H_a}{3} = 0.046 \text{ tn-m}$$

Fuerzas desestabilizantes :

$$E_A = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma_S \cdot H_T^2 = 0.974 \text{ tn}$$

$$M_A = E_A \cdot Y = 0.649 \text{ tn-m}$$

Verificación por deslizamiento : FSD = 1.50

$$\frac{f \cdot P}{E_A - E_H} \geq FSD \quad f = 0.839$$

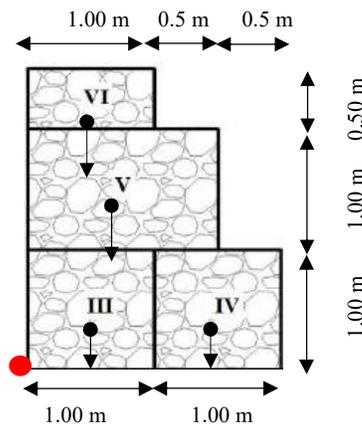
$$\boxed{\text{FSD} = 4.88 > 1.50} \dots \text{Cumple}$$

Verificación por volteo : FSV = 2.00

$$\frac{M_r + M_H}{M_A} \geq FSV$$

$$\boxed{\text{FSV} = 7.38 > 2.00} \dots \text{Cumple}$$

SEGUNDO BLOQUE:



Fuerzas estabilizantes :

$$\text{Peso (III)} = 3.70 \text{ tn}$$

$$\text{Momento (III)} = 1.85 \text{ tn-m}$$

$$\text{Peso (IV)} = 3.70 \text{ tn}$$

$$\text{Momento (IV)} = 5.55 \text{ tn-m}$$

$$\text{Peso (V)} = 5.55 \text{ tn}$$

$$\text{Momento (V)} = 4.16 \text{ tn-m}$$

$$\text{Peso (VI)} = 1.35 \text{ tn}$$

$$\text{Momento (VI)} = 0.68 \text{ tn-m}$$

$$\Sigma = 14.30 \text{ tn}$$

$$\Sigma = 12.24 \text{ tn-m}$$

$$E_H = \frac{1}{2} \cdot \gamma_a \cdot H_a^2 = 0.50 \text{ tn}$$

$$M_A = E_A \cdot \frac{H_a}{3} = 0.28 \text{ tn-m}$$

Fuerzas desestabilizantes :

$$E_A = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma_S \cdot H_T^2 = 1.522 \text{ tn}$$

$$M_A = E_A \cdot Y = 1.268 \text{ tn-m}$$

Verificación por deslizamiento : FSD = 1.50

$$\frac{f \cdot P}{E_A - E_H} \geq FSD \quad f = 0.839$$

$$\boxed{\text{FSD} = 5.93 > 1.50} \dots \text{Cumple}$$

Verificación por volteo : FSV = 2.00

$$\frac{M_r + M_H}{M_A} \geq FSV$$

$$\boxed{\text{FSV} = 9.43 > 2.00} \dots \text{Cumple}$$

Universidad Mayor de San Andrés – Carrera de Ingeniería Civil

Autor: Choque Tumiri Edgar

CI: 7047470 LP

Celular: +591 77598087

Correo electrónico: edgardect07@gmail.com



**DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-3417/2024
La Paz, 31 de octubre de 2024**

VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **28 de octubre de 2024**, por **EDGAR CHOQUE TUMIRI** con **C.I. N° 7047470 LP**, con número de trámite **DA 1957/2024**, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: **"MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RÍO SECO - MUNICIPIO DE VIACHA"**, cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

CONSIDERANDO:

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el *"Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración"*.

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece *"Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión"*. En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: *"la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios"*

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: *"...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial"*

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley N° 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: *"... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los"*



ciudadanos ...", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

POR TANTO:

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas.

RESUELVE:

INSCRIBIR en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: **"MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, ESTUDIO DE CASO: RÍO SECO - MUNICIPIO DE VIACHA"** a favor del autor y titular: **EDGAR CHOQUE TUMIRI** con **C.I. N° 7047470 LP** bajo el seudónimo **INGEDOTA**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.

CASA/Im

Firmado Digitalmente por:

Servicio Nacional de Propiedad Intelectual - SENAPI

CARLOS ALBERTO SORUCO ARROYO

DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS

LA PAZ - BOLIVIA



Firma:



3PeEm3Kq1Jl39M

PARA LA VALIDACIÓN DEL PRESENTE DOCUMENTO INGRESAR A LA PÁGINA WEB www.senapi.gob.bo/verificacion Y COLOCAR CÓDIGO DE VERIFICACIÓN O ESCANEAR CÓDIGO QR.



Oficina Central - La Paz
Av. Montes, N° 515,
entre Esq. Uruguay y
C. Batallón Illimani.
Telfs.: 2115700
2119276 - 2119251

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
prolongación Quijarro,
N° 29, Edif. Bicentenario.
Telfs.: 3121752 - 72042936

Oficina - Cochabamba
Calle Bolívar, N° 737,
entre 16 de Julio y Antezana.
Telfs.: 4141403 - 72042957

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, N° 2560
Edif. Multicentro El Ceibo
Ltda. Piso 2, Of. 5B,
Zona 16 de Julio.
Telfs.: 2141001 - 72043029

Oficina - Chuquisaca
Calle Kilómetro 7, N° 366
casi esq. Urriagoitia,
Zona Parque Bolívar.
Telf.: 72005873

Oficina - Tarija
Av. La Paz, entre
Calles Ciro Trigo y Avaroa
Edif. Santa Clara, N° 243.
Telf.: 72015286

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre, N° 5837,
entre Ayacucho
y Junín, Galería Central,
Of. 14.
Telf.: 67201288

Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Wenceslao Alba y San Alberto,
Edif. AM. Salinas N° 242,
Primer Piso, Of. 17.
Telf.: 72018160

