

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Estimación de las curvas de descarga en dos ríos al noroeste de la ciudad de Cuenca

Trabajo de titulación previo
a la obtención del título de
Ingeniero Civil

Autores:

Kevin Marcelo Farfán Fajardo

Pamela Thalia Villa Cajilima

Director:

Vladimiro Alexis Tobar Solano

ORCID:  0000-0003-0541-0095

Cuenca, Ecuador

2024-10-30

Resumen

Las curvas de descarga permiten establecer una relación directa entre el nivel de agua de una sección de cauce y el caudal que discurre por ella. Su determinación simplifica procesos de obtención e interpretación de datos y facilita la predicción de caudales. El presente trabajo se enfoca en la elaboración de curvas de descarga para dos ríos de montaña de cuencas comparables: Mazán A.J. Matadero y Culebrillas A.J. Matadero. Para esto, se identificaron los tramos de control y se prepararon las secciones de medición de cada caso. De conformidad con la metodología de medición en campo, se realizaron 14 aforos por vadeo en cada cauce con el equipo de medición de velocidad y flujo "FlowTracker2 ADV". Se realizó el tratamiento de datos recolectados y planteamiento de los modelos de ajuste de regresión lineal con su validación estadística mediante el análisis de las asunciones de normalidad, varianza constante y no autocorrelación de los residuos. Además, a nivel referencial de lo que se espera en campo se determinó la curva de descarga en condiciones controladas en un canal de laboratorio equipado con un vertedero triangular de 90° de pared delgada. Los resultados sugieren que para las estaciones Mazán A.J. Matadero, Culebrillas A.J. Matadero y para el vertedero triangular, el 97.5%, 99.6% y 99.76% de la variabilidad de caudal observado transformado puede ser explicado por una relación lineal entre las variables transformadas. A fin de aclarar las diferencias entre caudales medidos, se realizó un análisis morfométrico de las dos microcuencas involucradas que permitió estimar sus rendimientos y contrastarlos. Aunque los resultados evidencian microcuencas de características morfométricas relativamente similares, con esto no se puede explicar la diferencia obtenida en caudales aforados.

Palabras clave del autor: FlowTracker2, medición de caudal, ríos de montaña, vadeo



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

Rating curves establish a direct relationship between the water level of a channel section and the flow passing through it. The determination of a rating curve simplifies the processes of data collection and interpretation, facilitating flow prediction. This work focuses on the development of rating curves for two mountain rivers of comparable basins: Mazán A.J. Matadero and Culebrillas A.J. Matadero. For this, control sections were identified, and the measurement sections for each case were prepared. In accordance with field measurement methodology, 14 flow measurements were carried out in each channel using the "FlowTracker2 ADV" velocity and flow measurement equipment. Collected data was processed, and the linear regression fitted models were statistically validated by checking assumptions of normality, constant variance, and no autocorrelation of residuals. Additionally, at a referential level of what was expected in the field, the rating curve was determined under controlled conditions in a laboratory channel equipped with a 90° thin-walled triangular weir. The results suggest that for the Mazán A.J. Matadero and Culebrillas A.J. Matadero stations and for the triangular weir, 97.5%, 99.6%, and 99.76% of the observed transformed flow variability can be explained by a linear relationship between the transformed variables. To explain the differences between measured flows, based on a morphometric analysis of the two involved micro-basins, their specific flow rate was estimated and compared. Although the results show micro-basins with relatively similar morphometric characteristics, this did not help explaining the differences obtained in gauged flows.

Author keywords: FlowTracker2, streamflow measurements, mountain rivers, wading



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

Abstract.....	3
Índice de contenido.....	4
Índice de figuras.....	8
Índice de tablas.....	12
Agradecimientos	21
Capítulo 1 Introducción	23
1.1. Antecedentes.....	23
1.2. Justificación	26
1.3. Pregunta de investigación	27
1.4. Objetivos.....	27
1.4.1. Objetivo general	27
1.4.2. Objetivos específicos	28
1.5. Organización de los capítulos	28
Capítulo 2 Equipo de medición de velocidad y flujo “FlowTracker2 ADV”	30
2.1. Definiciones y terminología	30
2.2. Parámetros generales del equipo.....	31
2.2.1. Elementos del equipo.....	31
2.2.2. Configuración del dispositivo portátil para medición	32
2.2.3. Información del sistema	33
2.3. Especificaciones técnicas generales.....	34
2.4. Principio de funcionamiento	34
2.4.1. Consideraciones de operación	36
2.5. Parámetros de calidad de medición	36
2.5.1. SNR (Signal-to-Noise Ratio)	37
2.5.2. Error Estándar de Velocidad (σ_V).....	37
2.5.3. Interferencias de bordes	37
2.5.4. Filtro de Picos de Velocidad	37

2.5.5.	Ángulo de la velocidad y ángulo de inclinación	38
2.5.6.	Porcentaje de descarga, porcentaje de profundidad y ubicación de la estación	38
2.5.7.	Perfil de velocidad.....	38
2.6.	Medición de haz	39
2.7.	Técnica de medición de caudal	39
2.7.1.	Métodos de cálculo de caudal	39
2.7.2.	Método de Mid-Section	40
2.7.3.	Determinación de la velocidad media de la estación	40
2.8.	Montaje e instalación.....	41
2.8.1.	Ensamble del equipo	41
2.8.2.	Medición con varilla graduada para vadeo	42
2.8.2.1.	Medición a 0.6 de la profundidad	42
2.8.2.2.	Medición a 0.2 de la profundidad	43
2.8.2.3.	Medición a 0.8 de la profundidad	43
2.9.	Medición de caudal en campo.....	43
2.10.	Consideraciones adicionales	44
2.11.	Aplicación de escritorio	45
2.11.1.	Descarga, visualización y edición de datos.....	45
Capítulo 3	Marco teórico.....	47
3.1.	Términos y definiciones.....	47
3.2.	La cuenca hidrográfica	48
3.2.1.	Forma de la cuenca.....	48
3.2.2.	Relieve de la cuenca	50
3.2.3.	Drenaje de la cuenca	51
3.3.	Cauces naturales.....	52
3.3.1.	Flujo en cauces naturales	55
3.4.	Perfil de velocidad	57
3.5.	Hidrometría.....	59
3.6.	Curva de descarga	59

3.7.	Metodologías de aforo.....	62
3.7.1.	Método área – velocidad	62
3.7.2.	Correntómetros de molinete y dispositivos acústicos	63
3.7.3.	Flotadores	63
3.7.4.	Dilución trazadora	64
3.7.5.	Otros métodos de medición	66
3.8.	Aforo por vadeo	66
3.8.1.	Tramo o sección de control	67
3.8.1.1.	Controles artificiales	67
3.8.2.	Sección o estación de medición	69
3.8.3.	Procedimiento general de aforo	69
3.8.4.	Medición automática de caudal	71
3.8.5.	Información complementaria	72
3.8.6.	Requerimientos de seguridad	72
3.9.	Fuentes de incertidumbre	73
3.10.	Comprobación del modelo de ajuste	74
Capítulo 4 Caracterización de la zona de estudio y estimación de las curvas de descarga.		77
4.1.	Caracterización de las cuencas con software QGIS	77
4.1.1.	Pretratamiento de información ráster	77
4.1.2.	Delimitación de cuencas hidrográficas y cauces.....	78
4.1.3.	Análisis morfométrico	79
4.1.4.	Tipo, uso y cobertura de suelo	83
4.2.	Casos de estudio.....	88
4.3.	Aplicación del procedimiento operativo estándar de medición en campo.....	89
4.4.	Datos experimentales.....	94
4.5.	Condiciones de flujo en las secciones de aforo	98
4.5.1.	Obtención de isotaquias.....	99
4.5.2.	Determinación de los coeficientes de distribución de velocidad	100
4.5.3.	Caracterización del régimen de flujo en la sección	101

4.6.	Curvas de descarga	102
4.6.1.	Mazán A.J. Matadero	103
4.6.2.	Culebrillas A.J. Matadero	110
4.7.	Información complementaria	116
4.7.1.	Mazán A.J. Tomebamba	116
4.8.	Contraste de caudales específicos entre el río Mazán y río Culebrillas	120
4.9.	Curvas de descarga aplicadas a observaciones en canal de laboratorio.....	121
Capítulo 5 Discusión y análisis de resultados.....		130
5.1.	Caracterización de las microcuencas	130
5.1.1.	Microcuenca del Río Mazán	130
5.1.2.	Microcuenca del Río Culebrillas	130
5.1.3.	Análisis comparativo de las microcuencas.....	131
5.2.	Régimen de flujo en las secciones de aforo	132
5.3.	Casos de estudio y datos experimentales	134
5.4.	Mazán A.J. Matadero	135
5.5.	Culebrillas A.J. Matadero	137
5.6.	Contraste de caudales específicos entre el río Mazán y río Culebrillas	138
5.7.	Canal de laboratorio con vertedero triangular	139
Capítulo 6 Conclusiones, observaciones y recomendaciones.....		141
6.1.	Conclusiones	141
6.2.	Observaciones y factores limitantes	143
6.3.	Recomendaciones para futuras investigaciones	144
Referencias.....		147
Anexos		152
Anexo A. Observaciones de nivel y caudal en laboratorio		152
Anexo B: Campaña de aforos realizada en campo.....		154

Índice de figuras

Figura 2-1. Elementos y accesorios del equipo FlowTracker2.	31
Figura 2-2. Componentes del sistema FlowTracker2, dispositivo portátil y sonda.	31
Figura 2-3. Esquema de sensor de medición y volumen de control. Fuente: (SonTek).	35
Figura 2-4. Intensidad de la señal receptada respecto al tiempo posterior a la emisión del pulso. Fuente: (SonTek).	35
Figura 2-5. Orientación del equipo. Fuente: (SonTek).	38
Figura 2-6. Gráfico de medición de haz para una estación medida en el Río Mazán. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura 2-7. Método de cálculo de caudal Mid-Section. Fuente: (SonTek).	40
Figura 2-8. Ventana principal de visualización de datos en la aplicación de escritorio. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 2-9. Menú de edición de estaciones. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 3-1. Curva hipsométrica en unidades porcentuales. Fuente: (Ion 1985).	51
Figura 3-2. Relación entre la densidad de drenaje y el hidrograma a la salida del cauce principal. Fuente: (Smith & Peter 1978).	52
Figura 3-3. Perfil de velocidades. En donde, V_m : velocidad media, V_s : velocidad superficial, $V_{0.6}$: velocidad a seis décimas de la profundidad, $V_{0.8}$: velocidad a ocho décimas de la profundidad. Fuente: (Chereque, Wendor, 1989).	58
Figura 3-4. Vectrino, equipo de medición de velocidad de flujo en laboratorio y terreno, y software Vectrino+.	63
Figura 3-5. Curva de concentración-tiempo en la sección de control para (a) inyecciones de tasa constante e (b) inyección súbita. Fuente: (Rantz, 1982).	64
Figura 3-6. Diagrama de vertedero de pared delgada triangular o en V. Fuente: Elaboración propia.	68
Figura 3-7. Gráficas de residuales (a) respecto a variable predictora (b) en orden de observación. (c) Gráfico de probabilidad normal de los residuos. Fuente: (Montgomery, 2013).	75
Figura 3-8. Gráfica de residuales que indica (a) una varianza no constante y (b) una variable independiente omitida. Fuente: (Devore, 2008).	76
Figura 4-1. Datos de elevación erróneos registrados en la información MDE.	77
Figura 4-2. Microcuencas y cauces del Río Mazán (zona inferior) y Río Culebrillas (zona superior). Fuente: Elaboración propia.	78
Figura 4-3. Mapa de microcuencas hidrográficas. Fuente: Elaboración propia.	80
Figura 4-4. Curvas hipsométricas de (a) Mazán y (b) Culebrillas. Fuente: Elaboración propia.	81

Figura 4-5. Perfiles de cauces principales de (a) Mazán y (b) Culebrillas. Fuente: Elaboración propia. 82

Figura 4-6. Mapa del uso y cobertura del suelo de las microcuencas hidrográficas Mazán y Culebrillas. Fuente: Elaboración propia. 84

Figura 4-7. Cobertura y uso de tierra para las microcuencas del Río Mazán y Río Culebrillas. Fuente: Elaboración propia. 85

Figura 4-8. Tipo de suelo de las microcuencas del Río Mazán y Río Culebrillas. Fuente: Elaboración propia. 87

Figura 4-9. Ubicación general del proyecto en la provincia de Azuay, Ecuador. Fuente: Elaboración propia. 89

Figura 4-10. Tramo de control de condiciones relativamente uniformes y sección de medición de la estación Mazán A.J. Matadero con vista (a) transversal con esquema del fondo de cauce y (b) longitudinal con guía de medición perpendicular a la dirección del flujo. Fuente: Elaboración propia. 90

Figura 4-11. Tramo de control de condiciones relativamente uniformes y sección de medición B-2 de la estación Culebrillas A.J. Matadero con vista (a) transversal con esquema del fondo de cauce y (b) longitudinal con guía de medición perpendicular a la dirección del flujo. Fuente: Elaboración propia. 91

Figura 4-12. Tramo de control de la Estación Mazán A.J. Matadero y regleta de medición de nivel de la estación limnigráfica Mazán A.J. Tomebamba de propiedad municipal. Fuente: Elaboración propia. 93

Figura 4-13. Tramo de control B-1 de la Estación Culebrillas A.J. Matadero con esquema de fondo de cauce y punto de referencia de medición de nivel. Fuente: Elaboración propia.... 93

Figura 4-14. Registro de mediciones de caudal – nivel en la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia. 95

Figura 4-15. Relación (a) área – nivel, (b) velocidad – nivel y (c) área (eje izquierdo rojo) y velocidad (eje derecho azul) respecto a nivel en la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia. 96

Figura 4-16. Relación área – caudal en la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia. 96

Figura 4-17. Registro de mediciones de caudal – nivel en la estación Culebrillas A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia. 97

Figura 4-18. Relación (a) área – nivel, (b) velocidad – nivel y (c) área (eje izquierdo rojo) y velocidad (eje derecho azul) respecto a nivel en la estación Culebrillas A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia. 98

Figura 4-19. Relación área – caudal en la estación Culebrillas A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia. 98

Figura 4-20. Isotaquias obtenidas a partir de la interpolación de los puntos de velocidad medidos en campo en la sección del Río Mazán para caudal máximo de 1.976 m³/s. Fuente: elaboración propia. 99

Figura 4-21. Isotaquias y perfiles de la velocidad para las secciones de aforo en (a) Río Mazán y (b) Río Culebrillas para el caudal máximo registrado. Fuente: Elaboración propia. 100

Figura 4-22. Gráficas de diagnóstico del modelo de ajuste de la forma $\ln(Q) = B \ln(h+C) + \ln(A)$ para la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia. 104

Figura 4-23. Registros de aforo, curva de descarga para h en m y Q en m^3/s , (a) intervalos de confianza de 95% para la media y (b) intervalos de predicción de 95% para una observación predicha para estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia. .. 106

Figura 4-24. Gráficas de diagnóstico del modelo de ajuste de la forma $\ln(v) = (2/3+b)\ln(A/P) + \ln(S1/2n')$ para la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia. 108

Figura 4-25. Registros de aforo, curva de descarga por Manning para h en m y Q en m^3/s , (a) intervalos de confianza de 95% para la media y (b) intervalos de predicción de 95% para una observación predicha para estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia. .. 110

Figura 4-26. Curvas de descarga obtenidas a partir del ajuste tipo $\ln(Q) = B \ln(h+C) + \ln(A)$ (línea continua) y $(2/3+b)\ln(A/P) + \ln(S1/2n')$ (línea entrecortada), para nivel h en m y caudal Q en l/s de la Estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia. 110

Figura 4-27. Gráficas de diagnóstico del modelo de ajuste (I) de la forma $\ln(Q) = B \ln(h+C) + \ln(A)$ para la estación Culebrillas A.J. Matadero a partir de 14 aforos. Fuente: Elaboración propia. 113

Figura 4-28. Gráficas de diagnóstico del modelo de ajuste (II) de la forma $\ln(Q) = B \ln(h+C) + \ln(A)$ para la estación Culebrillas A.J. Matadero a partir de 12 aforos. Fuente: Elaboración propia. 115

Figura 4-29. Registros de aforo, curva de descarga para h en m y Q en m^3/s , (a) intervalos de confianza de 95% para la media y (b) intervalos de predicción de 95% para una observación predicha para estación Culebrillas A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia. 116

Figura 4-30. Variación temporal de caudal en m^3/s de la estación limnigráfica Mazán A.J. Tomebamba de ETAPA EP desde octubre de 2023 a abril de 2024. Fuente: Elaboración propia. 117

Figura 4-31. Relación caudal en m^3/s respecto a nivel en cm de la estación limnigráfica Mazán A.J. Tomebamba de ETAPA EP. Fuente: Elaboración propia. 117

Figura 4-32. Relación de caudal-nivel de los registros de ETAPA EP y aforos realizados en la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia. 118

Figura 4-33. Relación entre nivel de la estación ETAPA EP y el valor observado en regleta. Fuente: Elaboración propia. 119

Figura 4-34. Gráficas de caudal (a) observado, (b) ajustado mediante método tradicional y (c) ajustado mediante ecuación de Manning respecto al caudal de la Estación limnigráfica proporcionado por ETAPA EP. Fuente: Elaboración Propia. 119

Figura 4-35. Caudal de ETAPA y caudal observado temporalmente. Fuente: Elaboración propia. 120

Figura 4-36. Relación entre caudal específico de Culebrillas con el valor de caudal captado supuesto respecto al caudal específico de Mazán. Fuente: Elaboración propia. 121

Figura 4-37. Tanque rectangular pequeño con turbina hidráulica Francis y vertedero triangular de pared delgada. Fuente: Elaboración propia. 122

Figura 4-38. Registro de observaciones de caudal – nivel con equipo FlowTracker2 en canal de laboratorio con vertedero triangular. Fuente: Elaboración propia. 123

Figura 4-39. Registro de mediciones de caudal – nivel con equipo Vectrino en canal de laboratorio con vertedero triangular. Fuente: Elaboración propia. 124

Figura 4-40. Gráficas de diagnóstico del modelo de ajuste de curva de descarga para observaciones realizadas con FT2 en canal de laboratorio con vertedero triangular. Fuente: Elaboración propia. 126

Figura 4-41. Curva de descarga de vertedero triangular de 90° de pared delgada donde h está en m y Q en l/s. Fuente: Elaboración propia. 128

Figura 4-42. Gráfica de valores ajustados respecto a valores teóricos de (a) King, H., (b) Barnes, A., (c) Boucher, R., (d) Barr, J. Fuente: Elaboración propia. 129

Figura 4-43. Datos observados con equipo Flowtracker2, curva de descarga e intervalos de confianza del 95% para la media para vertedero triangular de 90° de pared delgada. Fuente: Elaboración propia. 129

Figura 5-1. Distribuciones típicas de velocidad en canales de lecho liso y rugoso con flujo uniforme. Fuente: (Chow, 1994). 133

Figura 5-2. Curvas de descarga para observaciones realizadas con Flowtracker2 (línea continua) y Vectrino (línea entrecortada), para nivel h en m y caudal Q en l/s. Fuente: Elaboración propia. 139

Índice de tablas

Tabla 2-1. Especificaciones de la sonda ADV y unidad electrónica. Fuente: (SonTek).....	34
Tabla 3-1. Índices de caracterización de forma. Fuente: Adaptado de (Ion, 1985).....	49
Tabla 3-2. Índices de caracterización del relieve. Fuente: Elaboración propia.	51
Tabla 3-3. Índices de caracterización de la red de drenaje. Fuente: Elaboración propia.....	52
Tabla 3-4. Coeficientes de la curva estándar de velocidad. Fuente: (Hulsing, Smith, & Coob, 1869).....	58
Tabla 3-5. Expresiones para el cálculo de caudal en un vertedero de pared fina triangular de 90°. En donde Q = caudal (m ³ /s) y h = carga sobre el vértice del vertedero (m). Fuente: Elaboración propia.	69
Tabla 3-6. Número de verticales en función del ancho del canal. Fuente: (International Organization for Standardization, 2007).	70
Tabla 4-1. Principales complementos empleados en el análisis morfológico de cuencas hidrográficas en QGIS. Fuente: Elaboración propia.	79
Tabla 4-2. Resultados del análisis morfométrico de las microcuencas del Río Mazán y Río Culebrillas. Fuente: Elaboración propia.	81
Tabla 4-3. Tiempos de concentración y velocidad media para las microcuencas de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	83
Tabla 4-4. Uso y cobertura del suelo de las microcuencas Mazán y Culebrillas. Fuente: Elaboración propia.	83
Tabla 4-5. Información de cobertura y uso de tierra de la microcuenca del río Mazán obtenida del MAGAP. Fuente: Elaboración propia.	86
Tabla 4-6. Información de cobertura y uso de tierra de la microcuenca del río Culebrillas obtenida del MAGAP. Fuente: Elaboración propia.	87
Tabla 4-7. Información del tipo de suelo de las microcuencas del río Mazán y río Culebrillas obtenida de MAGAP. Fuente: Elaboración propia.	88
Tabla 4-8. Identificadores de las estaciones de aforo para los dos casos de estudio. Fuente: Elaboración propia.	89
Tabla 4-9. Parámetros de medición de caudal para el aforo N° 10 realizado en la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.....	94
Tabla 4-10. Datos de aforo de la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.	95
Tabla 4-11. Datos de aforo de la estación Culebrillas A.J. Matadero. Nota: El cambio de sección de control se realiza a partir del aforo No. 7. Fuente: Elaboración propia.....	97
Tabla 4-12. Resumen de cálculos para la obtención de coeficientes de velocidad. Fuente: elaboración propia.	101

Tabla 4-13. Resumen de parámetros de régimen de flujo para los caudales medidos..... 102

Tabla 4-14. Pendiente del tramo de control de la Estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia. 102

Tabla 4-15. Parámetros de ajuste, ecuación de ajuste, coeficiente de determinación y desviación estándar de los residuales del modelo linealizado para curva de descarga de la forma $Q = A (h + C)B$, para nivel h en m y caudal Q en m^3/s para Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia..... 103

Tabla 4-16. Pruebas estadísticas para comprobación del modelo de ajuste de la forma $\ln(Q) = B \ln(h+C) + \ln(A)$ para la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia. .. 105

Tabla 4-17. Registros de nivel y caudal en aforos realizados, caudal ajustado mediante la curva de descarga $Q = 4.60 (h - 0.21)^{2.18}$ para h en m y Q en m^3/s , residuales y desviación estándar de los errores para la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia. 105

Tabla 4-18. Parámetros de ajuste, ecuación de ajuste, coeficiente de determinación y desviación estándar de los residuales del modelo linealizado para curva de descarga de la forma $Q = An' (R)23 + bS12$, para nivel h en m y caudal Q en m^3/s para Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia..... 107

Tabla 4-19. Pruebas estadísticas para comprobación del modelo de ajuste de la forma $\ln(v) = (2/3+b)\ln(A/P) + \ln(S1/2n')$ para la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia..... 108

Tabla 4-20. Registros de nivel y caudal en aforos realizados, caudal ajustado mediante la curva de descarga $Q = A0.056R23 + 0.51S12$ para h en m y Q en m^3/s , residuales y desviación estándar de los errores para la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia..... 109

Tabla 4-21. Parámetros de ajuste, ecuación de ajuste, coeficiente de determinación y desviación estándar de los residuales del modelo linealizado a partir de 14 observaciones (modelo I), y 12 observaciones (modelo II) para curva de descarga de la forma $Q = A (h + C)B$, para nivel h en m y caudal Q en m^3/s de la Estación Culebrillas A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia. 111

Tabla 4-22. Pruebas estadísticas para comprobación del modelo de ajuste (I) de la forma $\ln(Q) = B \ln(h+C) + \ln(A)$ para la estación Culebrillas A.J. Matadero a partir de 14 aforos. Fuente: Elaboración propia..... 113

Tabla 4-23. Pruebas estadísticas para comprobación del modelo de ajuste (II) de la forma $\ln(Q) = B \ln(h+C) + \ln(A)$ para la estación Culebrillas A.J. Matadero a partir de 12 aforos. Fuente: Elaboración propia..... 115

Tabla 4-24. Registros de nivel y caudal en aforos realizados, caudal ajustado mediante la curva de descarga $Q = 4.60 (h - 0.21)^{2.18}$ para h en m y Q en m^3/s , residuales y desviación estándar de los residuos para la estación Culebrillas A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia. 116

Tabla 4-25. Valores observados y registros de nivel en m y caudal en m^3/s de la Estación limnigráfica Mazán A.J. Tomebamba de propiedad municipal en el horario de los aforos experimentales. Fuente: Elaboración propia. 118

Tabla 4-26. Caudal específico para los ríos Mazán y Culebrillas (sin caudal captado y con caudal captado). Fuente: Elaboración propia. 121

Tabla 4-27. Observaciones de caudal y nivel realizadas con el equipo FlowTracker2 en canal de laboratorio con vertedero triangular. Fuente: Elaboración propia. 123

Tabla 4-28. Registros de caudal y nivel determinados de observaciones de velocidad con el equipo Vectrino en canal de laboratorio con vertedero triangular. Fuente: Elaboración propia. 123

Tabla 4-29. Parámetros de ajuste, ecuación de ajuste, coeficiente de determinación y desviación estándar de los residuales para curvas de descarga obtenidas de observaciones con FlowTracker2 y Vectrino, para nivel h en m y caudal Q en m^3/s . Fuente: Elaboración propia. 124

Tabla 4-30. Pruebas estadísticas para comprobación del modelo de ajuste de curva de descarga para canal de laboratorio con vertedero triangular. 125

Tabla 4-31. Caudal ajustado y residuales para la curva de descarga obtenida de observaciones de nivel h y caudal Q realizadas con FT2 en canal pequeño con vertedero triangular. Fuente: Elaboración propia. 127

Tabla 4-32. Determinación de MSE y MAE entre valores ajustados y valores teóricos de distintos autores. Fuente: Elaboración propia. 127

Tabla 4-33. Valores de caudal ajustado mediante curva de descarga para observaciones realizadas con el equipo FT2 y valores teóricos para canal con vertedero triangular a 90° . Fuente: Elaboración propia. 127

Tabla 5-1. Porcentaje de variación entre aforos realizados consecutivamente en la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia. 134

Tabla 5-2. Porcentaje de variación entre aforos realizados consecutivamente en la estación Culebrillas A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia. 135

Tabla 5-3. Caudal específico de los ríos Mazán y Culebrillas (sin considerar el caudal captado y considerando un valor de $300l/s$ de caudal captado). Fuente: Elaboración propia. 139

Acrónimos

- ADV Acoustic Doppler Velocimeter (Velocímetro Acústico Doppler)
- ARCA Agencia de Regulación y Control del Agua
- DEM Digital Elevation Model (Modelo Digital de Elevación)
- EHA Estaciones hidrológicas automáticas
- EPMAPS Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento
- ESA European Space Agency (Agencia Espacial Europea)
- ETAPA EP Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento
- FONAG Fondo para la Protección del Agua
- FT2 FlowTracker2
- GPS Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global)
- INAMHI Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
- INER Instituto Nacional de Eficiencia y Energías Renovables
- IVE Interpolated Variance Estimator (Estimador de la Varianza Interpolado)
- LCD Liquid-Crystal Display (Pantalla de cristal líquido)
- MAE Mean Absolute Error (Error absoluto medio)
- MAGAP Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca
- MSE Mean Squared Error (Error medio cuadrático)
- OMM Organización Meteorológica Mundial
- SIG Sistema de información geográfica
- SNR Signal-to-Noise Ratio (Relación señal-ruido)
- UTC Universal Time Coordinated (Tiempo Coordinado Universal)

Símbolos

α	Coeficiente de energía
A	Área de la microcuenca
A	Área mojada de la sección transversal
ΔA	Área elemental en el área mojada completa A
b_i	Ubicación de la estación
C	Concentración medida en la sección de control en un tiempo dado
C_1	Concentración de la solución trazadora
C_2	Concentración en la sección de control
C_b	Concentración inicial del cauce
d	Tirante de agua
D	Profundidad hidráulica del área perpendicular al fondo del canal
D_d	Densidad de drenaje
d_i	Profundidad del agua en la estación
e_i	Residuales
f_d	Fracción de profundidad
F_f	Factor de Forma de Ogievsky & Apollov
Fr	Número de Froude
h	Altura limnimétrica o nivel
h	Altura estática sobre el vértice del vertedero
H_{med}	Altitud media
H_{rod}	Ajuste de profundidad de la sonda en la varilla de vadeo
J	Pendiente media del cauce principal
L	Longitud entre secciones

L	Longitud del cauce principal
m	Coefficiente de Compacidad
n	Coefficiente de rugosidad
N_u	Orden del cauce
θ	Ángulo de pendiente longitudinal del canal
θ	Ángulo de abertura de vertedero triangular
P	Perímetro mojado
Q	Caudal de una sección transversal
Q_{FT2}	Caudal predicho a través de observaciones realizadas con el instrumento FT2
$Q_{Vetrino}$	Caudal predicho a través de observaciones realizadas con el instrumento Vetrino
q	Caudal de la solución inyectada
R	Radio hidráulico
R_a	Grado de Elongación
RC	Radio de Circularidad
Re	Número de Reynolds
R_e	Radio de Elongación
R_f	Factor de Forma de Horton
RF	Factor de Forma de Zavoianu
R^2	Coefficiente de determinación
S	Pendiente de canal
S	Pendiente del cauce principal
S	Desviación estándar de los residuales
σ^2	Varianza de los residuales

$T_{C_{Bransby\ Williams}}$ Tiempo de concentración de Bransby Williams

$T_{C_{Kirpich}}$ Tiempo de concentración de Kirpich

V Velocidad de flujo

V_1 Volumen de la solución inyectada en el cauce

v Velocidad de la curva de distribución de velocidad

ν Viscosidad cinemática del agua

\bar{v}_i Velocidad promedio en la estación

w_d Profundidad del agua

\bar{y} Profundidad media de flujo

Dedicatoria

Con todo mi amor y gratitud, dedico este trabajo a ustedes mis padres, Benito y Lucía, los pilares fundamentales en mi vida y mis grandes ejemplos de lucha. Su legado más importante fue el haberme inculcado el deseo de ser siempre mejor. Todos mis logros son y serán para ustedes. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo, la perseverancia y el trabajo honesto. Esto no sería posible sin su apoyo constante y su fe inquebrantable en mí.

A toda mi familia. De manera especial a mi hermano Zhoni, mi mayor ejemplo de amor, fortaleza, lealtad y entrega. A mi querida cuñada Liliana, aunque hoy no estés con nosotros, nos demostraste que con una sonrisa y actitud positiva, todo puede salir bien. Tu luz se apagó lentamente, pero tu recuerdo, lleno de amor y alegría, quedará por siempre en nuestros corazones. Nos enseñaste a enfrentar la vida con coraje y optimismo, y por eso, siempre te recordaremos con cariño y admiración.

Kevin Marcelo Farfán Fajardo.

Dedicatoria

A mi querida madre Fany, por su sacrificio diario, paciencia y cariño incondicional. Ha sido un ejemplo de fortaleza y trabajo duro, inspirándome cada día a ser mejor persona y recordándome lo valioso de la vida. Siempre será la luz de mi camino y un refugio a donde puedo volver. Este logro es más suyo que mío.

A mi abuelito Abelito, que me acompaña a diario desde el cielo. Su amor y bondad ha traspasado los límites terrenales y sus enseñanzas han dejado una huella imborrable en mi corazón.

A mi viejito Firulais, que a pesar de los achaques de la edad me ha acompañado fielmente al pie del escritorio durante el proceso de redacción de esta tesis.

Pamela Thalia Villa C.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a nuestro tutor, Ingeniero Vladimiro Tobar, cuyo tiempo invertido y enseñanzas nos han orientado a desarrollar con éxito el presente trabajo de titulación. Su dedicación y paciencia nos ha enriquecido académica y personalmente, y motivado a ir más allá de lo esperado.

Al Ingeniero Franklin Riera, encargado del laboratorio de Hidráulica y Dinámica de Fluidos, por su interés en nuestro trabajo, que además de apoyarnos con los recursos necesarios, nos brindó conocimientos valiosos.

Agradecemos a los docentes de la Facultad de Ingeniería Civil, cuyos conocimientos y experiencias han sido fundamentales en nuestra formación académica. También extendemos nuestro agradecimiento a toda la comunidad universitaria por su constante apoyo.

Queremos expresar nuestra gratitud a nuestras familias, quienes han sido nuestro sostén y fuente de inspiración a lo largo de este arduo camino. Sin su amor, paciencia y sacrificios, este logro no hubiera sido posible.

Kevin Marcelo Farfán Fajardo y Pamela Thalia Villa C.

Agradezco a mis grandes amigos Sebastián, Juan, José y David, muchas gracias por todo el aprecio y por siempre extenderme su mano, su profunda fe en mí me motivaron a dar lo mejor. A mis amigas Evelyn y Pamela R., gracias por formar parte de mi vida. A mi gran compañera Pamela V. por su total entrega a la realización de este trabajo, aprecio cada segundo dedicado y cada valiosa idea aportada, mi total aprecio y admiración para ti. A mi querida Nube, gracias por ser mi roca en los momentos difíciles, por celebrar conmigo cada pequeño logro y por creer en mí cuando yo más lo necesitaba. Finalmente, muchas gracias a todo aquel que formó parte de esta historia.

Kevin Marcelo Farfán Fajardo

Un particular agradecimiento a mis amigos que han convertido mis años universitarios en un recuerdo memorable. A Pamela, mi primera amiga de la carrera, y Evelyn, su apoyo mutuo y desinteresado han hecho cada reto más llevadero. A Kevin, Jhon y Jack sus chistes y buen humor hicieron que las horas en la biblioteca sean cortas. A mis amigos Ingenieros, Sebastián, Kevin, José y Juan quienes siempre han estado dispuestos a brindar ayuda e intercambiar conocimiento. Al resto de amigos, quienes aparte del apoyo académico, me han regalado risas y alegrías.

Pamela Thalia Villa C.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

El agua, al igual que el suelo, el aire y la luz son elementos esenciales para la existencia de la vida en el planeta (Rojas, Óscar, 2016). Precisamente, el agua dulce es necesaria para el desarrollo de la biodiversidad de ecosistemas y de la humanidad, por lo que su aprovechamiento resulta esencial para el progreso y la vida humana. Siendo así, el crecimiento urbano abre paso a requerimientos en la demanda del líquido vital, resultando desde tiempos remotos una necesidad básica de carácter cotidiano. El acceso a este recurso garantiza el progreso de las comunidades pequeñas y mejora de manera significativa la calidad de vida de la población. Es así que su uso es indispensable para una vida digna y para la realización de cualquier derecho (González, 2015). En consecuencia, es necesario llevar a cabo estudios apropiados de calidad, cantidad y distribución del agua para su aprovechamiento.

Particularmente, en cuanto a la cantidad, su variación a lo largo del tiempo es necesaria para garantizar la biodiversidad y mantener los servicios del sistema hídrico (Kintz, J. R. C. et al., 2009). De modo que la medición del caudal de una fuente de agua durante un período de tiempo permite establecer la disponibilidad de este recurso. Asimismo, la estimación de caudales máximos y mínimos favorece a un dimensionamiento apropiado de las estructuras hidráulicas requeridas para su captación y aprovechamiento, además de proporcionar información valiosa sobre la cuenca de aporte.

La ciencia encargada de la medición y el registro de volúmenes de agua que circulan en cierta sección transversal de un río, canal o tubería se denomina hidrometría (ICC, 2017). Esta permite comprender de mejor manera el comportamiento de una determinada cuenca en términos de la disponibilidad de agua y su variación temporal. En este ámbito, pese a la facilidad de medición de datos pluviométricos, la gran variabilidad espacial hace que su generalización para un área muy extensa se torne compleja. Resultando más conveniente registrar, calcular y analizar los caudales en puntos representativos de las corrientes superficiales (ICC, 2017). Con este enfoque, la medición de los volúmenes de agua por unidad de tiempo (caudales) que circulan en una sección transversal de un río, al ser un punto común de reunión del agua de la cuenca, provee de invaluable información para la caracterización de este recurso hídrico.

En este contexto, en 1961 se creó el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (Paredes, Ana & Pérez, Marjory, 2008). Es una entidad técnica-científica con la capacidad y obligación de suministrar información sobre el tiempo, clima y recursos hídricos pasados, presentes y futuros (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2011). El INAMHI ha propuesto un plan de instalación de estaciones hidrológicas que han permitido estimar de mejor manera la disponibilidad del recurso hídrico para su gestión y aprovechamiento. Es así que en el año 1963 se presenta el primer Anuario Hidrológico con información recopilada del país y en requeridas ocasiones con valores deducidos por falta de lecturas (SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA, 1964). Hasta el año 2016 contaba con 35 estaciones hidrológicas automáticas (EHA) además de las convencionales (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2016). Actualmente, proporciona información oportuna sobre caudales de los ríos, temperatura, precipitación, humedad, velocidad y dirección del viento, niveles de aguas superficiales y subterráneas, entre otros.

En lo referente a los caudales, el monitoreo se lo realiza no solamente en estaciones manejadas por el INAMHI, sino también por otros organismos regionales. Dentro de este grupo se encuentra el Fondo para la Protección del Agua (FONAG) encargado de diversos programas que implican la gestión y manejo del recurso hídrico de las fuentes que abastecen al Distrito Metropolitano de Quito (Lloret, Pablo, 2011). También se encuentra la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA, 2022) que tiene entre sus objetivos el cuantificar y registrar caudales y volúmenes de agua para un control del servicio de agua potable. De la misma manera la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) posee estaciones hidrometeorológicas en puntos estratégicos dentro y fuera de Quito, capital del Ecuador (Rosero, Rosario, 2010). Asimismo, la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Saneamiento y Gestión Ambiental del cantón Cuenca en el Ecuador (ETAPA EP) realiza el monitoreo de caudal desde el año 1977 con el inicio de una red hidrometeorológica de 14 estaciones. Esta red ha ido creciendo a través de los años con la incorporación de nuevas tecnologías y equipos modernizados ante la necesidad de recopilación de información. ETAPA EP es la principal entidad encargada del monitoreo hidrometeorológico en la ciudad de Cuenca. A la par, instituciones como la Universidad de Cuenca, el Instituto Nacional de Eficiencia y Energías Renovables (INER) y la Universidad Politécnica Salesiana (UPS) han generado estudios, recopilado información y abierto paso a nuevas investigaciones referentes al tema.

En la ciudad de Cuenca, el monitoreo por parte del INAMHI y ETAPA EP de las cuencas de los ríos Tarqui, Tomebamba, Machángara y Yanuncay ha generado información continua de

precipitación y caudal. La implementación de estaciones manuales, automáticas y mixtas de tipo limnimétricas, limnigráficas y climatológicas favorecen la recopilación y tratamiento de datos. Por lo que, es importante fomentar la simplicidad de la toma de valores a fin de facilitar un registro continuo y enriquecer bases de datos y fuentes de información.

Una curva de descarga para una sección transversal de un curso de agua representa una estrategia de determinación de datos sencilla y eficiente. La obtención de caudales, se basa en el registro de una lectura de nivel de agua ya sea mediante sensores ultrasónicos, de presión o en escala limnimétrica que es relacionada a una curva de descarga propia del sitio de estudio, la cual se obtiene sobre la base de aforos directos. Sin embargo, esta curva de descarga ajustada mediante registros previos de caudal en ciertas condiciones de sección del río puede variar debido a eventos de socavación, transporte de sedimentos, y en general modificaciones de la sección del cauce, comprometiendo la calidad de los datos observados. Según lo expuesto, resulta importante no sólo la correcta calibración de la curva de descarga, sino también un monitoreo continuo que nos permita detectar los posibles cambios y reajustes en la misma. En donde, el registro de caudales para curvas de descarga debe realizarse periódicamente, al menos cada dos meses (INAMHI, 2011).

La morfología y condiciones de flujo del río, o canal a medir es una importante fuente de errores de medición. A diferencia de los ríos de llanura, los ríos de montaña presentan sedimentos de mayor tamaño debido a las altas pendientes longitudinales y mayor capacidad de erosión y transporte de partículas (López, Raúl, 2005b). En ríos de montaña con pendiente considerable y alto grado de obstrucción, el flujo se caracteriza por una notable variabilidad, con zonas de cambio de régimen y resaltos hidráulicos. La gran cantidad de material aluvial de dimensión considerable induce la existencia de flujos cruzados que perturban la exactitud de la medición, por lo cual resulta imprescindible la preparación de la sección de medición perpendicular al flujo, a fin de conseguir condiciones lo más uniformes posibles.

En cuanto al equipo de medición se debe conocer las limitaciones presentes y las condiciones necesarias para un óptimo registro. Mecanismos de medición de velocidad mediante el empleo de equipos como molinetes, flotadores o trazadores presentan errores ya sea por la simplicidad de recolección o por su alta dependencia a los parámetros hidráulicos del canal. Por otro lado, métodos volumétricos resultan poco efectivos para cauces naturales dada la dificultad de registrar de manera precisa el volumen que atraviesa la sección de control en un tiempo dado. En este sentido, la reciente evolución de equipos de medición con tecnología acústica basada en el efecto Doppler (ADV) ha permitido recolectar datos cada vez más precisos y con fuentes de error más controlables. Se pueden distinguir algunas ventajas de

los instrumentos acústicos frente a métodos tradicionales (ej.: molinete): los primeros generan una mínima interferencia en el punto de medición, no poseen piezas móviles susceptibles a deterioro, ofrecen un registro automático de datos, y posibilitan la determinación del caudal mediante procedimientos estandarizados a medida que avanza la medición (Palman et al., 2015).

La revisión de antecedentes acerca de la experiencia de medición de caudales permite comprender la efectividad de mediciones a partir de dispositivos ADV (velocímetro acústico de efecto Doppler). Se puede citar trabajos realizados por la Universidad Nacional del Litoral, en donde mediante pruebas en canales de laboratorio y cauces naturales se determinó el error relativo de medición para el equipo FlowTracker y molinete OTT, con resultados de 2.5% y 3.8% respectivamente. (Palman et al., 2015). Trabajos realizados por el Instituto de Hidrología en Eslovaquia comparan la efectividad de medición de la velocidad de flujo y caudales de descarga por métodos ADV y mediante trazadores, concluyendo que los resultados mediante el primer caso son adecuados incluso bajo condiciones de flujo difíciles, mientras que el método de trazadores otorga valores únicamente referenciales, con resultados cuestionables para tramos largos, con cambios de profundidad o con presencia de abundante vegetación (Schugerl et al., 2019).

1.2. Justificación

Los patrones y la intensidad de eventos meteorológicos experimentan una amplia variabilidad espacial y temporal (WBG, 2021). En el contexto de un clima cambiante, la intensidad y la distribución de las precipitaciones varían ampliamente a lo largo del tiempo y el espacio, generando patrones climáticos dinámicos. Esta variabilidad incide directamente en la respuesta de los cuerpos de agua, afectando la magnitud y frecuencia de los caudales fluviales. De manera que, un registro continuo de caudales en puntos estratégicos es fundamental para la caracterización del recurso hídrico, tratándose como una herramienta eficaz para afrontar problemáticas de eventos extremos.

En lo referente a la medición del caudal que discurre en una sección de cauce natural, la simplicidad de estrategias y principios de medición inducen errores en los datos recolectados, por lo cual, la tecnología de medición de caudales se ha encontrado en constante evolución. Dentro de las diferentes alternativas de recolección de datos, la Universidad de Cuenca cuenta con el equipo FlowTracker2 de la empresa SonTek. El equipo mide velocidad/caudal mediante un sensor ADV (Acoustic Doppler Velocimeter). Este ofrece gran eficacia y precisión de medición bajo una amplia gama de entornos favoreciendo la obtención de mediciones confiables de caudal en puntos estratégicos a fin de mantener un registro continuo (SonTek).

Dado que el aforo de caudal de un cauce natural es una tarea laboriosa que no puede llevarse a cabo diariamente, para conformar la estadística hidrológica se debe optar por alternativas cuyos resultados sean aceptables y su metodología resulte sencilla (Quintana Aylwin, A, 1951). De modo que una lectura de la altura limnimétrica del agua puede representar una solución efectiva para un registro acertado de caudales en una determinada sección con una periodicidad adecuada.

Para que el registro de alturas limnimétricas represente información que pueda ser aprovechada se debe contar con la ecuación de la curva de descarga para la sección de control. La curva de descarga representa una manera eficaz de relacionar el calado del agua y el caudal que atraviesa una sección, especialmente cuando en la misma no se teme alteraciones de forma o dimensiones del lecho y en general se puede asegurar su estabilidad (Quintana Aylwin, A, 1951). Dada la importancia de la generación de una ecuación que represente dicha relación es primordial realizar mediciones precisas del caudal (Ji et al., 2013).

En este sentido, se plantea la obtención de curvas de descarga para el río Mazán A.J. Matadero y el río Culebrillas A.J. Matadero en el puente Picota Cucho de la vía Buenos Aires de Sayausí, y la determinación de errores, mediante el registro de niveles y caudales con el uso del instrumento FlowTracker2 a fin de establecer el mejor ajuste que relacione dichas variables en secciones de control debidamente preparadas con características apropiadas. Como resultado, la obtención y reajuste de curvas de descarga motivan el registro de datos y fortalecen la base de datos de registros históricos.

1.3. Pregunta de investigación

- ¿Es posible determinar la curva de descarga que represente el mejor ajuste de la relación caudal – nivel y estimar errores de medición en secciones de control de cauces naturales correspondientes al río Mazán A.J. Matadero y Culebrillas A.J. Matadero y en un canal de laboratorio con vertedero triangular bajo condiciones controladas?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Elaborar curvas de descarga y estimar errores de medición en dos secciones transversales de cauces naturales ubicados al noroeste de la ciudad de Cuenca en el río Mazán A.J.

Matadero y en el río Culebrillas A.J. Matadero en el puente Picota Cucho de la vía Buenos Aires de Sayausí.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Comprender el principio de funcionamiento y potencialidades del equipo FlowTracker2 con el propósito de emplearlo en la medición de caudales.
2. Ejecutar mediciones de caudales en un canal de laboratorio bajo condiciones controladas con el equipo FlowTracker2.
3. Ejecutar mediciones de caudales en dos secciones transversales de dos ríos ubicados al noroeste de la ciudad de Cuenca, en el río Mazán A.J. Matadero y en el río Culebrillas A.J. Matadero en el puente Picota Cucho de la vía Buenos Aires de Sayausí con el equipo FlowTracker2, a fin de determinar la divergencia para condiciones de calado semejantes.
4. Determinar las características morfométricas de dos microcuencas al noroeste de la ciudad de Cuenca para contrastar la información registrada y verificar los rendimientos de las mismas.
5. Contrastar resultados de caudales y errores de medición en dos condiciones de flujo diferentes, en los cauces naturales con alto grado de turbulencia, y en un canal con condiciones controladas y flujo uniforme.
6. Estimar la curva de descarga para los ríos analizados.

1.5. Organización de los capítulos

El presente trabajo de titulación se encuentra organizado en 6 capítulos como se indica a continuación.

Capítulo 1 Introducción: En este capítulo se exponen los antecedentes que contextualizan el trabajo de titulación a fin de ofrecer una visión general de la importancia del tema, seguido de la justificación a la problemática del mismo, el planteamiento de la pregunta de investigación, y los objetivos tanto general como específicos. Además, se da a conocer la secuencia del contenido de los capítulos.

Capítulo 2 Equipo de medición de velocidad y flujo “FlowTracker2 ADV”: En este capítulo se presenta un enfoque de la caracterización y empleo del equipo FlowTracker2 para medición de velocidad y caudal. Se incluye todo lo relativo a la configuración del dispositivo, al principio de funcionamiento, a los componentes y montaje del equipo, a las especificaciones técnicas, modo de uso y proceso de medición, a la recolección y revisión de

datos, a los parámetros de calidad de medición, al software de escritorio, exportación de datos y formatos de archivo.

Capítulo 3 Marco teórico: En este capítulo se aborda aspectos referentes a la cuenca hidrográfica, cauces naturales, hidrometría, curvas de descarga y metodologías de aforo. El enfoque se realiza en aforo por vadeo con la identificación, selección y demarcación del sitio de medición, así como en la preparación de la sección de aforo y otros aspectos importantes. Además, se describen los posibles errores y limitaciones que inducen al incremento de incertidumbre, así como la comprobación estadística de las asunciones del modelo de ajuste para la curva de descarga.

Capítulo 4 Caracterización de la zona de estudio y estimación de las curvas de descarga: En este capítulo se define los casos de estudio referente a las secciones del cauce y puntos de descarga de las microcuencas, y el procesamiento de su información morfométrica. Se expone la aplicación de la metodología de medición en campo y en laboratorio, además de la validación y el tratamiento de los datos recolectados para la obtención de las curvas de descarga respectivas y verificación del ajuste.

Capítulo 5 Discusión y análisis de resultados: En este capítulo se interpreta los hallazgos y discute respecto al análisis conjunto de las microcuencas, al régimen de flujo en las secciones de aforo, a las curvas de descarga obtenidas para las estaciones Mazán A.J. Matadero y Culebrillas A.J. Matadero, así como para el canal de laboratorio con vertedero triangular.

Capítulo 6 Conclusiones, observaciones y recomendaciones: En este capítulo se presenta las conclusiones del trabajo desarrollado en respuesta a los objetivos planteados respecto a las curvas de descarga para el Río Mazán, Río Culebrillas y en laboratorio en condiciones controladas, y la comparativa para los principales casos de estudio. Se exponen observaciones y limitaciones referentes al alcance obtenido. Además, se propone las recomendaciones afines a nuevos temas para ampliar y complementar la investigación.

Capítulo 2

Equipo de medición de velocidad y flujo “FlowTracker2 ADV”

En este capítulo se describe aquellos aspectos referentes al equipo de medición de velocidad y flujo FlowTracker2 de acuerdo a la configuración utilizada para el desarrollo del presente trabajo de investigación. El contenido redactado se basa en el manual de usuario FlowTracker2 proporcionado por la empresa SonTek.

2.1. Definiciones y terminología

En este apartado se definen términos relacionados al equipo FlowTracker2 y su funcionamiento.

- **Correntómetro** – Instrumento de medición de velocidad de flujo.
- **Desviación estándar** – Parámetro estadístico que mide la desviación de un conjunto de datos respecto al valor promedio.
- **Dispositivo portátil** – Instrumento manual que controla el equipo mediante un sistema electrónico interno, teclado y pantalla.
- **Firmware** – Tipo de software encargado de las funciones básicas de interacción entre el sistema operativo y el hardware.
- **Frecuencia** – Cantidad de ciclos por unidad de tiempo medido en hercios (Hz) en donde 1Hz representa una repetición de onda por segundo.
- **Medición 2D** – Resultante del registro de velocidad del agua en dos direcciones.
- **Receptor acústico** – Elementos sensibles al ruido que captan la intensidad de la señal emitida. El FT2 tiene 2 receptores acústicos ubicados en cada brazo de la sonda.
- **Salinidad** – Contenido de sales minerales en el agua. El valor establecido por defecto para agua dulce en FT2 es 0.
- **Sonda** – Instrumento de medición de flujo.
- **Transmisor acústico** – Elemento de la sonda que genera un pulso de sonido concentrado en un haz de 6mm de diámetro.
- **Utilidades** – Conjunto de funciones que aportan detalles a la medición sin afectarla directamente.
- **Velocidad de sonido** – Velocidad a la que las ondas sonoras se propagan en el agua.

2.2. Parámetros generales del equipo

2.2.1. Elementos del equipo

El equipo de aforo FlowTracker2 cuenta con los elementos y accesorios indicados en la **Figura 2-1**.

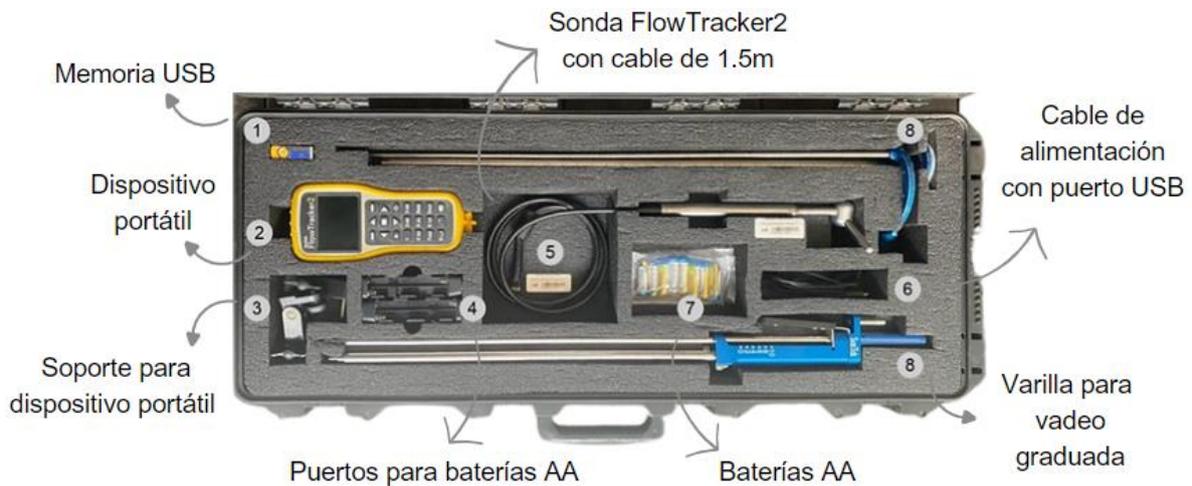


Figura 2-1. Elementos y accesorios del equipo FlowTracker2.

El sistema de medición de velocidad y caudal está constituido principalmente por los componentes presentados en la **Figura 2-2**. En general, la sonda posee los transmisores y receptores acústicos para medición 2D, así como un sensor de temperatura y presión.



Figura 2-2. Componentes del sistema FlowTracker2, dispositivo portátil y sonda.

El diseño del teclado es intuitivo permitiendo al usuario acceder eficazmente a las funciones del equipo. Posee las teclas de navegación y selección en la parte superior y enseguida, un teclado alfa--numérico.

La pantalla LCD permite la visualización de las alternativas que ofrece el equipo. El menú principal consta de las opciones “Configuración de dispositivo”, “Utilidades”, “Comunicación” e “Información del sistema”.

2.2.2. Configuración del dispositivo portátil para medición

La configuración del dispositivo expone el menú de “Interfaz de usuario”, “Configuración de la aplicación”, “Plantilla de caudal” y “Plantilla general”. La primera opción se relaciona con la comodidad de interacción entre operador y dispositivo. Se incluye la selección de idioma y la alternativa de activar un emisor de sonido cuando se requiera.

En lo concerniente a configuración de aplicación, se define las unidades en sistema métrico o inglés, la opción de varilla de vadeo, la nomenclatura de archivos y carpetas, el GPS y el sensor de presión. En particular, la opción varilla de vadeo indica numérica y gráficamente la profundidad requerida en función de los tipos de medición: ajuste superior, universal, hielo o desconocido. Las alternativas de ajuste superior y hielo hacen referencia a una medición realizada desde la superficie del agua hacia el fondo. Por el contrario, la opción universal mide desde el fondo hacia la superficie.

En relación a la nomenclatura de archivos, en caso de que se asigne el mismo nombre, el sistema interno garantiza que no se sobrescriban mediante la adición de un número al final del texto. En añadidura, las carpetas pueden organizarse por número o nombre de sitio, o por fecha (año-mes). Finalmente, respecto al registro GPS de las estaciones, este puede ser automático o manual. El primero depende de la señal satelital captada, en donde las coordenadas son obtenidas de un promedio de información posicional desde que se añade una estación hasta que se completa la medición en la misma. Por otra parte, la alternativa manual permite el ingreso de la ubicación GPS en donde la precisión depende del operador.

Al realizar los aforos se utilizó el sistema métrico con una configuración de varilla de vadeo de tipo ajuste superior de acuerdo a lo indicado en la **Ecuación 2-1**. La resultante H_{rod} , indica el valor de ajuste de la varilla, el cual es función de la profundidad total del agua en ese punto y de la fracción de profundidad de medición a la cual se ubicará la sonda (ver [sección 2.8.2](#)).

$$H_{rod} = \left[\frac{(1 - f_d) \times w_d}{0.4} \right]$$

Ecuación 2-1. Ajuste de profundidad de la sonda en la varilla de vadeo. Fuente: (SonTek).

Donde,

H_{rod} = Ajuste de profundidad de la sonda en la varilla de vadeo

f_d = Fracción de profundidad

w_d = Profundidad del agua

Los ajustes de la toma de datos en donde se detalla el tiempo de la medición en segundos, salinidad, temperatura y velocidad de sonido se configuran en las opciones de plantilla. Los datos recolectados se someten a un control de calidad, el cual incluye la configuración del umbral de los parámetros de calidad de medición (ver [sección 2.5](#)).

Además, se configura la función ajuste de caudal y el método de cálculo de velocidad. El ajuste de caudal hace referencia a la ecuación para el cálculo del mismo (ver [sección 2.7.2](#)). Por otro lado, los métodos de medición de velocidad para cálculo de caudal varían entre método 0.2/0.8/0.6, el método de Kreps, el método de los 5 puntos, el método de los 6 puntos y la curva de velocidad vertical. Es posible activar más de un método. No obstante, se ha definido únicamente el método por defecto correspondiente a las mediciones fraccionarias de profundidad a 0.2/0.8/0.6 (ver [sección 2.7.3](#)).

Para las mediciones se creó una nueva plantilla en base a la de caudal con las configuraciones previas a la toma de datos relacionadas a las características del sitio y al operador. En adición, la temperatura y velocidad del sonido son medidas en sitio, esta última con una duración de 40 segundos. Finalmente, en cuanto a los límites de control de calidad, los umbrales permanecieron con los valores predeterminados.

La verificación de las utilidades caracteriza cada estación y permite el detallamiento de los datos. Entre las distintas utilidades se tiene el “Reloj” en donde se presentan los parámetros de fecha aaaa-mm-dd, hora hh:mm:ss y hora UTC hh:mm. La siguiente función es “Grabadora”, la cual permite la visualización del espacio libre y usado de la memoria interna en porcentaje y en Megabytes (MB) de un total de 2000MB. Se exponen además los archivos almacenados. Permite la visualización de datos sin almacenar referentes a velocidad, SNR, temperatura, inclinación, batería y presión. Tanto los registros de SNR, temperatura, ángulo de inclinación y presión son actualizados una vez por segundo.

2.2.3. Información del sistema

La opción de información de sistema permite identificar el equipo, número de serie y firmware. Además, posee información de contacto de la empresa distribuidora SonTek. La base de datos del presente trabajo se obtuvo con el equipo FlowTracker2 Portátil de medición 2D con número de serie FT2H1620002 y firmware v1.1.1 actualizado en 2016-02-17.

2.3. Especificaciones técnicas generales

El dispositivo asegura altas prestaciones en función de las especificaciones y control de calidad de las mismas. A continuación, en la **Tabla 2-1** se detallan las principales especificaciones de los parámetros involucrados en la medición.

No.	Parámetro	Especificación
1	Velocidad	Rango [m/s]: ± 0.001 a 4.0 Resolución [m/s]: 0.0001 Precisión: $\pm 1.0\%$ de la velocidad medida
2	Frecuencia acústica [MHz]	10.0
3	Profundidad de medición	Valor mínimo [m]: 0.02 Rango [m]: 0 a 10.0 Resolución [m]: 0.001
4	Sensor de temperatura	Resolución [°C]: 0.01 Precisión [°C]: 0.1
5	Temperatura	Rango de funcionamiento (pila alcalina) [°C]: -20 a 45 Rango de almacenamiento [°C]: -30 a 70
6	Sensor de inclinación	Precisión [°]: 1.0
7	GPS	Precisión en posición horizontal [m]: <2.5
8	Almacenamiento de datos [GB]	16
9	Resistencia al agua	IP-67 ¹

Nota. ¹Código numérico que indica el grado de protección, la primera cifra indica el nivel resistencia ante el polvo (0 a 6) mientras que la segunda al agua (0 a 9).

Tabla 2-1. Especificaciones de la sonda ADV y unidad electrónica. Fuente: (SonTek).

2.4. Principio de funcionamiento

El equipo FT2 utiliza un Velocímetro Acústico Doppler (ADV), el cual está basado en el efecto Doppler. Dicho efecto indica que la frecuencia del sonido emitido por una fuente puede acortarse o alargarse conforme esta se acerca o se aleja del receptor. De modo que, la frecuencia recibida será directamente proporcional a la velocidad relativa entre estos dos y su efecto disminuye conforme mayor es la velocidad de propagación en el medio.

El equipo consta de un emisor de sonido y dos sensores receptores cuya intersección de ejes representa el volumen de control para la medición de forma cilíndrica con un diámetro de 6mm y 9mm de altura ubicado a 10cm del emisor. Para la determinación de la velocidad, el emisor genera un haz de sonido de una frecuencia conocida, mismo que al atravesar el medio es reflejado en todas las direcciones. Una porción de la energía emitida se refleja en el volumen de control y viaja hacia cada uno de los receptores cuyo cambio de frecuencia debido al desplazamiento permite determinar la velocidad del medio.

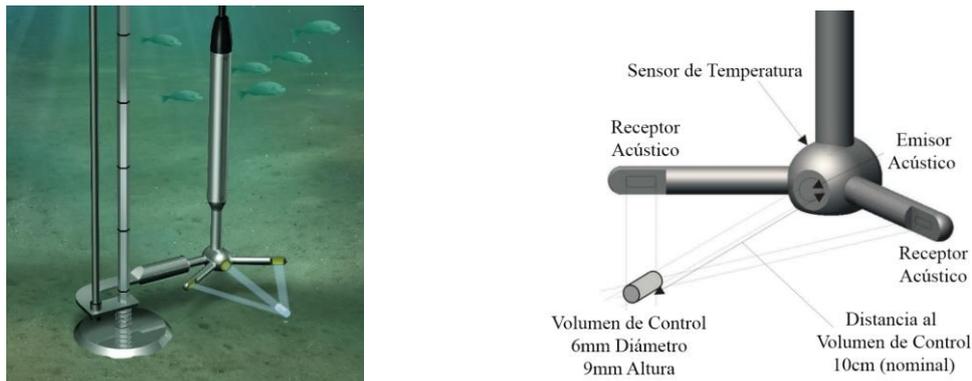


Figura 2-3. Esquema de sensor de medición y volumen de control. Fuente: (SonTek).

Inmediatamente después de generarse el pulso, el sonido viaja en todas direcciones y los receptores miden solo el ruido ambiental. Conforme se propaga el pulso, los receptores experimentan un incremento en la intensidad de la señal que llega a un pico cuando esta se encuentra en el volumen de control. El FT2 realiza la medición en base a un muestreo del pico de la señal. Por otro lado, la relación entre la intensidad del ruido ambiental y el pico de la señal se denomina SNR (Signal-to-Noise Ratio) (ver [sección 2.5.1](#)), y es un indicador de la calidad de la medición. El fabricante recomienda que este valor sea siempre mayor a 10dB para mediciones confiables.

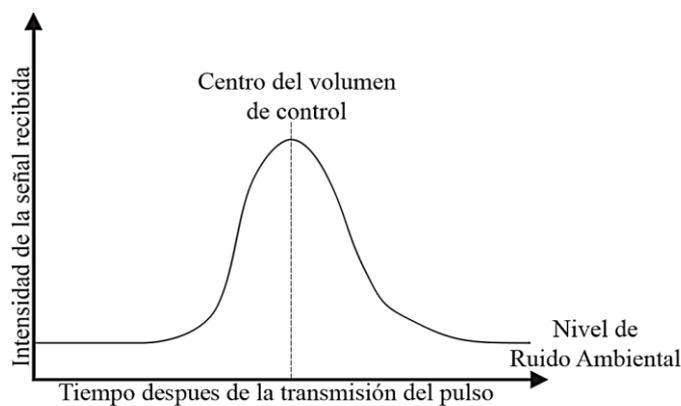


Figura 2-4. Intensidad de la señal receptada respecto al tiempo posterior a la emisión del pulso. Fuente: (SonTek).

2.4.1. Consideraciones de operación

El equipo reporta dos datos de velocidad por segundo, siendo cada uno la media de 20 mediciones puntuales. De modo que, la frecuencia de muestreo es de 40Hz. Los datos de velocidad son recolectados durante el intervalo de tiempo especificado por el usuario que típicamente se encuentra en el rango de 40 a 60 segundos, y depende principalmente de la variabilidad de las condiciones de medición.

El equipo no mide la velocidad del agua sino de las partículas que ésta contiene. Si no existieran partículas a más de las moléculas de agua, la medición no sería posible. Sin embargo, la precisión es tal que incluso una pequeña cantidad de burbujas de aire producen resultados apropiados. Adicionalmente, la forma, tamaño y distribución de las partículas afectan la precisión de los datos recolectados. En este contexto, dos cauces con la misma turbidez no necesariamente tendrán la misma precisión. Por tal, se recomienda realizar una prueba de haz (ver [sección 2.6](#)) si se presume condiciones de medición inadecuadas.

La medición de la señal puede ser afectada por la presencia de obstáculos entre emisor y volumen de control. Incluso un obstáculo a una distancia de 15cm del volumen de control podría inducir error en la medición debido a la reflexión de la señal. El equipo reporta un parámetro de calidad (ver [sección 2.5.3](#)) que considera el efecto de obstáculos en la medición.

La sonda debe estar orientada de modo que el eje del emisor resulte perpendicular a la dirección del flujo. Se recomienda que dicha alineación no varíe en más de 40 a 50° para mediciones precisas. Adicionalmente, el equipo no necesita ser recalibrado entre mediciones a menos que exista daño físico en la sonda.

La velocidad del sonido se ve afectada principalmente por la salinidad y la temperatura. Ante esto, el equipo dispone de un sensor de temperatura integrado y el valor de salinidad puede ser ingresado de manera manual a fin de ajustar la velocidad del sonido en el agua. Un cambio de 5°C en la temperatura del agua o de 12 en la Escala Práctica de Salinidad involucra una variación del 1% en la velocidad del sonido. A su vez, un error en la velocidad del sonido del 1% resulta en un error de alrededor del 2% en los datos de velocidad medidos.

2.5. Parámetros de calidad de medición

Los parámetros de calidad de medición corresponden a un conjunto de variables recolectadas durante la toma de datos de velocidad. Cuando cualquier parámetro de calidad excede los límites esperados, el equipo presentará una advertencia dado que la confiabilidad de la medición podría verse comprometida.

2.5.1. SNR (Signal-to-Noise Ratio)

El valor de SNR es el parámetro de calidad más importante. Se reporta cada segundo y representa la relación entre el pico de señal de pulso recibida y el ruido ambiental (ver [Figura 2-4](#)). Se presenta en escala logarítmica y se recomienda que sea mayor a 10dB y nunca inferior 4dB. Valores de SNR bajos suponen una cantidad muy pequeña de partículas en el agua que conllevan a señales débiles. Sin embargo, la mayoría de aplicaciones en campo tienen una cantidad adecuada de partículas suspendidas.

El equipo permite visualizar el valor de SNR de manera instantánea durante cada medición y reporta el valor medio al final de la misma. Algunos problemas reflejados en este parámetro tienen que ver con la presencia de obstáculos o un alto grado de turbulencia. Estos errores se reportan cuando se registra una diferencia mayor a 5dB entre haces en los receptores, entre estaciones o en la desviación estándar durante cada medición. Si el problema persiste se recomienda analizar el entorno y cambiar de posición de medición.

2.5.2. Error Estándar de Velocidad (σ_V)

Puede ser interpretado como la precisión de los datos de velocidad medidos. Se calcula dividiendo la desviación estándar de las muestras durante un segundo por la raíz cuadrada del número de muestras (40 muestras). Representa la variación debido a las condiciones del ambiente, y su umbral típicamente toma el valor de 0.01m/s con un máximo de 0.025m/s.

2.5.3. Interferencias de bordes

Este parámetro tiene que ver con el efecto de objetos en el volumen de control o cercanos a este. Los objetos pueden obstruir la transmisión de la señal o a su vez causar reflexión y consecuente distorsión de los datos. Ante esta situación, el equipo puede adaptar su funcionamiento para evitar la interferencia. Adicionalmente, reporta el parámetro Boundary QC mismo que representa el grado de interferencia en la señal y se encuentra en el intervalo de 0 a 3. El efecto de las obstrucciones incrementa conforme mayor es la velocidad de flujo.

2.5.4. Filtro de Picos de Velocidad

Cubre el efecto de valores atípicos en la medición debido a la influencia de partículas alargadas, burbujas de aire o anomalías acústicas. En referencia a los datos medidos, la diferencia entre el tercer cuartil (Q3) y el primer cuartil (Q1) representa el rango intercuartílico (IQR) que deberá ser siempre mayor a 0.015m/s. Todos los datos menores a $Q1-2(IQR)$ o mayores a $Q3+2(IQR)$ son considerados picos y no se utilizan en la medición. Por defecto, el límite de picos se encuentra en un 10% del total de los datos.

2.5.5. Ángulo de la velocidad y ángulo de inclinación

De manera ideal, el flujo debería ser perpendicular a la línea que define la sección transversal del cauce. En la mayoría de entornos, la velocidad varía en su dirección, sin embargo, estas variaciones en lo posible deberán ser menores a 20° respecto al eje x (ver Figura 2-5).

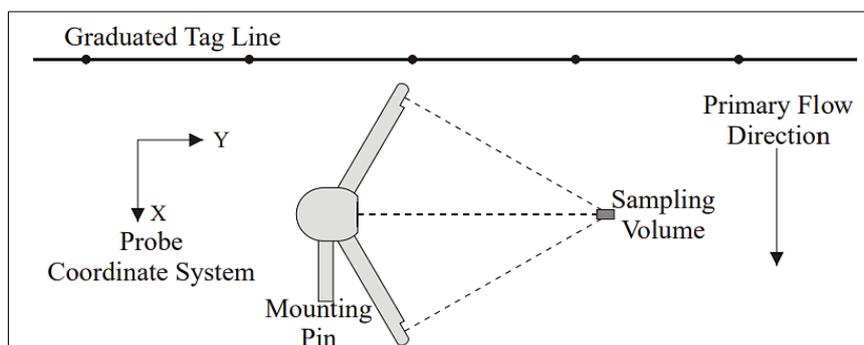


Figura 2-5. Orientación del equipo. Fuente: (SonTek).

El ángulo de inclinación corresponde al de la varilla de vadeo respecto a la vertical. Una buena medición deberá tener ángulos de inclinación menores a 5° . Tanto el ángulo de inclinación como de velocidad son únicamente indicadores y no interfieren en el cálculo de la velocidad.

2.5.6. Porcentaje de descarga, porcentaje de profundidad y ubicación de la estación

El porcentaje de descarga se refiere al porcentaje de caudal de una determinada estación respecto al caudal de todo el cauce. El valor referencial y empleado por defecto por el equipo es de 10%. Por otro lado, el porcentaje de profundidad de la estación sugiere que la profundidad respecto a las estaciones adyacentes no debería tener una variación de más de 50%. Este valor asegura cambios graduales para profundidades de al menos 20cm y evita en lo posible el ingreso de datos erróneos. Mientras, el parámetro de ubicación sugiere que el espaciamiento respecto a la estación anterior no debería ser superior al 100%, es decir, el espaciamiento de la nueva estación es como máximo el doble respecto a la estación anterior.

2.5.7. Perfil de velocidad

Parámetro que permite identificar distribuciones de velocidad inusuales en mediciones a profundidades a 0.2/0.8. Como control de calidad el equipo sugiere una medición a 0.6 de la profundidad en tres casos. En primer lugar, cuando la magnitud de la medición a 0.8 es mayor a la medición a 0.2 de la profundidad. Segundo, cuando la magnitud a 0.2 es dos veces mayor que a 0.8 de la profundidad. Por último, cuando las magnitudes en ambos puntos sugieren un flujo en sentido opuesto.

2.6. Medición de haz

Es una representación gráfica del valor de SNR en cada uno de los receptores respecto a la distancia desde el emisor. El pico representa el centro del volumen de control, que típicamente se encuentra de 10 a 12cm de distancia. Adicionalmente, obstáculos presentes dentro de la distancia de influencia también incrementan la intensidad del SNR debido a la reflexión de la señal (ver Figura 2-6). La prueba permite detectar que las condiciones de medición sean adecuadas según la amplitud del pico en el volumen de control. Asimismo, favorece la detección de obstáculos cuando estos no sean visibles desde la superficie a fin de evitar que en lo posible estos se encuentren a una distancia menor a 27cm del emisor.

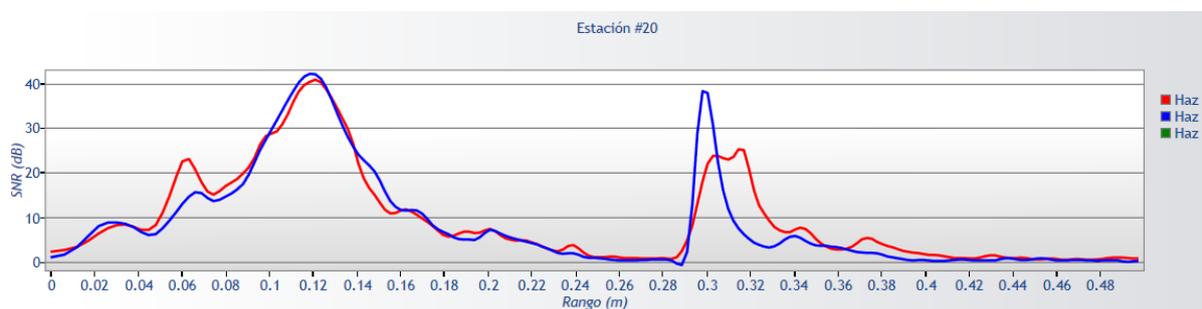


Figura 2-6. Gráfico de medición de haz para una estación medida en el Río Mazán. Fuente: Elaboración propia (FlowTracker2 aplicación de escritorio).

2.7. Técnica de medición de caudal

La técnica de medición empleada por el equipo para la obtención del caudal en una determinada sección está fundamentada en el principio área – velocidad. Se basa en la toma de múltiples velocidades a lo largo de la sección transversal del cauce, en conjunto con el registro de valores de ubicación y profundidad de la sonda. La medición debe seguir las recomendaciones para la selección de la sección descritas en el apartado 3.8.1, además del procedimiento de medición con el equipo FT2 de acuerdo a la **sección 2.9**.

2.7.1. Métodos de cálculo de caudal

Los métodos de cálculo de caudal fueron originalmente desarrollados para instrumentos correntómetros. Dado que el equipo FT2 emplea el mismo principio de medición, dichos métodos de cálculo son válidos y pueden ser empleados para determinar el caudal de una sección. El FT2 dispone de tres opciones de cálculo ampliamente utilizadas por agencias gubernamentales, hidrólogos e hidrógrafos, siendo estas el método de Mid-Section, Mean-Section y el método japonés. Dado que el método Mid-Section es el empleado por defecto por el equipo y el de mayor aplicación será el único descrito a detalle.

2.7.2. Método de Mid-Section

El método consiste en dividir la sección transversal en múltiples estaciones, en cada vertical se registra la ubicación, profundidad y velocidad media de la estación. La **Ecuación 2-2** muestra el método empleado para el cálculo del caudal total de una sección en base al método Mid-Section. De manera gráfica el método puede ser interpretado según lo presentado en la **Figura 2-7**. Método de cálculo de caudal Mid-Section. Fuente: En adición, es importante mencionar que la velocidad en el borde será igual a la velocidad en la estación adyacente afectada por un factor de corrección.

$$Q = \sum \bar{v}_0 d_0 \left(\frac{b_1 - b_0}{2} \right) + \bar{v}_1 d_1 \left(\frac{b_2 - b_0}{2} \right) + \dots + \bar{v}_n d_n \left(\frac{b_{n+1} - b_{n-1}}{2} \right)$$

Ecuación 2-2. Caudal mediante el método de Mid-Section. Fuente: (SonTek).

Donde,

\bar{v}_i = Velocidad promedio en la estación

d_i = Profundidad del agua en la estación

b_i = Ubicación de la estación

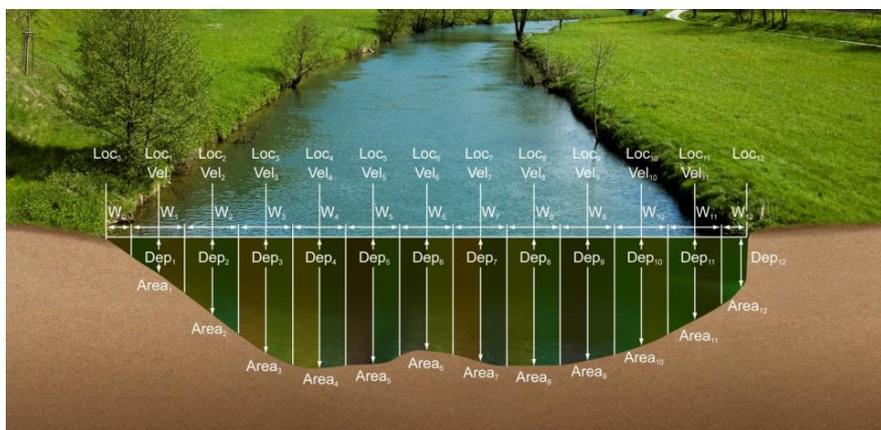


Figura 2-7. Método de cálculo de caudal Mid-Section. Fuente: (SonTek).

2.7.3. Determinación de la velocidad media de la estación

Cuando se realiza la medición del caudal se debe determinar la velocidad promedio de cada vertical. El método de medición de velocidad puede ser de uno, dos o tres puntos a profundidades desde la superficie de 0.2, 0.2/0.8 y 0.2/0.6/0.8 respectivamente. La selección del número de velocidades medidas debe regirse en base al perfil de velocidad esperado en el cauce (ver [sección 3.4](#)). Las fórmulas empleadas por el equipo para determinar la velocidad media de la estación se presentan en la **Ecuación 2-3**, **Ecuación 2-4** y **Ecuación 2-5**.

$$V_{med(0.6)} = V_{0.6}$$

Ecuación 2-3. Velocidad media a 0.6 de profundidad. Fuente: (SonTek).

$$V_{med(0.2/0.8)} = \frac{V_{0.2} + V_{0.8}}{2}$$

Ecuación 2-4. Velocidad media a 0.2/0.8 de profundidad. Fuente: (SonTek).

$$V_{med(0.2/0.6/0.8)} = \frac{V_{0.2} + 2 V_{0.6} + V_{0.8}}{2}$$

Ecuación 2-5. Velocidad media a 0.2/0.6/0.8 de profundidad. Fuente: (SonTek).

Un factor de corrección (CF) es empleado para escalar la velocidad media de una estación adyacente para el caso de estaciones en las que no sea posible realizar la medición del caudal. Es comúnmente usado en los bordes de cauces, en islas internas (obstrucciones de gran tamaño) o en cualquier otra circunstancia en la que se requiera aproximar la velocidad de la estación. Este parámetro debe estar dentro del rango de -1 a 1 sin incluir el 0.

2.8. Montaje e instalación

El equipo de aforo posee una varilla para vadeo graduada (ver [Figura 2-1](#)) diseñada para facilitar al usuario la recogida de datos. Esta tiene un soporte en forma de *J* para sostener la sonda. También tiene un soporte de montaje para el dispositivo portátil ajustable a la altura requerida que es útil cuando la medición es realizada únicamente por un operador.

2.8.1. Ensamble del equipo

El procedimiento para ensamble y manejo de equipo se detalla a continuación. Se parte de una revisión de todos los componentes a fin de verificar que el equipo se encuentre completo y funcional, así como diagnosticar las condiciones originales en las que se encuentra.

Para el caso de que la medición se pretenda realizar con varilla de vadeo, se inicia con su ensamblaje. Esta posee dos varillas de distinto diámetro fraccionadas en dos partes. La varilla gruesa de 2cm de diámetro se encuentra fija respecto a la base. Mientras, la varilla delgada está diseñada para ser movilizada mediante la manipulación de un mango situado en la parte superior de la varilla de vadeo. Cada varilla se acopla mediante una unión roscada.

Seguido, se instala la sonda en el soporte en forma de *J* ubicado en la base de la varilla de vadeo. Este posee un pin de montaje con un tornillo roscable que permite asegurar la inmovilidad de la misma ante la fuerza del flujo. Después, se coloca el cable de sonda en el conector de comunicación del dispositivo portátil. Por otro lado, se posicionan las baterías en

su puerto, se lo instala en el compartimento y se lo asegura con su tapa roscada. El equipo FT2 utiliza 8 pilas de tamaño AA alcalinas o recargables de 1.5 voltios.

El desensamble del equipo se procede de manera similar. De inicio, se verifica que el equipo se encuentre apagado y fuera del agua. Se separa sus partes y se las coloca en su lugar asignado en el transportador. Para concluir, se verifica las condiciones en las cuales se encuentra el equipo y se lo traslada con cuidado hacia su lugar de almacenamiento.

2.8.2. Medición con varilla graduada para vadeo

La varilla para vadeo es de un material resistente e inoxidable. Posee un nivel circular y una base en su parte inferior para ayudar al operador a mantener la verticalidad del instrumento de medición. Además, permite un gran rango de medición referente a desplazamientos en el eje vertical con una sencilla manipulación en el mango de la varilla.

La varilla de mayor diámetro posee marcas divisorias separadas cada 2cm representadas por una línea perimetral. Análogamente, dos líneas perimetrales indican separaciones de 10cm y tres líneas se refieren a 50cm. La varilla delgada también posee marcas divisorias.

Con esta consideración, la varilla gruesa permite estimar la profundidad del agua de manera visual. Posterior a haber obtenido este dato se coloca el sensor a la profundidad de medición según sea el método. Para esto se hace uso de la **Ecuación 2-1** en donde el ajuste se realiza en base al movimiento vertical de la varilla delgada. Por defecto, los números inscritos en el mango corresponden a una medición desde la superficie a 0.6 de la profundidad.

El uso del equipo está propuesto para ser efectivo en mediciones en campo sin tener la necesidad de acudir a herramientas o equipos adicionales. Los métodos de medición usados en el trabajo en campo corresponden a 0.6, 0.2/0.8 y 0.2/0.6/0.8 de la profundidad.

2.8.2.1. Medición a 0.6 de la profundidad

Para determinar la profundidad a la que se debe colocar la sonda (H_{rod}) representada en la varilla de vadeo se reemplaza la fracción de profundidad en la **Ecuación 2-1**. El resultado corresponde a la profundidad total del agua, tal cual se indica a continuación.

$$H_{rod} = \left[\frac{(1 - 0.6) \times w_d}{0.4} \right] = \left[\frac{(0.4) \times w_d}{0.4} \right] = w_d$$

Para su representación, se encaja las líneas de graduación de la varilla delgada con las del mango azul de manera que coincidan con la medida de profundidad total registrada de la varilla gruesa. Para ejemplificar, si se tiene 100cm de profundidad, debe coincidir el 10 de la

varilla delgada con el 0 del mango azul. Esto corresponde a una profundidad de 60cm medida desde la superficie ($0.6w_d$), o una altura de 40cm desde el fondo.

2.8.2.2. Medición a 0.2 de la profundidad

Para el caso de medición a 0.2 de la profundidad total, se realiza el mismo procedimiento empleado en el caso de 0.6d. De acuerdo a la **Ecuación 2-1**, el resultado a representar en la varilla de vadeo corresponde al doble de la profundidad total del agua en la estación.

$$H_{rod} = \left[\frac{(1 - 0.2) \times w_d}{0.4} \right] = \left[\frac{(0.8) \times w_d}{0.4} \right] = 2 w_d$$

Es así que, una vez tomada la lectura de la profundidad de agua, se duplica este valor. Posterior, se lo hace coincidir entre la varilla delgada y el mango azul. Por ejemplo, si se tiene una profundidad total de 100cm, se duplica esta magnitud (200) lo que corresponde a colocar el valor de 20 de las divisiones de la varilla delgada y el número 0 en el mango azul, es decir a 20cm de profundidad ($0.2w_d$) o a 80cm desde el fondo.

2.8.2.3. Medición a 0.8 de la profundidad

Para realizar la medición al 0.8 de la profundidad, se analiza de igual manera al caso de 0.6 de profundidad. El resultado de emplear la **Ecuación 2-1** corresponde a la mitad de la profundidad total del agua como se indica a continuación.

$$H_{rod} = \left[\frac{(1 - 0.8) \times w_d}{0.4} \right] = \left[\frac{(0.2) \times w_d}{0.4} \right] = 0.5 w_d$$

Por ende, para colocar la sonda a 0.8 de la profundidad se utiliza el valor obtenido a representar en la varilla de vadeo. Luego de registrar la lectura de profundidad del agua, se toma la mitad del valor y se ubica en la medición de la varilla delgada y el mango azul. Para el mismo caso de tener 100cm de profundidad total, la mitad corresponde a 50cm. Se coloca la varilla delgada en 5 y el mango azul en 0. Esto indica una medición a 80cm de profundidad ($0.8w_d$) o a 20cm desde el fondo.

2.9. Medición de caudal en campo

En lo que compete a una recolección de datos representativos para el objetivo del estudio, es importante poseer los conocimientos necesarios sobre las partes que envuelven el proceso. La metodología global involucra realizar un control previo de los instrumentos del equipo, así como la recopilación de información del sitio de medición, pre evaluación de la medición, ejecutar la secuencia de medición y proporcionar una revisión a la información generada.

Para empezar, es conveniente realizar la inspección del estado de cada elemento previo a la salida a campo. De esta manera se verifica el funcionamiento del equipo y se garantiza su desempeño. Las condiciones se evalúan física y funcionalmente mediante inspección visual o con pruebas en laboratorio. Por un lado, se inspecciona la apariencia externa, conectores, cables, baterías, entre otros. Mientras que el estado funcional se comprueba mediante el funcionamiento interno ya sea carga de batería, estado de memoria, control de haz, etc. Como recomendación, el usuario puede planear las etapas de medición y apoyarse en un listado de los componentes necesarios.

Por otro lado, el reconocimiento de las características de la zona de aforo se realiza *in-situ*. Para esto, el instrumento solicita campos de entrada con los requisitos principales que representan al sitio garantizando así una coherencia y organización de la base de datos. Entre las variables de entrada se registran el número y nombre de sitio, el operador, la hora y fecha de inicio y fin de la medición, coordenadas de ubicación. Los aspectos cualitativos deben ser registrados mediante fotografías u observaciones adicionales. Una vez elegido el sitio de medición en base a todos los criterios recomendados se prepara la sección y se establece el método de medición (ver [sección 2.8.2](#)).

Finalmente, se requiere monitorear los datos recolectados antes de cambiar de sitio. Se constata los parámetros ingresados referentes a la estación, así como el resultado obtenido del resumen, de modo que se encuentre dentro del rango esperado y umbrales definidos. En caso de tener irregularidades se debe registrar nuevas medidas para corroboración. Por último, se descarga y crea una copia de seguridad de la base de datos generada.

2.10. Consideraciones adicionales

Es importante garantizar un apropiado desempeño del equipo antes, durante y después de realizar la medición. En este contexto, el operador es el encargado de la correcta manipulación, así como el tratamiento y mantenimiento del equipo. Las herramientas son trasladadas a campo en un estuche de transporte diseñado para la protección de las mismas.

Conforme al mantenimiento rutinario, es recomendable realizar verificaciones en los accesorios. Por ejemplo, el cable debe ser inspeccionado con regularidad y guardado de manera que no sea susceptible a daños. Asimismo, se realiza una verificación del nivel de batería, ya sea directamente desde el dispositivo en porcentaje o con una medición de voltaje. Se aconseja también retirar las pilas luego de cada práctica. Adicionalmente, posterior al uso, es necesario secar con cuidado la sonda antes de su guardado, y de ser posible, limpiar el dispositivo portátil para evitar la acumulación de suciedad.

En definitiva, el usuario debe ser cuidadoso al manipular el dispositivo en la estación ya que este no está diseñado para trabajar sumergido. En caso de suceder, se deberá eliminar la humedad exterior, retirar la carcasa de protección y el cable de sonda e inspeccionar los puertos de entrada. Si existe humedad, puede ser un indicador de ingreso de agua al interior. En tal caso, el dispositivo portátil posee un paquete interno que absorbe la humedad por lo que no es necesario que sea abierto. Finalmente, se debe colocar las partes en un lugar sin humedad, ni luz solar directa para que se sequen.

2.11. Aplicación de escritorio

La aplicación de escritorio permite visualizar los datos, realizar un procesamiento posterior de la información, descargar los datos medidos o conectarse al equipo ADV para realizar otras funciones como la actualización del dispositivo. La aplicación viene incluida en la memoria USB junto con el equipo o puede ser descargada de la página oficial de la empresa SonTek: <https://www.yssi.com/customer-support/software-firmware-downloads>.

Previo a su uso es importante su configuración definiendo principalmente temas respecto al idioma, unidades y precisión de la información. Por otro lado, el menú “utilidades” cuenta con funciones adicionales otorgadas por la aplicación, en el cual se resalta la posibilidad de crear nuevas plantillas que posteriormente pueden ser configuradas y cargadas al equipo ADV.

2.11.1. Descarga, visualización y edición de datos

La descarga de datos desde el dispositivo ADV a la aplicación se puede realizar en base a una conexión USB o Bluetooth, en ambos casos se deberá ingresar al menú comunicación y dispositivo en el FT2 y la aplicación respectivamente. La conexión entre la computadora y el FT2 permite realizar actualizaciones en el dispositivo y descargar los datos.

El equipo otorga un archivo con extensión *.ft* que es un archivo de tipo ZIP que contiene los datos de medición de haz, puntos medidos y archivo de datos. Los datos de la medición también pueden ser obtenidos en forma de cuatro archivos de formato CSV. Cada uno contiene los parámetros de configuración, datos medidos y SNR, valores de descarga calculados, y un resumen de velocidad y datos de control de calidad de todas las mediciones.

Los datos descargados pueden ser visualizados desde la aplicación en base a tres paneles referentes a datos de resumen de la configuración, el sitio y los resultados, un panel principal con información detallada de cada estación y un panel con casillas editables referentes a métodos de cálculo y umbrales de los parámetros de calidad. Los tres paneles en mención se presentan en la **Figura 2-8**.



Figura 2-8. Ventana principal de visualización de datos en la aplicación de escritorio. Fuente: Elaboración propia (FlowTracker2 aplicación de escritorio).

La edición de valores asociados a una medición puede realizarse en la configuración general de la medición, y sobre ciertos valores recolectados en cada estación. En cuanto a los parámetros generales, su edición se realiza mediante el tercer panel de la parte derecha de la ventana principal de visualización (ver Figura 2-8). Para la edición de cada estación se procede desde el panel principal en la opción de estaciones, aquí será posible editar aquellos parámetros presentados en la Figura 2-9.

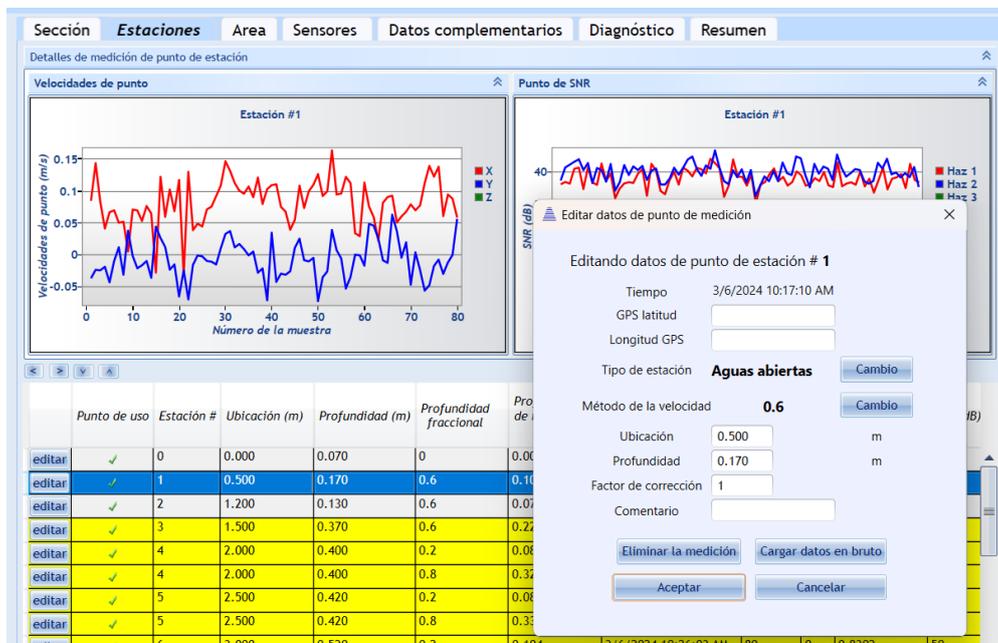


Figura 2-9. Menú de edición de estaciones. Fuente: Elaboración propia (FlowTracker2 aplicación de escritorio).

Capítulo 3

Marco teórico

La OMM (2021) en su reglamento técnico, volumen III, indica que los instrumentos y métodos empleados en la generación de base de datos hidrológicos debe estar acorde a las necesidades y recursos nacionales. El monitoreo de los afluentes y la generación de información cruda y procesada tiene diversos propósitos entre los que se encuentra la gestión adecuada de los recursos hídricos, diseño de estructuras, programas de prevención de riesgos, desarrollo de investigaciones afines, entre otros. Bajo estas condiciones, la exactitud y amplitud de los datos depende de la finalidad y alcance requerido.

En el marco de la exigencia de generación de información hidrológica, particularmente en cuanto a la cuantificación de volúmenes de agua (caudales) en cauces naturales, se han desarrollado diversos métodos de aforo, equipos e instrumentación. En el presente capítulo se describe la relación de la cuenca hidrográfica sobre la cantidad de agua que fluye en una sección de río, además de exponer la obtención de estos volúmenes mediante diferentes procedimientos de medición, con énfasis en el aforo por vadeo, describiendo aspectos relevantes relacionados a la elección de la sección de control y sitio de medición, así como los procesos empleados, fuentes de incertidumbre, determinación de errores residuales y demás aspectos complementarios.

3.1. Términos y definiciones

- **Aforo** – Medición del caudal que discurre por una sección transversal de un río expresado generalmente en litros por segundo (l/s) o metros cúbicos por segundo (m^3/s).
- **Cuenca hidrográfica** – Superficie geográfica en la que toda el agua superficial drena hacia un punto de desfogue común.
- **Curva hipsométrica** Gráfico que relaciona la altitud y el área de la cuenca sobre dicha altitud.
- **Divisoria de aguas** – Línea imaginaria que limita una cuenca hidrográfica correspondiente a los puntos más altos del relieve natural.
- **Flujo uniforme permanente** – Flujo de agua constante que no sufre cambios hidráulicos en espacio y tiempo.
- **Geomorfología** – Ciencia que estudia las formas y configuración del relieve.
- **Nivel de agua** – Magnitud medida verticalmente desde un punto de referencia hasta la superficie libre del agua.

- **Tiempo de concentración** – Tiempo que se demora una gota en recorrer superficialmente una cuenca desde el punto más alejado hasta su desembocadura o punto de control.
- **Tirante de agua** – Altura de agua medida verticalmente desde el fondo del cauce hasta la superficie libre de agua.
- **Vadeo** – Proceso de cruzar un río caminando ligado con la medición de velocidad de flujo y tirante de agua.
- **Vertical** – Línea vertical de medición en la sección transversal del cauce.

3.2. La cuenca hidrográfica

En hidrología la unidad de medida es la cuenca hidrográfica, siendo así que Smith & Peter (1978) la consideran como la unidad más conveniente para el estudio de la geomorfología y la hidrología. Representa el área en la que toda la precipitación drena hacia un punto en común como consecuencia de su topografía, de modo que sus límites vendrán definidos por las zonas altas del terreno que definen la divisoria de aguas. Asimismo las características topográficas de la cuenca definen donde fluye y se acumula el agua (Edwards et al., 2015). Hay que agregar que existen líneas divisorias para aguas subterráneas que a diferencia de las aguas superficiales, estas están definidas por las estructuras geológicas, es decir, zonas de infiltración y pisos impermeables que favorecen el flujo superficial proveniente de cuencas adyacentes (Vélez, 2000).

Un aspecto fundamental en el estudio de las cuencas hidrográficas se centra en el análisis de los parámetros que definen sus características morfológicas. En este contexto, la morfometría se ocupa del análisis cuantitativo de los aspectos físicos de la cuenca y su red de drenaje, lo que facilita su caracterización y comparación con otras unidades similares, recordando que cada cuenca hidrográfica es el resultado de la interacción del agua y los procesos geológicos que han dado forma a su estructura (Smith & Peter, 1978). Según Ion (1985) los principales elementos que definen las características de la cuenca son el tipo de roca, el tipo del suelo y su profundidad, el relieve y la cobertura vegetal. Hay que considerar que, para comparar la morfometría entre distintas cuencas, es esencial asegurar que los mapas, escalas y métodos empleados sean consistentes y comparables. Por lo general, se recomienda utilizar una escala de 1:25000 para este fin (Smith & Peter, 1978).

3.2.1. Forma de la cuenca

La geometría de la cuenca influye significativamente en varios parámetros morfométricos y, a su vez, describe el comportamiento y la magnitud de las crecidas. Una cuenca alargada

tiende a tener un tiempo de concentración más prolongado, lo que se traduce en caudales más bajos en su salida en comparación con una cuenca de forma más redondeada. Este último tipo de cuenca, al mostrar valores más elevados en el hidrograma de crecida, experimenta mayores velocidades de flujo y, consecuentemente, una mayor capacidad de transporte de sedimentos (Ion, 1985). Dos cuencas con características similares, pero con formas diferentes presentarán curvas hipsométricas considerablemente diferentes debido a la erosión, de modo que el área bajo dicha curva será menor para el caso de cuencas redondeadas.

Debido a la dificultad de delimitar la cuenca de drenaje subterránea, únicamente se tiene en consideración el área superficial para correlacionar la escorrentía con el tamaño de la cuenca. Esta área a su vez está limitada por el perímetro que corresponde a la proyección horizontal de la divisoria de aguas (Ion, 1985). En general, han existido varias propuestas para caracterizar la forma de una cuenca. Ion (1985) recopila varias expresiones que describen la forma de la cuenca desde diferentes perspectivas, las cuales se muestran en la **Tabla 3-1**.

No.	Nombre del índice	Autor	Fórmula
1	Factor de Forma (R_f)	Horton (1932)	$R_f = A_b / L^2_{max}$; donde A_b = área de la cuenca (km^2), L_{max} = longitud máxima de la cuenca (km)
2	Coficiente de Compacidad (m)	Luchisheva (1950)	$m = 0.282 P / A^{0.5}$; donde P = perímetro de la cuenca (km), A = área de la cuenca (km^2)
3	Factor de Forma (F_f)	Ogievsky (1952), Apollov (1963)	$F_f = A / L^2$; donde A = área de la cuenca (km^2), L = área de un cuadrado con igual perímetro que la cuenca (km^2)
4	Radio de Circularidad (RC)	Miller (1953)	$RC = A_b / A_c$; donde A_b = área de la cuenca (km^2), A_c = área de un círculo de igual perímetro que la cuenca (km^2)
5	Radio de Elongación (R_e)	Schumm (1956)	$R_e = D_c / L_b$; donde D_c = diámetro de un círculo de igual área que la cuenca (km), L_b = longitud máxima (km)
6	Grado de Elongación (R_a)	Diaconu and Lazarescu (1965)	$R_a = A / L$; donde A = área de la cuenca (km^2), L = longitud máxima (km)
7	Factor de Forma (RF)	Zavoianu (1978)	$RF = 16 A / P^2$; donde A = área de la cuenca (km^2), P = perímetro de la cuenca (km)

Tabla 3-1. Índices de caracterización de forma. Fuente: Adaptado de (Ion, 1985).

En lo referente al tiempo de concentración, Maidment (1993) presenta dos alternativas ampliamente empleadas en Estados Unidos que corresponden a las expresiones de Kirpich y Bransby Williams presentadas en la **Ecuación 3-1** y **Ecuación 3-2**.

$$T_{C_{Kirpich}} = 3.97(0.078 L^{0.77} S^{-0.385})$$

Ecuación 3-1. Tiempo de concentración de Kirpich. Fuente: (Maidment, 1993)

$$T_{C_{Bransby Williams}} = 14.6 (21.3 L A^{-0.1} S^{-0.2})$$

Ecuación 3-2. Tiempo de concentración de Bransby Williams. (Maidment, 1993)

Donde,

$T_{C_{Kirpich}}$ = Tiempo de concentración de Kirpich (min)

$T_{C_{Bransby\ Williams}}$ = Tiempo de concentración de Bransby Williams (min)

L = Longitud del cauce principal (km)

A = Área de la cuenca (km²)

S = Pendiente del cauce principal (m/m)

3.2.2. Relieve de la cuenca

El relieve de una cuenca hidrográfica se refiere a la forma superficial del terreno definida por la interacción de fuerzas internas y externas. Los agentes internos comprenden los movimientos tectónicos que determinan la altitud y energía potencial de la cuenca. Estos parámetros fueron máximos durante el período de mayor actividad tectónica, disminuyendo lentamente por la erosión del suelo y la influencia de agentes externos como el viento y la lluvia (Ion, 1985). De manera general, el relieve de la cuenca tiene una estrecha relación con la cobertura vegetal y las capas del suelo y a su vez condiciona el comportamiento hidrológico, dado que a mayores pendientes los tiempos de concentración son mucho menores (Sellers et al., 2017).

El relieve determina la distancia vertical entre la cabecera y la salida del cauce principal, que a su vez representa la energía potencial y está directamente relacionado con los procesos de escorrentía y la evolución de la cuenca. Se ha evidenciado que la altura vertical total de dos cauces del mismo orden es muy similar, por otro lado, la descarga y por lo tanto la capacidad erosiva de un cauce depende del orden que este tenga, de modo que la distancia vertical total de la cuenca depende del orden del cauce principal (Ion, 1985).

Como parte del estudio del relieve de una cuenca, es importante definir parámetros como la pendiente media del cauce principal y aspectos generales del relieve que se pueden evidenciar en representaciones gráficas como es el caso de la curva hipsométrica. Por un lado la pendiente condiciona la velocidad del flujo y a su vez caracterizará el tiempo de respuesta ante eventos de precipitación (Sellers et al., 2017). La curva hipsométrica a su vez es una gráfica bidimensional que relaciona el área sobre una determinada cota del terreno, asignando dichos valores al eje de las abscisas y ordenadas respectivamente. La curva hipsométrica permite entre otras cosas, la determinación de la altitud media de la cuenca y la

caracterización de la evolución geomorfológica del relieve. Para fines comparativos, es conveniente expresar los ejes de la curva en unidades porcentuales, en relación al área y desnivel total (ver Figura 3-1). Por naturaleza debido al transporte de sedimento desde las zonas altas de la cuenca a las partes bajas, el área bajo la curva hipsométrica será cada vez menor y será un indicativo del grado de maduración de la misma.

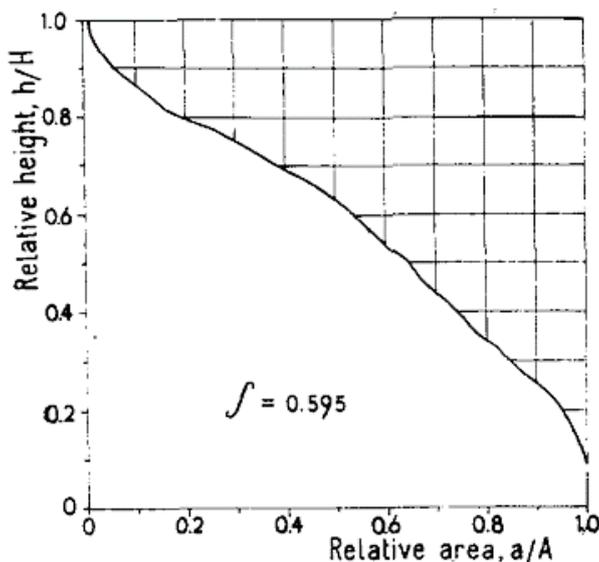


Figura 3-1. Curva hipsométrica en unidades porcentuales. Fuente: (Ion 1985).

La **Tabla 3-2** muestra algunas expresiones propuestas para el cálculo de índices que permiten la caracterización del relieve de la cuenca.

No.	Nombre del índice	Fuente	Fórmula
1	Altitud media (H_{med})	Vladimirescu (1978)	$H_{med} = A_{CH}/A$; donde A_{CH} = área bajo la curva hipsométrica (Km^3), A = área de la cuenca (Km^2).
2	Pendiente media del cauce principal (J)	Sellers et al. (2017)	$J = H/L_c$; donde H = desnivel total del cauce principal (Km), L_c = longitud del cauce principal (Km).

Tabla 3-2. Índices de caracterización del relieve. Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Drenaje de la cuenca

Se refiere a la cantidad y disposición de cauces naturales a través de los cuales la cuenca evacúa toda el agua superficial y subsuperficial. Cuando la cuenca se encuentra bien drenada, el pico del hidrograma de crecida será más pronunciado, dado que el agua fluye con mayor velocidad en los cauces que sobre el terreno natural, lo que afecta el caudal en la salida (ver Figura 3-2). Particularmente, dos de los parámetros de interés al caracterizar el drenaje de una cuenca son la densidad de drenaje y el orden de la cuenca. Por un lado, la densidad de drenaje se refiere a la relación entre el área de la cuenca y la longitud total de

los cauces que la componen. Mientras que orden de la cuenca hace referencia al grado de ramificación del cauce principal, así que un cauce de primer orden será aquel que no tiene ramificaciones y en general los cauces de orden n se originan por la convergencia de dos cauces de orden $n-1$ (ver [Tabla 3-3](#)). La densidad de drenaje está determinada por la precipitación media anual, especialmente por la intensidad de la lluvia, ya que la escorrentía erosiona el terreno formando canales de flujo (Smith & Peter, 1978).

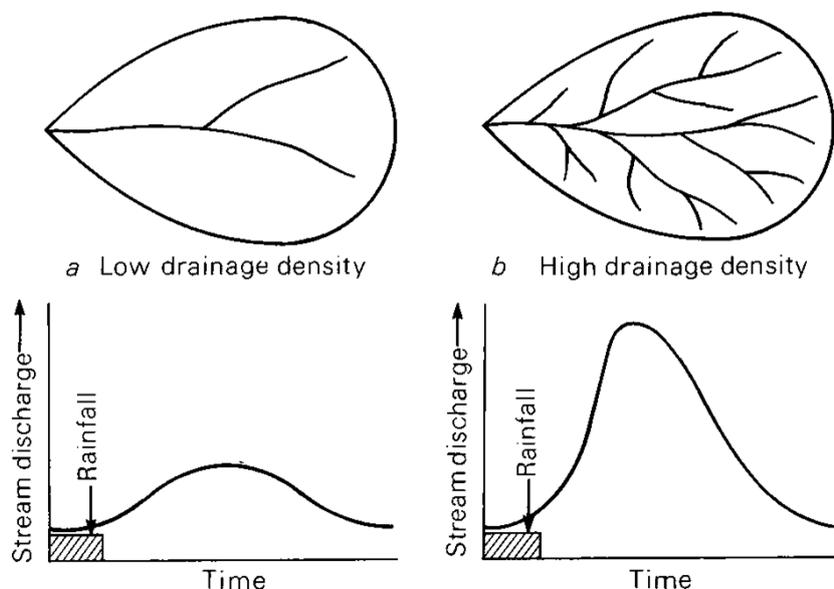


Figura 3-2. Relación entre la densidad de drenaje y el hidrograma a la salida del cauce principal. Fuente: (Smith & Peter 1978).

No.	Nombre del índice	Fuente	Fórmula
1	Orden del cauce (N_u)	Strahler (1964)	Orden jerárquico
2	Densidad de drenaje (D_d)	Horton (1945)	$N_u = L_t/A$; donde A = área de la cuenca (km^2), L_t = longitud total de los cauces (km).

Tabla 3-3. Índices de caracterización de la red de drenaje. Fuente: Elaboración propia.

3.3. Cauces naturales

Los canales o cauces naturales engloban a todos los cursos de agua de origen natural como lagunas, quebradas, arroyos o ríos (Chow, 1994a), por lo que su estudio es amplio, complejo y multidisciplinario. En particular, los ecosistemas fluviales se ven influenciados por aspectos hidrológicos, hidráulicos, orográficos y otros que requieren un análisis individual y compuesto. En este sentido, el régimen hidrológico de los ríos es resultado de la interacción de diversos factores, entre los que destacan la influencia de las características de la cuenca hidrográfica y las precipitaciones (Martín Vide, Juan Pedro, 2002).

Aunque no hay dos cuerpos de agua con propiedades físicas iguales por su variación espacio-temporal, es posible agrupar los ríos por similitudes en sus características. De ahí se proponen diversas clasificaciones realizadas a lo largo de los años, algunas más utilizadas que otras según requerimientos o demandas. Los enfoques principales de las clasificaciones son cualitativos relacionados a interpretaciones descriptivas como el aporte de sedimentos o perturbaciones en el caudal, y cuantitativos en donde se estudian parámetros como la pendiente, velocidad, número de Froude, entre otros (Buffington & Montgomery, 2013).

Una categorización amplia corresponde a los ríos de llanura y ríos de montaña. Estos últimos según López, R (2005a) se definen por dos criterios. El primer criterio lo establece como todo curso de agua natural, perenne o intermitente que se encuentre en una región de montaña, basándose principalmente en su altitud y pendiente de terreno. El segundo, por otro lado, involucra sus características hidrogeomorfológicas con distintas clasificaciones en función de la cantidad y complejidad de los parámetros involucrados.

De manera general, los ríos de montaña se caracterizan por tener mayor pendiente longitudinal y acarrear material más grueso y heterogéneo, además de presentar formas de fondo variables en comparación a los ríos de llanura. Los caudales en los ríos de montaña son mayores por sus cualidades orográficas en la producción de precipitación y a su menor tasa de evaporación (López-Alonso et al., 2008). Por el contrario, los ríos de llanura se encuentran relacionados a topografías planas y velocidades de flujo menores, con una disminución del volumen y tamaño de los sedimentos transportados (López, Raúl, 2005b).

Por otro lado, la forma de cauce brinda importante información respecto a la geometría y comportamiento hidráulico de un río. Entre los elementos geométricos básicos que caracterizan el cauce mediante su sección transversal se encuentra la profundidad de flujo y , el ancho de la superficie libre de agua (ancho superficial T), el área de la sección transversal perpendicular al flujo A , la longitud de contacto con el agua (perímetro mojado P), y parámetros derivados como el radio hidráulico R de la relación entre el área y perímetro mojado, y la profundidad hidráulica D de la relación entre área y ancho superficial.

El lecho de ríos de montaña presenta irregularidades evidentes relacionadas principalmente al tipo y tamaño de sedimentos depositados, por lo que su flujo es propenso a cambios de régimen con facilidad. El parámetro que clasifica el estado de flujo hidráulico es el número de Froude Fr , en donde el estado crítico ocurre cuando este es igual a la unidad, es decir, cuando la energía específica es la mínima para un caudal dado, la cual corresponde a la energía por peso de agua en la sección del canal medida desde el fondo (Chow, 1994a). Valores del número de Froude inferiores a la unidad se relacionan con un estado de flujo supercrítico,

mientras que valores superiores corresponden a flujo subcrítico. En canales artificiales el estado supercrítico se asocia con velocidades altas, sin embargo, en ríos de montaña, este régimen se limita a tramos cortos y reducidos por la elevada disipación de energía debida a los sedimentos de gran calibre (López, Raúl, 2005b). Cuando la variación entre regímenes de flujo se da rápidamente y en tramos cortos, se dice que ocurre un fenómeno local (caída hidráulica o resalto hidráulico) (Chow, 1994a).

En canales abiertos el número de Froude se determina mediante la **Ecuación 3-3**.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{(g D \cos\theta) / \alpha}}$$

Ecuación 3-3. Número de Froude. Fuente: (Chow, 1994).

Donde,

Fr = Número de Froude

V = Velocidad de flujo en la sección transversal

D = Profundidad hidráulica del área perpendicular al fondo del canal

θ = Ángulo de pendiente longitudinal del canal

α = Coeficiente de energía

El coeficiente de energía α permite corregir la variabilidad de distribución de velocidad en la sección transversal de estudio. Su cálculo permite obtener resultados más acertados a las condiciones de flujo de cauces naturales. Chow (1994a, pp. 28-29) presenta el criterio de flujo crítico para su determinación al desarrollar la siguiente ecuación que parte de registros conocidos de curvas de velocidad (isotaquias) y área mojada contenida entre estas.

$$\alpha = \frac{\int v^3 dA}{V^3 A} \approx \frac{\sum v^3 \Delta A}{V^3 A}$$

Ecuación 3-4. Coeficiente de energía. Fuente: (Chow, 1994).

Donde,

ΔA = Área elemental en el área mojada completa A

v = velocidad de la curva de distribución de velocidad

V = Velocidad de flujo en la sección transversal

A = Área de la sección transversal

α = Coeficiente de energía

Por otro lado, el estado del flujo está relacionado con los efectos de viscosidad y gravedad respecto a sus fuerzas inerciales (Chow, 1994b). Este se clasifica entre laminar, turbulento o transicional. El primero corresponde a fuerzas viscosas grandes respecto a inerciales, y viceversa para el segundo caso. Un flujo laminar indica un movimiento definido de las partículas de agua, mientras que en el turbulento las partículas adoptan diferentes trayectorias, aunque en conjunto siguen su curso. Por otro lado, el estado transicional corresponde a una situación intermedia. El número de Reynolds permite caracterizar el estado de flujo, en donde es laminar si este valor es bajo, generalmente menor a 2000. Este término es adimensional y se calcula a partir de la siguiente ecuación.

$$Re = \frac{V L}{\nu}$$

Ecuación 3-5. Número de Reynolds. Fuente: (Chow, 1994).

Donde,

Re = Número de Reynolds

V = Velocidad del flujo (m/s)

L = Longitud característica (m)

ν = Viscosidad cinemática del agua (m²/s)

3.3.1. Flujo en cauces naturales

El flujo uniforme permanente considera que la profundidad de flujo no varía en el tiempo, lo que es inusual en corrientes naturales. Sin embargo, se realiza esta suposición para simplificar problemas y obtener resultados aproximados y generales (Chow, 1994a). Para un desarrollo simple se hace uso de la ecuación de Manning para flujo en canales abiertos indicada en la **Ecuación 3-6**.

$$Q = \frac{A}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

Ecuación 3-6. Ecuación de Manning. Fuente: (Chow, 1994).

Donde,

A = área de la sección transversal (m^2)

Q = caudal [$Q = A \cdot V$] (m^3/s)

n = coeficiente de rugosidad

S = pendiente de canal (m/m)

R = radio hidráulico [A/P] (m)

Debido a la composición e irregularidad de los cauces naturales, estos parámetros son variables. En particular, tanto la pendiente longitudinal como la rugosidad están definidas por las formas de fondo y el material depositado. Ven Te Chow (1994a, pp. 108-111) presenta una tabla con los valores del coeficiente de rugosidad n , recopilados de diversas investigaciones de la época. Las cifras de n referentes a corrientes naturales varían en un rango de 0.025 a 0.200, dependiendo principalmente de las características de la sección.

Las magnitudes involucradas deberían ser cuantificadas in situ, sin embargo, al no ser posible en todos los casos, se realizan estimaciones. En este sentido, es posible utilizar la ecuación de Manning para obtener una variable desconocida siempre y cuando se conozca el resto.

Otra manera simplificada de analizar las relaciones hidráulico geométricas es mediante la curva de descarga (Julie, Pierre, 2002) (ver sección 3.6). A partir de la medición de caudal en la sección transversal y del ancho de su lámina libre de agua, es posible obtener la profundidad media de flujo \bar{y} . Del mismo modo, el perfil de la sección transversal permite conocer su área A , perímetro mojado P , y por ende el radio hidráulico R .

Para representar esta relación, el caudal Q y los parámetros de geometría hidráulica G se grafican en una escala logarítmica, en la que las curvas se ajustan a la forma $G = a Q^b$. Los coeficientes a y b resultan de la respectiva calibración, siendo el exponente b la representación del gradiente de estos perfiles (Julie, Pierre, 2002).

De esta manera, se define la relación entre perímetro mojado P y caudal Q :

$$P = a_1 Q^{b_1}$$

Ecuación 3-7. Perímetro mojado. Fuente: (Julie, Pierre, 2002).

Mediante la aproximación del radio hidráulico R a la profundidad media de flujo en la sección transversal \bar{y} , se define su relación respecto al caudal Q :

$$R \cong \bar{y} = a_2 Q^{b_2}$$

Ecuación 3-8. Radio hidráulico. Fuente: (Julie, Pierre, 2002).

La relación entre velocidad de flujo v y caudal Q , se define como:

$$v = a_3 Q^{b_3}$$

Ecuación 3-9. Velocidad de flujo. Fuente: (Julie, Pierre, 2002).

A partir de la ecuación de flujo volumétrico $Q = A * v$, se aproxima el área A mediante el producto del perímetro mojado P y la profundidad media de flujo \bar{y} . Desarrollando la expresión, resulta:

$$Q = A * v \cong (P * \bar{y}) * v = (a_1 Q^{b_1} * a_2 Q^{b_2}) * a_3 Q^{b_3}$$

$$Q = (a_1 * a_2 * a_3) * Q^{b_1+b_2+b_3}$$

Los coeficientes satisfacen las expresiones $a_1 * a_2 * a_3 = 1$ y $b_1 + b_2 + b_3 = 1$. De esta forma, es posible determinar las variables que son más sensibles ante cambios de caudal.

3.4. Perfil de velocidad

La velocidad del flujo es variable tanto espacial como temporalmente. La complejidad de la determinación de esta magnitud en cada punto de la masa de agua ha llevado a una simplificación de la misma mediante aproximaciones de velocidad media en distintas verticales a lo largo de la sección transversal de interés. La velocidad media en una vertical se obtiene de acuerdo a su perfil de velocidad construido por observaciones de dicha magnitud a diferentes profundidades. Sin embargo, los métodos aproximados utilizan una relación conocida entre las velocidades a distintas profundidades y la velocidad media. Un estudio realizado por Hulsing, Smith & Coob (1869) de una serie de mediciones de velocidad en distintos puntos plantea los coeficientes relacionados a un perfil estándar (ver [Tabla 3-4](#)).

Relación entre la profundidad de observación respecto al tirante de agua	Relación entre la velocidad en el punto de observación y la velocidad media
0.05	1.16
0.10	1.16
0.20	1.15
0.30	1.13
0.40	1.11
0.50	1.07
0.60	1.02

0.70	0.95
0.80	0.87
0.90	0.75
0.95	0.65

Tabla 3-4. Coeficientes de la curva estándar de velocidad. Fuente: (Hulsing, Smith, & Coob, 1869).

Entre los métodos de observación de velocidad más utilizados, siendo d el tirante de agua, se encuentran:

- Curva de velocidad vertical
- Método de dos puntos (0.2d/0.8d)
- Observación a seis décimas de profundidad (0.6d)
- Método de tres puntos (0.2d/0.6d/0.8d)
- Observación a dos décimas de profundidad (0.2d)
- Velocidad subsuperficial

El método de la curva de velocidad vertical consiste en registrar observaciones desde la superficie libre del agua hasta el lecho, usualmente a cada décima de profundidad. De acuerdo a la distribución del perfil de velocidades como se indica en la **Figura 3-3**, se describe gráficamente la relación entre las observaciones a distintas profundidades y la velocidad media, en donde esta última se aproxima a la observación a 0.6d, así como a la media entre las observaciones a 0.2d y 0.8d, y también a 0.85 de la observación de la velocidad superficial. Esta relación se asocia a los coeficientes de la **Tabla 3-4**, de lo cual la mejor aproximación corresponde al método de dos puntos (0.2d/0.8d), resultando en una diferencia del 1% de la velocidad media.

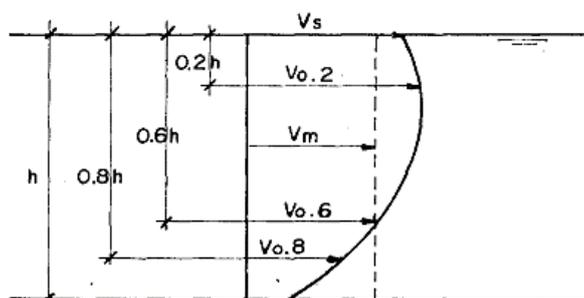


Figura 3-3. Perfil de velocidades. En donde, V_m : velocidad media, V_s : velocidad superficial, $V_{0.6}$: velocidad a seis décimas de la profundidad, $V_{0.8}$: velocidad a ocho décimas de la profundidad. Fuente: (Chereque, Wendor, 1989).

El método de los dos puntos se recomienda que sea utilizado en profundidades mayores a 0.76m (Rantz, 1982a). Se considera fiable en el caso en que la velocidad a 0.2d es mayor que la velocidad a 0.8d, pero menos del doble, y en donde la superficie y el lecho no se vean

interferidos por objetos como vegetación o rocas grandes. De no ser así, se requiere combinar con el método de las seis décimas de profundidad con una medición extra, correspondiendo al método de los tres puntos.

El método de dos décimas de profundidad se utiliza en caudales altos cuando es conveniente realizar mediciones solamente a 0.2d. Se requiere tener una curva de ajuste, sin embargo, usualmente no se usa coeficientes de corrección por lo que el método no se considera tan confiable. Similar, el método de velocidad subsuperficial se mide justo bajo la superficie libre de agua y requiere factores de corrección. Este es recomendado en corrientes rápidas con al menos 0.60m de profundidad. Para el método de velocidad superficial el coeficiente usado comúnmente para obtener la velocidad media es de 0.85 (Rantz, 1982a).

3.5. Hidrometría

La hidrometría es la ciencia encargada de la medición y el registro de volúmenes de agua que circulan en cierta sección transversal de un río, canal o tubería (Manual de Medición de Caudales, 2017). Según el *Hydrometric Network* (2015), en un esquema más amplio, la hidrometría se encarga del monitoreo y recolección de datos de todos los elementos del ciclo hidrológico pero se aplica principalmente a la medición de caudales fluviales. Su importancia surge de la histórica vulnerabilidad de la humanidad ante eventos extremos asociados a la escasez y exceso de precipitaciones, siendo una herramienta clave para comprender los procesos hidrológicos y generar estrategias de gestión.

3.6. Curva de descarga

En términos simples la curva de descarga es una relación entre el nivel de agua y el caudal en una determinada sección de un cauce. Es importante dado que las mediciones directas de caudal resultan actividades costosas que demandan mucho tiempo, por lo que se suele optar por métodos indirectos. Principalmente estos métodos suelen implicar la colocación de una estación limnimétrica o limnigráfica que recopila los valores del nivel de agua y que a partir de la ecuación calibrada de la curva de descarga son transformados de manera instantánea a valores de caudal (Hrafinkelsson et al., 2021). Su obtención se basa en la toma de una serie de mediciones de caudal en conjunto con el nivel respectivo que posteriormente son ajustados a un modelo predeterminado (Reitan & Petersen-Overleir, 2011). La norma ISO 18320 (2020) establece un mínimo de 15 mediciones para determinar una curva de descarga por primera vez en un sitio.

Los cambios a lo largo del tiempo de los elementos que rigen la relación caudal-altura, como la geometría de la sección limnimétrica, la rugosidad del canal, el transporte y deposición de

sedimentos y las condiciones aguas arriba y aguas abajo, hacen que la relación varíe por lo que constantemente se requiere una recalibración. El remanso proveniente de elementos aguas abajo como lagos, convergencias, afluentes o presas también puede inducir errores significativos en la recolección de datos (Petersen-Overleir y Reitan, 2009).

Un modelo ampliamente aceptado de curva de descarga sigue la forma de la ley de potencias presentado en la **Ecuación 3-10** (Hrafnkelsson et al., 2021). Para determinar las constantes adecuadas para el ajuste es necesario linealizar la **Ecuación 3-10** empleando logaritmos. La **Ecuación 3-11** muestra la forma linealizada de la expresión original, de modo que las constantes A y B pueden ser obtenidas al realizar una regresión lineal simple entre las variables transformadas $\ln(Q)$ y $\ln(h+C)$ variando C hasta que el error de ajuste sea mínimo al maximizar el coeficiente de determinación R^2 .

$$Q = A (h + C)^B$$

Ecuación 3-10. Curva de descarga Fuente: (Maidment, 1993)

Donde,

Q = caudal calculado (m^3/s)

h = altura limnimétrica (m)

A, B = constantes de ajuste

C = altura en la cual el caudal es cero

$$\ln(Q) = \ln(A) + B \ln(h + C)$$

Ecuación 3-11. Curva de descarga linealizada. Fuente: (Maidment, 1993)

Adicionalmente, Maidment (1993) recomienda realizar gráficos de altura respecto al área de la sección transversal y velocidad pues menciona su utilidad para:

1. Extrapolación de registros.
2. Identificación de causas en los cambios de pendiente de la curva de descarga.
3. Facilita la detección de errores. Por ejemplo, cuando para una medición el área registrada sigue la tendencia esperada para la altura que le corresponde, una desviación de la velocidad media puede deberse a una mala práctica de medición o un equipo inadecuado.
4. Identificar si ha ocurrido eventos de socavación o deposición de material dado que el área de la sección transversal medida para una misma altura será diferente.

Cuando se registre una altura mayor o menor de las correspondientes a las mediciones de caudal en campo, es necesario una extrapolación de la curva. Pueden surgir grandes errores en la extrapolación si no se tiene en consideración la geometría de la sección. El trabajo será sencillo cuando la sección de medición resulte estable, en tal caso se puede extender las gráficas área–altura y velocidad–altura a fin de con su producto, obtener el caudal extrapolado (Maidment, 1993). Es importante mencionar que es casi imposible obtener una curva de descarga confiable en una sección inestable, por lo que es útil incluir variables que contengan información de la evolución de la geometría y parámetros hidráulicos (Léonard et al., 2000).

Otra forma de medición indirecta de caudal se basa en la aplicación de la ecuación de Manning presentada en **Ecuación 3-5**. Dicha ecuación fue desarrollada para flujo uniforme donde la superficie del agua y el gradiente de energía son paralelos al fondo, además el área, el radio hidráulico y la profundidad son constantes. Pese a esta condición el manual *Measurement and Computation of Streamflow* del USGS en su volumen 1 recomienda el empleo de la ecuación en secciones no uniformes de canales naturales con la modificación correspondiente de la pendiente de fricción presentada en la **Ecuación 3-12** (Rantz, 1982a).

$$S = \frac{h_f}{L} = \frac{\Delta h + \Delta h_v - k(\Delta h_v)}{L}$$

Ecuación 3-12. Pendiente de fricción. Fuente: (Rantz, 1982a).

Donde:

Δh = diferencia en la superficie del agua (m)

Δh_v = diferencia de la energía de velocidad [$\alpha V^2/2g$] (m)

k = coeficiente de pérdida de energía por contracción o expansión

L = longitud entre secciones (m)

Así, el caudal en cada sección puede ser determinado como $KS^{1/2}$, siendo $K = (1/n) A R^{2/3}$ para cada sección transversal. El caudal medio del tramo se calcula entonces como la media geométrica del caudal entre ambas secciones según la **Ecuación 3-13** (Rantz, 1982a).

$$Q = \sqrt{K_1 K_2 S}$$

Ecuación 3-13. Caudal en sección. Fuente: (Rantz, 1982a).

El uso de la ecuación anterior involucra disponer de información en dos secciones del cauce, cosa que normalmente no es posible llevarlo a cabo de manera continua. Ante esto Léonard et al. (2000), aplica la ecuación original de Manning para la obtención de una curva de

descarga con la distinción de que considera la variación del exponente del radio hidráulico adoptado como $2/3$ por la mayoría de autores. Adicionalmente, reconoce el hecho de que el coeficiente de rugosidad n decrece con el incremento del radio hidráulico R , cuya relación se describe mediante la **Ecuación 3-14**. Al combinar la ecuación original de Manning (3-4) reemplazando n por la relación presentada en **3-14** se obtiene la forma propuesta en la **Ecuación 3-15** donde n' y b son constantes y pueden ser ajustadas.

$$n = n'R^{-b}$$

Ecuación 3-14. Coeficiente de rugosidad. Fuente: (Léonard et al., 2000).

$$Q = \frac{A}{n'} R^{\frac{2}{3}+b} S^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 3-15. Curva de descarga por ecuación de Manning. Fuente: (Léonard et al., 2000).

Una ventaja del empleo de la ecuación de Manning para la obtención de curvas de descarga radica en que dicha ecuación incluye información de la geometría del canal y pendiente de la línea de energía que evolucionan con el tiempo induciendo errores en las aproximaciones. Así, en base a monitoreos continuos se puede proyectar la evolución del radio hidráulico y la pendiente de la línea de energía a lo largo del tiempo logrando mayor precisión en la determinación indirecta del caudal (Léonard et al., 2000).

3.7. Metodologías de aforo

Las mediciones de caudal tienen por objetivo determinar el volumen de agua que atraviesa la sección de control en un determinado intervalo de tiempo. En general se pueden llevar a cabo en base a métodos directos e indirectos. En los métodos directos el caudal se mide en campo con instrumentos y procedimientos normalizados. Por otro lado, en los métodos indirectos el caudal es aproximado en base a relaciones de área o profundidad. Las técnicas de aforo volumétrico resultan inadecuadas para mediciones en cauces naturales dado que registrar el volumen total es complicado e inviable, por lo que normalmente se opta por el método área-velocidad.

3.7.1. Método área – velocidad

La mayoría de aforos directos de caudal se describen mediante el método área - velocidad. Consiste en la toma del área de la sección transversal en conjunto con la velocidad promedio de la misma, en base a la suma de mediciones parciales de distancia, profundidad y velocidad promedio de las verticales a lo largo del eje transversal. De esta manera, el caudal puede obtenerse con el método Mid-Section descrito en la **sección 2.7.2**.

3.7.2. Correntómetros de molinete y dispositivos acústicos

Los correntómetros son instrumentos que determinan la velocidad de flujo en base a la proporcionalidad de giro de un rotor inmerso en el agua a la profundidad seleccionada según el método de medición adoptado (ver sección 2.7.3). Tradicionalmente los correntómetros de hélice disponían un circuito electrónico que emitía una señal sonora por cada vuelta del rotor, de modo que el número de revoluciones podía ser contabilizado y cronometrado para determinar la velocidad de flujo. Análogamente, los equipos modernos poseen una unidad de procesamiento que permite visualizar fácilmente la velocidad de flujo sin necesidad de un postratamiento (Kennedy et al., 1991; Rantz, 1982a).

Por otro lado, los dispositivos acústicos se presentan como una alternativa innovadora ante los correntómetros de molinete tradicionales. Al igual que estos, posibilitan la obtención de la velocidad de flujo a una determinada profundidad y ubicación, sin embargo, la diferencia radica en el principio de medición (ver sección 2.4). Ejemplos de dispositivos acústicos es el FlowTracker2 (ver Capítulo 2) y el velocímetro Vectrino (ver Figura 3-4).

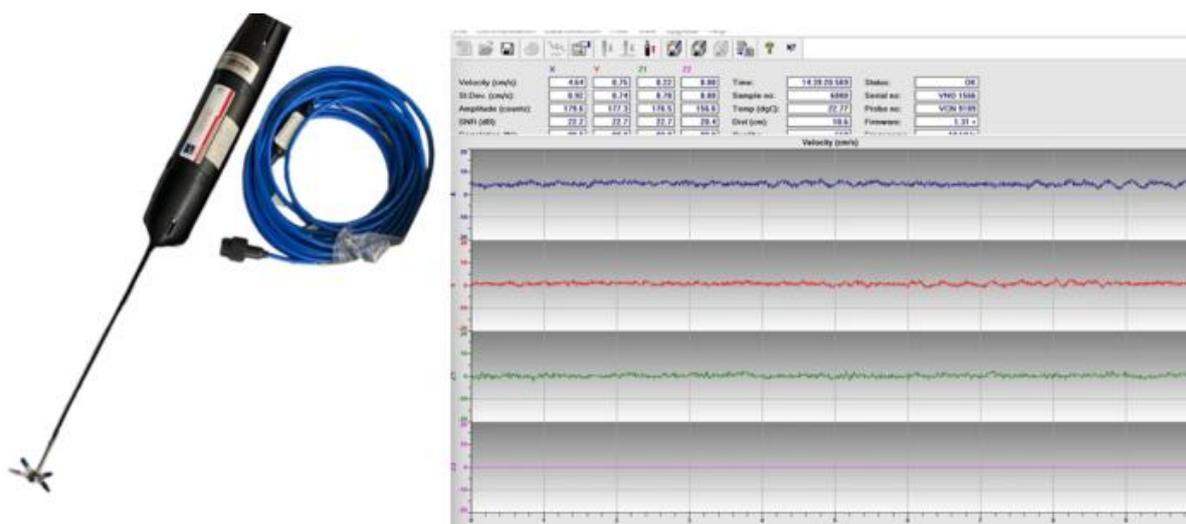


Figura 3-4. Vectrino, equipo de medición de velocidad de flujo en laboratorio y terreno, y software Vectrino+.

3.7.3. Flotadores

Son dispositivos capaces de mantenerse en la superficie del agua, parcialmente sumergidos de modo que la influencia del viento sea mínima (Maidment, 1993). Se presentan como una alternativa de menor precisión que los correntómetros ya que únicamente registran la velocidad superficial. Para este método resulta adecuado que el objeto flotador sea de un color distintivo, y que el tiempo de viaje a lo largo de la distancia conocida sea de al menos

20 segundos. Si se emplean flotadores para determinar la velocidad se deberían realizar varias mediciones a lo largo de la sección, de modo que la velocidad superficial se calcule en base a la relación distancia/tiempo. La velocidad media de la vertical representará un porcentaje de la velocidad superficial determinada, Maidment (1993) recomienda un coeficiente de 0.86, a su vez autores como Rantz (1982) y Michel et al. (2023) proponen coeficientes de 0.85. Finalmente, se requerirá de sondeos por separado en cada vertical de medición para determinar el área de la sección.

3.7.4. Dilución trazadora

Consiste en la inyección de una solución trazadora en la corriente del cauce. A partir de mediciones de la concentración de la solución, la concentración en la sección de control y el caudal de inyección, se puede determinar el caudal de flujo. Existen dos tipos de aplicación del método, inicialmente se empleaba la inyección súbita debido a las grandes cantidades de solución requeridas para su detección aguas abajo, sin embargo, con la incorporación de colorantes fluorescentes que presentan mayor facilidad de detección se ha trabajado con inyecciones de tasa constante con una mayor precisión. La diferencia entre ambos tipos radica en la evolución de la concentración aguas abajo (ver Figura 3-5).

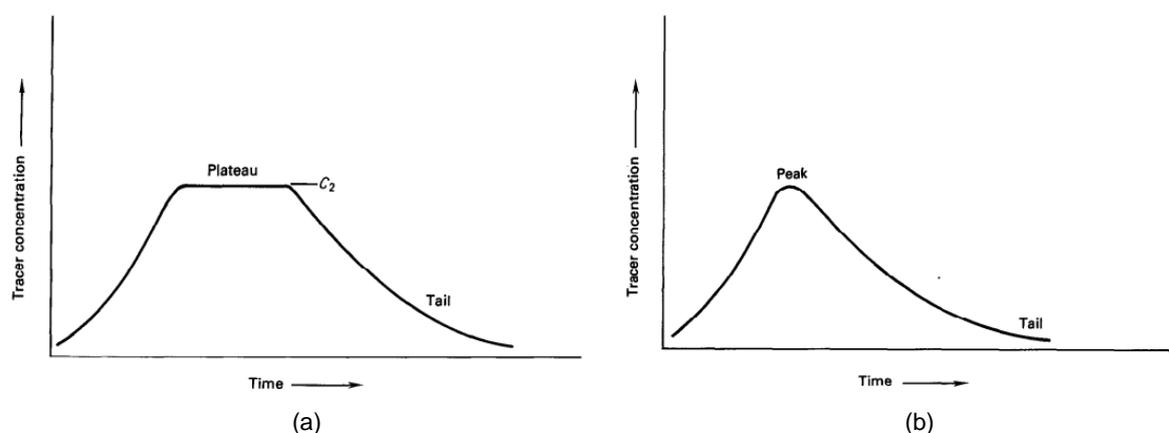


Figura 3-5. Curva de concentración-tiempo en la sección de control para (a) inyecciones de tasa constante e (b) inyección súbita. Fuente: (Rantz, 1982).

A su vez el cálculo del caudal se desprende del principio de conservación de masa. Así la descarga del canal para inyecciones de tasa constante se calcula según la **Ecuación 3-16** (Rantz, 1982a).

$$QC_b + qC_1 = (Q + q)C_2$$

$$Q = \left[\frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_b} \right] q$$

Ecuación 3-16. Caudal de canal para inyecciones de tasa constante. Fuente: (Rantz, 1982a).

Donde,

C_1 = concentración de la solución trazadora

C_2 = concentración en la sección de control (ver Figura 3-5)

C_b = concentración inicial del cauce

q = caudal de la solución inyectada

Si se realiza una inyección súbita, la concentración en la sección de control presentará un comportamiento como el que se presenta en la **Figura 3-5**. En tal caso, el caudal del cauce se obtiene según lo presentado en la **Ecuación 3-17**, donde el valor de la integral representa el área bajo la curva de la gráfica de concentración-tiempo para una inyección súbita (Rantz, 1982a).

$$Q = \frac{V_1 C_1}{\int_0^{\infty} (C - C_b) dt}$$

Ecuación 3-17. Caudal del cauce mediante dilución trazadora. Fuente: (Rantz, 1982a).

Donde,

V_1 = volumen de la solución inyectada en el cauce

C = concentración medida en la sección de control en un tiempo dado

Cualquier compuesto puede ser utilizado como trazador sin embargo es importante que se diluya con facilidad a temperaturas normales, que no esté presente naturalmente o lo esté en concentraciones bajas, que no se descomponga o sea absorbido, que sea detectable en concentraciones bajas por métodos sencillos y que sea inofensivo en las concentraciones empleadas (Rantz, 1982a). Tradicionalmente se emplea la sal común como trazador, sin embargo, los trazadores radioactivos presentan varias ventajas principalmente por la considerable facilidad de medida y vida corta (Ruiz, s. f.).

Su aplicación debería limitarse a canales rugosos y turbulentos en donde no sea posible la medición con correntómetros ya que su precisión se ve fuertemente comprometida por factores como la turbidez, la pérdida del trazador y por una mezcla incompleta entre el punto de inyección y la sección de control.

3.7.5. Otros métodos de medición

Se pueden emplear métodos adicionales cuando las condiciones de medición son adecuadas. En general, se espera lograr una mayor precisión mediante el uso de dispositivos correntómetros, sin embargo, su aplicación puede no ser factible en ciertas situaciones. En este contexto, anteriormente se detallaron dos metodologías alternativas empleadas para caudales altos y flujos turbulentos, como son el método de flotadores y el uso de trazadores. De manera análoga, existen alternativas para medir caudales bajos utilizando dispositivos portátiles, tales como las canaletas Parshall, placas de vertedero calibradas o envases graduados para mediciones volumétricas (Rantz, 1982a).

Asimismo, la mayoría de mediciones directas de caudal tienen como fin determinar la relación altura-caudal para la sección de medición. Una sección estable en conjunto con un correcto ajuste de ecuación de descarga determina mediciones indirectas confiables en donde se registra únicamente la altura del agua. A fin de reducir la variabilidad en la ecuación de ajuste normalmente se construyen secciones fijas que pueden ser vertederos o canales de sección uniforme cuya relación altura-caudal normalmente se obtiene en laboratorio y se valida en campo (Maidment, 1993). El uso de secciones de control artificiales debe ser analizado en cuanto a la conveniencia económica ya que aunque no se requieren constantes recalibraciones de la curva, el costo de construcción es considerable (Rantz, 1982a). Para mayor información acerca de secciones control artificiales referirse a la **sección 3.8.1.1**.

3.8. Aforo por vadeo

El aforo por vadeo corresponde a la acción de atravesar el cauce de un río de poca profundidad y anchura para medir velocidades y tirantes de agua en distintas verticales a fin de determinar el caudal que discurre en el mismo (Hidalgo, 2017). Dadas las condiciones, se procura que la medición de estas magnitudes genere información fiable, por lo que la estandarización de metodologías y equipos conjuntamente con la implementación de normas garantiza la calidad y uniformidad en la recopilación de datos.

Si bien es cierto que la generación de incertidumbre es inevitable, no implica que una medición sea incorrecta o inútil. En este ámbito, la aplicación de un procedimiento regulado en cuanto a elección de la sección de control, sitio de medición y ejecución del aforo contribuye a la reducción de la incertidumbre, así como a la cuantificación del grado de precisión obtenido.

3.8.1. Tramo o sección de control

La norma ISO 1100-1 (1996) establece a la sección o tramo de control como el lugar en el que se miden las características físicas del flujo de agua con el fin de obtener la relación nivel-caudal, en donde las alteraciones aguas abajo no afecten el nivel aguas arriba. Para su delimitación, inicialmente, se revisa la información disponible y actualizada sobre el río para un diagnóstico inicial. Una vez en el sitio, se realiza un recorrido relacionando el material teórico con las características en campo, planteando los posibles tramos o secciones de control. De un análisis oportuno se establece la o las secciones de mejores cualidades. Esta debe ser accesible de manera legal, segura y sencilla para el personal aforador y equipos, y ser visible en toda su longitud y ancho, de preferencia sin obstáculos visuales como árboles de gran tamaño o vegetación excesiva.

La sección de control debe encontrarse en un tramo recto no menor a siete veces el ancho del río (Arboleda, J. et al., 2018). La norma ISO 748 (2007a) recomienda que la longitud de tramo aguas arriba sea al menos el doble de la de aguas abajo desde la estación de medición. Además de que en caso de existir la confluencia con otro río aguas abajo, este debe encontrarse lo suficientemente lejos para evitar que influya en el nivel de agua de la medición. Similarmente, debe estar alejado de estructuras que produzcan posible inestabilidad en el flujo como sistemas de bombeo o desagües.

El tramo debe poseer características alti-planimétricas regulares, lo que implica que no debe haber cambios abruptos en la elevación del terreno, además de requerir uniformidad en los perfiles transversal y longitudinal del cauce. De esta manera se procura que el flujo de agua sea perpendicular a la sección de medición y paralelo a los márgenes del río, los cuales deben ser estables y mantenerse firmes en épocas de crecida.

Usualmente debido a la complicación de encontrar un tramo con todos los requerimientos establecidos se realiza una preparación previa mediante alteraciones manuales que contribuyan a uniformizar las condiciones. Otra alternativa, es la construcción de estructuras de control, denominadas controles artificiales.

3.8.1.1. Controles artificiales

Un control artificial corresponde a una estructura emplazada en el curso de agua, en donde una finalidad de su diseño es la medición del caudal y nivel. Este tipo de proyectos requieren de estudios de viabilidad en función de las ventajas y desventajas que presentan ante los controles naturales. Su principal característica es que, al asegurar la estabilidad de las condiciones geométricas de la estructura a lo largo del tiempo, se disminuye la variabilidad

de flujo de agua y generación de perturbaciones en la toma de datos, lo que implica la reducción de errores de medición.

Un aspecto importante que influye en su elección es su costo. Este está definido en mayor parte por las características de la estructura. El tipo, la forma y el tamaño dependerán a su vez del lecho de río, las condiciones de flujo, el intervalo de medición de caudales y la sensibilidad de datos deseada (Rantz, 1982a). Son beneficiosos a largo plazo ya que la sección de control se mantiene permanente, lo que facilita la toma y registro de datos.

Una vez que se establece el uso de un control artificial, se analiza el tipo de estructura a colocar y se realiza el diseño apropiado de la misma. La construcción de canales en un tramo de cauce y vertederos en una sección son tipos comunes de control artificial. Los vertederos presentan ventajas económicas ante los canales, por lo que siempre que se pueda se opta por estos. Generalmente se construye canales cuando se tiene un transporte de sedimentos de gran tamaño ya que los vertederos solamente podrían acumular cierta cantidad de partículas pequeñas sin alterar significativamente su ecuación de diseño. En cuanto a la influencia de sólidos, el mantenimiento y limpieza regular tanto de canales como vertederos contribuye a mantener las condiciones apropiadas de la geometría de la estructura de control.

El diseño de vertederos y canales se realiza mediante adaptaciones de estudios de modelos de laboratorio. Para arroyos pequeños sin carga alta de sedimentos son comúnmente usados los vertederos de placa delgada, de forma rectangular, trapezoidal o triangular (Rantz, 1982b).

Los vertederos de forma triangular o en V son útiles en caudales bajos por su precisión. Las ecuaciones teóricas para el cálculo de caudal desarrolladas por diversos autores, generalmente dependen del ángulo de abertura θ , del ancho del canal de transición B , de la altura estática h medida a una distancia aguas arriba de al menos $3h$ y de la profundidad media P , como se indica en la **Figura 3-6**.

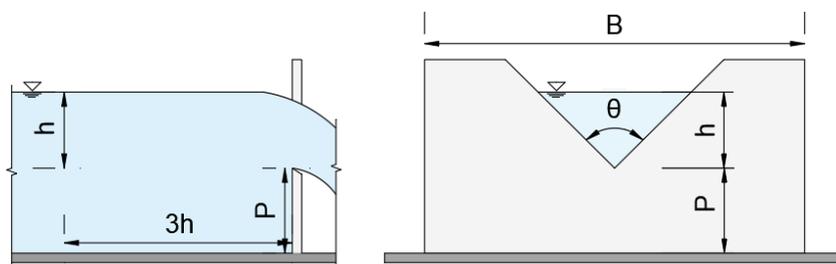


Figura 3-6. Diagrama de vertedero de pared delgada triangular o en V. Fuente: Elaboración propia.

Algunas expresiones para la determinación de caudal en un vertedero de pared delgada triangular de $\theta=90^\circ$ se presentan en la **Tabla 3-5**.

No.	Ecuación	Autor
1	$Q=1.34 h^{2.47}$	King, H (1996)
2	$Q=1.337 h^{2.48}$	Barnes, A (1967)
3	$Q=1.3424 h^{2.48}$	Raymond Boucher
4	$Q=1.4 h^{2.50}$	Barr, J (1908)

Tabla 3-5. Expresiones para el cálculo de caudal en un vertedero de pared fina triangular de 90°. En donde Q = caudal (m³/s) y h = carga sobre el vértice del vertedero (m). Fuente: Elaboración propia.

3.8.2. Sección o estación de medición

La estación de medición se encuentra dentro del tramo de control y se refiere a la sección transversal del cauce en la cual se registra los caudales que discurren (Rojas, Óscar, 2016). La sección debe estar libre de obstáculos y ser estable geométricamente, lo que implica que la relación entre profundidad de agua y sección transversal sea constante temporalmente (Maidment, 1993). El flujo debe ser permanente evitando zonas de estancamiento de agua, y no debe existir turbulencias, generación de vórtices o flujo inverso que produzcan inestabilidad en las líneas de velocidad (ISO 2007a).

Preferentemente se realiza la preparación de la sección de vadeo. Se libera el lecho del río de cualquier obstáculo como piedras o vegetación que produzca interferencia significativa en el flujo del agua o que pueda complicar la medición. La sección elegida debe asegurar la utilidad del instrumento de medición en todas las etapas de caudal, para lo cual debe existir el tirante de agua suficiente en épocas de estiaje y accesibilidad segura en caudales elevados. Por otro lado, en caso de ser necesario se modifica los márgenes del río a fin de confinar el caudal en un único canal.

La norma ISO 6416 (1992) plantea la colocación de hitos referenciales en cada lado opuesto del río en terreno estable, estos deben ser visibles e identificables a fin de que permitan reconocer el espacio de trabajo con facilidad. Los puntos de referencia resultan útiles en caso de que el aforo sea recurrente. Finalmente, la preparación de sección debe ser realizada previo a la medición o campaña de aforos con las principales modificaciones que mejoren el estado de flujo en el cauce en ese instante y a futuro.

3.8.3. Procedimiento general de aforo

El proceso de aforo consta de la medición de velocidades y tirantes de agua en la sección de medición, y del registro del nivel de agua desde un punto de referencia. El equipo de trabajo

deberá tener previsto un plan de aforo y todos los elementos necesarios (equipo, instrumentación, tramo de control, sección de medición y requerimientos de seguridad).

3.8.3.1. Velocidad y profundidad

Para la medición de velocidad y profundidad, se determina inicialmente la longitud de la superficie libre de agua en la sección de medición ya sea directamente con cinta graduada o alambre marcado, o mediante el uso de distanciómetros ópticos electrónicos, uso de sistema de posicionamiento diferencial, o métodos topográficos (ISO 2007a).

A continuación, se procura dividir el área transversal en subsecciones en la que cada una represente un caudal similar estimado. La norma norma ISO 748 (2007a) recomienda que para cauces de más de 5m cada segmento no supere más del 10% del caudal total estimado y propone un número de verticales en función del ancho de la superficie libre como se indica en la **Tabla 3-6**, en donde la primera y última vertical se encontrarán cercanas a los bordes. En caso de no cumplir los requisitos mínimos, deberá existir una justificación que lo valide.

Anchura del canal [m]	Número de verticales
Menor a 0.5m	De 5 a 6
Entre 0.5m y 1m	De 6 a 7
Entre 1m y 3m	De 7 a 12
Entre 3m y 5m	De 13 a 16
Mayor a 5m	De 22 a más

Tabla 3-6. Número de verticales en función del ancho del canal. Fuente: (International Organization for Standardization, 2007a).

Si se desconoce la distribución aproximada de caudales, para la ubicación de verticales, la norma ISO 1088 (2007b) indica que deberá registrarse mediciones en los puntos más profundos y en las posiciones que representen 0.6 y 0.3 de la profundidad máxima siempre y cuando no estén muy cercanas a las orillas.

La precisión de la magnitud de velocidad dependerá principalmente del equipo de medición empleado y de las condiciones de la sección de medición. En este sentido, se recalca la importancia de una adecuada preparación de área de trabajo, así como el uso apropiado de instrumentos y equipos calibrados, además de reportar las correcciones realizadas y efectos de interferencias externas inevitables.

La profundidad o tirante de agua debe ser medida en cada punto de registro de velocidad, con el objetivo de establecer la relación velocidad-profundidad. Se puede utilizar reglas graduadas, varillas de vadeo con nivel u otros aparatos o dispositivos de medición. Finalmente, durante la práctica de vadeo, se recomienda colocar referencias marcadas en una cuerda o cinta graduada templada y fijamente sujeta a cada margen del río.

3.8.3.2. Nivel de agua

La norma ISO 1100-1 (1996) establece que el nivel de agua se obtiene mediante observaciones sistemáticas de un medidor de referencia o de un sensor del nivel de agua. Para observaciones en medidor de referencia, este se instala en las orillas del río en una zona accesible o al alcance de realizar su lectura desde una distancia cercana. El medidor no necesariamente debe ser ubicado en la sección de medición, pero debe estar lo suficientemente cerca para establecer la relación entre caudal y nivel, en donde cambios de flujo en la sección sean distinguibles en el lector. Las graduaciones calibradas deben ser lo suficientemente claras y marcadas permanentemente a fin de que no sea probable observaciones confusas. Los números deben ser distinguibles hasta cierta lejanía y estar sobre una superficie de material liso, resistente ante la intemperie y de bajo coeficiente de dilatación. Asimismo, las marcas de graduación deben abarcar todo el rango de niveles esperado en caudales bajos y elevados.

Para el caso de medidores automáticos de nivel, se debe asegurar un constante mantenimiento y calibración del equipo. Su ubicación depende de los estudios apropiados y necesidades, así como del equipo usado y su principio de funcionamiento.

El nivel de agua debe ser registrado al inicio y al final de cada medición y ser respaldado mediante información adicional como fotografías o videos de la lectura.

3.8.4. Medición automática de caudal

Los equipos de medición automática de caudal agilizan el proceso y contribuyen a la disminución de errores. Las limitantes y grado de incertidumbre dependen de las tecnologías disponibles y procesos empleados. Estos equipos si bien son costosos, presentan ventajas de automatización y generación de datos crudos e información procesada en tiempo real. Además, no solamente miden la variable de interés, sino también otros parámetros relacionados como la temperatura del agua, ubicación geográfica, presión, salinidad, entre otros, que a su vez sirven para realizar correcciones y brindar información complementaria del aforo. Algunos equipos son los caudalímetros ultrasónicos y los electromagnéticos. Varios de estos son de uso remoto por lo que brindan mayor seguridad al aforador.

3.8.5. Información complementaria

El registro de la ubicación hidrográfica, coordenadas y altitud es fundamental para caracterizar el cuerpo de agua (Rojas, Óscar, 2016). La identificación de las propiedades morfométricas del cauce y detalles adicionales respecto al entorno contribuyen a una interpretación adecuada del aforo. La precisión de la posición geográfica y altitud proporcionan la información requerida para el mantenimiento de la base de datos y futuros aforos hidrológicos.

Por otro lado, se debe llevar un registro detallado de fecha y hora de inicio y fin del aforo, equipo utilizado, operador o personal a cargo, inconsistencias durante la medición y observaciones adicionales de relevancia.

3.8.6. Requerimientos de seguridad

Las actividades de medición y registro de caudal se realizan en distintos escenarios que en ciertas ocasiones pueden resultar peligrosos para el aforador y el equipo de medición. Es necesario que el individuo se encuentre informado de las posibles amenazas y la manera de estar preparado previo y durante el aforo con el fin de minimizar el riesgo y saber actuar ante la situación. Dentro de este marco, se recalca la importancia de la preparación apropiada del entorno, así como de la capacitación respecto al proceso, técnicas de seguridad, y uso del equipo de protección personal.

Es necesario contemplar las condiciones climáticas, en donde en caso de presentarse en ese instante un evento de precipitación, de preferencia se reprograma el aforo ya que puede poner en riesgo tanto el equipo de medición como al personal involucrado, además de contribuir a variaciones significativas en las mediciones entre verticales. Por otro lado, garantizar un acceso seguro hacia la sección de control resulta esencial principalmente en épocas lluviosas, esto implica prever una ruta de superficie no resbaladiza e iluminada y en caso de requerirse, construir senderos y/o escalones de acceso (Arboleda, J. et al., 2018).

Asimismo, es indispensable mantener una distancia de seguridad de los bordes del río previo al ingreso al mismo. Para esto se verifica la estabilidad del terreno, evitando zonas de material removido o propenso a deslizamientos.

La identificación de riesgos en el entorno es fundamental. El personal no debería realizar el aforo en caso de que las condiciones no lo permitan como es el ejemplo de altas velocidades de flujo o elevadas profundidades. El equipo de seguridad personal principal corresponde a arnés, línea de vida, cuerdas y seguros, así como, ropa impermeable y calzado adecuado.

3.9. Fuentes de incertidumbre

La incertidumbre representa una medida de precisión de los datos obtenidos y de la predicción del modelo. En lo que respecta a la recolección y tratamiento de datos, las fuentes de incertidumbre son varias. Las principales son la incertidumbre relacionada con la medición de magnitudes como el ancho del cauce, la profundidad o la velocidad, y la incertidumbre producida por la metodología y el equipo utilizado. También se encuentra la incertidumbre referente al tamaño de muestra y a los modelos ajustados, y la incertidumbre producida por los procesos físicos del entorno.

En lo referente al tramo y sección de control, en su mayoría demandan una previa preparación debido a sus características temporalmente variables. La presencia de maleza en el lecho requiere atención ya que puede influir en las mediciones de velocidad cercanas al fondo, especialmente en equipos de medición acústica por la interferencia producida en la señal (ISO, 2007b).

Otro aspecto se relaciona con el proceso de medición de velocidad en cada estación. La elección del número de verticales de acuerdo al tipo de cauce determina la precisión de la medición, en donde, al tener mayor cantidad de verticales, se definirá de mejor manera la variación de velocidad a lo largo de la sección transversal. Asimismo, el tiempo de observación, la verticalidad de la línea de sondeo y la orientación del dispositivo de medición perpendicular a la sección transversal son aspectos de igual importancia (ISO, 2007a).

El número de aforos define la cantidad de datos y por ende la validez del modelo. Mantener la continuidad de aforos es primordial para la actualización de información, más aún cuando se relaciona a curvas de ajuste. La sección de control puede no mantenerse constante debido al acarreo y deposición de sedimentos. Esto implica cambios repentinos en la curva de ajuste, que son más significativos luego de una crecida por el cambio de la forma del lecho. Por otro lado, los errores relacionados al modelo de ajuste pueden ser mayores al momento de estimar resultados fuera de los rangos de calibración (Maidment, 1993).

El análisis y tratamiento de residuos permite identificar las fuentes de incertidumbre, y establecer metodologías para mejorar la fiabilidad de los resultados. Por un lado, el cumplimiento de procesos estandarizados y uso de equipos adecuados y calibrados garantizan de cierta forma la obtención de datos confiables. Sin embargo, el modelo de ajuste adoptado requiere de la comprobación de su adecuación referente a las variables involucradas.

3.10. Comprobación del modelo de ajuste

La verificación de un modelo de ajuste de curva de descarga, no suele realizarse directamente sobre las observaciones de caudal al ser dependientes de la variable predictora (nivel de agua), si no que la comprobación se realiza mediante un análisis de los residuales. Un modelo de ajuste lineal como el descrito en la **Ecuación 3-18**, asume los supuestos de independencia de residuales y distribución normal con media cero y varianza σ^2 constante desconocida (Faraway, Julian, 2009).

$$\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + e_i$$

Ecuación 3-18. Modelo de ajuste lineal. Fuente: (Faraway, Julian, 2009).

El estudio de los residuales permite diagnosticar las deficiencias del modelo. Los residuales e_i se definen como la diferencia entre el valor observado Y_i y el estimado \hat{Y}_i en la observación i , según se indica en la **Ecuación 3-19**.

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i$$

Ecuación 3-19. Residuales. Fuente: (Faraway, Julian, 2009).

Las gráficas básicas de diagnóstico de un modelo de ajuste son gráficas de residuales respecto a la variable independiente y respecto a los valores ajustados (ver [Figura 3-7 \(a\)](#)), la gráfica de valores predichos contra valores observados y la gráfica de probabilidad normal de los residuos (Devore, 2008). La independencia de residuales se detecta mediante las dos primeras gráficas y también se identifica por medio de un gráfico de residuales en orden temporal de observación (ver [Figura 3-7 \(b\)](#)), los cuales deben encontrarse dispersos y no presentar un patrón específico (Montgomery, 2013). El tercer gráfico permite visualizar la efectividad del modelo por la cercanía de los puntos a una recta de 45° que pasa por el origen como indicador de la proximidad entre el valor observado y el ajustado. Finalmente, el gráfico de probabilidad normal de los residuos es útil para verificar el supuesto de normalidad mediante su correspondencia a una recta (ver [Figura 3-7 \(c\)](#)).

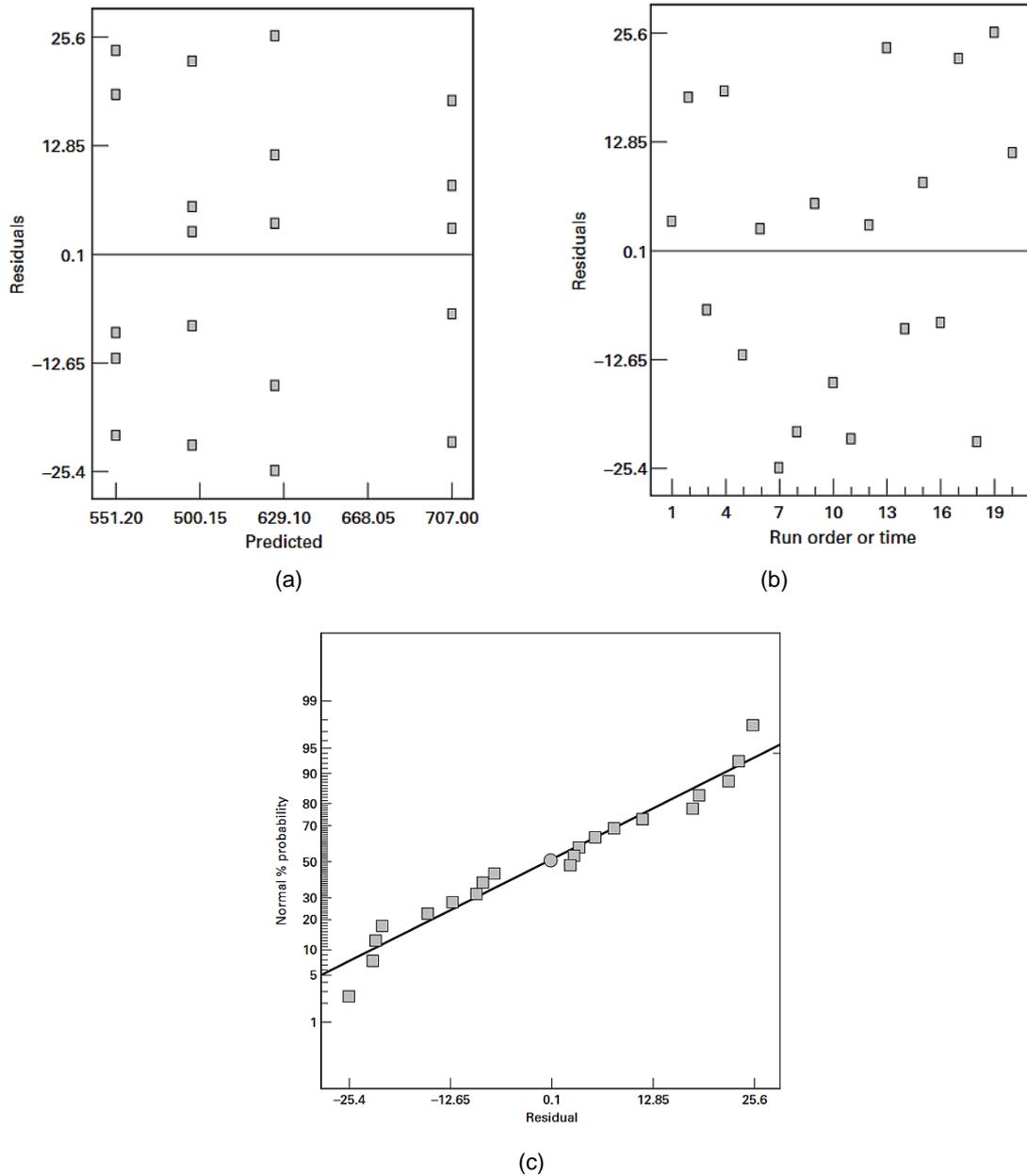


Figura 3-7. Gráficas de residuales (a) respecto a variable predictora (b) en orden de observación. (c) Gráfico de probabilidad normal de los residuos. Fuente: (Montgomery, 2013).

La no independencia sugiere que existen variables que condicionan temporalmente la respuesta. De ser el caso, se presentará un incremento (ver [Figura 3-8 \(a\)](#)) o decremento en la dispersión del gráfico de residuales. Para el caso de estudio, una dependencia de los residuos sugiere un cambio de las condiciones de la sección de medición debido principalmente a los efectos de socavación y deposición de materiales. De este modo, residuos dependientes son una evidencia clara de una sección de control inestable.

Por otro lado, la no constancia de la varianza puede indicar la influencia de variables no consideradas en el modelo de predicción. Si se sospecha de esta situación, es conveniente

realizar un gráfico de los residuos aislando la variable que podría tener influencia en los resultados. Si la gráfica presenta un tipo de patrón (ver Figura 3-8 (b)) debería considerarse un modelo de regresión múltiple (Devore, 2008) y evaluar si existen mejoras en la adecuación del modelo.

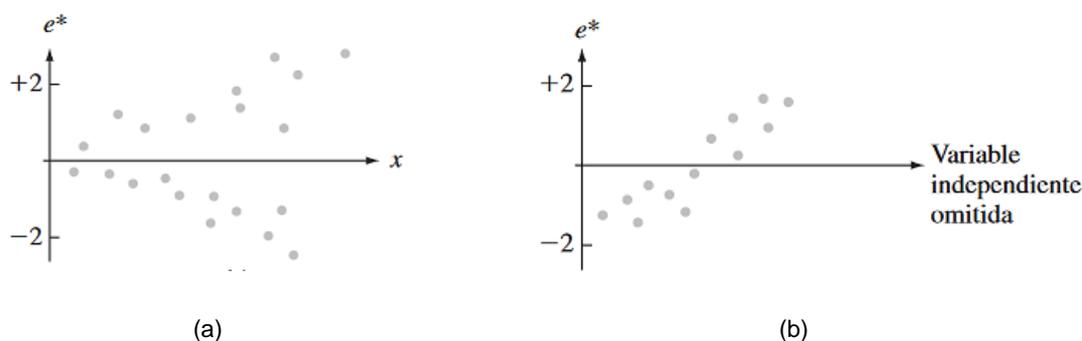


Figura 3-8. Gráfica de residuales que indica (a) una varianza no constante y (b) una variable independiente omitida. Fuente: (Devore, 2008).

En lo referente a la asunción de normalidad de los residuales, se puede verificar formalmente mediante la prueba de Shapiro-Wilk (Faraway, Julian, 2009). Para esta, la hipótesis nula representa la normalidad de los residuos para un nivel de significancia del 5% que se cumple cuando p-value es mayor a 0.05. Sin embargo, la prueba es menos significativa cuando se tiene tamaños de muestra pequeños. Similar, la autocorrelación de residuales puede verificarse mediante el estadístico de la prueba Durbin Watson, en donde un p-value mayor a 0.05 indica la no autocorrelación. La constancia de la varianza de los residuos puede determinarse a partir de la prueba de Breusch-Pagan (Kutner, 2005) en donde el estadístico de prueba p-value mayor a 0.05 indica que existe una varianza constante.

Capítulo 4

Caracterización de la zona de estudio y estimación de las curvas de descarga

En este capítulo se expone el procedimiento de selección, preparación de sección y recolección de datos en campo y laboratorio. Además, se presenta el procesamiento de los mismos, la generación de curvas de descarga y validación de los modelos de ajuste. Asimismo, se procede con la caracterización de las cuencas hidrográficas de estudio que nos permita estimar sus rendimientos y contrastarlos.

4.1. Caracterización de las cuencas con software QGIS

La caracterización de la zona de estudio se desprende del Modelo Digital de Elevación (DEM), disponible en la página oficial del Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Geológica (SIGTIERRAS) con una resolución de píxeles de 3m. Esta capa representa la información base para las labores de delimitación y caracterización de la cuenca. Adicionalmente se requiere la ubicación de los puntos de aforo, misma que se desprende de la ubicación aproximada medida en campo.

4.1.1. Pretratamiento de información ráster

Es útil corregir los datos erróneos del archivo ráster antes de tratar la información. El pretratamiento incluye la eliminación de áreas problemáticas con valores de elevación fuera del rango esperado, determinado según los valores máximos y mínimos identificados por la herramienta de “estadística de zona” del ráster. Los valores anormales pueden ser suprimidos y posteriormente rellenados mediante la herramienta "rellenar sin datos", que interpola dentro de un rango especificado de forma radial al píxel seleccionado. En la **Figura 4-1** se muestra un ejemplo de zona de datos erróneos, donde el píxel seleccionado tiene un valor -645.95m.

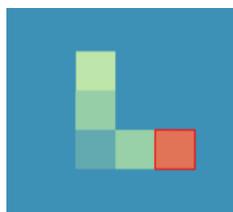


Figura 4-1. Datos de elevación erróneos registrados en la información MDE.

Además, es fundamental suprimir las zonas que, aunque dentro del rango esperado, presentan depresiones anormales que dificultan la obtención de direcciones de flujo. Este procedimiento se realiza mediante la herramienta “r.fill.dir” de GRASS, la cual rellena depresiones en un MDE y calcula las direcciones de flujo corregidas, eliminando los errores de flujo causados por depresiones o áreas planas en el terreno.

4.1.2. Delimitación de cuencas hidrográficas y cauces

La delimitación de cuencas hidrográficas y la obtención de cauces se logra mediante la aplicación de dos herramientas de GRASS. En primer lugar, `r.watershed` permite delimitar cuencas según un rango de área especificado. Sin embargo, sin la opción de incluir el punto de salida, su aplicación se limita a obtener la capa de dirección de drenaje y los segmentos de río. En este punto, un parámetro importante que determina la caracterización de los cauces es la dimensión mínima de las subcuencas, que debe ser especificada en forma de número de píxeles. Para su definición se combinó lo observado en la ortofoto de la zona junto con los cauces delineados, concluyéndose que para un área de aporte de 15Ha correspondiente a 16666 píxeles se obtiene una precisión de cauces adecuada.

En segundo lugar, la herramienta `r.water.outlet` permite delinear una cuenca hidrográfica que drena hacia un punto específico. Así, utilizando el archivo de dirección de drenaje y especificando los puntos de aforo conocidos, se pueden obtener las cuencas hidrográficas para los puntos de drenaje considerados. De esta manera, se generarán archivos de cuencas y cauces en formato ráster que pueden ser vectorizados mediante la herramienta `r.to.vect`, facilitando así la determinación de las características morfológicas. Las cuencas delimitadas a partir de las estaciones de aforo y los cauces delineados se presentan en la **Figura 4-2**.

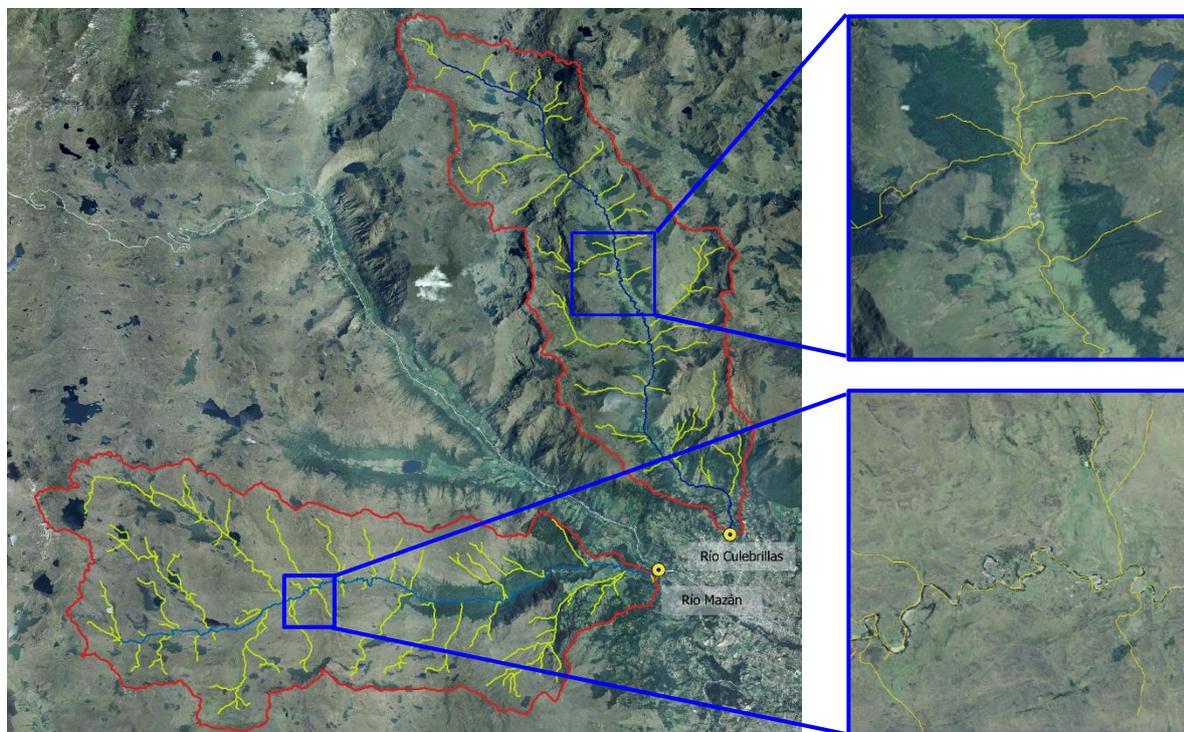


Figura 4-2. Microcuencas y cauces del Río Mazán (zona inferior) y Río Culebrillas (zona superior).
Fuente: Elaboración propia (SIGTIERRAS).

4.1.3. Análisis morfométrico

El análisis morfométrico de las cuencas hidrográficas se llevó a cabo a partir de una serie de complementos de QGIS y GRASS. La **Tabla 4-1** resume los principales complementos empleados para el análisis morfométrico de las cuencas desde el punto de vista de forma, relieve y red de drenaje. Dichos complementos pueden ser seleccionados directamente desde la “Caja de herramientas de Procesos” del software.

Complemento	Fuente	Tipo de capa	Uso
Calculadora de campos	QGIS	vectorial	Determinación de parámetros geométricos y cálculo de campos
Ruta más corta (punto a punto)	QGIS	vectorial	Extracción de cauce principal
Medir línea	QGIS	...	Mediciones lineales sobre el espacio de trabajo
Estadística de zona	QGIS	ráster	Obtención de parámetros estadísticos de capas ráster
Estadística básica para campos	QGIS	vectorial	Obtención de parámetros estadísticos de capas vectoriales
Reclasificar por tabla	QGIS	ráster	Reclasificación de capas por rangos establecidos manualmente
Disolver	QGIS	vectorial	Unificación de filas en tablas de atributos con el mismo identificador en determinado campo
Terrain profile	QGIS	ráster / vectorial	Extracción y exportación de perfil a partir de una capa ráster y una línea vectorial
Corregir geometrías	QGIS	vectorial	Corrección de errores de geometrías tipo área que limitan el cálculo de parámetros geométricos
r.thin	GRASS	ráster	Adelgazamiento capas ráster para su correcta conversión a capas vectoriales tipo línea
r.to.vect	GRASS	ráster	Conversión de capas ráster a vectoriales

Tabla 4-1. Principales complementos empleados en el análisis morfológico de cuencas hidrográficas en QGIS. Fuente: Elaboración propia.

Las microcuencas hidrográficas a partir de las cuales se desprende el análisis morfológico se presentan en la **Figura 4-3**.

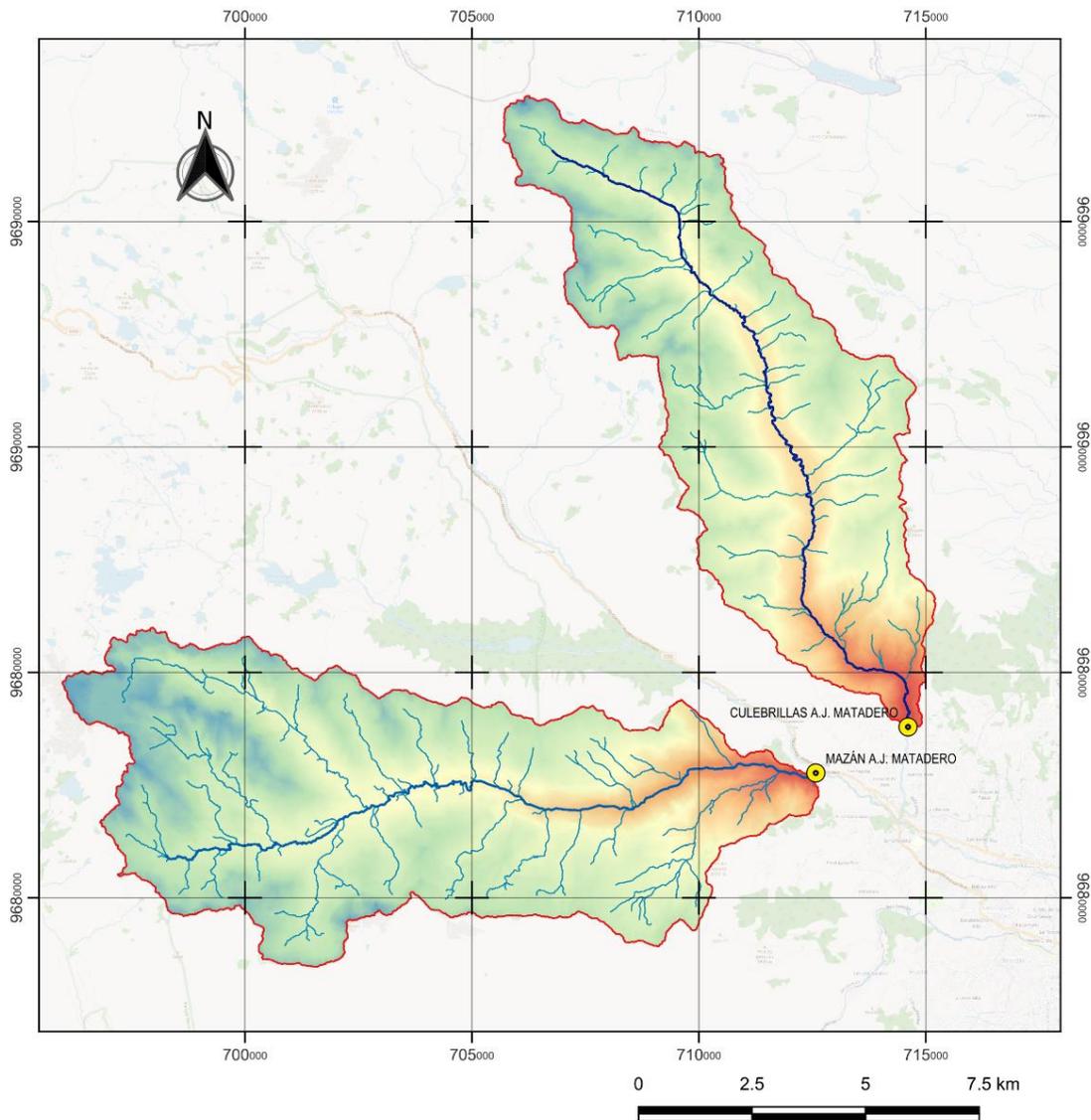


Figura 4-3. Mapa de microcuencas hidrográficas. Fuente: Elaboración propia (SIGTIERRAS).

De igual forma los resultados desprendidos del análisis morfométrico de cada una de las microcuencas se presenta en la **Tabla 4-2**, siendo evidente la similitud entre los diferentes parámetros, los mismos que son analizados a detalle en la sección **5.1**.

Parámetro	Unidad	Mazán	Culebrillas
Parámetros geométricos generales			
Área	Km ²	73.15	56.68
Perímetro	Km	57.87	50.17
Longitud Máxima	Km	16.72	16.32
Ancho de la cuenca	Km	4.37	3.47
Parámetros de forma			
Factor de Forma	...	0.26	0.21
Coefficiente de Compacidad	...	1.91	1.88
Radio de Circularidad	...	0.27	0.28

Parámetros de relieve			
Altitud Máxima	m.s.n.m.	4203.5	4361.5
Altitud Mínima	m.s.n.m.	2758.1	2796.9
Altitud Media	m.s.n.m.	3680.5	3399.9
Altitud Máxima del Cauce	m.s.n.m.	3764.9	3830.5
Altitud Mínima del Cauce	m.s.n.m.	2758.1	2796.9
Desnivel	m	1445.4	1564.6
Parámetros de red de drenaje			
Orden de la cuenca	...	4	4
Densidad de drenaje	...	1.64	1.54
Longitud del Cauce Principal	Km	19.3	20.9

Tabla 4-2. Resultados del análisis morfométrico de las microcuencas del Río Mazán y Río Culebrillas. Fuente: Elaboración propia.

Como parte del análisis del relieve de las cuencas se determinaron las curvas hipsométricas a partir del ráster de elevaciones. Dicha capa se reclasificó en 15 intervalos equiespaciados que cubren el desnivel total de cada cuenca, determinándose el área entre cada rango de elevación. Las curvas hipsométricas en unidades porcentuales se presentan en la **Figura 4-4**, estas incluyen el área bajo la curva que representa un parámetro clave de comparación del grado de maduración del relieve y de su capacidad en términos de energía potencial.

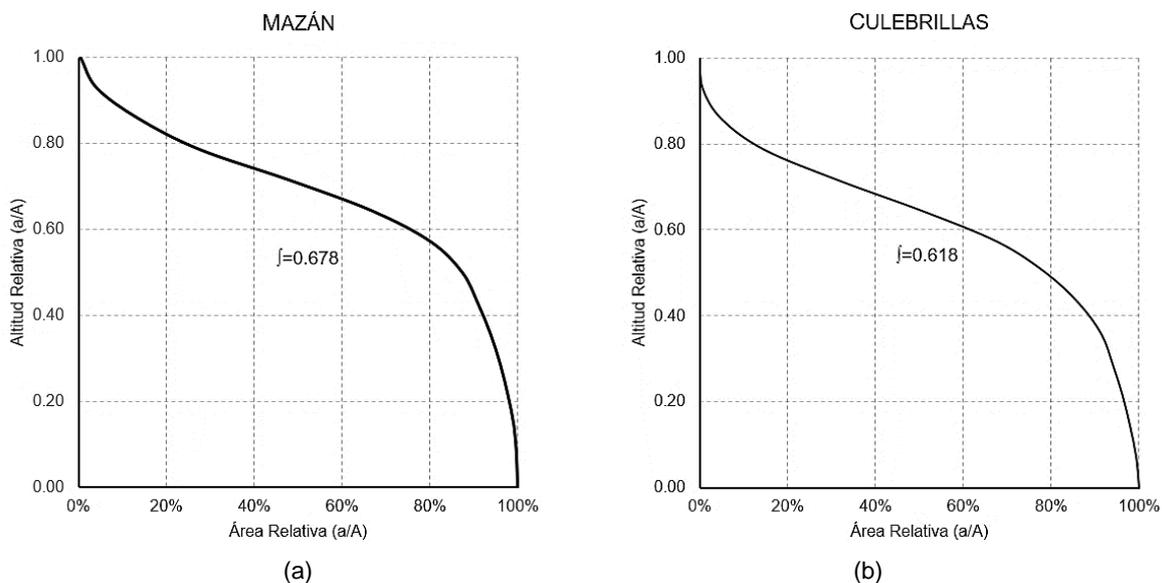


Figura 4-4. Curvas hipsométricas de (a) Mazán y (b) Culebrillas. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, como parte del análisis de la red de drenaje de la cuenca resulta importante la obtención de los perfiles de los cauces principales, mismos que se presentan en la **Figura 4-5**. La importancia de estos perfiles radica en su utilidad para evaluar la erosión y sedimentación, modelar el flujo de agua, evaluar riesgos de inundación, entre otras aplicaciones. Adicionalmente se presenta la línea de pendiente ponderada misma que

presenta un valor de 0.06 y 0.054m/m para el cauce principal de la cuenca del Río Mazán y Culebrillas respectivamente.

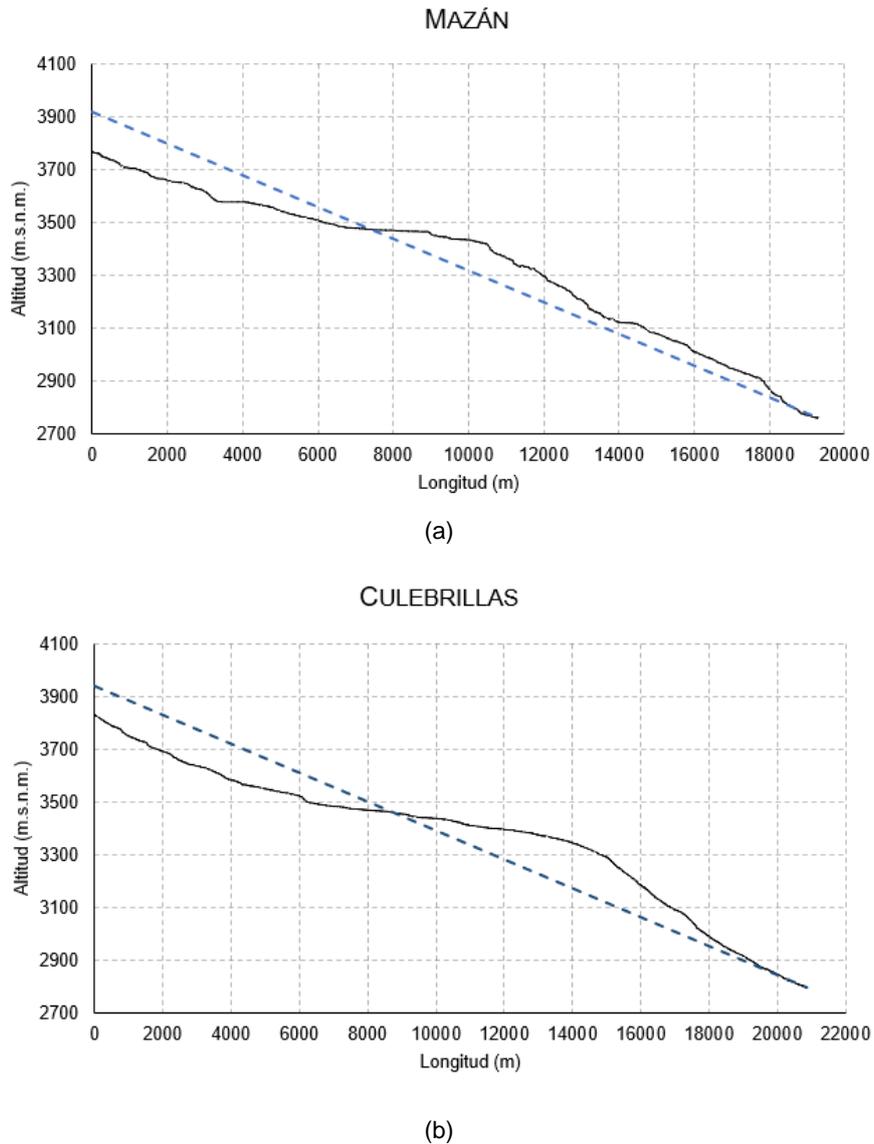


Figura 4-5. Perfiles de cauces principales de (a) Mazán y (b) Culebrillas. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se determina el tiempo de concentración, el cual tiene relación directa con las características morfológicas de la cuenca. Este parámetro indica el tiempo de respuesta de cada cuenca ante un evento de precipitación, ayudando a predecir el momento en que se alcanzará un caudal máximo en el cauce principal. El tiempo de concentración representa el tiempo en que toda la cuenca aporta al punto de drenaje; siendo un parámetro clave para establecer el orden de caudales que se esperaría. Los resultados de aplicar la **Ecuación 3-1** y la **Ecuación 3-2** se presentan en la **Tabla 4-3**, además se incluye la velocidad media esperada en cada cauce principal.

Parámetro	Mazán		Culebrillas	
	Kirpich	Bransby-Williams	Kirpich	Bransby-Williams
Tc (min)	120.944	331.225	130.984	371.078
Vmed (m/s)	2.660	0.971	2.655	0.937

Tabla 4-3. Tiempos de concentración y velocidad media para las microcuencas de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.4. Tipo, uso y cobertura de suelo

El tipo, uso y cobertura del suelo de la cuenca es un factor que incide en la distribución temporal de la cantidad y calidad de agua que llega al punto de desfogue. Además, influye en el grado de escorrentía superficial y de infiltración del agua, por lo que su consideración dentro de la caracterización de una cuenca hidrográfica es representativa.

Los datos de cobertura del suelo se obtuvieron de la información disponible en línea del mapa global derivado de imágenes satelitales del programa Sentinel-2 de la ESA con una resolución espacial de 10m, a partir de la última actualización disponible realizada en el año 2021. La **Figura 4-6.** presenta la variación espacial de la cobertura del suelo en las microcuencas hidrográficas.

Las superficies de cobertura de suelo y sus porcentajes referentes al área total de cada microcuenca se exponen en la **Tabla 4-4.** La principal cobertura para ambos casos corresponde a pastizal con un 83% de la superficie total de la microcuenca Mazán y un 73% de la microcuenca Culebrillas. Los bosques corresponden a la segunda área representativa, siendo mayor para el caso de Culebrillas. Mientras que, la presencia de lagunas como cuerpos de agua natural es mayor en la microcuenca Mazán.

No.	Uso y cobertura del suelo	Mazán		Culebrillas	
		Área (km ²)	Porcentaje	Área (km ²)	Porcentaje
1	Pastizal	60.54	82.77%	41.39	73.02%
2	Bosques	11.16	15.26%	14.50	25.59%
3	Cuerpo de agua natural	1.34	1.84%	0.43	0.76%
4	Sin información por nubosidad	0.06	0.08%	0.18	0.32%
5	Suelo desnudo	0.04	0.05%	0.10	0.18%
6	Área de construcción	-	-	0.07	0.13%
Área total (km²)		73.146		56.682	

Tabla 4-4. Uso y cobertura del suelo de las microcuencas Mazán y Culebrillas. Fuente: Elaboración propia.

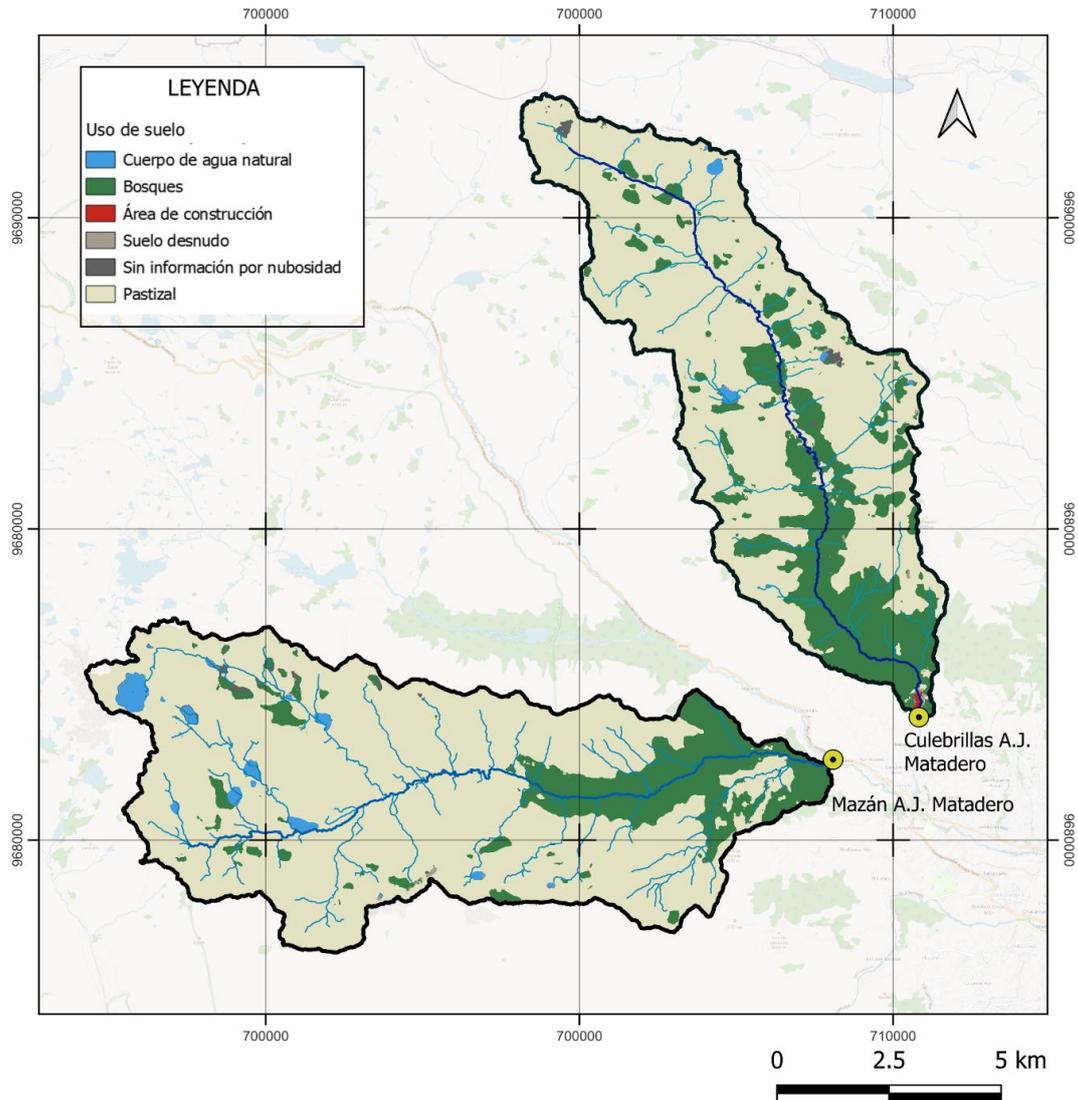


Figura 4-6. Mapa del uso y cobertura del suelo de las microcuencas hidrográficas Mazán y Culebrillas. Fuente: Elaboración propia (ESA).

Además, el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca proporciona información más detallada acerca de la cobertura y uso de la tierra y sistemas productivos agropecuarios en su geoportal en escala 1:25000 con actualización en el año 2020. Estos se describen en tres niveles de acuerdo a sus características. La **Figura 4-7** presenta el nivel 1 de cobertura de suelo para ambas microcuencas con una superficie mayor de tierra arbustiva y herbácea. La **Tabla 4-5** y **Tabla 4-6** exponen los tres niveles y el uso de suelo con sus áreas y el porcentaje que representa en cada caso.

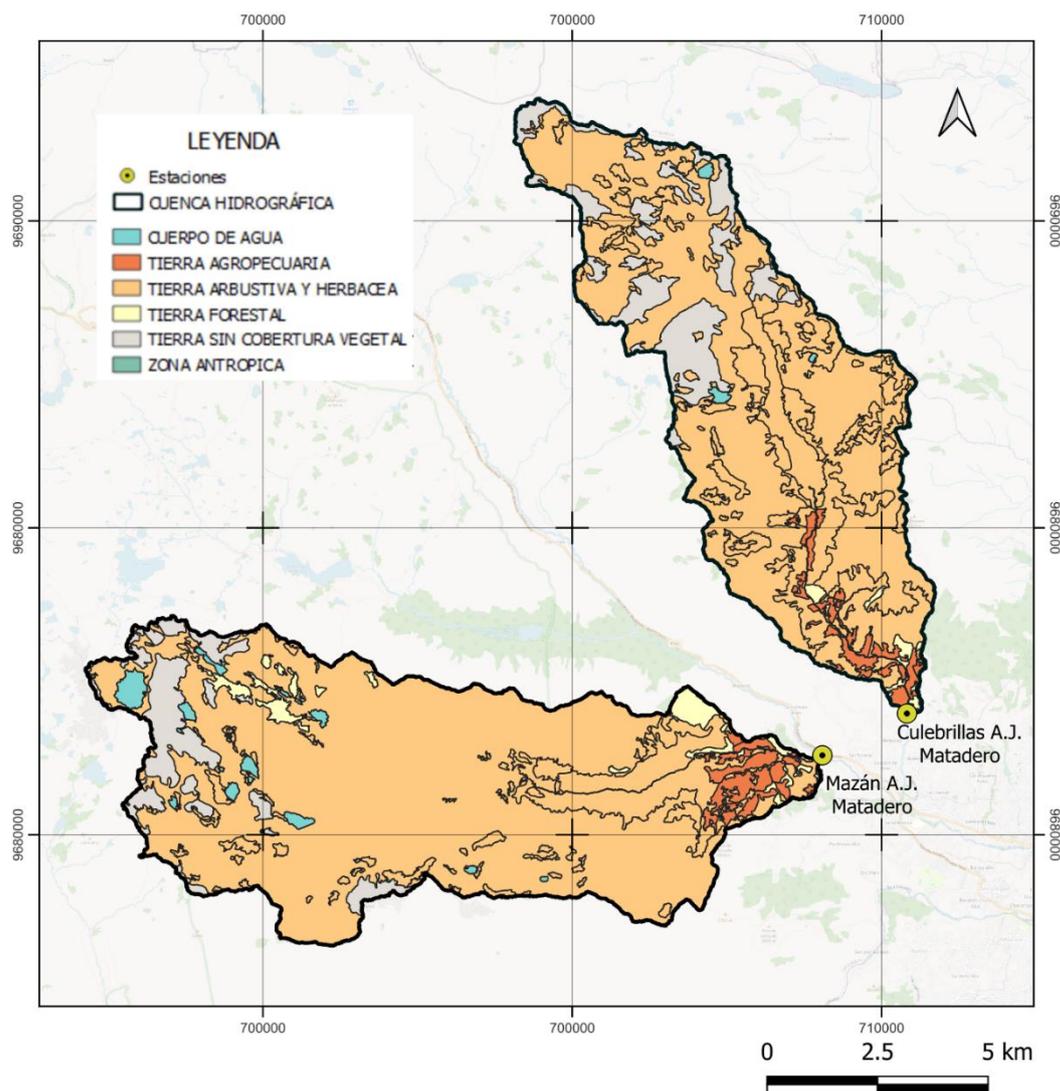


Figura 4-7. Cobertura y uso de tierra para las microcuencas del Río Mazán y Río Culebrillas.
Fuente: Elaboración propia (MAGAP).

La cuenca del río Mazán posee una superficie de 84.67% de tierra arbustiva herbácea subdividida en páramo con el 86.82% y vegetación arbustiva con el 13.18%, siendo un área conservada y protegida. Seguido se tiene tierra sin cobertura vegetal con 7.45%, y a la tierra forestal con 3.05% del área total.

CUENCA RÍO MAZÁN				
NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3	USO	ÁREA Km ²
Cuerpo de agua (1.87%)	Cuerpo de agua natural (100%)	Lago / laguna (97.27%)	Agua	1.33
		Rio doble (2.73%)	Agua	0.04
Tierra agropecuaria (2.95%)	Pastizal (100%)	Pasto cultivado (100%)	Pecuario	2.16
Tierra arbustiva y herbácea	Páramo (86.82%)	Páramo herbáceo poco alterado (100%)	Conservación y Protección	53.77

(84.67%)	Vegetación arbustiva (13.18%)	Vegetación arbustiva (23.41%)	Conservación y Protección	1.91
		Matorral húmedo medianamente alterado (76.59%)	Conservación y Protección	6.25
Tierra forestal (3.05%)	Bosque nativo (51.15%)	Bosque húmedo poco alterado (12.95%)	Conservación y Protección	0.15
		Bosque nativo (87.05%)	Conservación y Protección	0.99
	Plantación forestal (48.85%)	Eucalipto (37.86%)	Protección o producción	0.41
		Pino (61.14%)	Protección o producción	0.68
Tierra sin cobertura vegetal (7.45%)	Erial (100%)	Afloramiento rocoso (100%)	Tierras improductivas	5.45

Tabla 4-5. Información de cobertura y uso de tierra de la microcuenca del río Mazán obtenida del MAGAP. Fuente: Elaboración propia.

La cuenca del río Culebrillas posee una superficie del 81.86% de tierra arbustiva y herbácea, subdividida en 9.85% de vegetación arbustiva y 90.15% páramo. El área de tierra sin cobertura vegetal corresponde a la segunda superficie mayor con el 13.08% del total. Seguido está la tierra agropecuaria con el 3.38% de superficie.

CUENCA RÍO CULEBRILLAS				
NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3	USO	ÁREA Km ²
Cuerpo de agua (0.56%)	Cuerpo de agua natural (100%)	Lago / laguna (77.65%)	Agua	0.25
		Rio doble (22.35%)	Agua	0.07
Tierra agropecuaria (3.38%)	Cultivo (0.68%)	Cultivo anual (100%)	Agrícola	0.01
	Mosaico agropecuario (3.48%)	Misceláneo de maíz y pasto cultivado (100%)	Agropecuario mixto	0.07
	Pastizal (95.84%)	Pasto cultivado (100%)	Pecuario	1.84
Tierra arbustiva y herbácea (81.86%)	Vegetación arbustiva (9.85%)	Matorral húmedo poco alterado (40.3%)	Conservación y Protección	1.84
		Vegetación herbácea de humedal poco alterada (59.7%)	Conservación y Protección	2.73
	Páramo (90.15%)	Páramo herbáceo poco alterado (100%)	Conservación y Protección	41.83
Tierra forestal (1.04%)	Bosque nativo (11.72%)	Bosque húmedo poco alterado (100%)	Conservación y Protección	0.07
	Plantación forestal (88.28%)	Pino (31.67%)	Protección o producción	0.16
		Eucalipto (68.33%)	Protección o producción	0.36
Tierra sin cobertura vegetal (13.08%)	Erial (100%)	Afloramiento rocoso (100%)	Tierras improductivas	7.41
Zona antrópica (0.08%)	Área poblada (100%)	Área en proceso de urbanización (100%)	Antrópico	0.05

Tabla 4-6. Información de cobertura y uso de tierra de la microcuenca del río Culebrillas obtenida del MAGAP. Fuente: Elaboración propia.

El mapa de tipo de suelo presentado en la **Figura 4-8** se elaboró a partir de la información temática digital del Mapa de Suelos del Ecuador del MAGAP (*Catálogo de Datos - Metadatos*, 2002) en escala 1:250000.

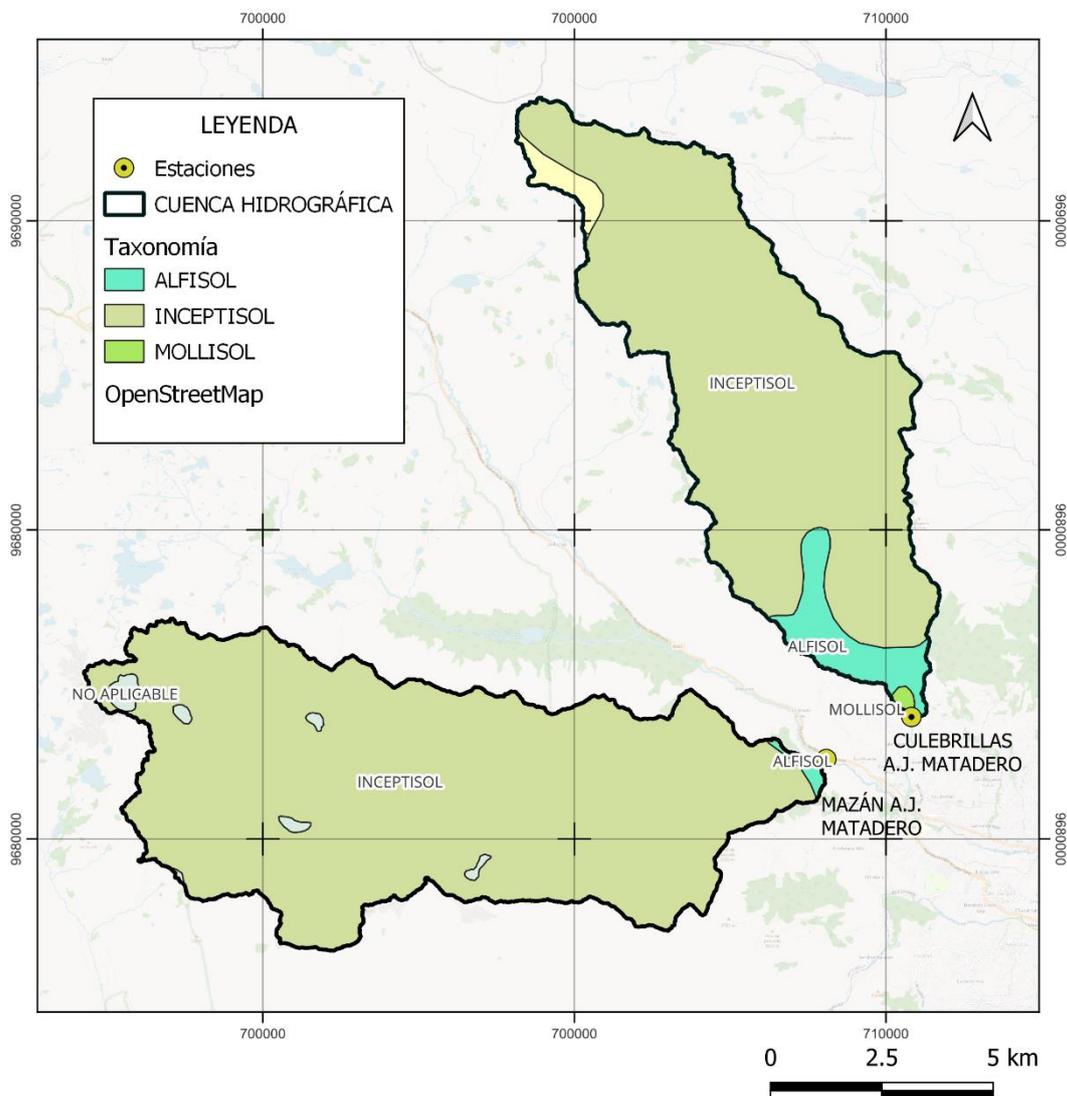


Figura 4-8. Tipo de suelo de las microcuencas del Río Mazán y Río Culebrillas. Fuente: Elaboración propia (MAGAP).

La **Tabla 4-7** presenta los porcentajes correspondientes a la taxonomía de cada suelo. En ambos casos domina INCEPTISOL para la microcuenca del río Culebrillas con un 89.48% y para la cuenca del río Mazán con un 98.06% representando casi su totalidad de área. Se utilizó la descripción de cada tipo de suelo que ofrece Organización de los Estados Americanos (Organización de los Estados Americanos, 1978) para su caracterización. Los suelos del orden Inceptisol provienen de depósitos fluviónicos. Su suborden Andept indica la

derivación de materiales volcánicos. Los suelos del orden alfisol corresponden a aquellos con saturación de base mayor a 35% y horizontes subsuperficiales con traslocación de arcillas. Su suborden Udalf indica que son usualmente húmedos con influencia de clima tropical húmedo. Los suelos del orden molisol son superficiales a moderadamente profundos de material volcánico y sedimentario. Su suborden Udoll indica que son usualmente húmedos. La superficie correspondiente a “No aplicable” compete principalmente a los cuerpos de agua.

Cuenca	Orden	Suborden	Gran grupo	Area km ²	Porcentaje
Río Culebrillas	ALFISOL	UDALF	TROPUDALF(EUTROPEPT)	4.38	7.73%
	INCEPTISOL	ANDEPT	HYDRANDEPT(CRYANDEPTS)	50.72	89.48%
	MOLLISOL	UDOLL	ARGIUDOLL	0.23	0.41%
	No aplicable	No aplicable	No aplicable	1.34	2.36%
Río Mazán	ALFISOL	UDALF	TROPUDALF(EUTROPEPT)	1.00	1.37%
	INCEPTISOL	ANDEPT	HYDRANDEPT(CRYANDEPTS)	71.73	98.06%
	No aplicable	No aplicable	No aplicable	0.41	0.56%

Tabla 4-7. Información del tipo de suelo de las microcuencas del río Mazán y río Culebrillas obtenida de MAGAP. Fuente: Elaboración propia.

Existen otras fuentes de información de mapas como el repositorio de la Universidad del Azuay – IERSE (*Información temática digital de la cuenca del Río Paute*, s. f.) que se encuentra disponible en línea en proyección PSAD 1956 UTM Zone 17S.

4.2. Casos de estudio

Los casos de estudio corresponden a dos afluentes del río Matadero ubicados al noroeste de la ciudad de Cuenca, que junto con otras fuentes tributarias contribuyen a su caudal. El primero (caso A) es el río Mazán, este tiene origen en la región montañosa, sus aguas son claras provenientes de una microcuenca conservada y fluyen en dirección O-E hasta desembocar en el Matadero por su margen derecho. Aproximadamente 2.3km aguas abajo, se encuentra el segundo (caso B) correspondiente al río Culebrillas, también conocido como Sayausí o Capulí, el cual se origina en las montañas fluyendo desde el norte hasta su desembocadura al margen izquierdo del río donde hay la presencia de depósitos fluvio-glaciales (Ordóñez Espinoza, Galo, 2008).

Luego de un recorrido e identificación de las características del sitio se realizó la selección del tramo de control de cada río de montaña. El tramo de control del río Mazán se encuentra 80m aguas arriba de la junta con el río Matadero en donde se ubica además una estación limnigráfica de propiedad municipal. Mientras que el tramo de control del río Culebrillas se localiza 2.2km aguas arriba de su junta con el río Matadero. Aproximadamente 300m antes de la estación Culebrillas A.J. Matadero en el sector Paquitranca existe una captación de tipo

convencional. Similarmente, a pocos metros aguas arriba de la estación Mazán A.J. Matadero hay una captación pequeña de pocos litros por segundo.

La ubicación de las estaciones de aforo se indica en la **Tabla 4-8** y se visualiza geográficamente en la **Figura 4-9**.

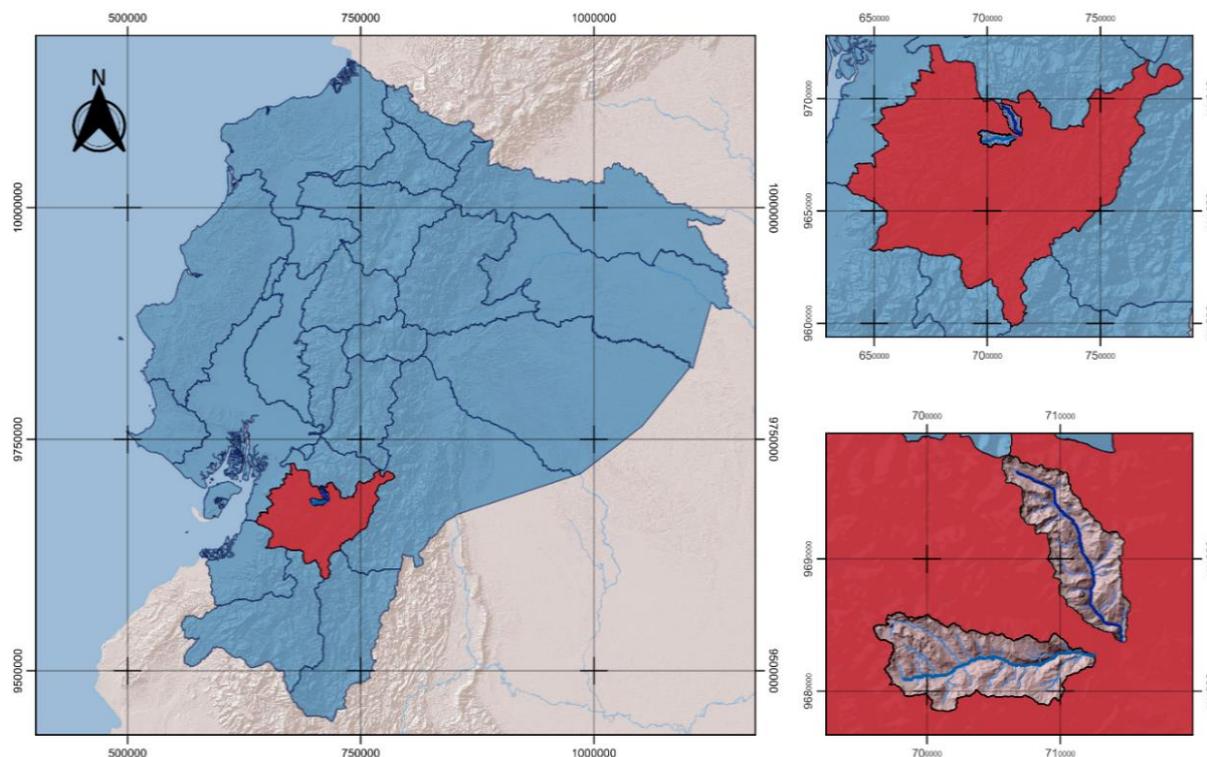


Figura 4-9. Ubicación general del proyecto en la provincia de Azuay, Ecuador. Fuente: Elaboración propia.

No.	Identificador	CASO A	CASO B
1	Microcuenca hidrográfica	Mazán	Culebrillas
2	Nombre del río	Mazán	Culebrillas
3	Nombre de la estación de aforo	Mazán A.J. Matadero	Culebrillas A.J. Matadero
4	Coordenadas geográficas	712586.00 m E 9682797.00 m S	714572.00 m E 9683766.00 m S
5	Elevación de la estación	2758 m.s.n.m.	2797 m.s.n.m.
6	Sistema geodésico de referencia	WGS 84 / UTM zona 17S	WGS 84 / UTM zona 17S

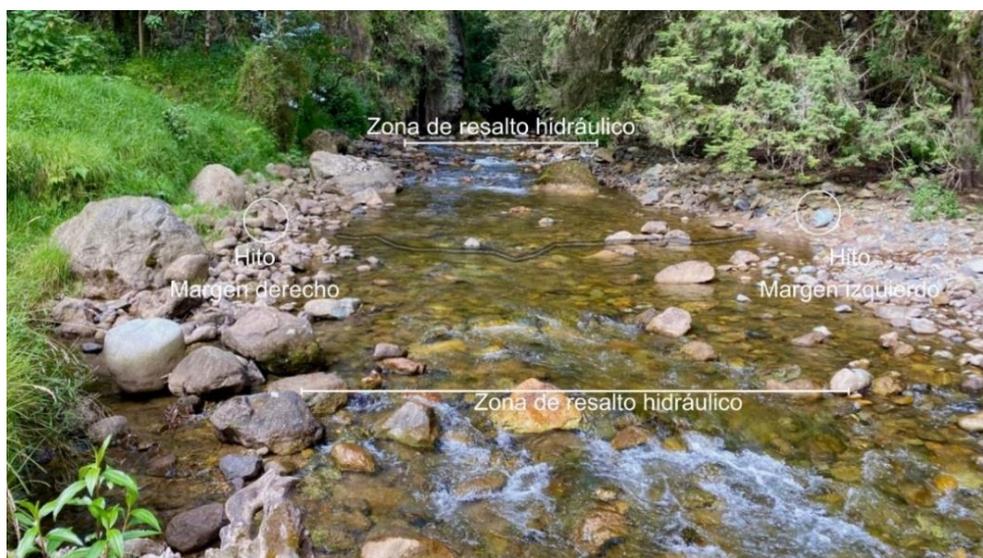
Tabla 4-8. Identificadores de las estaciones de aforo para los dos casos de estudio. Fuente: Elaboración propia.

4.3. Aplicación del procedimiento operativo estándar de medición en campo

El procedimiento de medición involucra la preparación de la sección transversal de cada cauce, la ejecución de los aforos por vadeo con la determinación del caudal, características

geométricas de la sección y registro del nivel de agua, además de la recopilación de información adicional cualitativa.

Para el caso de la estación Mazán A.J. Matadero, se visualizó el tramo de mejores características, recto con márgenes paralelos (ver Figura 4-10). Se mejoró las condiciones de la sección con el desplazamiento o retiro de rocas que provocaban fenómenos locales, sin embargo, el movimiento de aquellas de tamaño considerable no fue alcanzable por lo que se mantuvo la presencia de resaltos hidráulicos en pocos puntos. Por otro lado, las rocas removidas se colocaron estratégicamente en los márgenes con el fin de encausar el flujo y evitar zonas muertas.



(a)



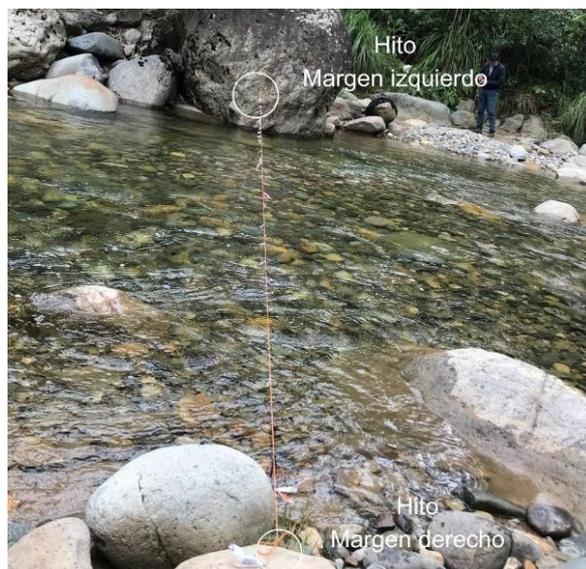
(b)

Figura 4-10. Tramo de control de condiciones relativamente uniformes y sección de medición de la estación Mazán A.J. Matadero con vista (a) transversal con esquema del fondo de cauce y (b) longitudinal con guía de medición perpendicular a la dirección del flujo. Fuente: Elaboración propia.

En la estación Culebrillas A.J. Matadero para la medición de los valores bajos de caudal se eligió una sección transversal de poco ancho (B-1) (Figura 4-13.). Sin embargo, al incrementar el caudal, no se vio conveniente continuar las observaciones en la misma, ya que no fue posible encaminar el flujo a un solo canal, viéndose ramificado por la magnitud de rocas. Es así que, se optó por otra sección transversal (B-2) (Figura 4-11), la cual se encontró a una distancia no tan alejada a fin de mantener la relación entre el nivel en el punto de referencia inicial y el caudal medido. A pesar del mejoramiento de esta última sección, se presentaron flujos cruzados en el margen izquierdo del río debido al material rocoso de gran tamaño.



(a)



(b)

Figura 4-11. Tramo de control de condiciones relativamente uniformes y sección de medición B-2 de la estación Culebrillas A.J. Matadero con vista (a) transversal con esquema del fondo de cauce y (b) longitudinal con guía de medición perpendicular a la dirección del flujo. Fuente: Elaboración propia.

En este sentido, según la configuración de los tramos de control, al presentar condiciones estables es posible suponer flujo uniforme permanente, adoptando las simplificaciones teóricas necesarias para modelar la relación nivel-caudal mediante una ecuación.

El registro de caudales se realizó con el equipo de medición de velocidad y flujo FlowTracker2, mediante una campaña de aforos por vadeo entre los meses de octubre de 2023 a abril de 2024 con períodos significativos entre medición obteniendo un total de catorce observaciones en cada caso de estudio en una media estimada de una hora de demora por caudal. Para un control de la sección transversal entre aforos se colocó un hito a cada orilla, en los cuales se sujetó una cuerda graduada atravesando el cauce, que a su vez sirvió de guía para determinar la distancia entre verticales y mantener la sección de medición perpendicular a la dirección del flujo (ver [Figura 4-10](#) y [Figura 4-11](#)).

El número de verticales en la sección transversal depende de la distribución de caudal en el cauce, por lo que el número se estimó de acuerdo a las recomendaciones del equipo de medición y la **Tabla 3-6**. Se obtuvo un registro de 10 verticales en el caudal más bajo y un máximo de 26 verticales en la estación Mazán A.J. Matadero, mientras que para la estación Culebrillas A.J. Matadero se tuvo una variación de 8 a 12 verticales para la primera sección de control y de 18 a 20 para la segunda.

La medición de velocidad en cada vertical se realizó mediante el método de las seis décimas de profundidad (0.6d), el método de los dos puntos (0.2d/0.8d) y el método de los tres puntos (0.2d/0.6d/0.8d) según el tirante de agua de cada caso. Se procuró seguir las indicaciones de uso del equipo (ver [Capítulo 2](#)) y las recomendaciones del procedimiento general de aforo (ver [sección 3.8.3](#)) a fin de reducir la incertidumbre en la toma de datos.

Por otro lado, el tirante de agua de cada vertical se midió con varilla de vadeo graduada y fue registrado en el equipo. El ancho de la superficie libre de agua, área de la sección transversal y demás parámetros hidráulico geométricos se obtuvieron del resumen de datos al finalizar cada aforo. Además, se realizó una revisión de valores luego de cada captura porcentual de caudal, así como el resultado final del mismo a fin de garantizar la consistencia de los datos.

En cuanto a la estación de medición Mazán A.J. Matadero, las lecturas de nivel se realizaron en la regleta instalada por ETAPA EP de su estación limnigráfica (ver [Figura 4-12](#)) ubicada a una distancia aproximada de 25m aguas abajo de la sección de aforo. La junta con el río Matadero se encuentra aproximadamente a 80m aguas abajo de la estación, por lo que se supone la no influencia de su flujo en el nivel de agua dentro del rango de caudales medidos.



Figura 4-12. Tramo de control de la Estación Mazán A.J. Matadero y regleta de medición de nivel de la estación limnigráfica Mazán A.J. Tomebamba de propiedad municipal. Fuente: Elaboración propia.

Las mediciones de nivel de la estación Culebrillas A.J. Matadero se realizaron mediante un punto de referencia seleccionado desde la observación inicial (ver Figura 4-13) ubicado junto a la primera sección de control (B-1) y aproximadamente a 25m aguas abajo de la segunda sección (B-2).



Figura 4-13. Tramo de control B-1 de la Estación Culebrillas A.J. Matadero con esquema de fondo de cauce y punto de referencia de medición de nivel. Fuente: Elaboración propia.

Las lecturas de nivel se capturaron antes y después de cada medición, las cuales se registraron en la libreta de campo y fueron respaldadas mediante videos y fotografías. Una

vez realizado el aforo, se procedió a exportar los datos y respaldar la información mediante el uso del software de escritorio para su posterior tratamiento.

4.4. Datos experimentales

El equipo FT2 recolecta información de cada vertical y la procesa para la obtención del caudal de la sección transversal. Los principales parámetros de interés de una observación se detallan en la **Tabla 4-9**, en donde, de acuerdo al reporte de medición, ha pasado todos los controles de calidad del equipo (ver sección 2.5). El **Anexo B: Campaña de aforos realizada en campo** resume todas las observaciones de ambas estaciones.

No.	Nombre del parámetro	Unidad	Magnitud
1	Número de estaciones	-	26
2	Ancho total B	m	10.10
3	Área total A	m ²	3.05
4	Caudal total Q	m ³ /s	1.19
5	Profundidad media \bar{y}	m	0.30
6	Velocidad media Vx	m/s	0.39
7	Velocidad media Vy	m/s	0.04
8	SRN media	dB	45.97
9	Error en la velocidad media Vx	m/s	0.01
10	Error en la velocidad media Vy	m/s	0.01
11	Temperatura media del agua T	° C	12.42
12	Tiempo de lectura	seg	40
13	Método de medición de velocidad	-	0.6d, 0.2d/0.8d
14	Ecuación de caudal	-	MidSection
15	Fecha	dd/mm/aa	9/2/2024
16	Hora de inicio	hh:mm:ss	10:08:39
17	Hora de fin	hh:mm:ss	10:57:18
18	Observación	Sentido de medición de margen derecho a izquierdo	
19	Lectura de nivel en regleta	m	0.68

Tabla 4-9. Parámetros de medición de caudal para el aforo N° 10 realizado en la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

La **Tabla 4-10** y **Tabla 4-11** exponen los datos de nivel y caudal, así como las principales características geométricas de las secciones de medición para cada estación y las figuras a continuación muestran gráficamente las relaciones principales.

El rango de caudales registrados en la estación Mazán A.J. Matadero varía entre el valor mínimo de 0.297m³/s en un nivel de 0.46m y un máximo de 1.976m³/s a un nivel de 0.78m. Los datos se encuentran presentados en orden de observación, con un registro de medición de velocidad en verticales continuas de margen derecho a izquierdo y viceversa en una misma fecha, a excepción de la quinta y doceava observación que se registraron únicamente

en un sentido, en el primer caso debido a la magnitud de caudal y condiciones climáticas, y en el segundo caso debido a que ya se obtuvo con anterioridad una observación para el mismo el nivel h . Las observaciones de nivel capturadas en los aforos de un mismo día no presentan variación a excepción de la décima y onceava observación con una diferencia de 1cm adicional. Gráficamente se aprecia cierta diferencia entre la dispersión de datos en caudales de la mitad superior del rango de lecturas respecto a la inferior.

No.	Nivel h (m)	Caudal Q (m ³ /s)	Profundidad media \bar{y} (m)	Ancho B (m)	Área A (m ²)	Perímetro mojado P (m)
1	0.46	0.297	0.21	6.15	1.30	6.11
2	0.46	0.352	0.22	6.15	1.37	6.20
3	0.52	0.530	0.22	8.10	2.04	8.18
4	0.52	0.511	0.25	8.10	1.99	8.19
5	0.78	1.976	0.39	11.00	4.29	11.14
6	0.56	0.513	0.24	8.60	2.06	8.83
7	0.56	0.529	0.24	8.60	2.08	8.86
8	0.72	1.4649	0.33	10.50	3.49	10.74
9	0.72	1.3607	0.34	10.50	3.60	10.70
10	0.68	1.185	0.30	10.10	3.05	10.43
11	0.69	1.135	0.31	10.10	3.08	10.43
12	0.69	1.059	0.30	10.20	3.05	10.49
13	0.56	0.543	0.21	9.40	1.95	9.68
14	0.56	0.548	0.22	9.40	2.03	6.11

Tabla 4-10. Datos de aforo de la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

Aforos estación Mazán A.J. Matadero

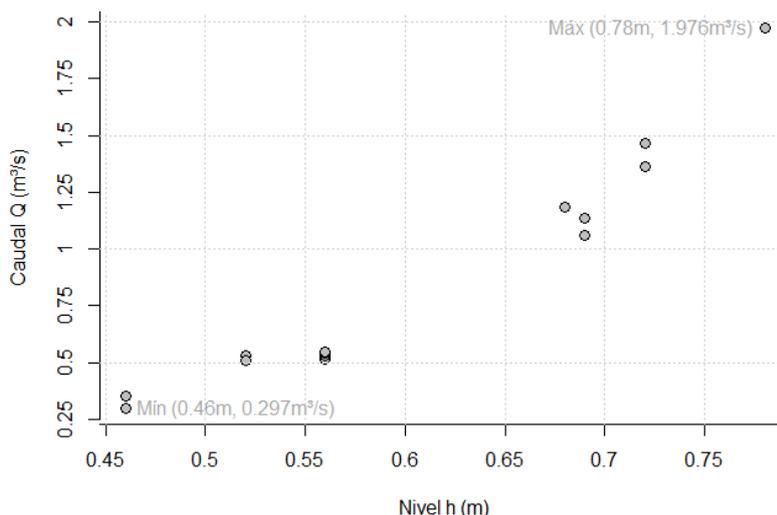


Figura 4-14. Registro de mediciones de caudal – nivel en la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

Las relaciones área-nivel y velocidad-nivel de la **Figura 4-15** no indican anomalías significativas en el registro de datos al observar su correspondencia entre área y velocidad

para un mismo h , lo que sugiere que no hay mediciones de velocidad con errores significativos capaces de producir valores atípicos.

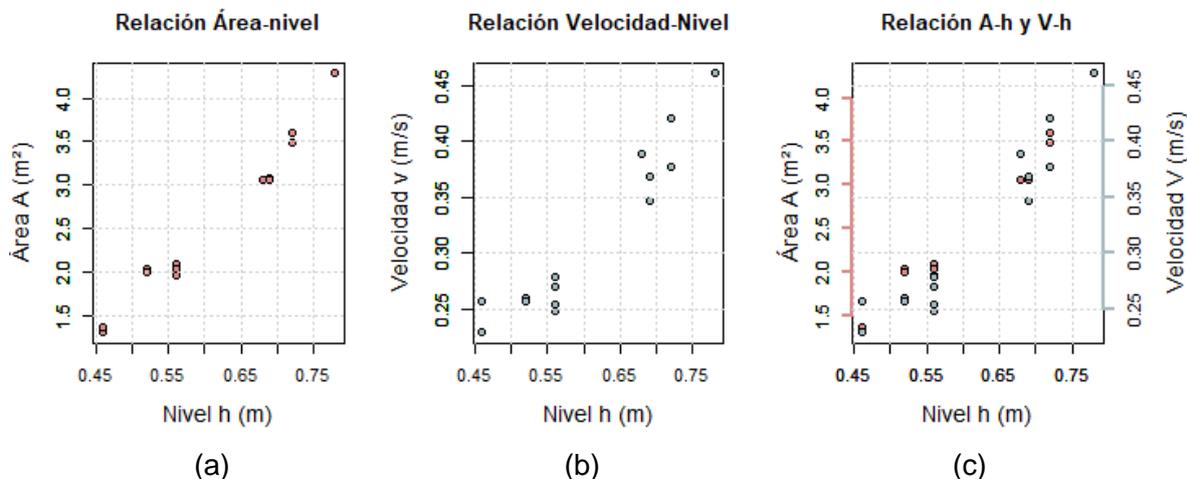


Figura 4-15. Relación (a) área – nivel, (b) velocidad – nivel y (c) área (eje izquierdo rojo) y velocidad (eje derecho azul) respecto a nivel en la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 4-16** indica los registros de caudal respecto a área transversal. De manera general, la relación resulta creciente, incrementándose caudal y área. Sin embargo, analizando particularmente los puntos de superficie cercanos a 3m^2 existe un incremento notorio en el caudal resultado de la variación de velocidades medias entre observaciones, por otro lado, en el cambio de superficie de 3.48m^2 a 3.60m^2 hay una disminución cercana a 104l/s lo que es resultado de una medición de velocidad menor.

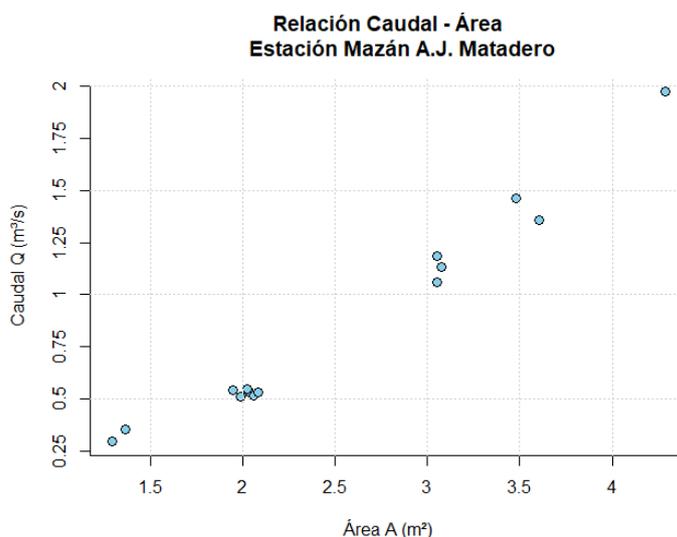


Figura 4-16. Relación área – caudal en la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

En la estación Culebrillas A.J. Matadero el rango de caudales observados varía entre un mínimo de $0.035\text{ m}^3/\text{s}$ en un nivel de 0.315m a un máximo caudal de $0.6983\text{m}^3/\text{s}$ a un nivel

de 0.615m. Se registró dos observaciones por fecha correspondientes a un sentido de medición de margen derecho a izquierdo y viceversa. Las observaciones de nivel realizadas en un mismo día no tienen variación a excepción de la décima observación respecto a la novena, con una disminución de medio centímetro. Los registros de caudales bajos realizados en la primera sección de control B-1 se presentan hasta la sexta observación en un rango de 28l/s a 236l/s. La segunda serie de caudales (sección B-2) varía de 409l/s a 698l/s.

No.	Nivel h (m)	Caudal Q (m³/s)	Profundidad media \bar{y} (m)	Ancho B (m)	Área A (m²)	Perímetro mojado P (m)
1	0.315	0.035	0.27	2.55	0.68	2.70
2	0.315	0.028	0.29	2.20	0.64	2.23
3	0.345	0.054	0.31	2.20	0.69	2.25
4	0.345	0.053	0.31	2.20	0.69	2.26
5	0.480	0.227	0.39	3.00	1.18	3.27
6	0.480	0.236	0.38	3.10	1.17	3.38
7	0.615	0.6733	0.33	6.90	2.30	7.08
8	0.615	0.6983	0.34	6.90	2.34	7.08
9	0.550	0.422	0.27	6.70	1.82	6.83
10	0.545	0.409	0.28	6.70	1.85	6.83
11	0.620	0.642	0.35	7.00	2.44	7.26
12	0.620	0.6049	0.35	7.00	2.42	7.28
13	0.600	0.485	0.22	6.90	1.53	7.02
14	0.600	0.454	0.22	6.90	1.54	6.97

Tabla 4-11. Datos de aforo de la estación Culebrillas A.J. Matadero. Nota: El cambio de sección de control se realiza a partir del aforo No. 7. Fuente: Elaboración propia.

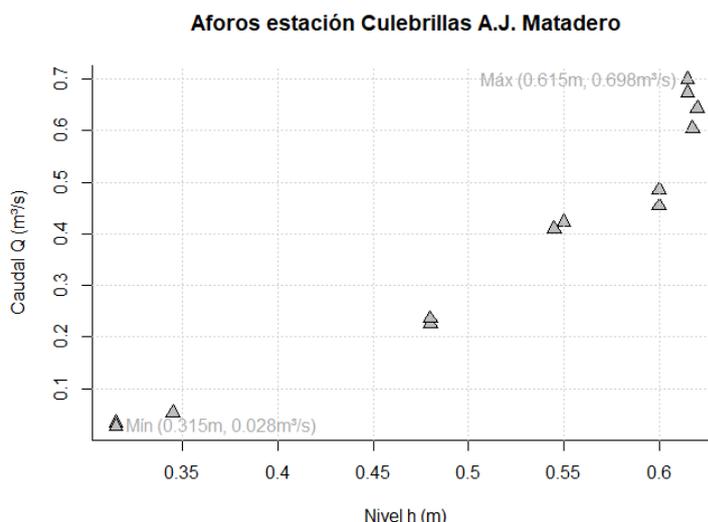


Figura 4-17. Registro de mediciones de caudal – nivel en la estación Culebrillas A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

Las relaciones de área transversal y velocidad respecto a nivel se presentan en la **Figura 4-18** con una distinción entre secciones B-1 y B-2. Se observa la tendencia de crecimiento del área, en donde la sección B-2 presenta un gradiente mayor respecto a B-1. En particular,

dos puntos se alejan de tal tendencia, estos corresponden de acuerdo a la **Tabla 4-11** a las dos últimas observaciones para un nivel h de 0.6m, siendo sujeto de análisis.

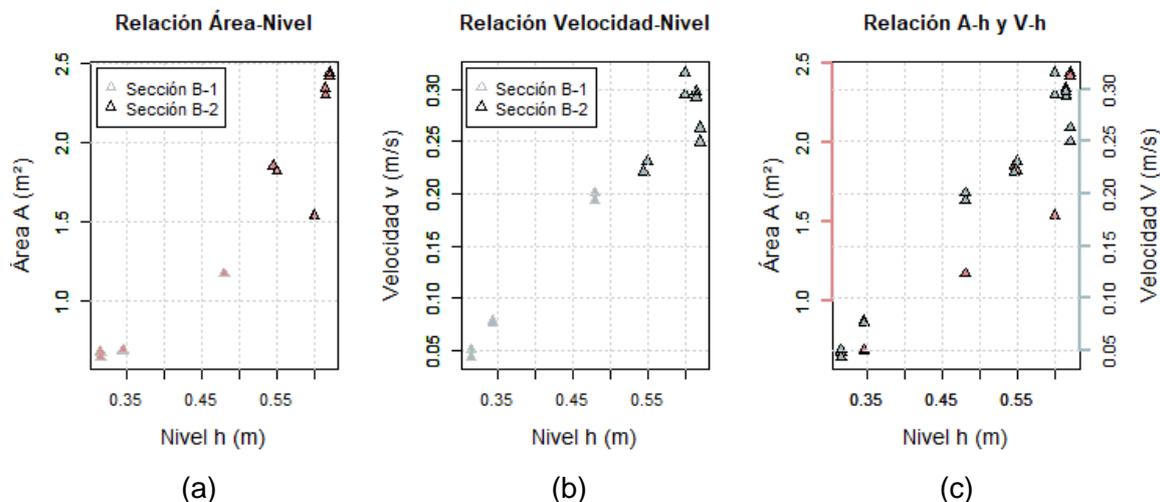


Figura 4-18. Relación (a) área – nivel, (b) velocidad – nivel y (c) área (eje izquierdo rojo) y velocidad (eje derecho azul) respecto a nivel en la estación Culebrillas A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

La correspondencia de caudal respecto a área transversal se indica en la **Figura 4-19**. Se aprecia la desviación de las dos últimas observaciones con valores de superficie de 1.54m² respecto a la tendencia del resto de datos, lo que podría alterar el modelo predictivo de la curva de descarga, requiriendo un análisis con y sin este par de valores.

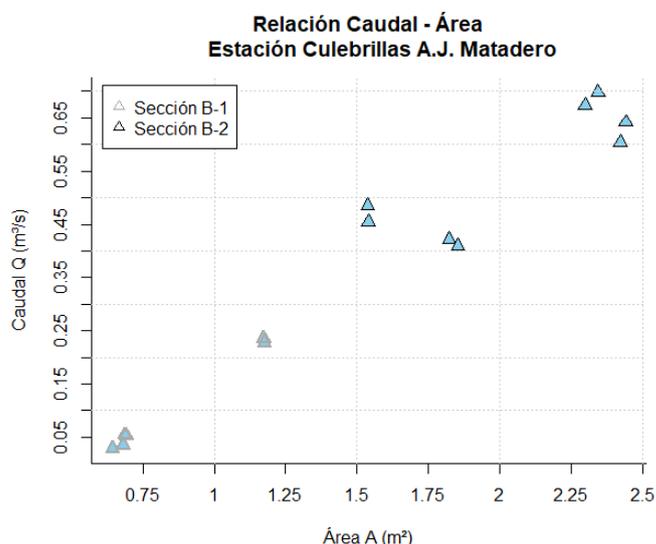


Figura 4-19. Relación área – caudal en la estación Culebrillas A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

4.5. Condiciones de flujo en las secciones de aforo

El análisis de las distribuciones de velocidad y el régimen de flujo en las secciones de medición es fundamental para caracterizar adecuadamente el comportamiento hidráulico.

Así, esta sección se enfoca en la obtención de isotaquias y el cálculo del coeficiente de distribución de velocidad, los cuales son esenciales para determinar los números de Froude y Reynolds, parámetros que describen la dinámica del flujo en el cauce y su régimen. La precisión en estos análisis permite caracterizar de mejor manera las secciones de aforo e identificar deficiencias en las mismas.

4.5.1. Obtención de isotaquias

Las velocidades registradas durante cada aforo se representan como una nube de puntos que puede ser interpolada en función de la velocidad medida en cada ubicación. Esta tarea se ha realizado utilizando la herramienta "Multilevel B-Spline" de QGIS. A partir de la capa vectorial de los puntos de medición, se genera un archivo ráster de velocidades a lo largo de toda la sección. En la **Figura 4-20** se muestra el resultado de la interpolación de velocidades para la sección del Río Mazán, correspondiente al caudal máximo registrado de 1.976 m³/s con una escala de H:5V.

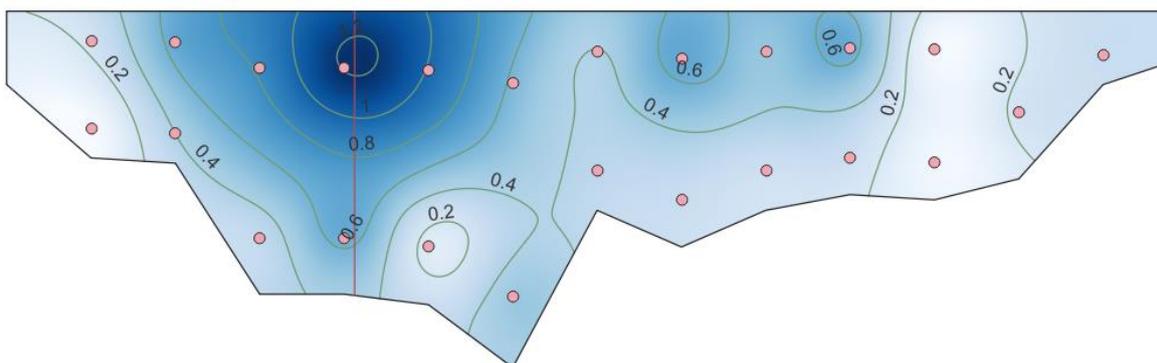


Figura 4-20. Isotaquias obtenidas a partir de la interpolación de los puntos de velocidad medidos en campo en la sección del Río Mazán para caudal máximo de 1.976 m³/s. Fuente: elaboración propia.

Los resultados de isotaquias y perfiles de velocidad en las secciones de aforo para los caudales máximos registrados se presentan en la **Figura 4-21**. Se observa que la velocidad máxima se presenta a una profundidad aproximada de 20 a 25% desde la superficie, situación que se ajusta a los modelos teóricos.

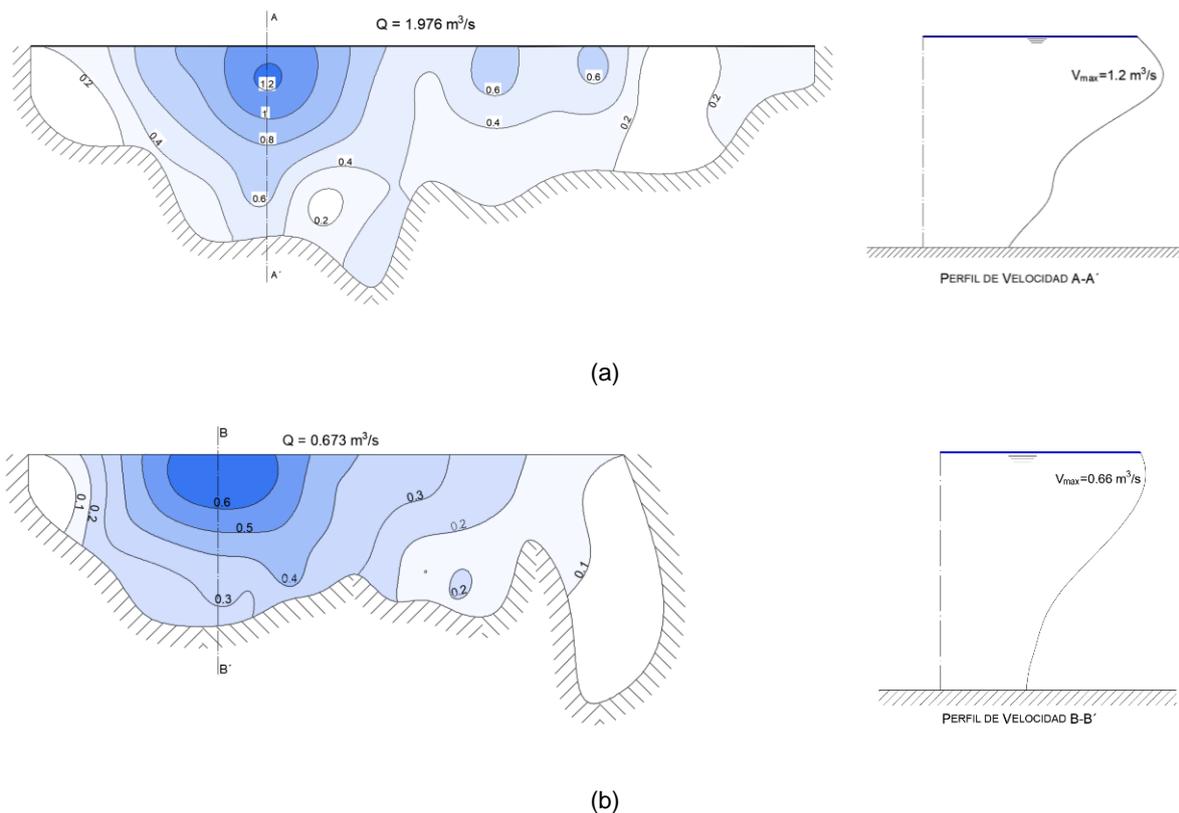


Figura 4-21. Isotaquias y perfiles de velocidad para las secciones de aforo en (a) Río Mazán y (b) Río Culebrillas para el caudal máximo registrado. Fuente: Elaboración propia.

4.5.2. Determinación de los coeficientes de distribución de velocidad

El coeficiente de distribución de velocidad es un parámetro fundamental en el análisis de flujo en canales. Este coeficiente permite corregir la velocidad media del flujo, proporcionando una descripción más precisa de la distribución de velocidades en una sección transversal del cauce. Su cálculo sirve para determinar los números de Froude y Reynolds, los cuales permiten caracterizar el régimen de flujo y diseñar adecuadamente las estructuras hidráulicas. Además, el coeficiente de distribución de velocidad facilita la validación y calibración de modelos computacionales, mejorando la precisión de las simulaciones hidrológicas. Al ajustar la velocidad media a las condiciones reales del cauce, se consigue una representación más fiel del comportamiento del flujo.

El coeficiente de distribución de velocidad se ha determinado en base al procedimiento presentado por Chow (1994) a partir de la **Ecuación 3-4** con base en las isotaquias obtenidas previamente. Para cada sección se ha determinado el área entre las diferentes isolíneas de velocidad correspondiente al parámetro ΔA de la expresión. Los coeficientes α ponen en evidencia la menor uniformidad de flujo en la sección del río culebrillas pese a que el caudal

máximo registrado fue mucho menor que para el caso de la sección del río Mazán, dicho cambio se atribuye a la presencia de flujos cruzados debido obstrucciones en el cauce.

MAZÁN				CULEBRILLAS			
Intervalo (m/s)		Área (m ²)	v ³ ΔA (m ⁵ /s ³)	Intervalo (m/s)		Área (m ²)	v ³ ΔA (m ⁵ /s ³)
0	0.2	0.60	0.00	0	0.1	0.34	0.0000
0.2	0.4	1.22	0.01	0.1	0.2	0.41	0.0000
0.4	0.6	1.45	0.09	0.2	0.3	0.44	0.0030
0.6	0.8	0.54	0.12	0.3	0.4	0.49	0.0130
0.8	1	0.25	0.13	0.4	0.5	0.27	0.0170
1	1.2	0.15	0.15	0.5	0.6	0.19	0.0230
1.2	1.4	0.03	0.05	0.6	0.7	0.12	0.0250
		Σv³ΔA (m⁵/s³)	0.55			Σv³ΔA (m⁵/s³)	0.0820
		V (m/s)	0.46			V (m/s)	0.2930
		A (m²)	4.23			A (m²)	2.3000
		V³A (m⁵/s³)	0.41			V³A (m⁵/s³)	0.0580
		α	1.32			α	1.43

Tabla 4-12. Resumen de cálculos para la obtención de coeficientes de velocidad. Fuente: elaboración propia.

4.5.3. Caracterización del régimen de flujo en la sección

La caracterización del régimen de flujo utilizando los números de Froude y Reynolds, es fundamental para entender y predecir el comportamiento hidráulico. Estos parámetros son producto del efecto combinado de la viscosidad y gravedad sobre el fluido y al requerirse una sección con flujo uniforme pueden resultar un indicativo de la calidad de la misma.

La caracterización de los regímenes de flujo se llevó a cabo en base a las ecuaciones **Ecuación 3-3** y **Ecuación 3-5**. El ángulo del fondo del cauce para el Río Culebrillas se consideró igual al del Río Mázan dado que no se realizó mediciones del mismo y este corresponde a 0.7% o 0.401°. El valor de viscosidad cinemática se aproximó en base a la temperatura media registrada en el Río Mazán y Río Culebrillas con valores de 12.79 y 13.83 °C respectivamente cuya viscosidad correspondiente es de aproximadamente 1.203e-6 y 1.17e-6m²/s. Finalmente, el número de Froude y número de Reynolds para cada caudal se presentan en la **Tabla 4-13**. Para todos los casos, al corresponder Fr a valores menores a la unidad se determina que el flujo es subcrítico como lo esperado, mientras que Re indica que es de tipo turbulento.

MAZÁN	Q (m ³ /s)	0.30	0.35	0.53	0.51	1.98	0.51	0.53
	Fr	0.09	0.10	0.10	0.10	0.14	0.10	0.09
	Re	161632	189005	217765	207529	590017	193152	194741
	Q (m ³ /s)	1.47	1.36	1.19	1.14	1.06	0.54	0.55

CULEBRILLAS	Fr	0.14	0.12	0.13	0.13	0.12	0.11	0.09
	Re	453557	422826	377508	361963	335906	186304	297978
	Q (m³/s)	0.04	0.03	0.05	0.05	0.23	0.24	0.67
	Fr	0.02	0.02	0.03	0.03	0.06	0.07	0.10
	Re	42771	42185	80204	77264	230591	231938	316203
	Q (m³/s)	0.70	0.42	0.41	0.64	0.61	0.49	0.45
	Fr	0.10	0.09	0.08	0.09	0.08	0.13	0.12
	Re	327976	214653	199469	294023	276331	229320	216723

Tabla 4-13. Resumen de parámetros de régimen de flujo para los caudales medidos.

4.6. Curvas de descarga

El ajuste de curvas de descarga, se realiza mediante la **Ecuación 3-10**, en donde sus parámetros se encuentran a partir de la linealización de la misma.

Las observaciones realizadas en la estación Mazán A.J. Matadero se ajustan también mediante la ecuación de Manning (ver **Ecuación 3-6**), en donde el radio hidráulico R es una función del nivel h y un parámetro de corrección C y la pendiente del canal S se considera como un valor constante. Los parámetros n' y b se determinan mediante la linealización de la ecuación y evaluación del modelo.

La pendiente de la superficie de agua resulta del promedio de dos mediciones de desnivel y longitud realizadas en campo dentro del tramo de control con nivel topográfico y cinta métrica por dos observadores. La **Tabla 4-14** presenta las lecturas realizadas en la mira graduada situada en el punto 1 y punto 2, así como la distancia entre ambos puntos en un eje horizontal. Bajo la hipótesis de una sección con flujo uniforme permanente se asume la pendiente de fondo S y la de la línea de energía son iguales a la de la superficie de agua, a fin de emplear la ecuación de Manning para el modelo predictivo.

No.	Altura en Punto 1 H_1 (m)	Altura en Punto 2 H_2 (m)	Distancia L (m)	Pendiente S_i	Pendiente media S (%)
1	1.5730	1.6550	11.37	0.0007	0.7
2	1.5740	1.6590	11.37	0.0007	

Tabla 4-14. Pendiente del tramo de control de la Estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, para la estación Culebrillas A.J. Matadero se realiza un primer análisis con todos los datos recolectados refiriéndose a un modelo de ajuste I, y un segundo análisis omitiendo las dos últimas observaciones correspondiendo a un modelo de ajuste II, ambos siguiendo la forma de la **Ecuación 3-10**.

4.6.1. Mazán A.J. Matadero

El resultado del modelo predictivo I de la **Ecuación 3-10**, se indica en la **Tabla 4-15**, junto con sus parámetros, coeficiente de determinación y desviación estándar de los residuos. La evaluación del modelo de regresión lineal se realiza a las variables transformadas con la inspección de sus gráficas de diagnóstico y aplicación de las pruebas estadísticas para los supuestos de normalidad, varianza constante y no autocorrelación de los residuos.

Parámetro	Valor
A	1.5992
B	4.6873
C	0.2467
Ecuación de ajuste	$\ln(Q) = 4.69 \ln(h+0.25) + \ln(1.59)$
Coeficiente de determinación R^2	0.9746
Desviación estándar de los residuales S	0.0965
Varianza de los residuales σ^2	0.0093
Curva de descarga	$Q = 1.59 (h + 0.25)^{4.69}$

Tabla 4-15. Parámetros de ajuste, ecuación de ajuste, coeficiente de determinación y desviación estándar de los residuales del modelo linealizado para curva de descarga de la forma $Q = A (h + C)^B$, para nivel h en m y caudal Q en m^3/s para Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

Las gráficas de diagnóstico se presentan en la **Figura 4-22**. La relación entre los residuales del ajuste realizado a las variables transformadas respecto al caudal observado y al caudal ajustado no presentan patrones distinguibles sugiriendo que los residuales se producen de manera aleatoria. Mientras que la **Figura 4-22 (d)** permite identificar si existe autocorrelación de los residuales al ser colocados en secuencia de observación, en donde al observar una posible tendencia, es necesario verificar el resultado de la prueba estadística Durbin Watson. En la **Figura 4-22 (c)** se aprecia que no existe gran dispersión de los puntos respecto a la línea diagonal que indica igualdad entre valores observados y predichos, sugiriendo que el modelo captura la relación entre las variables, con mayor cercanía para caudales relativamente bajos. El gráfico de probabilidad Normal de los residuos de la **Figura 4-22 (e)** expone la cercanía de los puntos a la línea de distribución Normal, lo que sugiere que se cumple el supuesto de normalidad de los residuos.

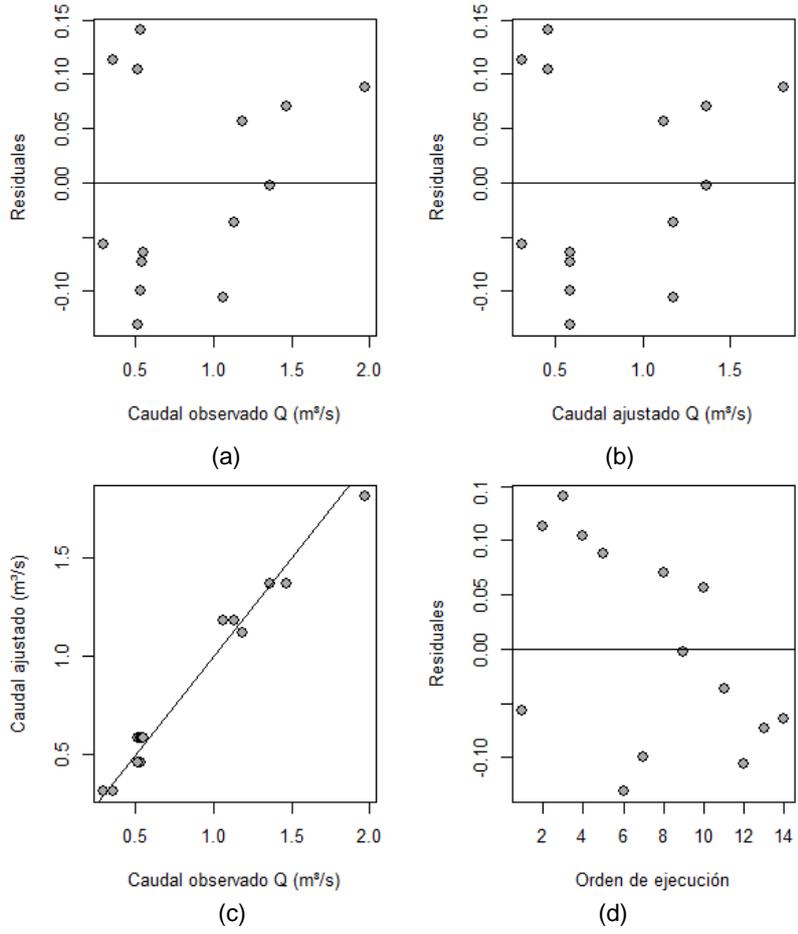


Gráfico de probabilidad Normal de los residuos Estación Mazán A.J. Matadero

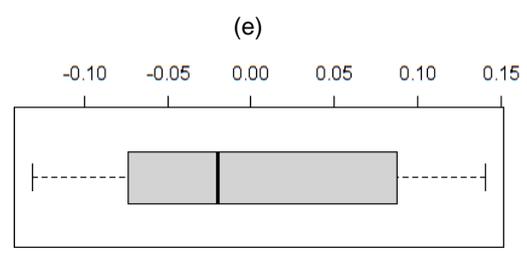
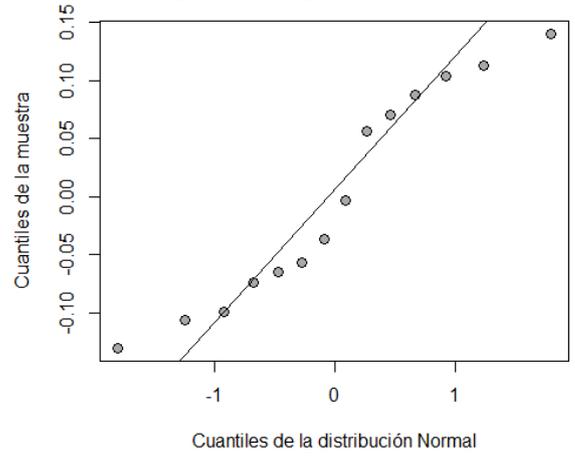


Figura 4-22. Gráficas de diagnóstico del modelo de ajuste de la forma $\ln(Q) = B \ln(h+C) + \ln(A)$ para la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

Al aplicar las pruebas estadísticas para comprobación del modelo linealizado se asegura el cumplimiento de los supuestos de normalidad, no autocorrelación y varianza constante de los residuos, indicando que los coeficientes A, B y C de la curva de descarga son estadísticamente representativos.

No.	Prueba estadística	Hipótesis nula H_0	Nivel de significancia	p-value
1	Shapiro - Wilk	Los datos siguen distribución normal	$\alpha = 0.05$	0.2011
2	Durbin - Watson	No hay autocorrelación en los residuos	$\alpha = 0.05$	0.0700
3	Breusch - Pagan	La varianza de los residuos es constante	$\alpha = 0.05$	0.1133

Tabla 4-16. Pruebas estadísticas para comprobación del modelo de ajuste de la forma $\ln(Q) = B \ln(h+C) + \ln(A)$ para la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

La **Tabla 4-17** indica las observaciones realizadas de nivel y caudal de acuerdo a su magnitud, así como los valores predichos y desviación estándar de los residuos. En este caso la máxima sobreestimación de la curva de descarga es de 118.5l/s correspondiendo a un nivel de 0.69m, mientras que la máxima subestimación es de 165.8l/s para el nivel más alto de 0.78m, siendo en ambos casos valores de magnitud significativa respecto a las observaciones.

No.	h (m)	$Q_{\text{observado}}$ (m^3/s)	Q_{ajustado} (m^3/s)	$Q_{\text{observado}} - Q_{\text{ajustado}}$ (m^3/s)
1	0.46	0.297	0.3144	-0.0174
2	0.46	0.352	0.3144	0.0376
3	0.52	0.511	0.4606	0.0504
4	0.56	0.513	0.5846	-0.0716
5	0.56	0.529	0.5846	-0.0556
6	0.52	0.530	0.4606	0.0694
7	0.56	0.543	0.5846	-0.0416
8	0.56	0.548	0.5846	-0.0366
9	0.69	1.059	1.1775	-0.1185
10	0.69	1.135	1.1775	-0.0425
11	0.68	1.185	1.1198	0.0652
12	0.72	1.3607	1.3650	-0.0044
13	0.72	1.4649	1.3650	0.0999
14	0.78	1.976	1.8102	0.1658
Desviación estándar de los errores (m^3/s)				0.0771

Tabla 4-17. Registros de nivel y caudal en aforos realizados, caudal ajustado mediante la curva de descarga $Q = 4.60 (h - 0.21)^{2.18}$ para h en m y Q en m^3/s , residuales y desviación estándar de los errores para la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

La curva de descarga obtenida a partir del modelo de regresión lineal y sus intervalos de confianza del 95% determinados con la herramienta de análisis de datos RStudio se presentan en la **Figura 4-23**. Los rangos de los intervalos se ensanchan a medida que

incrementa el nivel h , indicando que existe mayor incertidumbre para predicciones de caudales altos. Además, se aprecia los registros reales respecto a la curva de descarga, y aquellos que se encuentran fuera de las bandas de confianza.

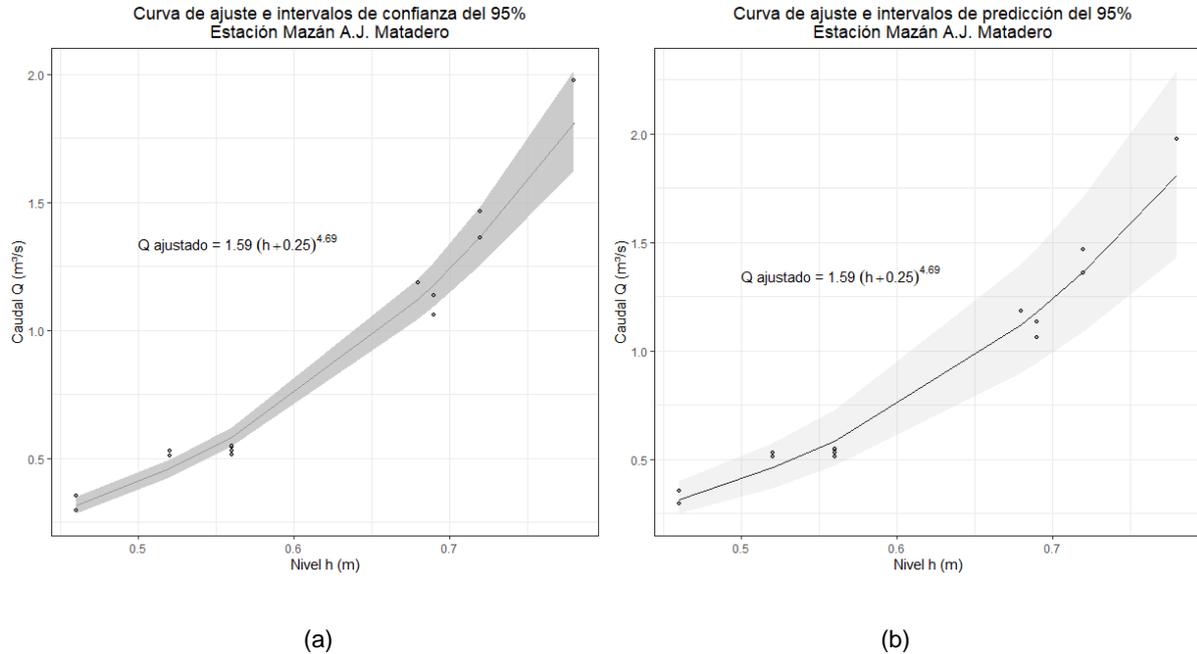


Figura 4-23. Registros de aforo, curva de descarga para h en m y Q en m^3/s , (a) intervalos de confianza de 95% para la media y (b) intervalos de predicción de 95% para una observación predicha para estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

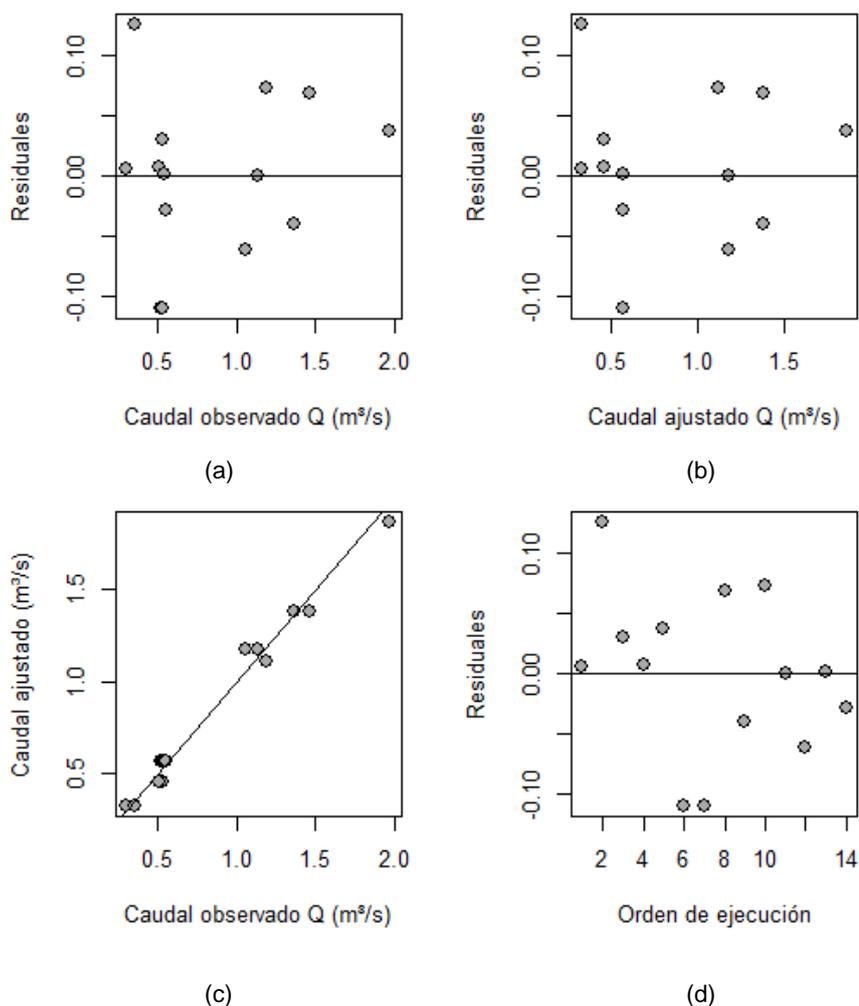
Por otro lado, el modelo predictivo II resultado de realizar un ajuste a la ecuación de Manning ($Q = \frac{A}{n} R^{\frac{2}{3}+b} S^{\frac{1}{2}}$) se presenta en la **Tabla 4-18**. El número de parámetros a determinar es tres, correspondiendo a un coeficiente de rugosidad equivalente n' , al exponente del radio hidráulico, y a un parámetro de ajuste C asociado al nivel. Los dos primeros son resultantes de la relación presentada en la **Ecuación 3-14** mientras que el tercero se obtiene de un ajuste a las ecuaciones que asocian la superficie y perímetro mojado respecto al valor del nivel corregido. Para ajustar la ecuación de Manning se utilizó las velocidades medias registradas y la aplicación de la ecuación de continuidad $Q=A \cdot v$.

Parámetro	Valor
n'	0.0559
b	0.5118
C	-0.6524
$A = f(h+C)$	$A = 11.319 (h+C)^2 + 0.3291 (h+C) + 2.8221$
$P = f(h+C)$	$P = 14.439 (h+C) + 9.9267$
Ecuación de ajuste	$\ln(v) = (2/3+b) \ln(A/P) + \ln\left(\frac{S^{1/2}}{n'}\right)$

Coefficiente de determinación R^2	0.9173
Desviación estándar de los residuales S	0.0693
Varianza de los residuales σ^2	0.0048
Curva de descarga	$Q = \frac{A}{0.056} R^{2+0.51} (S)^{\frac{1}{2}}$

Tabla 4-18. Parámetros de ajuste, ecuación de ajuste, coeficiente de determinación y desviación estándar de los residuales del modelo linealizado para curva de descarga de la forma $Q = \frac{A}{n^b} (R)^{2+b} S^{\frac{1}{2}}$, para nivel h en m y caudal Q en m^3/s para Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

El análisis del modelo de ajuste, se realiza de igual manera a los residuales de las variables transformadas. Las gráficas de diagnóstico se exponen en la **Figura 4-24**. Se observa la aleatoriedad de los residuales en las gráficas respecto a caudal observado, ajustado y orden de ejecución. El gráfico de probabilidad normal de los residuos se aproxima al tipo de distribución.



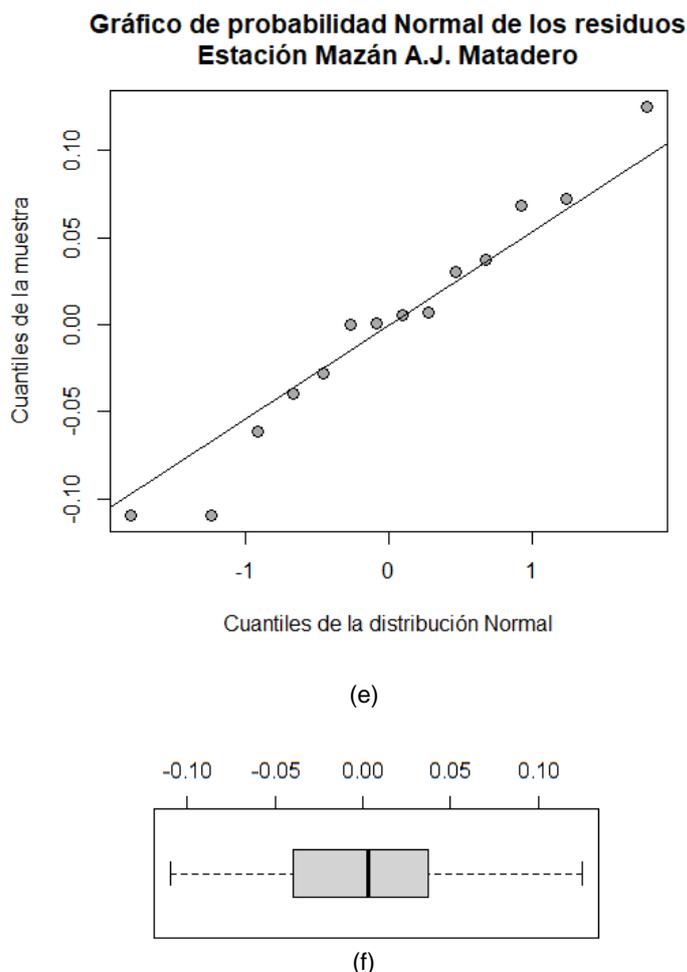


Figura 4-24. Gráficas de diagnóstico del modelo de ajuste de la forma $\ln(v) = (2/3+b)\ln(A/P) + \ln(\frac{S^{1/2}}{n^r})$ para la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas estadísticas de la **Tabla 4-19** comprueban el modelo de ajuste al confirmar los supuestos de distribución normal, no autocorrelación y varianza constante de los residuos.

No.	Prueba estadística	Hipótesis nula H_0	Nivel de significancia	p-value
1	Shapiro - Wilk	Los datos siguen distribución normal	$\alpha = 0.05$	0.8575
2	Durbin - Watson	No hay autocorrelación en los residuos	$\alpha = 0.05$	0.9060
3	Breusch - Pagan	La varianza de los residuos es constante	$\alpha = 0.05$	0.3431

Tabla 4-19. Pruebas estadísticas para comprobación del modelo de ajuste de la forma $\ln(v) = (2/3+b)\ln(A/P) + \ln(\frac{S^{1/2}}{n^r})$ para la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

Los caudales observados y ajustados en orden de magnitud y la diferencia entre estos se presenta en la **Tabla 4-20**. La máxima subestimación es de 112l/s del nivel de 0.78m correspondiendo al mismo nivel y menor magnitud que el caso de ajuste indicado en la **Tabla 4-17**, mientras que la máxima sobrestimación es de 117l/s relacionado al nivel de 0.69m, el

cual se aproxima al valor de 118l/s en 0.69m del ajuste previo. Lo que indica los posibles valores que más se alejan en magnitud de la curva de descarga resultante.

No.	h (m)	Q _{observado} (m ³ /s)	Q _{ajustado} (m ³ /s)	Q _{observado} -Q _{ajustado} (m ³ /s)
1	0.46	0.297	0.329	-0.0320
2	0.46	0.352	0.329	0.0230
3	0.52	0.511	0.455	0.0560
4	0.56	0.513	0.571	-0.0580
5	0.56	0.529	0.571	-0.0420
6	0.52	0.530	0.455	0.0750
7	0.56	0.543	0.571	-0.0280
8	0.56	0.548	0.571	-0.0230
9	0.69	1.059	1.176	-0.1170
10	0.69	1.135	1.176	-0.0410
11	0.68	1.185	1.115	0.0700
12	0.72	1.3607	1.377	-0.0170
13	0.72	1.4649	1.377	0.0880
14	0.78	1.976	1.864	0.1120
Desviación estándar de los errores (m³/s)				0.0663

Tabla 4-20. Registros de nivel y caudal en aforos realizados, caudal ajustado mediante la curva de descarga $Q = \frac{A}{0.056} R^{2/3+0.51} S^{1/2}$ para h en m y Q en m³/s, residuales y desviación estándar de los errores para la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

La curva de descarga e intervalos de confianza de 95% para la media, así como los intervalos de predicción de 95% de una observación se indican en la **Figura 4-25**. Al comparar gráficamente con la **Figura 4-23** se observa respecto al ajuste previo las franjas son más estrechas indicando el rango estimado en el cual se espera que se encuentre el caudal real.

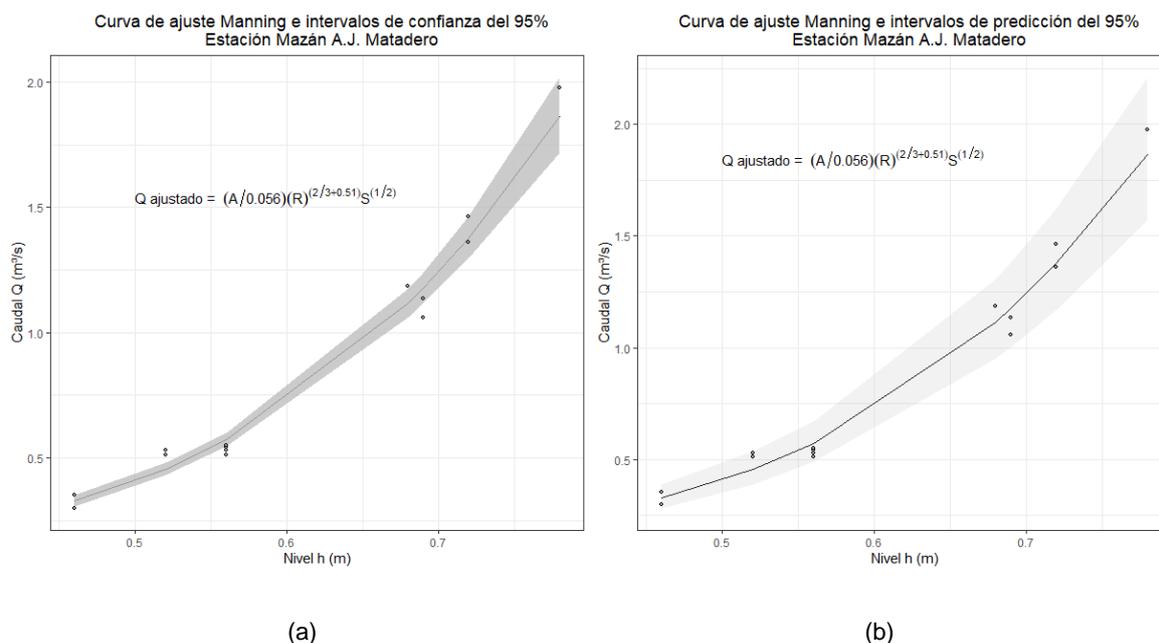


Figura 4-25. Registros de aforo, curva de descarga por Manning para h en m y Q en m^3/s , (a) intervalos de confianza de 95% para la media y (b) intervalos de predicción de 95% para una observación predicha para estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la comparativa gráfica entre curvas de descarga en un rango de 0.3 a $2m^3/s$ se presenta en la **Figura 4-26**. Las observaciones directas se contrarestan con las relaciones empíricas de nivel y caudal, en donde la curva del ajuste mediante la ecuación de Manning tiende a incrementarse más rápido y a decrementar más lento.

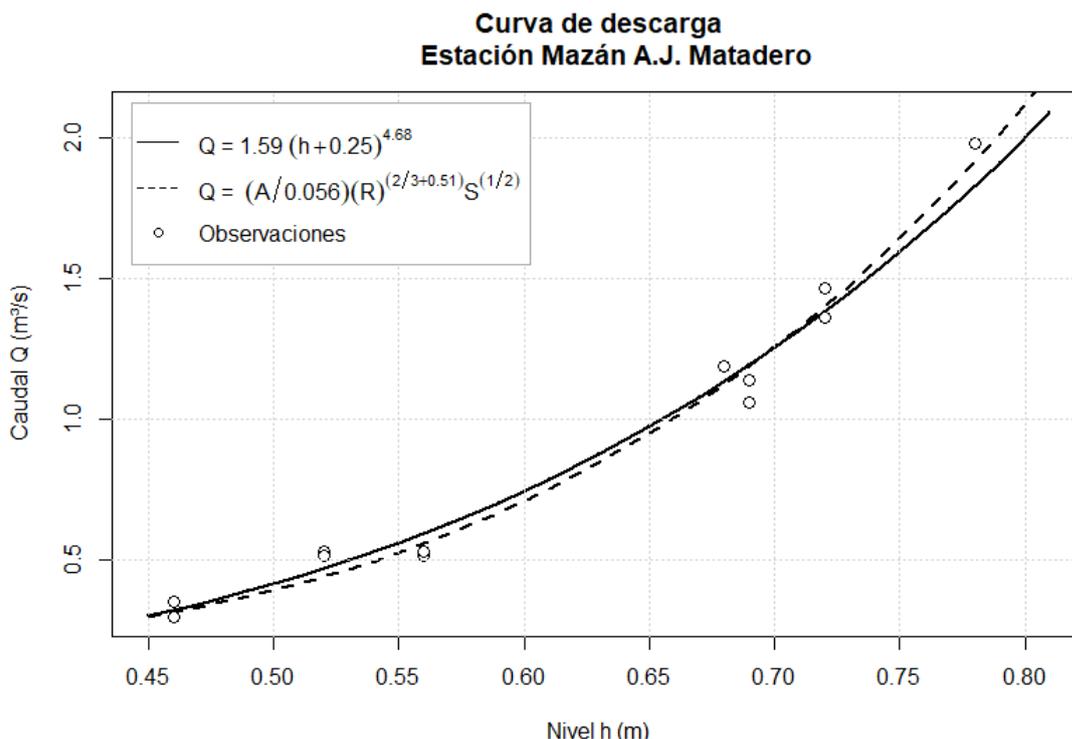


Figura 4-26. Curvas de descarga obtenidas a partir del ajuste tipo $\ln(Q) = B \ln(h+C) + \ln(A)$ (línea continua) y $(2/3+b)\ln(A/P) + \ln(\frac{S^{1/2}}{n})$ (línea entrecortada), para nivel h en m y caudal Q en l/s de la Estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

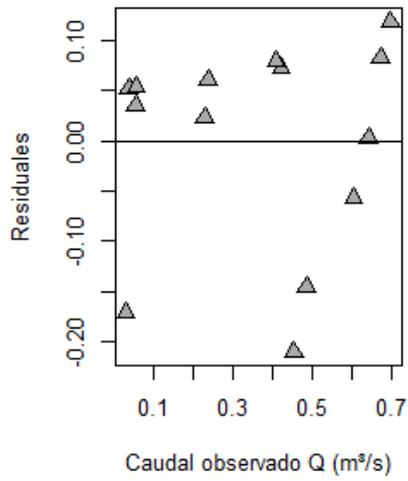
4.6.2. Culebrillas A.J. Matadero

El resultado de los modelos de ajuste de acuerdo a la **Ecuación 3-10** con todas las observaciones (I) y omitiendo los dos últimos aforos (II) se indica en la **Tabla 4-21**, junto con sus parámetros, coeficiente de determinación y desviación estándar de los residuos del modelo linealizado. En ambos casos presentan un coeficiente de determinación cercano a la unidad, siendo mayor para el modelo II y presentando a su vez una menor desviación estándar de los residuales. En primer lugar, se valida el modelo de regresión lineal que toma en cuenta todos los datos con las gráficas de diagnóstico y la aplicación de las pruebas estadísticas aplicadas a los residuos para verificar los supuestos de normalidad, varianza constante y falta de autocorrelación.

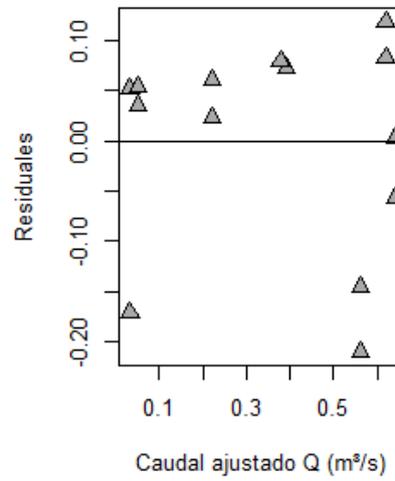
Parámetro	Ajuste modelo I	Ajuste modelo II
A	5.7340	4.6014
B	3.4597	2.1833
C	-0.0893	-0.2147
Ecuación de ajuste	$\ln(Q) = 3.46 \ln(h-0.09) + \ln(5.73)$	$\ln(Q) = 2.18 \ln(h-0.21) + \ln(4.60)$
Coefficiente de determinación R^2	0.9923	0.9961
Desviación estándar de los residuales S	0.1087	0.0819
Varianza de los residuales σ^2	0.0118	0.0066
Curva de descarga	$Q = 5.73 (h - 0.09)^{3.46}$	$Q = 4.60 (h - 0.21)^{2.18}$

Tabla 4-21. Parámetros de ajuste, ecuación de ajuste, coeficiente de determinación y desviación estándar de los residuales del modelo linealizado a partir de 14 observaciones (modelo I), y 12 observaciones (modelo II) para curva de descarga de la forma $Q = A (h + C)^B$, para nivel h en m y caudal Q en m^3/s de la Estación Culebrillas A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

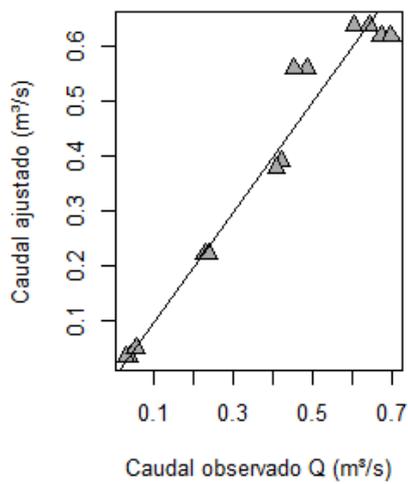
Las gráficas de diagnóstico del modelo de regresión lineal (I) se presentan en la **Figura 4-27**. Los gráficos de residuos respecto a valores observados y ajustados (ver **Figura 4-27 (a)** y **(b)**) se encuentran mayormente distribuidos en la parte superior del eje horizontal, sin embargo, no hay evidencia de un patrón específico que implique no aleatoriedad. Por otra parte, la **Figura 4-27 (d)** en donde se presentan los residuales en orden de observación indica un patrón curvilíneo, dando a interpretación que existe autocorrelación entre los residuos, indicando que existe una dependencia temporal de los residuos y sugiere otro modelo de ajuste. La **Figura 4-27 (c)** de caudal ajustado respecto a observado se presentan cercanos a la línea diagonal a excepción de las observaciones de $0.485m^3/s$ y $0.454m^3/s$ referentes a los dos últimos aforos con valores de ajustados superiores a los $0.500m^3/s$. El gráfico de probabilidad normal de los residuos presenta colas pesadas hacia la izquierda, lo que indica que los cuantiles bajos de los residuales se alejan levemente de la distribución normal, este aspecto puede apreciarse también en el boxplot de la **Figura 4-27 (f)** en donde la concentración de valores de los residuales está al lado derecho, además de que la línea que indica la mediana se encuentra relativamente alejada de cero como indicio de sesgo sistemático de los residuos. Por otro lado, el diagrama de caja de los residuos no tiene valores atípicos o datos inusuales en el registro.



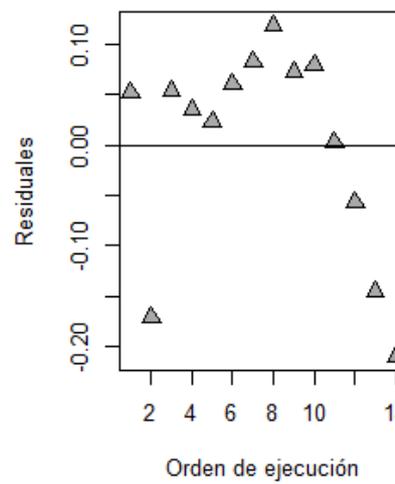
(a)



(b)

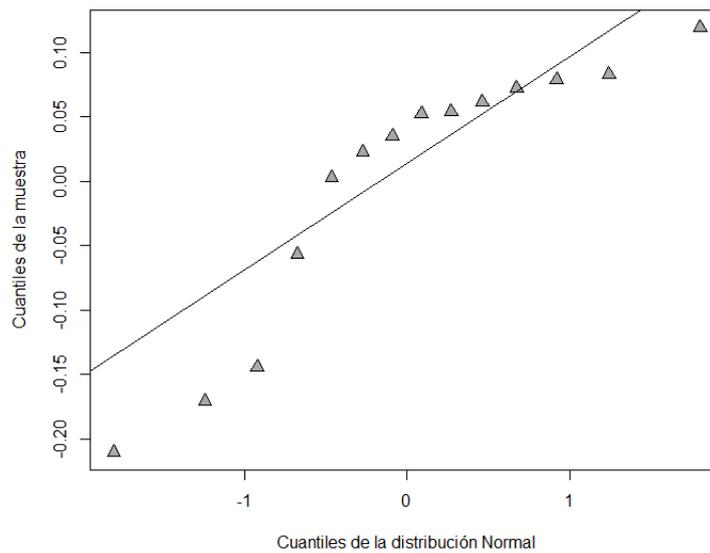


(c)

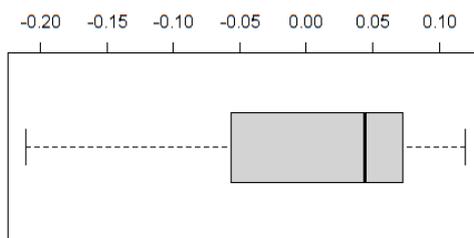


(d)

**Gráfico de probabilidad Normal de los residuos
Estación Culebrillas A.J. Matadero**



(e)



(f)

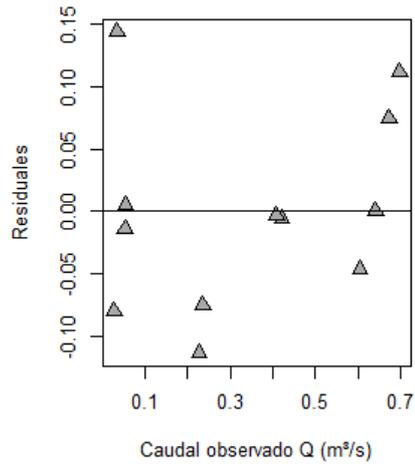
Figura 4-27. Gráficas de diagnóstico del modelo de ajuste (I) de la forma $\ln(Q) = B \ln(h+C) + \ln(A)$ para la estación Culebrillas A.J. Matadero a partir de 14 aforos. Fuente: Elaboración propia.

Al aplicar las pruebas estadísticas al modelo (I) se evidencia el cumplimiento de los supuestos de distribución normal y varianza constante en los residuos, sin embargo, hay autocorrelación en los residuos, indicando que los residuos dependen del orden de observación requiriendo una mejora en la propuesta de curva de descarga.

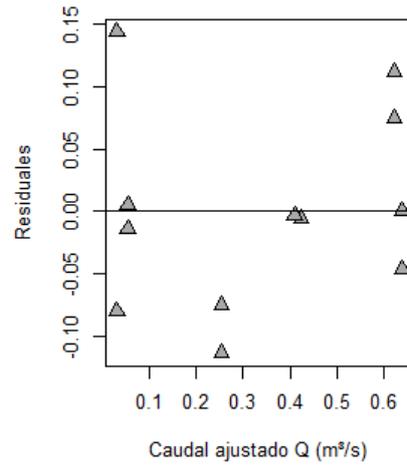
No.	Prueba estadística	Hipótesis nula H_0	Nivel de significancia	p-value (I)
1	Shapiro - Wilk	Los datos siguen distribución normal	$\alpha = 0.05$	0.2214
2	Durbin - Watson	No hay autocorrelación en los residuos	$\alpha = 0.05$	0.0120
3	Breusch - Pagan	La varianza de los residuos es constante	$\alpha = 0.05$	0.3635

Tabla 4-22. Pruebas estadísticas para comprobación del modelo de ajuste (I) de la forma $\ln(Q) = B \ln(h+C) + \ln(A)$ para la estación Culebrillas A.J. Matadero a partir de 14 aforos. Fuente: Elaboración propia.

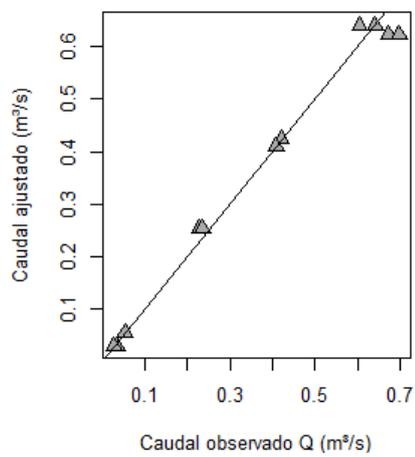
Las gráficas de diagnóstico del modelo de regresión lineal (II) realizado con 12 aforos, eliminando las dos últimas observaciones se indican en **Figura 4-28**. En este caso las gráficas de residuales respecto a caudales observados y predichos presentan mayor agrupación bajo el eje, hacia los residuales negativos que indican que el valor ajustado es mayor al observado, además de tener varios puntos concentrados alrededor del eje representando residuales bajos cercanos a cero. Por otro lado, no se evidencia patrones específicos que puedan indicar varianza no constante de los residuos. La **Figura 4-28 (d)** de residuales en orden de observación presenta aleatoriedad a comparación de la **Figura 4-27 (d)** del modelo (I), indicando un modelo más apropiado. En el gráfico de caudales ajustado respecto a valores observados, estos se encuentran muy cercanos a la diagonal que indica igualdad, sugiriendo que la ecuación de curva de descarga representa adecuadamente las observaciones. En lo referente a la normalidad de los residuos la **Figura 4-28 (e)** y **(f)** permiten interpretar que valores correspondientes a los cuantiles altos se alejan levemente de la distribución normal. Por otro lado, la centralidad de los residuos se visualiza mediante la línea cercana a cero del diagrama de caja indicando que no existe sesgo sistemático en los residuos, sin embargo, existe una leve asimetría en la caja y no se tiene simetría en los bigotes con tendencia a ser largo hacia la derecha en donde se encuentran los residuales positivos.



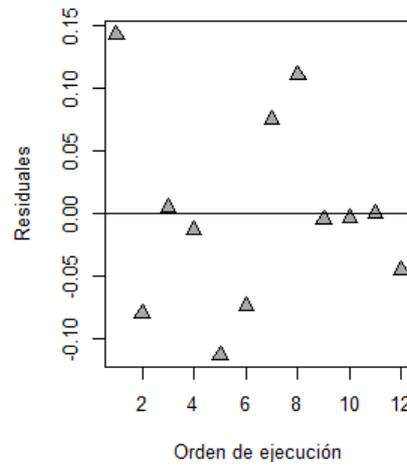
(a)



(b)

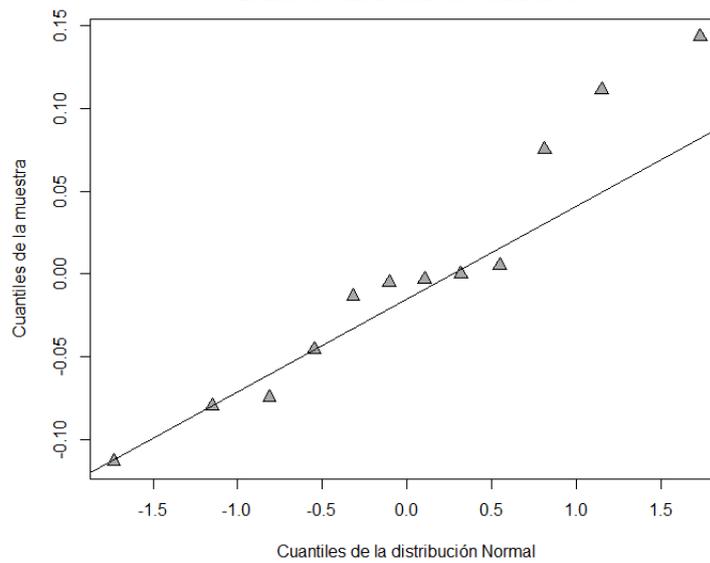


(c)

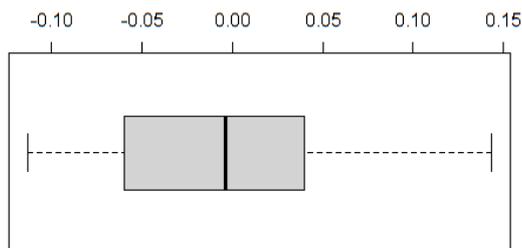


(d)

**Gráfico de probabilidad Normal de los residuos
Estación Culebrillas A.J. Matadero**



(e)



(f)

Figura 4-28. Gráficas de diagnóstico del modelo de ajuste (II) de la forma $\ln(Q) = B \ln(h+C) + \ln(A)$ para la estación Culebrillas A.J. Matadero a partir de 12 aforos. Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas estadísticas aplicadas al modelo de regresión lineal (II), comprueban los supuestos de distribución normal, no existencia de autocorrelación y varianza constante de los residuos, validando el modelo de ajuste para la curva de descarga con 12 observaciones.

No.	Prueba estadística	Hipótesis nula H_0	Nivel de significancia	p-value (II)
1	Shapiro - Wilk	Los datos siguen distribución normal	$\alpha = 0.05$	0.5045
2	Durbin - Watson	No hay autocorrelación en los residuos	$\alpha = 0.05$	0.3280
3	Breusch - Pagan	La varianza de los residuos es constante	$\alpha = 0.05$	0.3532

Tabla 4-23. Pruebas estadísticas para comprobación del modelo de ajuste (II) de la forma $\ln(Q) = B \ln(h+C) + \ln(A)$ para la estación Culebrillas A.J. Matadero a partir de 12 aforos. Fuente: Elaboración propia.

La **Tabla 4-24** indica las observaciones realizadas de caudal y nivel en orden de magnitud, así como los valores resultantes del modelo adoptado de ajuste, además de la desviación estándar de los residuos. La máxima sobreestimación de caudal es de 35.5l/s para el mayor nivel de 0.62m, mientras que la máxima subestimación corresponde a 75.0l/s correspondiendo al valor de nivel de 0.615m. Para caudales bajos considerados hasta el registro No. 4, se tiene un residual máximo de 4.7l/s, evidenciando que los errores de predicción se reducen en niveles relativamente bajos.

No.	h (m)	$Q_{\text{observado}}$ (m³/s)	Q_{ajustado} (m³/s)	$Q_{\text{observado}} - Q_{\text{ajustado}}$ (m³/s)
1	0.315	0.028	0.0303	0.0047
2	0.315	0.035	0.0303	-0.0023
3	0.345	0.053	0.0537	0.0003
4	0.345	0.054	0.0537	-0.0007
5	0.480	0.227	0.2539	-0.0269
6	0.480	0.236	0.2539	-0.0179
7	0.615	0.409	0.6233	0.0500
8	0.615	0.422	0.6233	0.0750
9	0.550	0.6049	0.4233	-0.0013
10	0.545	0.642	0.4097	-0.0007
11	0.620	0.67331	0.6404	0.0016

12	0.620	0.6983	0.6404	-0.0355
Desviación estándar de los errores (m³/s)				0.0305

Tabla 4-24. Registros de nivel y caudal en aforos realizados, caudal ajustado mediante la curva de descarga $Q = 4.60 (h - 0.21)^{2.18}$ para h en m y Q en m^3/s , residuales y desviación estándar de los residuos para la estación Culebrillas A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

La curva de descarga adoptada se presenta en la **Figura 4-29** con intervalos de confianza del 95%. El rango de niveles bajos presenta los márgenes de los intervalos de confianza más estrechos por lo que indica mayor precisión en las estimaciones de caudal y se ensanchan conforme el nivel es mayor, incrementando también la incertidumbre en las predicciones. Así también, los valores observados se encuentran más alejados de la curva de ajuste en los niveles máximos a comparación de las observaciones en niveles mínimos.

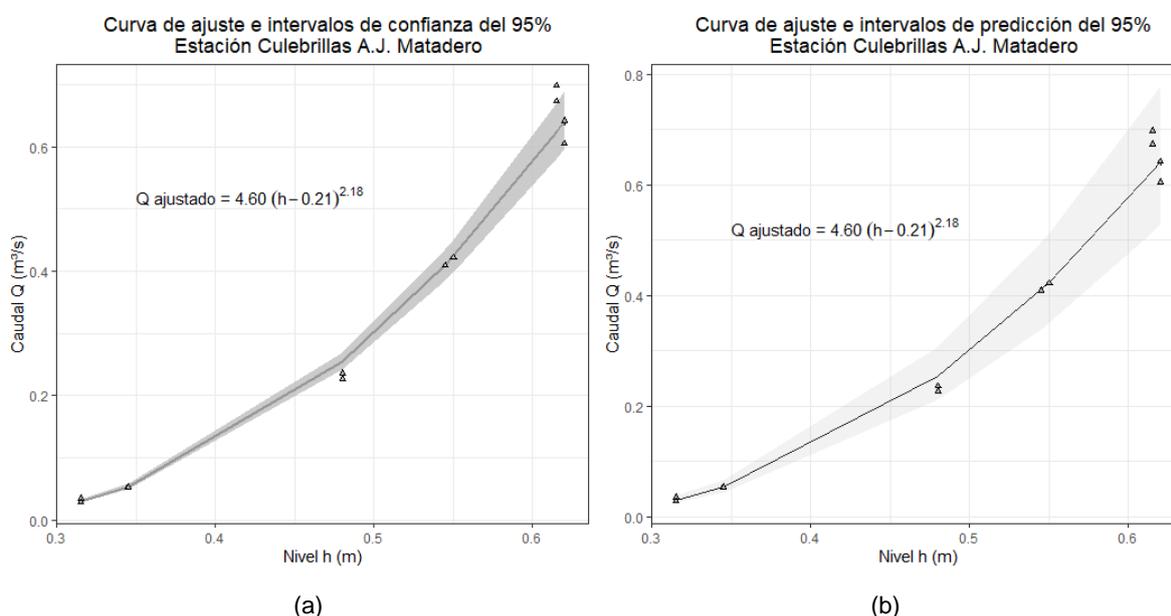


Figura 4-29. Registros de aforo, curva de descarga para h en m y Q en m^3/s , (a) intervalos de confianza de 95% para la media y (b) intervalos de predicción de 95% para una observación predicha para estación Culebrillas A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

4.7. Información complementaria

4.7.1. Mazán A.J. Tomebamba

Los registros de caudal y nivel de la estación limnigráfica Mazán A.J. Tomebamba recolectados cada cinco minutos fueron proporcionados por la Empresa Pública ETAPA desde la fecha 1 de octubre de 2023 hasta el 30 de abril de 2024 que corresponden a los meses de aforos. La **Figura 4-30** muestra los registros de caudal a través del tiempo, en donde se presentan picos de magnitud irreal en ciertas épocas del año, dando indicios de una incorrecta aplicación de la relación nivel-caudal. Por otro lado, la **Figura 4-31** representa la

tendencia exponencial de la curva de descarga de la cual se identifica la sensibilidad del caudal respecto al nivel medido en centímetros, con un crecimiento pronunciado especialmente en valores superiores a 250cm.

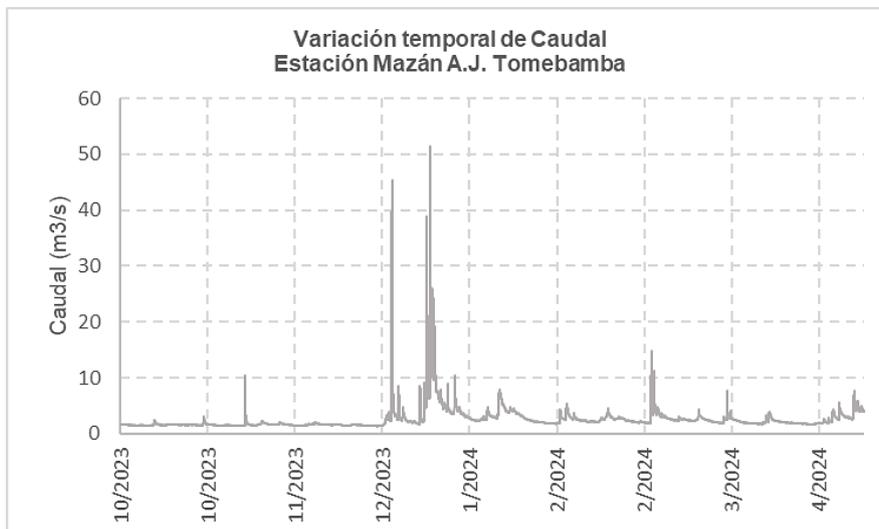


Figura 4-30. Variación temporal de caudal en m³/s de la estación limnigráfica Mazán A.J. Tomebamba de ETAPA EP desde octubre de 2023 a abril de 2024. Fuente: Elaboración propia.

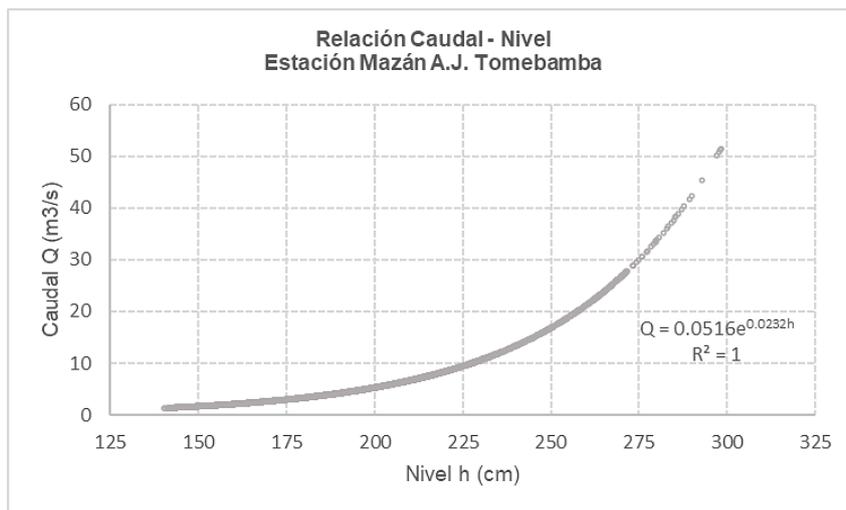


Figura 4-31. Relación caudal en m³/s respecto a nivel en cm de la estación limnigráfica Mazán A.J. Tomebamba de ETAPA EP. Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis de los datos, se ha realizado una selección de los valores correspondientes a las fechas y hora en las que se ejecutó cada aforo (ver [Anexo C: Registros de caudal y nivel de Estación limnigráfica Mazán A.J. Tomebamba](#)). De las cuales, se ha tomado el valor de la hora aproximada al final de cada medición de caudal y nivel (ver [Tabla 4-25](#)). La representación gráfica tanto de los aforos ejecutados como de los registros obtenidos se presenta en la **Figura 4-32**, en donde se evidencia la variación de las lecturas de nivel desde otro punto referencial y, asimismo, las diferencias de magnitud de caudal.

No.	Nivel Observado h (m)	Caudal Observado Q (m ³ /s)	Fecha y hora corregida	Nivel ETAPA EP (m)	Caudal ETAPA EP (m ³ /s)	Fecha y hora ETAPA EP
1	0.46	0.297	31/10/2023 10:47	1.4657	1.54	31/10/2023 10:45
2	0.46	0.352	31/10/2023 11:17	1.4601	1.52	31/10/2023 11:15
3	0.52	0.53	14/11/2023 10:23	1.4859	1.61	14/11/2023 10:20
4	0.52	0.511	14/11/2023 11:09	1.4835	1.6	14/11/2023 11:05
5	0.78	1.976	20/12/2023 15:02	1.6540	2.38	20/12/2023 15:00
6	0.56	0.513	30/1/2024 10:33	1.5662	1.94	30/1/2024 10:30
7	0.56	0.529	30/1/2024 11:25	1.5688	1.95	30/1/2024 11:25
8	0.72	1.46489	7/2/2024 10:28	1.7081	2.69	7/2/2024 10:25
9	0.72	1.36068	7/2/2024 11:22	1.7041	2.67	7/2/2024 11:20
10	0.68	1.185	9/2/2024 10:23	1.6728	2.48	9/2/2024 10:20
11	0.69	1.135	9/2/2024 11:12	1.6688	2.46	9/2/2024 11:10
12	0.69	1.059	6/3/2024 10:30	1.6973	2.63	6/3/2024 10:30
13	0.56	0.543	9/4/2024 10:32	1.5693	1.95	9/4/2024 10:30
14	0.56	0.548	9/4/2024 11:06	1.5674	1.94	9/4/2024 11:05

Tabla 4-25. Valores observados y registros de nivel en m y caudal en m³/s de la Estación limnigráfica Mazán A.J. Tomebamba de propiedad municipal en el horario de los aforos experimentales. Fuente: Elaboración propia.

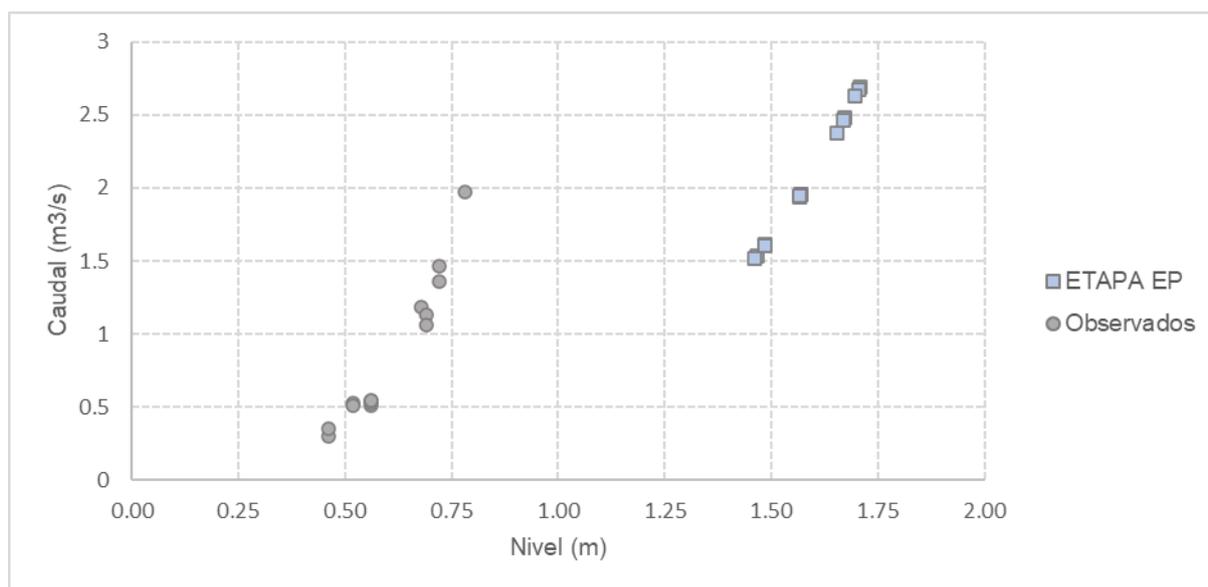


Figura 4-32. Relación de caudal-nivel de los registros de ETAPA EP y aforos realizados en la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

La comparación de registros de nivel se presenta en la **Figura 4-33**. La ecuación indica la relación entre el nivel observado en la regleta y valor registrado por el equipo de medición de ETAPA EP, con un desfase aproximadamente de un metro y una variación del nivel de etapa del 85% por cada unidad del valor observado.

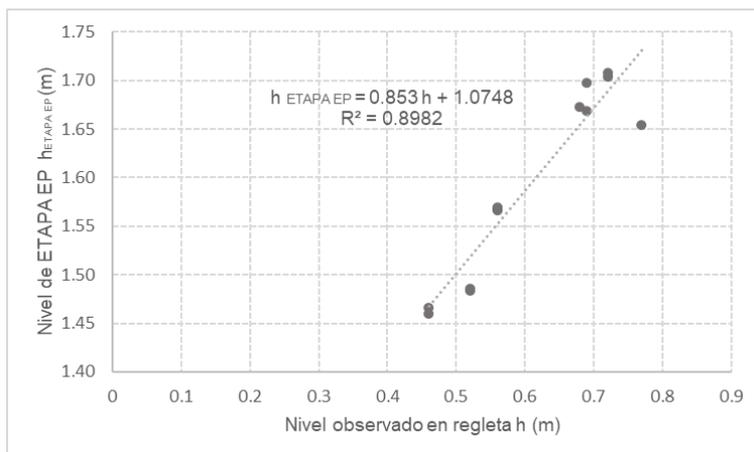


Figura 4-33. Relación entre nivel de la estación ETAPA EP y el valor observado en regleta.
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la comparativa es que en todos los casos la estimación del caudal mediante las curvas de descarga, así como las observaciones son menores a los datos proporcionados por la estación. En donde el valor que más se acerca a la diagonal que representa igualdad de caudales es la observación alrededor de los 2m³/s, sin este dato la relación entre datos tiende a ser lineal.

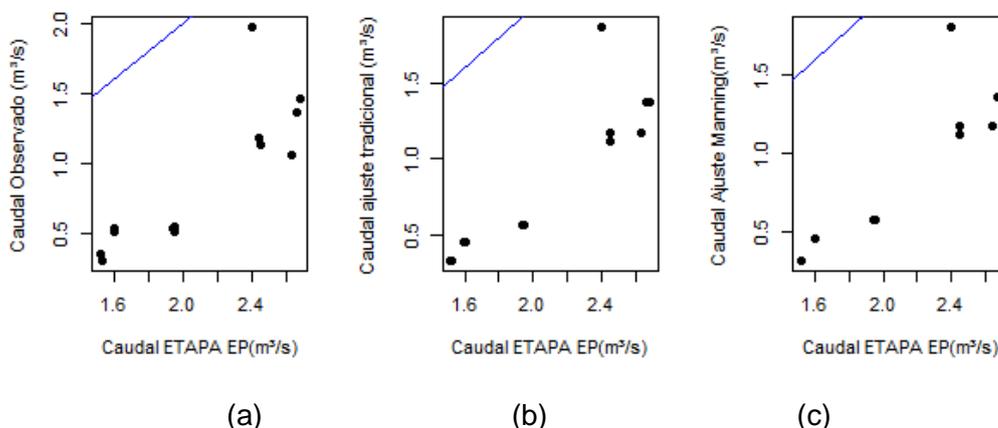


Figura 4-34. Gráficas de caudal (a) observado, (b) ajustado mediante método tradicional y (c) ajustado mediante ecuación de Manning respecto al caudal de la Estación limnigráfica proporcionado por ETAPA EP. Fuente: Elaboración Propia.

La comparativa de caudales observados y caudales de los registros de ETAPA recolectados en las distintas fechas y horas aproximadas de aforo expuestos en la **Tabla 4-25** se presentan en la **Figura 4-35**. En esta se visualiza la diferencia de magnitud sobreestimada de los registros predichos.

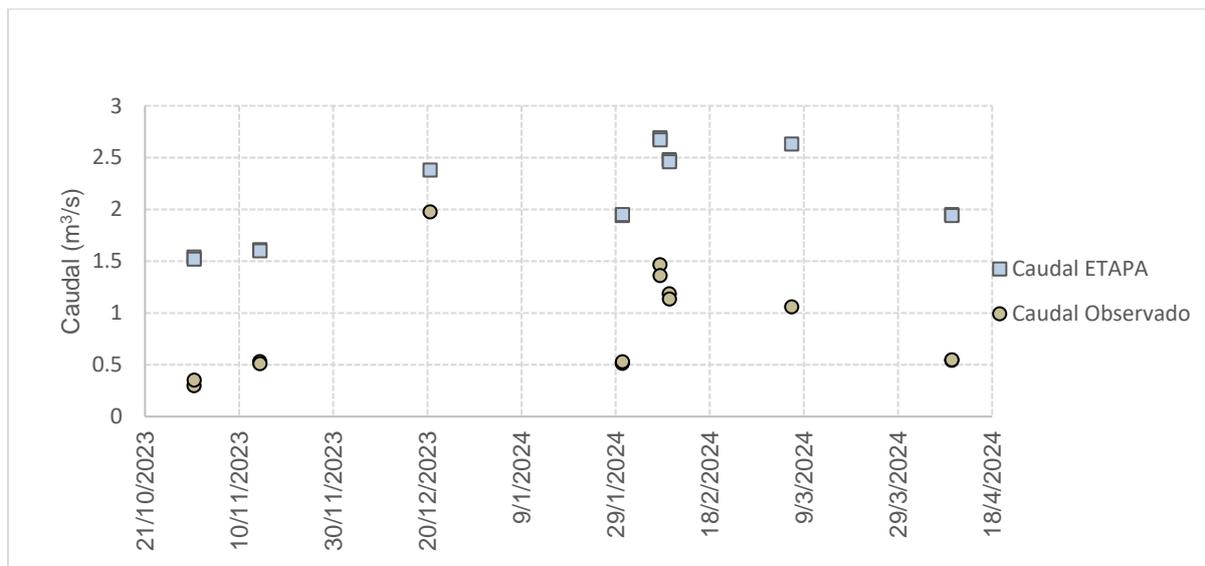


Figura 4-35. Caudal de ETAPA y caudal observado temporalmente. Fuente: Elaboración propia.

4.8. Contraste de caudales específicos entre el río Mazán y río Culebrillas

Los caudales específicos para los ríos Mazán y Culebrillas, con áreas de microcuencas de 73.15km² y 56.68km² respectivamente, determinados de los registros de las mismas fechas de aforo con una diferencia temporal promedio entre cambio de estación de Mazán A.J. Matadero a Culebrillas A.J. Matadero de 1:45:00 se indican en la **Tabla 4-26**. Particularmente, para el caso del río culebrillas, se consideró realizar un análisis inicial de los valores observados de caudal y otro adicional con los valores supuestos al reponer un caudal extraído por la captación de Paquitrancia. Este se estableció en un valor aproximado estándar de 300l/s de acuerdo a la información proporcionada por ETAPA EP.

Para Mazán, el caudal específico varía desde los 4.06l/s/km² a los 20.03l/s/km². En el caso de Culebrillas con los valores reales aforados, el caudal específico varía de 0.49l/s/km² a 12.32l/s/km², resultando en diferencias notables en cuanto a magnitudes. Al determinar el caudal específico incorporando el caudal estándar captado los valores varían de 5.79l/s/km² a 17.61l/s/km², acercándose de cierta manera al Mazán.

Mazán			Culebrillas				
Fecha y hora	Caudal (m³/s)	Caudal específico (l/s/km²)	Fecha y hora	Caudal observado (m³/s)	Caudal específico (l/s/km²)	Caudal + valor captado (m³/s)	Caudal específico (l/s/km²)
31/10/2023 10:47	0.297	4.06	31/10/2023 12:16	0.035	0.62	0.34	5.91
31/10/2023 11:17	0.352	4.81	31/10/2023 12:48	0.028	0.49	0.33	5.79
14/11/2023 10:23	0.53	7.25	14/11/2023 12:19	0.054	0.95	0.35	6.25

14/11/2023 11:09	0.511	6.99	14/11/2023 12:45	0.053	0.94	0.35	6.23
30/1/2024 10:33	0.513	7.01	30/1/2024 12:31	0.227	4.00	0.53	9.30
30/1/2024 11:25	0.529	7.23	30/1/2024 13:09	0.236	4.16	0.54	9.46
7/2/2024 10:28	1.4649	20.03	7/2/2024 12:42	0.6733	11.88	0.97	17.17
7/2/2024 11:22	1.3607	18.60	7/2/2024 13:25	0.6983	12.32	1.00	17.61
9/2/2024 10:23	1.185	16.20	9/2/2024 12:43	0.422	7.45	0.72	12.74
9/2/2024 11:12	1.135	15.52	9/2/2024 13:12	0.409	7.22	0.71	12.51
6/3/2024 10:30	1.059	14.48	6/3/2024 11:32	0.642	11.33	0.94	16.62
9/4/2024 10:32	0.543	7.42	9/4/2024 11:48	0.485	8.56	0.79	13.85
9/4/2024 11:06	0.548	7.49	9/4/2024 12:37	0.454	8.01	0.75	13.30

Tabla 4-26. Caudal específico para los ríos Mazán y Culebrillas (sin caudal captado y con caudal captado). Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 4-36.** expone la variabilidad de caudales específicos para Culebrillas con el valor captado supuesto respecto a Mazán. En donde no se espera ninguna tendencia que explique una relación entre ambos caudales específicos.

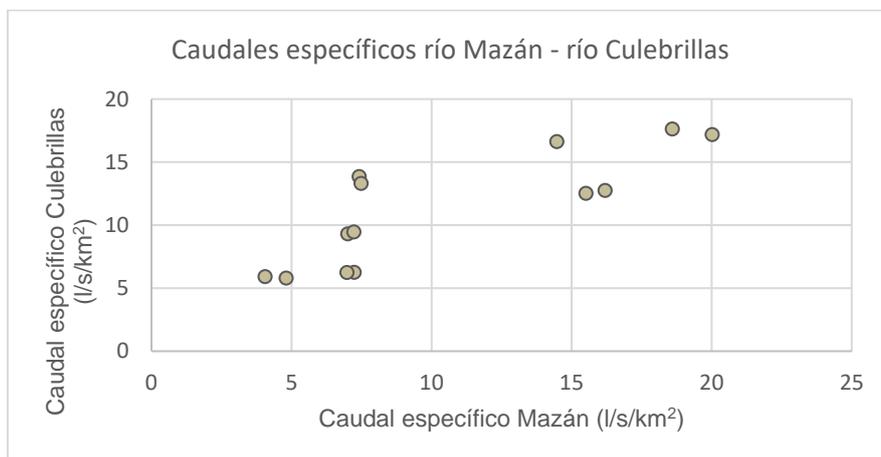


Figura 4-36. Relación entre caudal específico de Culebrillas con el valor de caudal captado supuesto respecto al caudal específico de Mazán. Fuente: Elaboración propia.

4.9. Curvas de descarga aplicadas a observaciones en canal de laboratorio

El ajuste de curvas de descarga aplicadas a mediciones en canal de laboratorio permitió habituarse al uso del instrumento de medición y evaluar su funcionalidad bajo condiciones controladas. Se utilizó el equipo FlowTracker2 y el velocímetro Vectrino para efectuar observaciones a distintos niveles de agua en un tanque o canal pequeño con vertedero triangular de 90° de pared delgada y con un sistema de turbina hidráulica tipo Francis ubicado en el laboratorio de hidráulica y dinámica de fluidos de la Universidad de Cuenca.

El canal rectangular posee un ancho B de 0.40m y una longitud de 0.55m. La distancia P entre el vértice del vertedero y el fondo es de 0.085m. El nivel h de agua sobre la cresta se registra mediante una regleta de medición con escala en milímetros que posee un nivel

máximo de medición de 110mm, colocada a una distancia de 0.35m aguas arriba al vertedero y encerada respecto al eje de su vértice.

El tubo de salida de agua del rodete de la turbina se encuentra posicionado verticalmente y posee inmediatamente dos rejillas ubicadas transversalmente al inicio del canal. En cuanto a las condiciones de flujo en caudales relativamente altos (ver Figura 4-37), se generó cierta turbulencia en el tubo de descarga, por lo que se adicionó dos rejillas a la entrada del canal (ver Figura 4-37) para mejorar la distribución de flujo paralelo a las paredes del tanque y transversal a la sección de control. En síntesis, todas las mediciones se ejecutaron con tres rejillas plásticas colocadas verticalmente y una metálica inclinada.

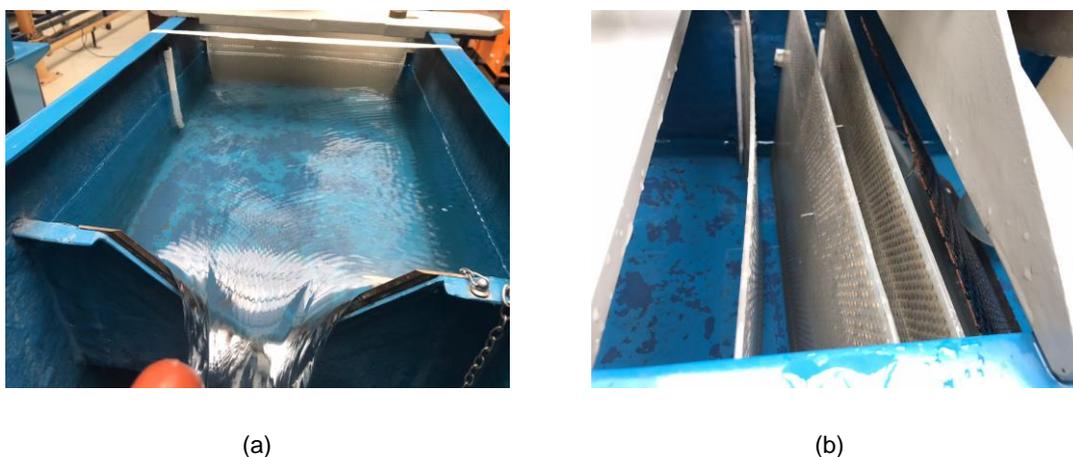


Figura 4-37. Tanque rectangular pequeño con turbina hidráulica Francis y vertedero triangular de pared delgada. Fuente: Elaboración propia.

Las mediciones se registraron mediante el método de las seis décimas de profundidad, en tres verticales de la sección transversal ubicada en el eje de la regleta de medición de nivel, asegurando la distancia de observación aguas arriba del vertedero de al menos $3h$. Las verticales se posicionaron a 0.10m, 0.20m y 0.29m desde el margen derecho a fin de mantener la distancia de sensibilidad del instrumento ante paredes, para lo cual se utilizó una cinta métrica como guía para mantener uniformidad en los puntos de medición. En lo que respecta a las observaciones con el instrumento Vectrino se realizó tres aforos por nivel h , mientras que para el equipo FT2 se ejecutó dos aforos con varilla de vadeo por nivel h , como se indica en la **Tabla 4-27** y **Tabla 4-28**.

Para el caso del instrumento FT2, se tomó un total de 36 muestras de velocidad durante 40seg resultando en 12 registros de caudal calculados con el equipo. El orden de ejecución de observaciones se realizó incrementando el nivel h , desde un mínimo nivel de 0.022m o a su vez un tirante de agua de 0.107m para un caudal de 0.20l/s, hasta un máximo nivel h de 0.091m o un tirante de 0.176m para un caudal de 0.35l/s (ver Figura 4-38).

No.	h (m)	Q ₁ (l/s)	Q ₂ (l/s)
1	0.022	0.20	0.20
2	0.046	0.64	0.65
3	0.055	1.10	1.00
4	0.062	1.40	1.40
5	0.073	2.00	2.10
6	0.091	3.50	3.50

Tabla 4-27. Observaciones de caudal y nivel realizadas con el equipo FlowTracker2 en canal de laboratorio con vertedero triangular. Fuente: Elaboración propia.

Registro caudal - nivel con Flowtracker2

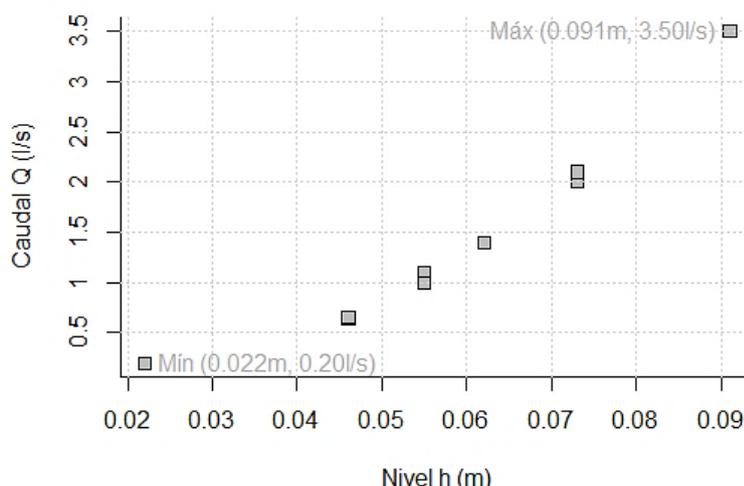


Figura 4-38. Registro de observaciones de caudal – nivel con equipo FlowTracker2 en canal de laboratorio con vertedero triangular. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se realizaron 81 registros de velocidad de 40seg con el equipo Vectrino, en donde el cálculo de caudal se realizó con el mismo principio de FT2, el método Mid-Section, obteniendo 27 caudales. Para este caso se realizó mayor cantidad de observaciones debido al procesamiento manual de datos y la falta de varilla de vadeo. El rango de observaciones se realizó desde un mínimo nivel *h* de 0.036m a un máximo de 0.090m.

No.	h (m)	Q ₁ (l/s)	Q ₂ (l/s)	Q ₃ (l/s)
1	0.086	2.74	2.70	2.69
2	0.074	1.98	2.04	2.03
3	0.065	1.39	1.33	1.37
4	0.055	1.04	0.95	0.93
5	0.045	0.52	0.51	0.55
6	0.036	0.23	0.27	0.26
7	0.08	2.40	2.43	2.17
8	0.09	3.16	3.13	3.43
9	0.088	2.91	2.95	3.00

Tabla 4-28. Registros de caudal y nivel determinados de observaciones de velocidad con el equipo Vectrino en canal de laboratorio con vertedero triangular. Fuente: Elaboración propia.

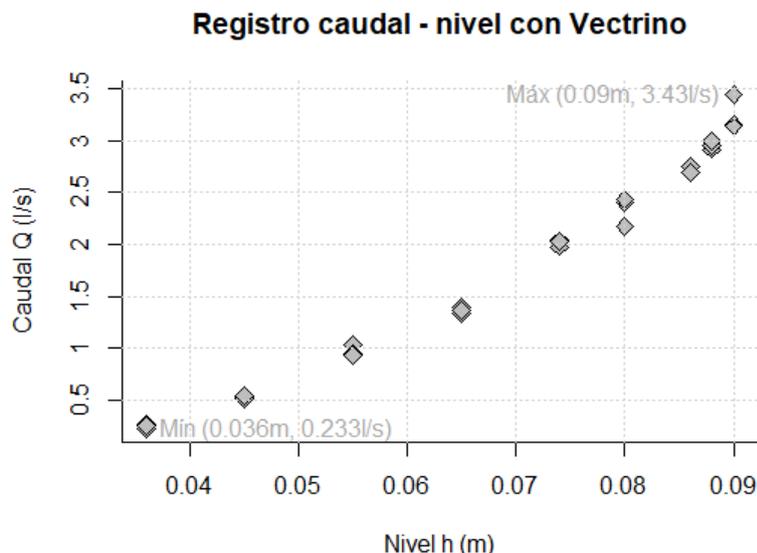


Figura 4-39. Registro de mediciones de caudal – nivel con equipo Vectrino en canal de laboratorio con vertedero triangular. Fuente: Elaboración propia.

El ajuste de las curvas de descarga se realizó mediante la **Ecuación 3-10**, y la determinación de sus parámetros a partir de sus variables transformadas según la **Ecuación 3-11**, obteniendo los resultados indicados en la **Tabla 4-29**.

Parámetro	FlowTracker2	Vectrino
A	12.3692	0.4822
B	4.0746	1.9404
C	0.0445	-0.0154
Ecuación de ajuste	$\ln(Q) = 4.07 \ln(h + 0.04) + \ln(12.37)$	$\ln(Q) = 1.94 \ln(h - 0.02) + \ln(0.48)$
Coefficiente de determinación R^2	0.9976	0.9965
Desviación estándar de los residuales S	0.0622	0.0918
Varianza de los residuales σ^2	0.0038	0.0084
Curva de descarga	$Q_{FT2} = 12.31 (h + 0.04)^{4.07}$	$Q_{Vectrino} = 0.48 (h - 0.02)^{1.94}$

Tabla 4-29. Parámetros de ajuste, ecuación de ajuste, coeficiente de determinación y desviación estándar de los residuales para curvas de descarga obtenidas de observaciones con FlowTracker2 y Vectrino, para nivel h en m y caudal Q en m^3/s . Fuente: Elaboración propia.

Se realiza el análisis de residuales de las variables transformadas para comprobación de los modelos de ajuste. Las pruebas estadísticas aplicadas (ver **Tabla 4-30**) comprueban la validez de los modelos de ajuste al aceptar la hipótesis nula en todos los casos, de lo cual existe normalidad, varianza constante y falta de autocorrelación de los residuos.

No.	Prueba estadística	Hipótesis nula H_0	Nivel de significancia	p-value FlowTracker2	p-value Vetrino
1	Shapiro - Wilk	Los datos siguen distribución normal	$\alpha = 0.05$	0.9004	0.7031
2	Durbin - Watson	No hay autocorrelación en los residuos	$\alpha = 0.05$	0.8780	0.6680
3	Breusch - Pagan	La varianza de los residuos es constante	$\alpha = 0.05$	0.8035	0.3635

Tabla 4-30. Pruebas estadísticas para comprobación del modelo de ajuste de curva de descarga para canal de laboratorio con vertedero triangular.

Las gráficas de diagnóstico se presentan para la curva de descarga obtenida de las observaciones realizadas con el equipo FT2, el cual presenta mayor coeficiente de determinación R^2 . La **Figura 4-40 (a)** y **(b)** presentan los residuales del ajuste realizado a las variables transformadas respecto al caudal observado y al caudal ajustado, y la **Figura 4-40 (d)** presenta los residuales respecto al orden de ejecución de las observaciones, en las mismas no se evidencia algún patrón señalando independencia de residuales y varianza constante. La **Figura 4-40 (c)** indica la proximidad entre las observaciones de caudal y el resultado de su ajuste al encontrarse sobre la recta de igualdad. El gráfico de probabilidad Normal de los residuos de la **Figura 4-40 (e)** expone los residuales ordenados respecto a los cuantiles teóricos esperados de la distribución normal y su relación lineal.

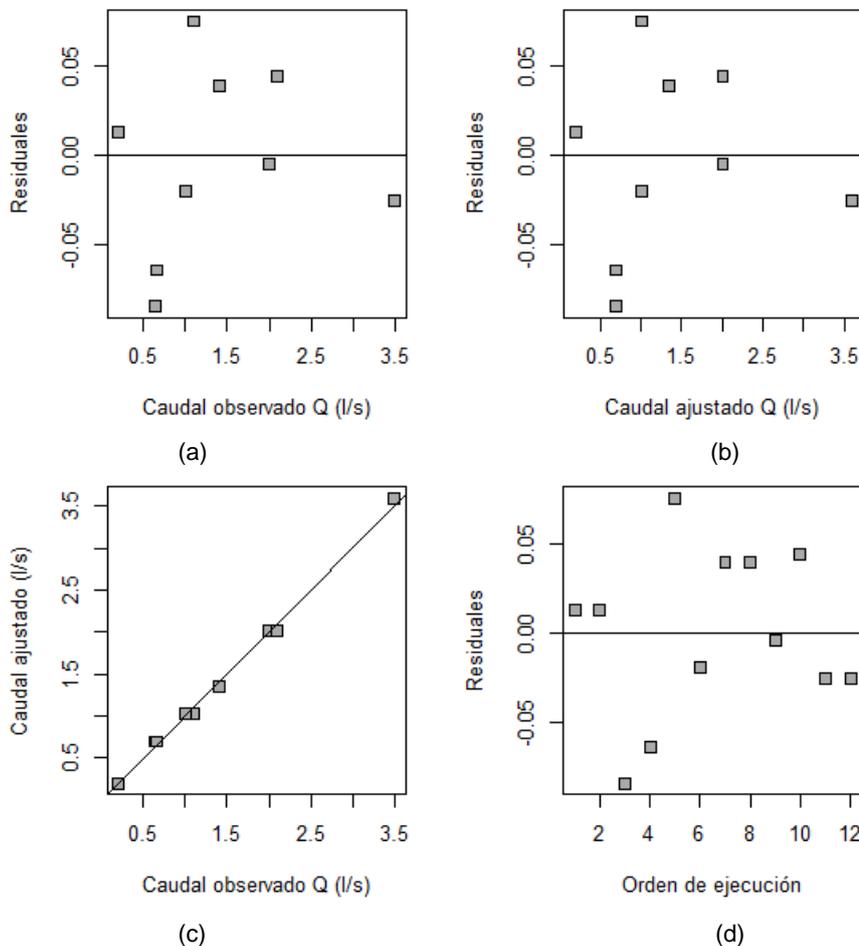
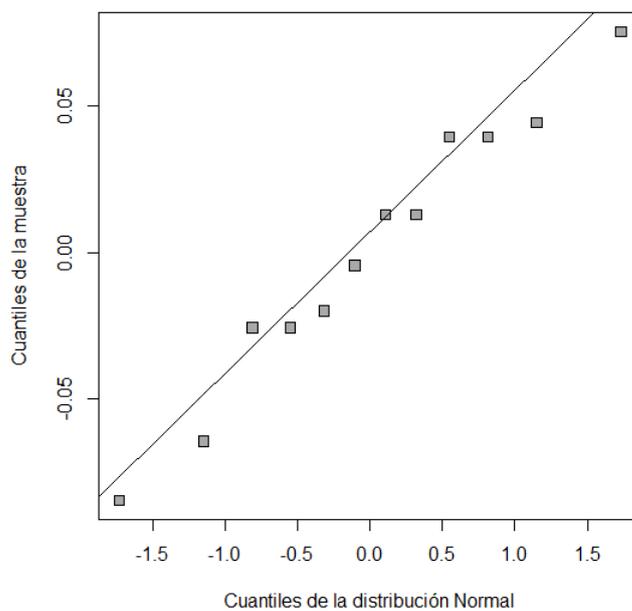
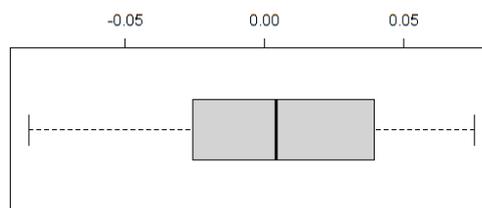


Gráfico de probabilidad Normal de los residuos



(e)



(f)

Figura 4-40. Gráficas de diagnóstico del modelo de ajuste de curva de descarga para observaciones realizadas con FT2 en canal de laboratorio con vertedero triangular. Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 4-31**, se presentan los residuales resultantes de las observaciones y el modelo de curva de descarga para FT2, en donde valores positivos indican que el caudal observado es mayor al ajustado y viceversa para los negativos. La máxima subestimación es de 0.0912l/s mientras que la máxima sobrestimación con la curva es de 0.0908l/s.

No.	h (m)	Q _{observado} (l/s)	Q _{ajustado} (l/s)	Q _{observado} -Q _{ajustado} (l/s)
1	0.022	0.20	0.1975	0.0025
2	0.022	0.20	0.1975	0.0025
3	0.046	0.64	0.6932	-0.0562
4	0.046	0.65	0.6932	-0.0432
5	0.055	1.10	1.0201	0.0799
6	0.055	1.00	1.0201	-0.0201
7	0.062	1.40	1.3458	0.0542
8	0.062	1.40	1.3458	0.0542
9	0.073	2.00	2.0088	-0.0088

10	0.073	2.10	2.0088	0.0912
11	0.091	3.50	3.5908	-0.0908
12	0.091	3.50	3.5908	-0.0908

Tabla 4-31. Caudal ajustado y residuales para la curva de descarga obtenida de observaciones de nivel h y caudal Q realizadas con FT2 en canal pequeño con vertedero triangular. Fuente: Elaboración propia.

Para corroborar la alternativa que mejor se ajusta, los modelos de curva de descarga se comparan con la aplicación de las ecuaciones teóricas para un vertedero triangular de 90° de pared delgada indicadas en la **Tabla 3-5**. Expresiones para el cálculo de caudal en un vertedero de pared fina triangular de 90°. En donde Q = caudal (m3/s) y h = carga sobre el vértice del vertedero (m)., para un rango de datos de nivel de 0.02m a 0.1m. La discrepancia entre los valores predichos y los valores teóricos se cuantifica mediante el error medio cuadrático MSE y el error absoluto medio MAE. Los resultados de acuerdo a la **Tabla 4-32** indican que las observaciones realizadas con el equipo Flowtracker2 modelan la realidad con mayor precisión debido a que son menores en todos los casos.

Error	Autor				
	Equipo	King, H	Barnes, A	Boucher, R	Barr. J
Error medio cuadrático MSE (l/s) ²	Flowtracker2	0.0044	0.0088	0.0065	0.0080
	Vectrino	0.0567	0.0294	0.0363	0.0311
Error absoluto medio MAE (l/s)	Flowtracker2	0.0588	0.0647	0.0606	0.0661
	Vectrino	0.1974	0.1430	0.1581	0.1431

Tabla 4-32. Determinación de MSE y MAE entre valores ajustados y valores teóricos de distintos autores. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de acuerdo a las observaciones con FT2 se exponen en la **Tabla 4-33** y **Figura 4-41**. Se distingue la proximidad entre valores teóricos y ajustado mediante la superposición de las curvas.

No.	h (m)	Q _{ajustado} (l/s)	Q King (l/s)	Q Barnes (l/s)	Q Boucher (l/s)	Q Barr (l/s)
1	0.022	0.1974	0.1031	0.1005	0.1040	0.1005
2	0.046	0.6932	0.6670	0.6419	0.6479	0.6354
3	0.055	1.0201	1.0371	0.9999	1.0092	0.9932
4	0.062	1.3458	1.3942	1.3458	1.3584	1.3400
5	0.073	2.0088	2.0870	2.0179	2.0367	2.0157
6	0.091	3.5908	3.5970	3.4856	3.5181	3.4973

Tabla 4-33. Valores de caudal ajustado mediante curva de descarga para observaciones realizadas con el equipo FT2 y valores teóricos para canal con vertedero triangular a 90°. Fuente: Elaboración propia.

Curva de descarga, Vertedero triangular

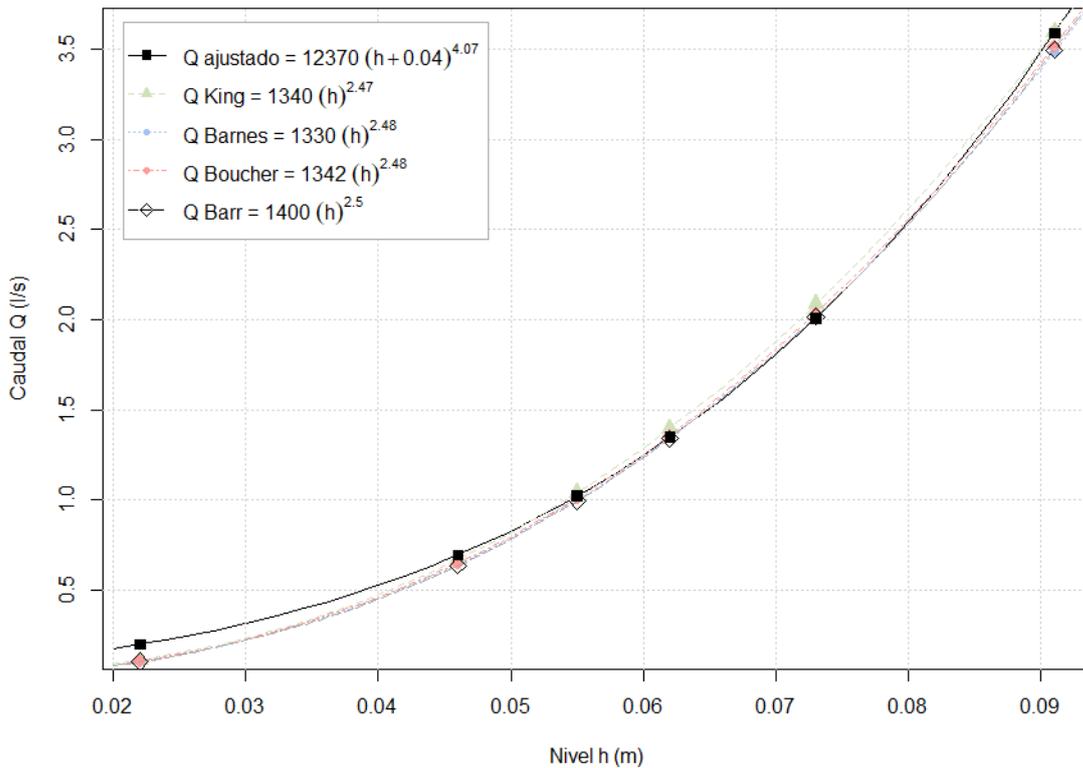
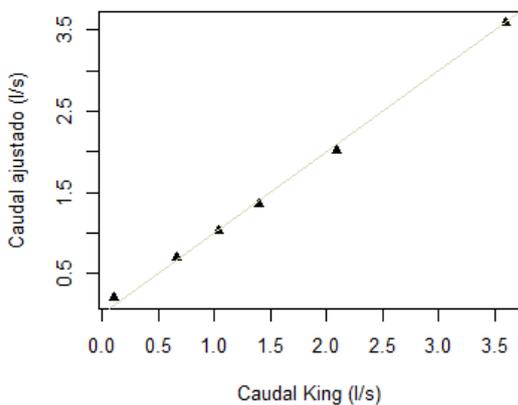


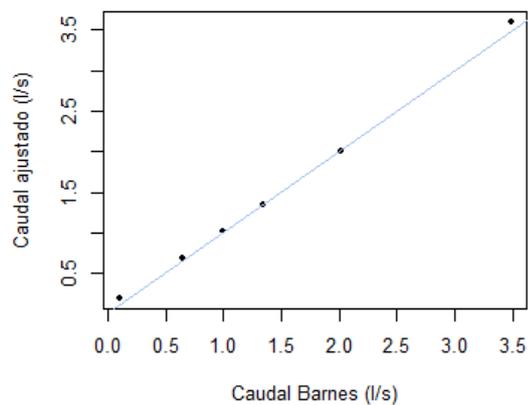
Figura 4-41. Curva de descarga de vertedero triangular de 90° de pared delgada donde h está en m y Q en l/s. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4-42 expone gráficamente la proximidad entre el ajuste de la curva de descarga y las ecuaciones de distintos autores mediante la recta diagonal que representa de igualdad entre los valores.

Comparación de valores ajustados con valores teóricos



(a)



(b)

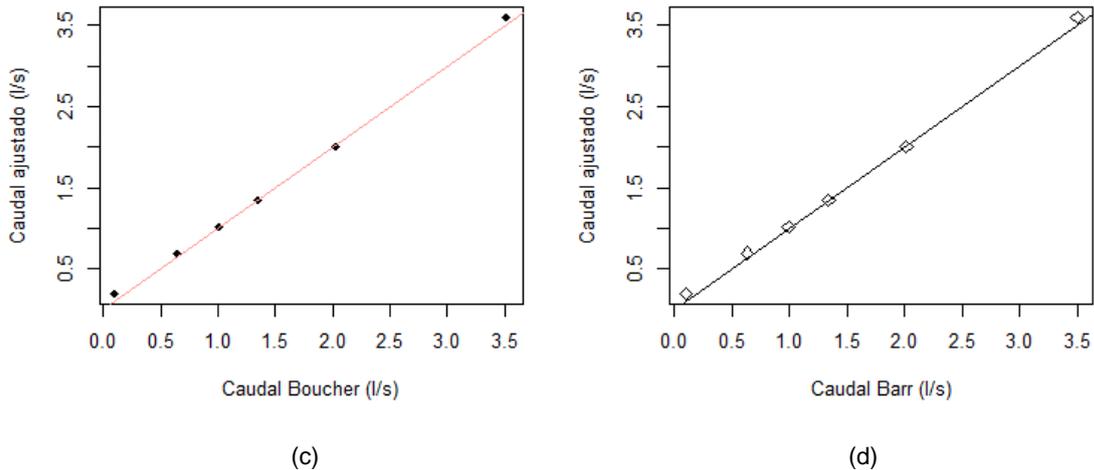


Figura 4-42. Gráfica de valores ajustados respecto a valores teóricos de (a) King, H., (b) Barnes, A., (c) Boucher, R., (d) Barr, J. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se expone la curva de descarga obtenida mediante observaciones realizadas con el equipo FlowTracker2, con un coeficiente de determinación R^2 de 0.9976, y sus intervalos de confianza del 95%. Las bandas estrechas de los intervalos de confianza indican que el modelo presenta baja incertidumbre en la predicción de caudal siendo menor en niveles pequeños y creciendo conforme incrementa el nivel.

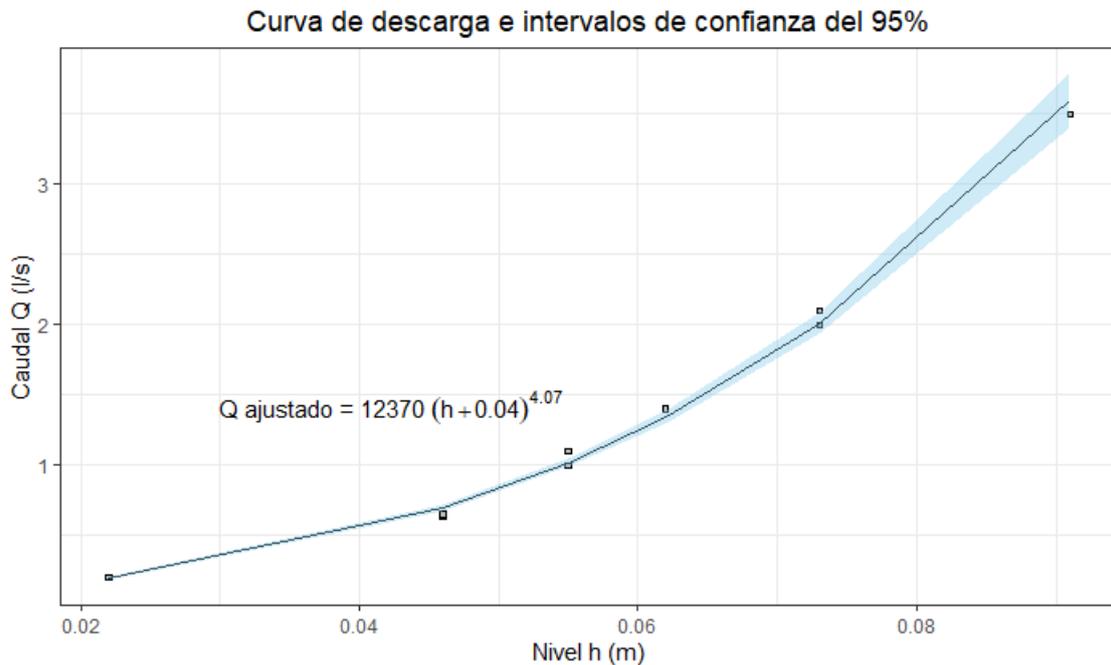


Figura 4-43. Datos observados con equipo Flowtracker2, curva de descarga e intervalos de confianza del 95% para le media para vertedero triangular de 90° de pared delgada. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 5

Discusión y análisis de resultados

En el presente capítulo se analiza los resultados obtenidos en el capítulo previo y se realiza una discusión de los mismos de acuerdo a los objetivos logrados.

5.1. Caracterización de las microcuencas

La interpretación de los parámetros desprendidos del análisis morfométrico facilita la comprensión acerca del comportamiento de la microcuenca ante eventos de precipitación. En este sentido, en esta sección se analiza y compara las características de forma, relieve y drenaje de las microcuencas de estudio a fin de predecir su comportamiento en términos de descarga.

5.1.1. Microcuenca del Río Mazán

La microcuenca del río Mazán tiene una forma alargada, con un factor de forma de 0.262 y un radio de circularidad de 0.274. Esta configuración geométrica sugiere un tiempo de concentración largo, lo que resulta en picos de caudal menos pronunciados y distribuidos a lo largo del tiempo, reduciendo el riesgo de inundaciones repentinas. Su relieve, con una altitud máxima de 4203.5 metros y mínima de 2758.123 metros, junto con una pendiente ponderada del cauce principal de 0.06 m/m, indica un terreno inclinado que puede incrementar la velocidad de flujo y la capacidad erosiva durante lluvias intensas.

La densidad de drenaje de 1.635 sugiere una red de drenaje bien desarrollada, facilitando un drenaje eficiente del agua de lluvia, pero también implicando un mayor transporte de sedimentos. Los tiempos de concentración calculados son de 120.944 minutos (Kirpich) y 331.225 minutos (Bransby Williams), lo que ayuda a distribuir el caudal a lo largo del tiempo.

En cuanto al uso y cobertura del suelo, el 82.77% de la microcuenca está cubierto por pastizales y el 15.26% por bosques, contribuyendo a reducir la escorrentía superficial y aumentar la infiltración de agua. La curva hipsométrica sugiere una microcuenca en una etapa de maduración joven a intermedia, con capacidad de almacenamiento de agua en las áreas elevadas y un flujo más sostenido hacia las partes bajas, mejorando la regulación del caudal.

5.1.2. Microcuenca del Río Culebrillas

La microcuenca del río Culebrillas también presenta una forma alargada, con un factor de forma de 0.213 y un radio de circularidad de 0.283. Esto sugiere un tiempo de concentración

ligeramente mayor en comparación con el río Mazán, resultando en picos de caudal menos pronunciados y distribuidos a lo largo del tiempo. Su relieve, con una altitud máxima de 4361.530 metros y mínima de 2796.907 metros, y una pendiente ponderada del cauce principal de 0.054m/m, indica un terreno inclinado similar al del río Mazán, pero con una pendiente ligeramente menor.

La densidad de drenaje de 1.541 sugiere una red de drenaje eficiente, aunque menos desarrollada que la del río Mazán, lo que podría resultar en un transporte de sedimentos ligeramente menor. Los tiempos de concentración son de 130.984 minutos (Kirpich) y 371.078 minutos (Bransby Williams), indicando tiempos de concentración largos que favorecen la distribución del caudal a lo largo del tiempo y reducen el riesgo de picos de caudal abruptos.

El uso y cobertura del suelo en la microcuenca del río Culebrillas muestra que el 73.02% está cubierto por pastizales y el 25.59% por bosques. La mayor proporción de bosques puede ayudar a reducir la escorrentía superficial y aumentar la infiltración de agua, contribuyendo a un flujo más regulado y a la disminución del riesgo de inundaciones. La curva hipsométrica indica una etapa de maduración intermedia similar a la microcuenca del Mazán.

5.1.3. Análisis comparativo de las microcuencas

Al comparar las microcuencas, se observa que ambas tienen formas alargadas y tiempos de concentración largos, lo que favorece la distribución del caudal a lo largo del tiempo y reduce el riesgo de inundaciones repentinas. Sin embargo, la microcuenca del río Mazán presenta una densidad de drenaje ligeramente mayor (1.635) en comparación con la del río Culebrillas (1.541). La pendiente del cauce principal es ligeramente mayor en la microcuenca del río Mazán (0.06m/m) comparado con la microcuenca del río Culebrillas (0.054m/m), lo que puede resultar en un tiempo de concentración menor.

En términos de uso y cobertura del suelo, la microcuenca del río Culebrillas tiene una mayor área y proporción de bosques (25.59%) comparada con la microcuenca del río Mazán (15.26%), lo que puede ayudar a reducir la escorrentía superficial y mejorar la infiltración de agua, contribuyendo a un flujo más regulado y eventos de creciente de menor magnitud.

Los tipos de tierra para ambas cuencas corresponden en su mayoría a tierra arbustiva y herbácea superando el 80% del área de las microcuencas. Este tipo de tierra está constituido en su mayor parte por páramo, el cual posee gran capacidad de absorción y retención de agua contribuyendo a mantener el balance hídrico en épocas de sequía. La cuenca río Mazán tiene una superficie de 53.77km² de páramo y la del río Culebrillas de 41.83 km² lo cual puede

ser una variable influyente en menor grado en la diferencia de caudales aforados. Así también, se involucra la superficie de tierra sin cobertura vegetal con afloramiento rocoso que es mayor en la cuenca del río Culebrillas (7.41km²) representando el 13.08% de su área, respecto a la del río Mazán (5.45km²) que representa el 7.45% de toda la microcuenca. A su vez, el tipo de suelo en ambos casos en su mayoría está conformado por suelo de orden Inceptisol. La microcuenca del río Mazán está comprendida por este en casi su totalidad con un 98.06% de su área, mientras que en la microcuenca del río Culebrillas corresponde a un 89.48%, indicando diferencias no tan significativas.

El tipo, uso y cobertura vegetal del suelo, debido a su similitud relativa para ambas microcuencas, podría explicar superficialmente las diferencias respecto a caudales observados en ambos ríos. Sin embargo, se requiere de un análisis de mayor alcance y detalle para establecer conclusiones sólidas y definir magnitudes de influencia respecto a la variabilidad de caudales y rendimiento de las microcuencas hidrográficas.

Por otro lado, las curvas hipsométricas proporcionan una visión clara de las etapas de evolución de las cuencas (Ion 1985). La microcuenca del río Mazán, está en una etapa de maduración intermedia en contraste con la microcuenca del río Culebrillas, que demuestra una etapa levemente más avanzada.

5.2. Régimen de flujo en las secciones de aforo

Un análisis adecuado de la distribución de velocidades en la sección de aforo es esencial para evaluar la calidad del mismo. Al examinar las curvas de igual velocidad presentadas en la **Figura 4-20**, se observa que estas tienden a seguir la forma del fondo del cauce, lo cual es lo ideal bajo condiciones de flujo uniforme sin obstrucciones. Sin embargo, las variaciones en las formas de las isotaquias en este caso se deben a la presencia de rocas en el cauce antes de la sección de aforo.

Esto es especialmente evidente en la sección del río Mazán, donde se observaron varias rocas que no pudieron ser desplazadas durante la preparación de la sección, afectando la uniformidad de las velocidades. En contraste, en el perfil del río Culebrillas, se aprecia un flujo preferente por la derecha en el sentido del movimiento del agua, con velocidades considerablemente más bajas en el lado izquierdo del cauce. Esta asimetría se atribuye a una obstrucción presente en el lado izquierdo, que desvía la corriente hacia la derecha.

En general, se observan mejores condiciones en la sección del río Mazán, donde el flujo se distribuye de manera relativamente uniforme a lo largo de toda la sección. En cambio, en el río Culebrillas, el agua atraviesa la sección preferentemente por la derecha, indicando una distribución menos homogénea debido a las obstrucciones presentes.

En la **Figura 4-21** se puede observar también el perfil de velocidades en la vertical donde se registra la velocidad máxima. Aquí se nota que dicha velocidad máxima se ubica a una profundidad de aproximadamente 20 a 25% desde la superficie, lo cual es consistente con lo esperado para flujos sobre superficies rugosas, típicas de ríos de montaña (ver **Figura 5-1**).

Además, se observa que el perfil de velocidad no sigue estrictamente el perfil teórico, donde se esperaría que la velocidad media se encuentre aproximadamente a una profundidad del 60%. Esta desviación del perfil teórico puede ser atribuida a las condiciones específicas del cauce, como la rugosidad y las obstrucciones presentes, que alteran la distribución de las velocidades en la sección vertical.

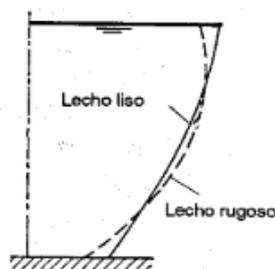


Figura 5-1. Distribuciones típicas de velocidad en canales de lecho liso y rugoso con flujo uniforme. Fuente: (Chow, 1994).

En cuanto al régimen de flujo, los parámetros indican características clave del comportamiento hidráulico. En base a lo presentado en la **Tabla 4-13**, los números de Froude (Fr) varían entre 0.091 y 0.136 en el río Mazán y entre 0.016 y 0.128 en el río Culebrillas, señalando un flujo subcrítico en ambos casos, lo cual sugiere condiciones de flujo tranquilo y estable. Los números de Reynolds (Re) muestran un flujo turbulento en ambos ríos, con valores que oscilan entre 161632 y 590071 para el río Mazán y entre 42771 y 327976 para el río Culebrillas. Este régimen de flujo turbulento es típico en ríos naturales, promoviendo la mezcla de fluidos y el transporte de sedimentos.

Comparativamente, el río Mazán presenta mayores valores de Reynolds, lo que indica una mayor capacidad de erosión y transporte de sedimentos en comparación con el río Culebrillas. Aunque ambos ríos tienen flujos subcríticos y turbulentos, las condiciones en el río Mazán sugieren un entorno más dinámico para el transporte de materiales. Esta diferencia puede

influir en la gestión de los cauces, donde el monitoreo del río Mazán podría requerir más atención para controlar la erosión y la sedimentación, mientras que el río Culebrillas, con menores valores de Re , podría tener un transporte de sedimentos ligeramente más moderado.

5.3. Casos de estudio y datos experimentales

En la estación Mazán A.J. Matadero, debido a la precisión en centímetros de las lecturas limnigráficas y al efecto ondulatorio del agua alrededor de la regleta, no se han detectado cambios significativos de nivel. La máxima variación del décimo al onceavo aforo realizados consecutivamente en el mismo día es de 1cm, del cual, al comparar las magnitudes correspondientes a la geometría de la sección, no hubo una variación importante (ver [Tabla 4-10](#)). Por otro lado, teniendo constancia de que se utilizó el mismo equipo con la misma metodología y de que no existió la influencia de cambios repentinos en las condiciones ambientales en los pares de aforos ejecutados continuamente, se atribuye la diferencia entre magnitudes de caudal a la variabilidad natural del flujo, en donde un porcentaje positivo indica incremento de caudal y viceversa (ver [Tabla 5-1](#)). El mayor porcentaje de variación corresponde al menor caudal registrado debido a su magnitud, con un incremento de 55l/s. Esta variabilidad inmediata indica que no es posible obtener resultados replicados en eventos reales, por lo que se requiere establecer un tamaño de muestra adecuado que capture dicha variación, la cual en este caso cumplió su objetivo. Además de que un monitoreo continuo y aforar por tiempos prolongados permitiría identificar ciertas tendencias que las mediciones inmediatas no reflejan.

No.	Nivel h (m) [h(Q1), h(Q2)]	Caudal inicial Q ₁ (m ³ /s)	Caudal consecutivo Q ₂ (m ³ /s)	Variación de caudal ΔQ (m ³ /s)	Variación relativa ΔQ/Q ₁	Porcentaje de variación %
1 - 2	[0.46, 0.46]	0.297	0.352	0.055	0.19	19%
3 - 4	[0.52, 0.52]	0.53	0.511	-0.019	-0.04	-4%
6 - 7	[0.56, 0.56]	0.513	0.529	0.016	0.03	3%
8 - 9	[0.72, 0.72]	1.4649	1.3607	-0.1042	-0.07	-7%
10 - 11	[0.68, 0.69]	1.185	1.135	-0.050	-0.04	-4%
13 - 14	[0.56, 0.56]	0.543	0.548	0.005	0.01	1%

Tabla 5-1. Porcentaje de variación entre aforos realizados consecutivamente en la estación Mazán A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

En la estación Culebrillas A.J. Matadero la precisión del registro de nivel fue en milímetros. Solamente hubo variación en el décimo aforo respecto al noveno con un incremento de 5mm. Similarmente, la mayor variación relativa corresponde al par de aforos capturados en el menor nivel de agua, mientras que el porcentaje de variación del resto de aforos consecutivos fueron menores al 7%, resultando no significativos.

No.	Nivel h (m) [h(Q1), h(Q2)]	Caudal inicial Q ₁ (m ³ /s)	Caudal consecutivo Q ₂ (m ³ /s)	Variación de caudal ΔQ (m ³ /s)	Variación relativa $\Delta Q/Q_1$	Porcentaje de variación %
1 - 2	[0.315, 0.315]	0.035	0.028	-0.0070	-0.2	-20%
3 - 4	[0.345, 0.345]	0.054	0.053	-0.0010	-0.02	-2%
5 - 6	[0.48, 0.48]	0.227	0.236	0.0090	0.04	4%
7 - 8	[0.615, 0.615]	0.6733	0.6983	0.0250	0.04	4%
9 - 10	[0.55, 0.545]	0.422	0.409	-0.0130	-0.03	-3%
11 - 12	[0.62, 0.62]	0.642	0.6049	-0.0371	-0.06	-6%

Tabla 5-2. Porcentaje de variación entre aforos realizados consecutivamente en la estación Culebrillas A.J. Matadero. Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 4-14** y **Figura 4-16** muestran la diferencia entre caudales registrados a un mismo nivel en términos de valor absoluto, en donde las mayores diferencias se presentan en niveles superiores. Por lo que la variación relativa permite identificar el cambio real en perspectiva a la magnitud de caudal.

El resultado de parámetros de geometría es característico de cada aforo, influenciado principalmente por la posición de la vertical y el registro de tirante de agua. De acuerdo a la **Figura 4-18** la relación de área respecto a nivel en Mazán A.J. Matadero presenta tendencia creciente como lo esperado al igual que la relación entre velocidad y nivel, las cuales se encuentran relacionadas por el método de cálculo de caudal. La estación Culebrillas A.J. Matadero, sección B-1 no presentó cambios significativos de área en los primeros 4 puntos, mientras que las velocidades fueron pequeñas menores a 0.1m/s por lo que dicha sección no reflejó adecuadamente la variabilidad esperada. Además, presentó dos valores alejados de la tendencia creciente en la relación área-nivel correspondientes al último par de aforos en la sección B-2, con una reducción significativa de área. En lo referente a las velocidades en dichos puntos, los valores fueron altos a fin de compensar el resultado de caudal. Este análisis indica que existió un cambio en la geometría de la sección B-2 respecto a la medición antecedente durante el tiempo intermedio entre aforos de aproximadamente un mes. Debido a que para el nivel de 0.6m se tuvo un área menor a la esperada se infiere que hubo deposición de sedimentos.

5.4. Mazán A.J. Matadero

Los modelos de ajuste propuestos para Mazán A.J. Matadero fueron verificados mediante el análisis de sus residuales. La aplicación de pruebas estadísticas con un nivel de significancia de 0.05 determinaron que los residuales de ambos modelos de regresión lineal con variables transformadas mediante logaritmos naturales tienen distribución normal de media cero y varianza constante, además de no estar autocorrelacionados.

En ambos casos se ajustaron tres parámetros asumiendo consideraciones teóricas. Por un lado, la curva del modelo I, $Q = 1.59 (h + 0.25)^{4.68}$, depende únicamente de la variable independiente nivel, mientras que la curva II, $Q = \frac{A}{0.056} R^2 + 0.51 S^{\frac{1}{2}}$, depende a su vez de la pendiente longitudinal del tramo, la cual se estableció como un valor constante del 0.7%. Sin embargo, esta simplificación puede alterar las predicciones en caso de que las condiciones naturales de flujo sean significativamente diferentes. En cuanto al exponente del radio hidráulico, al ser mayor a la unidad, da a interpretación que la geometría de la sección transversal del cauce tiene un efecto significativo en el cálculo de la velocidad, y por ende del caudal. Mientras que el valor del coeficiente de rugosidad ajustado n' (0.055) al ser relativamente alto, indica que la sección posee gran rugosidad debido principalmente a la irregularidad del fondo y a las rocas de gran tamaño del lecho.

Por tal, el ajuste de la ecuación de Manning proveería mejores resultados en tramos de control artificiales o de sección longitudinal y transversal constante que permitan monitorear adecuadamente los parámetros de hidráulico-geométricos, estimando con mejor ajuste las relaciones de nivel respecto a área y perímetro mojado.

De acuerdo a lo esperado, el modelo I de ajuste posee mayor coeficiente de determinación con un valor de 0.9746, mientras que el modelo II muestra 0.9173, lo que implica que la curva de descarga del modelo I explica un 6% mejor la variabilidad del conjunto de observaciones de caudal mediante una relación lineal entre variables de caudal y nivel transformadas. Cabe mencionar, que los modelos son aplicados con tal proporción de variabilidad dentro del rango de observaciones, ya que valores relativamente mayores en cuanto a nivel sobreestimarán los resultados de caudal si se aplica el modelo II debido a la tendencia de rápido crecimiento que presenta la curva (ver [Figura 4-26](#)). La desviación estándar de los errores residuales en términos de caudal es de $0.0771\text{m}^3/\text{s}$ para el modelo I y de $0.0663\text{m}^3/\text{s}$ para el modelo II, sugiriendo que para el caso del modelo I la variabilidad de residuos supera en aproximadamente 11% al modelo II, valor que al poner en perspectiva de magnitud de caudales medidos resulta bajo. Por lo tanto, la curva que se recomienda aplicar es la del modelo I, $Q=1.59 (h + 0.25)^{4.68}$.

Por otro lado, en lo referente a la base de datos proporcionada por ETAPA EP, los valores difieren significativamente de las observaciones registradas en los aforos. La diferencia corresponde a más de $1\text{m}^3/\text{s}$ a excepción de la lectura más alta de caudal cercana a $2\text{m}^3/\text{s}$, con un valor aproximado de $0.4\text{m}^3/\text{s}$ de diferencia. Los resultados indican que dentro del rango de observaciones la curva se encuentra muy por encima de los valores reales. Por lo que se asume que existió una alteración significativa del entorno de la estación a partir de la última

calibración de la curva de descarga ya que el material depositado influye en las lecturas automáticas de nivel, volviéndolas superiores, y por ende en las predicciones de caudal.

Además, la tendencia exponencial de la curva de descarga provee estimaciones inexactas, volviéndolas más sensibles en valores altos ya que un pequeño incremento de nivel se verá reflejado en un resultado sobreestimado de caudal (ver [Figura 4-31](#)). Esto se evidencia en los puntos picos de los registros (ver [Figura 4-30](#)), especialmente en los meses de diciembre de 2023 y febrero de 2024 que corresponden a datos irreales y por ende erróneos. Los valores registrados llegan incluso a superar los $30\text{m}^3/\text{s}$ que, dadas las condiciones del cauce, no es posible que los márgenes soporten tales magnitudes. Los puntos críticos solamente permiten identificar períodos en los que se dieron eventos de crecida como el caso del máximo valor observado cercano a $2\text{m}^3/\text{s}$ medido en mes de diciembre, del que según la curva se dieron precipitaciones intensas, y de manera similar, los registros a mediados de febrero, siendo las siguientes observaciones de caudal mayores en cuanto a magnitud.

La ecuación exponencial de la estación limnigráfica no es apropiada para predecir caudales, más aún en niveles altos debido a su gran sensibilidad. Debe ser ajustada o nuevamente determinada en función de aforos para los niveles actuales con el objetivo de no comprometer la gestión del recurso hídrico al presentar un monitoreo inadecuado que podría llevar a conclusiones erróneas.

5.5. Culebrillas A.J. Matadero

El análisis aplicado a los residuales del modelo de ajuste realizado con los 14 aforos identificó que existe autocorrelación en los mismos al obtener un p-value de 0.012 menor al nivel de significancia adoptado del 5% en la prueba estadística Durbin-Watson. Lo que confirma la dependencia temporal de los errores debida principalmente al cambio de condiciones de cauce por deposición de material durante el tiempo transcurrido entre las últimas mediciones. Es así que su detección, permitió reevaluar el modelo mediante la omisión del último par de aforos. Los resultados determinaron un modelo ajustado apropiadamente en donde los residuales siguen una distribución normal, con varianza constante y errores residuales no autocorrelacionados.

Se menciona, además, que durante los últimos aforos ejecutados se visualizó a personas que ingresaban al río para aprovechar el agua, principalmente para lavado de hortalizas, y en algunas ocasiones se identificó basura en los márgenes, lo que sugiere que es una zona que se ve influenciada a la vez por actividad humana. En este contexto, los escenarios cambiantes del punto de recopilación de datos de nivel y de caudal se vieron afectados a partir de la

temporada previa a la última medición, lo que asegura que en un futuro las condiciones se mantendrán dinámicas por lo que se debería redefinir puntos de control para próximos aforos.

La ecuación de regresión omitiendo el último par de datos posee un coeficiente de determinación de 0.9961. Este valor representa casi en su totalidad la variación de las observaciones de caudal respecto al nivel medido durante la temporada de aforos. La curva de descarga, $Q = 4.60 (h - 0.21)^{2.18}$, expone una desviación estándar de los errores residuales de 30.5l/s, indicando la magnitud promedio del error de estimación.

5.6. Contraste de caudales específicos entre el río Mazán y río Culebrillas

Se considera que el tiempo entre registro de datos consecutivos entre estaciones correspondientes a una misma fecha no tiene influencia significativa en la variabilidad de las magnitudes de caudal, por lo que esta diferencia temporal no explica la desigualdad encontrada entre caudales específicos de cada río. Al analizar los resultados de Mazán respecto a culebrillas con las observaciones sin considerar el caudal que sale, se tiene que el valor de Culebrillas corresponde a solamente el 57% del Mazán. Un análisis similar considerando el valor estándar de caudal de salida de 300l/s, el caudal específico promedio supera al Mazán en 7% de su magnitud.

Estos resultados indican que, al asumir un caudal superior, los rendimientos de las cuencas se aproximan. Sin embargo, no es adecuado suponer una salida de caudal constante, debido a que es cambiante, especialmente en épocas marcadas de sequía como la temporada correspondiente a los primeros aforos. Por lo que, cuantificar los volúmenes de agua de salida contribuiría a explicar tal la variabilidad entre caudales y a su vez a determinar el caudal específico real.

Mazán	Culebrillas	
	Caudal específico (l/s/km ²) (Sin caudal captado)	Caudal específico (l/s/km ²) (Con caudal captado)
4.06	0.62	5.91
4.81	0.49	5.79
7.25	0.95	6.25
6.99	0.94	6.23
7.01	4.00	9.30
7.23	4.16	9.46
20.03	11.88	17.17
18.60	12.32	17.61
16.20	7.45	12.74
15.52	7.22	12.51
14.48	11.33	16.62

7.42	8.56	13.85
7.49	8.01	13.30
Promedio= 10.55	Promedio= 5.99	Promedio= 11.29

Tabla 5-3. Caudal específico de los ríos Mazán y Culebrillas (sin considerar el caudal captado y considerando un valor de 300l/s de caudal captado). Fuente: Elaboración propia.

5.7. Canal de laboratorio con vertedero triangular

El tamaño de la muestra para la determinación de curvas de descarga tanto para el equipo Flowtracker2 como para el medidor de velocidad Vectrino proporcionó estimaciones precisas dentro del rango de observaciones. El rango en mención, para dicho canal de laboratorio rectangular con vertedero triangular a 90° de pared delgada, tiene su límite máximo de nivel en poco más de 9cm por lo que cubre todo el rango superior de caudales, mientras que el nivel de observación menor corresponde a 2cm, de lo cual, al ser un valor muy bajo se considera que la curva de descarga resultante es aplicable a niveles inferiores, cubriendo así todo el rango de niveles posibles de acuerdo a la capacidad del canal.

Al analizar los resultados obtenidos a partir de las observaciones realizadas con ambos instrumentos, las pruebas estadísticas aplicadas a los residuos para verificación del modelo de ajuste, producto de linealizar la ecuación a partir de logaritmos naturales, determinan que los residuos siguen una distribución normal de media cero y varianza constante y no poseen autocorrelación, por lo que se comprueba la fiabilidad de ambos modelos.

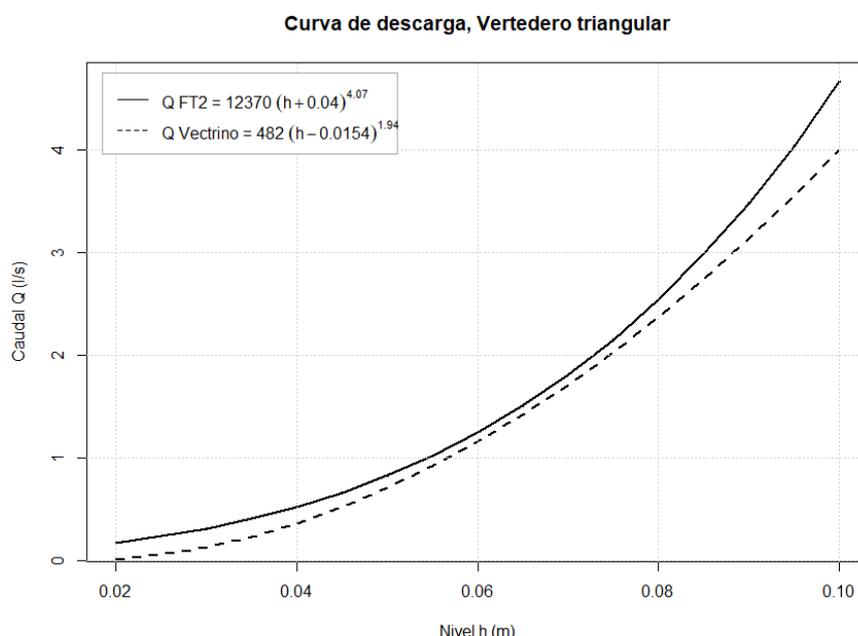


Figura 5-2. Curvas de descarga para observaciones realizadas con Flowtracker2 (línea continua) y Vectrino (línea entrecortada), para nivel h en m y caudal Q en l/s. Fuente: Elaboración propia.

Las ecuaciones generadas indican que las predicciones a partir de Q_{FT2} superan a las de $Q_{Vectrino}$ en todo el rango de niveles, con un crecimiento destacado en valores superiores a

8cm, lo que se observa en la tendencia de pendiente más pronunciada de acuerdo a la **Figura 5-2**.

Al analizar el coeficiente de determinación, no resulta adecuado realizar una comparación de magnitudes entre sí debido al uso de distintos instrumentos. Sin embargo, al ser en ambos casos cercanos a la unidad, esta medida estadística representa de cierta manera un ajuste apropiado de valores observados respecto a las ecuaciones de predicción. Los resultados del modelo de regresión lineal adoptado por el FT2 poseen un valor mayor de R^2 y menor desviación estándar de los residuos, indicando un mejor ajuste respecto a los datos, de lo cual la combinación de parámetros ajustados A, B y C con la variable independiente (nivel) explican apropiadamente la variabilidad de la variable dependiente (caudal).

Al evaluar ambos modelos predictivos respecto a ecuaciones teóricas de distintos autores aplicando las estadísticas de ajuste de error medio cuadrático y error absoluto medio, se determina que la ecuación Q_{FT2} tiene un mejor ajuste. De acuerdo a la **Tabla 4-32**, en lo que concierne al MSE, los resultados del equipo Vectrino superan a los del FT2 en factores aproximados de 13, 3, 6 y 4 respectivamente para los diferentes autores, indicando una discrepancia significativa de los errores residuales en promedio. Por otra parte, el MAE indica que para las lecturas del Vectrino, los predichos difieren en promedio con valores menores a 0.2l/s, mientras que para el FT2 en valores menores a 0.07l/s respecto a los teóricos. La ecuación del autor King, H presenta menor valor de MSE y MAE para FT2, por lo que es la que se asemeja más al ajuste.

La simplicidad de las condiciones hidráulicas de un canal de laboratorio respecto a cauces naturales debido a la geometría rectangular, a la rugosidad baja y uniforme de las paredes y del fondo, y a la ausencia de sedimentos, torna más sencillo el predecir la variabilidad de caudal. No obstante, el replicar las mismas condiciones de medición con exactitud para dos equipos diferentes es imposible. Por lo que, se establece que la obtención de valores superiores de MAE y MSE de la ecuación $Q_{Vectrino}$ respecto a teóricos está relacionado con el cálculo manual de caudales sin las correcciones que realiza el equipo FT2, principalmente de dirección de velocidad.

Finalmente se adopta la ecuación $Q = 12370 (h+0.04)^{4.07}$ con nivel h en m y caudal Q en l/s , representada gráficamente en la **Figura 4-43**, o en su defecto la ecuación teórica de King, H correspondiente a $Q = 1240 (h)^{2.47}$.

Capítulo 6

Conclusiones, observaciones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

De acuerdo al objetivo general de elaborar curvas de descarga y estimar errores de medición en dos secciones transversales de cauces naturales ubicados al noroeste de la ciudad de Cuenca en el río Mazán y en el río Culebrillas antes de la junta con el río Matadero, se mantuvo presente la importancia de una modelación apropiada a fin de permitir gestionar eficazmente el recurso hídrico para su aprovechamiento y diversas aplicaciones. De manera que las etapas involucradas como estudios previos, metodología e instrumentación, recolección de datos, análisis de resultados e interpretación se ejecutaron con estándares apropiados para garantizar resultados representativos apegados a la realidad.

El equipo de medición de flujo FlowTracker2 presentó una alternativa eficaz para la medición en tiempo real de caudales en laboratorio y en cauces naturales de características vadeables, presentándose como una herramienta de uso sencillo, facilitando el proceso de recolección de datos. Permitió agilizar la determinación de caudal, por su cálculo inmediato y correcciones relacionadas a las condiciones de flujo. Además, contribuyó al control de la calidad de los datos al instante de medición gracias a la configuración de umbrales de calidad. En definitiva, la familiarización del instrumento y sus accesorios en laboratorio permitió una manipulación adecuada en campo, así como disminuir la incertidumbre relacionada al aforador, al tipo de equipo y a la metodología de medición.

La curva de descarga apropiada para Mazán A.J. Matadero se adopta del modelo I, $Q=1.59(h + 0.25)^{4.68}$, que se encuentra en función de las lecturas de nivel de la regleta instalada en el sector. Esta curva representa en un 97%, según el ajuste, la variabilidad de las observaciones entre la relación de las variables transformadas de caudal-nivel, dentro de un rango de 0.45m a 0.80m. La aplicabilidad de la curva fuera de los límites disminuirá tal precisión en los resultados, especialmente para valores superiores en donde la incertidumbre de los caudales predichos es mayor.

La curva de descarga de ecuación exponencial de la estación limnigráfica de propiedad municipal, $Q = 0.051e^{0.0232h}$ con h en cm y Q en m³/s, no es adecuada para estimación de caudales. Esta ecuación no captura la variación caudal – nivel del río Mazán y por su tendencia de crecimiento sobreestima los resultados en gran magnitud. Se plantea reajustar los parámetros de la ecuación obtenida en el presente trabajo a fin de reemplazar las lecturas

de la regleta por el lector automático del equipo y adoptarla como nueva curva de descarga, al menos dentro del rango en mención.

En la estación Culebrillas A.J. Matadero, las secciones elegidas no son óptimas para continuar con mediciones ya que B-1 no es aplicable a distintos rangos de caudal, mientras que B-2 se espera que cambie conforme pasa el tiempo, al igual que el punto de medición de nivel que debido a la acumulación de sedimentos en el sitio y sus alrededores, incrementa el nivel produciendo lecturas cada vez mayores que dejan de ser compatibles con las correspondencias antecedentes, produciendo inexactitud en los resultados y comprometiendo los fines a los cuales sean aplicados. Por tal, la curva de descarga de Culebrillas A.J. Matadero, $Q = 4.60 (h - 0.21)^{2.18}$, es aplicable solamente al período de aforos ejecutados, requiriéndose a futuro un nuevo tramo de control de condiciones mejores que la sección B-2, que capture la respuesta del sistema para realizar calibraciones y reajustes a nuevos intervalos de nivel.

La curva de descarga para el canal de laboratorio con vertedero triangular de pared delgada, $Q = 12370 (h+0.04)^{4.07}$ con nivel h en m y caudal Q en l/s , predice caudales que se asemejan a la ecuación teórica de King, H correspondiente a $Q = 1240 (h)^{2.47}$ por lo que ambas son aplicables a este caso de estudio. La ecuación de ajuste obtenida a partir de observaciones con el equipo FlowTracker2 explica en un 99.76% la variabilidad de la relación lineal entre las variables transformadas mediante logaritmos naturales de caudal y nivel.

En respuesta a la pregunta de investigación, los resultados han demostrado que en condiciones que permiten controlar ciertas variables, el ajuste es más preciso y captura casi en su totalidad el comportamiento del sistema, a diferencia de la situación en campo en la cual la incertidumbre es mayor y por ende la magnitud de los errores residuales. Similarmente, la replicabilidad y repetibilidad de los aforos es más sencilla en laboratorio, mientras que en cauces naturales se da con menor precisión por la influencia externa de las condiciones ambientales. En ambos casos fue posible determinar la curva de descarga que represente de mejor manera el comportamiento del flujo. La curva de descarga obtenida para el canal de laboratorio con vertedero triangular a 90° de pared delgada con sistema de turbina hidráulica tipo Francis, $Q = 12370 (h+0.04)^{4.07}$ con nivel h en m y caudal Q en l/s , es aplicable a todos los rangos de nivel. La curva de descarga de Mazán A.J. Matadero, $Q=1.59 (h + 0.25)^{4.68}$ con nivel h en m y caudal Q en m^3/s , es aplicable al rango de 0.45m a 0.80m. La curva de descarga de Culebrillas A.J. Matadero, $Q = 4.60 (h - 0.21)^{2.1}$ con nivel h en m y caudal Q en m^3/s , es aplicable al intervalo de 0.3m a 0.65m durante el período aforado.

Por otro lado, ambas microcuencas son propensas a mantener un flujo base sostenido con picos de caudal moderados. Sin embargo, la microcuenca del río Mazán puede tener una capacidad de erosión y transporte de sedimentos ligeramente mayor debido a su densidad de drenaje y pendiente superior, además de su forma ligeramente menos alargada en comparación con la microcuenca del Río Culebrillas. Pese a su mayor capacidad erosiva, el relieve de la microcuenca del río Culebrillas se encuentra en una etapa de maduración levemente mayor, de modo que se esperaría que con el pasar del tiempo las curvas hipsométricas lleguen a presentar características similares.

A pesar de poseer características morfométricas similares en ambas microcuencas hidrográficas, el análisis presentado no explica en su totalidad la diferencia de magnitud de caudales específicos, en donde el rendimiento de la microcuenca del río Mazán supera a la del río Culebrillas. Las variaciones de caudal de un cauce a otro registradas durante las campañas de aforo se pueden atribuir a varias razones. Principalmente, se atribuye a la magnitud del caudal total captado para diferentes usos en el río Culebrillas. Por otro lado, el régimen de lluvias y la magnitud de infiltración y evapotranspiración determinan igualmente el caudal esperado a la salida de la red de drenaje. Además, el tipo, uso y cobertura del suelo se ven involucrados temporalmente en los procesos hídricos por su relación con la infiltración y escorrentía del agua, que, a pesar de presentar similitudes entre las microcuencas, las pequeñas diferencias de superficie condicionan los resultados.

Finalmente, se ha cumplido los objetivos específicos para establecer las conclusiones del presente trabajo, partiendo del adiestramiento de uso del equipo mediante la comprensión de su funcionamiento, así como la capacitación en laboratorio. La ejecución de mediciones en condiciones controladas permitió además estudiar los valores y realizar las interpretaciones respectivas de los resultados. Por otro lado, realizar aforos en campo conscientemente de la utilidad de los datos, mantuvo su consistencia con las condiciones de variabilidad natural. La determinación de curvas de descarga representativas con un ajuste verificado, permitieron evaluar el comportamiento de los cauces de estudio. Asimismo, la caracterización morfométrica de las microcuencas contribuyó a realizar una evaluación y análisis comparativo de las mismas y de las estaciones involucradas, concluyendo que, a pesar de la similitud de microcuencas, su caracterización no explica la diferencia obtenida en caudales aforados.

6.2. Observaciones y factores limitantes

Entre las principales limitaciones del trabajo se encontró la dificultad de controlar las variables que no son estudiadas, principalmente en las mediciones en campo, ya que replicar las mismas condiciones de medición resulta imposible por la variabilidad tiempo-espacial del

entorno. A pesar de ello, se procuró ejecutar las observaciones en una misma sección mejorada con una metodología particular. Además de que la precisión del instrumento fue adecuada sin necesitar calibración, en donde la práctica en laboratorio brindó a los aforadores la habilidad para su uso en campo a fin de disminuir errores humanos y por equipo.

El mejoramiento de los tramos de control se vio limitado por la magnitud y cantidad del material rocoso. En la estación Mazán A.J. Matadero hubo una cantidad reducida de obstáculos que generaron fenómenos locales dentro del tramo de control. En cuanto a la estación Culebrillas A.J. Matadero se encontró material fluvio-glacial que superaba el metro de altura produciendo estrechamiento de cauce, alteraciones en la dirección del flujo, estancamientos y zonas de flujo de retorno. No obstante, se procuró ejecutar las mediciones estratégicamente, evitando colocar las verticales cerca de obstáculos y disminuyendo la distancia entre verticales en zonas de flujo representativo.

Por otro lado, el tamaño de la muestra dependió principalmente de la disponibilidad de los aforadores y a su vez del tiempo empleado en cada salida a campo, teniendo que realizar ciertos aforos con tiempos prolongados entre medición. Mientras que la variabilidad de caudales se vio limitada a su vez por las condiciones climáticas de la época, de lo cual, al presentarse una temporada de sequía, no fue posible obtener registros más altos de caudal dentro de las fechas previstas y, similarmente no se pudo obtener registros en puntos intermedios. Sin embargo, la cantidad de datos y los valores máximos y mínimos permitieron reflejar adecuadamente la relación caudal-nivel en el intervalo de medición y cumplir con los objetivos previstos dentro del alcance planteado.

6.3. Recomendaciones para futuras investigaciones

Dentro del marco del presente estudio, una de las principales recomendaciones está relacionada con el levantamiento de la información. En primer lugar, el tamaño de la muestra influye directamente en la precisión de las curvas de descarga, de lo cual una muestra no representativa o muy pequeña podría no reflejar apropiadamente la correspondencia entre nivel y caudal. La cantidad de observaciones dependería de la necesidad y grado de precisión requerido, y a su vez de las características del cauce de interés referente a su sensibilidad ante la variación espaciotemporal, como lo son la magnitud y frecuencia de épocas de crecida y estiaje, o la influencia del caudal sólido sobre la geometría del lecho. Es así que se recomienda adoptar el mínimo de 15 mediciones establecido por la norma ISO 18320 (2020) para determinar por primera vez una curva de descarga en un tramo nuevo, y continuar con aforos en diversas condiciones climáticas para lograr capturar toda la variabilidad estacional y poder realizar ajustes y actualizaciones en las curvas de descarga propuestas.

Asimismo, las curvas de descarga son aplicables al intervalo de medición, por lo que se sugiere realizar observaciones fuera del rango y recalibrar las ecuaciones a fin de limitar la extrapolación de datos que podrían llevar a predicciones sobrestimadas o subestimadas.

El mejoramiento de la sección de aforo de preferencia debe realizarse en caudales bajos con el objeto de aprovechar los niveles mínimos para el acomodo o remoción de obstáculos que pudieran interferir con el dispositivo de medición. Además, tirantes bajos de agua permiten realizar inspecciones visuales del fondo de lecho y realizar mediciones de perfil para detectar cambios de forma y establecer condiciones uniformes tanto transversal como longitudinalmente. De ser posible se recomienda realizar un mantenimiento regular a las estaciones, especialmente luego de eventos de crecidas debido a los cambios de geometría por acumulación o remoción de sedimentos a modo de no comprometer la calidad de datos. En lo que respecta a secciones de medición continuamente variables se recomendaría optar por controles artificiales o estructuras aguas arriba de la sección de aforo que permitan mantener condiciones estables.

En cuanto a la estación Mazán A.J. Matadero, se recomienda planificar inspecciones, limpiezas y mantenimientos recurrentes en el tramo que comprende la regleta de lectura de nivel debido a la cantidad de sedimentos acumulados que comprometen su vida útil y la calidad de las observaciones limnimétricas.

Para el caso de la estación Culebrillas A.J. Matadero, se aconseja analizar nuevamente el tramo de control ya que la primera sección de medición (B-1) fue útil solamente en caudales bajos mientras que la segunda sección (B-2) se mostró cambiante temporalmente, además de presentar una distribución de flujo no perpendicular a la sección transversal en el margen izquierdo.

Además de la redefinición de las secciones de control, se recomienda cuantificar con mayor precisión las salidas de volúmenes de agua, especialmente antes de los puntos de medición. Así como, definir el uso de agua ya que puede involucrar un retorno parcial del volumen extraído.

También se puede optar por incluir una mayor cantidad de verticales a fin de detallar la variación de velocidad en la sección transversal de los cauces y obtener registros más complejos de la morfología de la sección. A su vez, procurar ejecutar las observaciones en los mismos puntos predefinidos para todos los aforos o en más secciones transversales con la intención de plantear comparativas y contrastar resultados.

Por otro lado, el estudio de la variación espacial y temporal de agentes climatológicos externos como la precipitación o la temperatura permitirían establecer parte de las causas de las diferencias encontradas entre las magnitudes de caudal de los ríos de estudio. Así también, realizar el balance hídrico de las microcuencas de características morfométricas relativamente similares permitiría definir con mayor precisión la disponibilidad de agua.

Referencias

- Agencia de Regulación y Control del Agua. (2022). *Guía técnica. Implementación de macromedición en los procesos de producción y distribución de agua potable*. ARCA.
- Arboleda, J., Felipe, O., & Yerrén, J. (2018). *Manual de Hidrometría. Documento Técnico 001 SENAMHI-DHI*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
- Buffington, J. M., & Montgomery, D. R. (2013). Geomorphic Classification of Rivers. En *Treatise on Geomorphology* (pp. 730-767). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00263-3>
- Chereque, Wendor. (1989). *Hidrología para estudiantes de Ingeniería Civil*. CONCYTEC.
- Chow, V. T. (1994a). *Hidráulica de canales abiertos* (1.ª ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Chow, V. T. (1994b). *HIDRÁULICA DE CANALES ABIERTOS* (Vol. 1). McGRAWL-HILL.
- Devore, J. L. (2008). *Probabilidad y estadística* (Séptima). Cengage Learning.
- Edwards, P. J., Williard, K. W. J., & Schoonover, J. E. (2015). Fundamentals of watershed hydrology. *Journal of Contemporary Water Research & Education*. 154: 3-20., 154, 3-20.
- ETAPA EP. (s. f.). *Red hidrometeorológica*. Plataformas de cuidado meteorológico e hidrológico. <https://www.etapa.net.ec/gestion-ambiental/plataformas-de-cuidado-meteorologico-e-hidrologico/red-hidrometeorologica/>
- Faraway, Julian. (2009). *Linear Models with R* (Vol. 63). Chapman & Hall/CRC.
- Hidalgo, L. (2017). *Guía práctica para aforar en canales y cauces naturales, utilizando instrumentación básica y de bajo costo*. Escuela Politécnica Nacional. Escuela de formación de Tecnólogos.
- Hrafinkelsson, B., Sigurdarson, H., Rögnvaldsson, S., Jansson, A. Ö., Vias, R. D., & Gardarsson, S. M. (2021). *Generalization of the power-law rating curve using hydrodynamic theory and Bayesian hierarchical modeling* (arXiv:2010.04769). arXiv. <http://arxiv.org/abs/2010.04769>
- Hulsing, H., Smith, W., & Cobb, E. D. (1869). *Velocity- Head Coefficients in Open Channels*.

- Hydrometric Network*. (2015, marzo 3). National River Flow Archive. <https://nrfa.ceh.ac.uk/hydrometry-uk>
- ICC. (2017). *Manual de medición de caudales*. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.
- INAMHI. (2011, agosto 4). *Nuestra historia. Meteorología e Hidrología: Pasado, presente y futuro en el Ecuador*. 52.
- Información temática digital de la cuenca del Río Paute*. (s. f.). [dataset]. GeoNetwork OpenSource. <https://gis.uazuay.edu.ec/descargas/promsa/paute/home.htm>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2016). *Anuario hidrológico 2014-2016. Publicación de la información generada por las 35 estaciones hidrológicas automáticas*. INAMHI.
- International Organization for Standardization. (1992). *Measurement of liquid flow in open channels—Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method* (2175).
- International Organization for Standardization. (1996). *Measurement of liquid flow in open channel—Part 1: Establishment and operation of a gauging station*.
- International Organization for Standardization. (2007a). *Hydrometry—Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats*.
- International Organization for Standardization. (2007b). *Hydrometry—Velocity-area methods using current-meters—Collection and processing of data for determination of uncertainties in flow measurement*.
- International Organization for Standardization. (2020). *Hydrometry—Measurement of liquid flow in open channels—Determination of the stage–discharge relationship*.
- Ion, Z. (1985). Morphometry of Drainage Basins. En *XF2006256478*.
- Ji, J.-Y., Park, S.-Y., Lee, G.-W., Park, G.-M., Hwang, S.-H., Kim, D.-H., & Lee, Y.-J. (2013). Analysis and Comparison of Flow Rate Measurements Using Various Discharge Measuring Instrument and ADCP. *Journal of Environmental Science International*, 22(2), 251-257. <https://doi.org/10.5322/JESI.2013.22.2.251>

- Julie, Pierre. (2002). *River Mechanics*. Cambridge University Press.
- Kennedy, A., Fragoza, F., Peña, E., & Moreno, E. (1991). *Manual de aforos*. Subcoordinación Editorial, IMTA.
http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/971/IMTA_028.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Kintz, J. R. C., Escobar, Y. C., & Heredia, L. M. C. (2009). *Caudal ambiental: Conceptos, experiencias y desafíos* (1.^a ed.). Universidad del Valle.
<https://www.jstor.org/stable/j.ctt1rfsq72>
- Kutner, M. H. (Ed.). (2005). *Applied linear statistical models* (5th ed). McGraw-Hill Irwin.
- Léonard, J., Mietton, M., NAJIB, H., & Gourbesville, P. (2000). Rating curve modelling with Manning's equation to manage instability and improve extrapolation. *Hydrological Sciences Journal*, 45, 739-750. <https://doi.org/10.1080/02626660009492374>
- Lloret, Pablo. (2011, octubre 5). *FONAG - Fondo para la protección del agua, Ecuador*. El agua en la economía verde en la práctica: hacia Río+20, Zaragoza, España.
http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/green_economy_2011/
- López, Raúl. (2005a). *Características hidráulicas y geomorfológicas de ríos de montaña (I)*. 36-39.
- López, Raúl. (2005b). *Características hidráulicas y geomorfológicas de ríos de montaña (III)*. 361, 36-39.
- López-Alonso, R., Barragán-Fernández, J., & Colomer-Cugat, M. À. (2008). Predicción de la resistencia al flujo en ríos de montaña. *Ingeniería hidráulica en México*, XXIII(3), 65-76.
- Maidment, D. (1993). *Handbook of Hydrology* (Vol. 1). McGRAW-HILL.
- Martín Vide, Juan Pedro. (2002). *Ingeniería de ríos*. EDICIONES UPC.
- Michel, D., Hirschi, M., Rosch, M., Brennan, K., Egly, M., & Jager, F. (2023). *Discharge measurements*. Climatological and hydrologyc field course.

- Montgomery, D. C. (2013). *Design and analysis of experiments* (Eighth edition). John Wiley & Sons, Inc.
- Ordóñez Espinoza, Galo. (2008). *De la bacinilla a la alcantarilla*. Uediciones.
- Organización de los Estados Americanos. (1978). *República de Panamá—Proyecto de desarrollo integrado de la región oriental de Panamá—Darién*. Gobierno de la República de Panamá. Programa de Desarrollo Regional. <https://www.oas.org/osde/publications/Unit/oea30s/begin.htm#Contents>
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2021). *Reglamento Técnico (OMM-N°49), Volumen III: Hidrología*. <https://library.wmo.int/idurl/4/32543>
- Palman, L., Montagnini, M., Pez, & Trento, A. (2015). *Mediciones en laboratorio con equipo flowtracker (ADV)*.
- Quintana Aylwin, A. (1951). *Determinación de la ecuación de curvas de descarga en cauces naturales* (7-8; pp. 256-265). Anales Del Instituto De Ingenieros De Chile. <https://revistas.uchile.cl/index.php/AICH/article/view/50006>
- Rantz, S. (1982a). *Measurement and computation of streamflow: Volume 1, Measurement of stage and discharge*. https://doi.org/10.3133/wsp2175_vol1
- Rantz, S. (1982b). *Measurement and computation of streamflow: Volume 2. Computation of discharge* (Report 2175; Water Supply Paper). https://doi.org/10.3133/wsp2175_vol1
- Reitan, T., & Petersen-Overleir, A. (2011). Dynamic rating curve assessment in unstable rivers using Ornstein-Uhlenbeck processes. *Water Resources Research*, 47(2). <https://doi.org/10.1029/2010WR009504>
- Rojas, Óscar. (2016). *Manual básico para medir caudales*. Fondo para la Protección del Agua; Central Ecuatoriana de Servicios Agrícolas; The Nature Conservancy.
- Rosero, Rosario. (2010). *SCADA del sistema de distribución de agua potable de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento*. EPMAPS.
- Ruiz, A. (s. f.). Aforo Mediante Trazadores. *Servicios de Aplicaciones Nucleares (CEDEX)*, 1.

- Schugerl, R., Veliskova, Y., & Kimlickova, T. (2019). Comparison of the discharge and flow velocity values determined by ADV device and indicator method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 362(1), 012056. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/362/1/012056>
- Sellers, C., Buján, S., Corbelle, E., & Miranda, D. (2017). EJE 07-09 Morfología interpretativa de alta resolución usando datos LiDAR en la cuenca hidrográfica del río Paute en Ecuador. *Memorias y Boletines de la Universidad del Azuay*, XVI, Article XVI.
- SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA. (1964). *Anuario hidrológico 1963 (Incluye resumen de los datos hidrométricos de 1954—1963) No. 1*. INAMHI.
- Smith, I., & Peter, S. (1978). An introduction of study of Hydrology. En *The river basin* (Primera, Vol. 1, p. 120). Press Syndicate of the University of Cambridge.
- SonTek. (s. f.). *FlowTracker2 ADV. Versatile Wading Discharge & Lab Acoustic Doppler Velocimeter*. Xylem Environmental Solutions. <https://www.xylem.com/siteassets/brand/sontek/resources/brochure/flowtracker2-brochure.pdf>
- Vélez, M. (2000). *HIDROLOGIA PARA INGENIEROS*.
- WBG. (2021). *Climate Risk Country Profile: Ecuador*. World Bank Group.

Anexos

Anexo A. Observaciones de nivel y caudal en laboratorio

Lecturas de velocidad con equipo Vectrino y cálculo de caudal

No.	Altura total	Altura sobre vertedero	Velocidad			Método	No. verticales	Caudal $Q = A \cdot v$			
	H	h	V ₁	V ₂	V ₃			Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q
	cm	m	cm/s	cm/s	cm/s			l/s	l/s	l/s	l/s
1	16.8	0.086	3.9	3.72	4.51	0.6d	3	0.98	0.62	1.14	2.74
2	16.8	0.086	3.65	3.67	4.6	0.6d	3	0.92	0.62	1.16	2.70
3	16.8	0.086	3.8	3.51	4.53	0.6d	3	0.96	0.59	1.14	2.69
4	15.5	0.074	2.8	3.04	3.68	0.6d	3	0.65	0.47	0.86	1.98
5	15.5	0.074	2.94	3.24	3.66	0.6d	3	0.68	0.50	0.85	2.04
6	15.5	0.074	2.97	3.04	3.75	0.6d	3	0.69	0.47	0.87	2.03
7	14.7	0.065	2.14	2.31	2.64	0.6d	3	0.47	0.34	0.58	1.39
8	14.7	0.065	2.16	2.14	2.45	0.6d	3	0.48	0.31	0.54	1.33
9	14.7	0.065	2.22	2.02	2.64	0.6d	3	0.49	0.30	0.58	1.37
10	13.8	0.055	1.72	1.76	2.13	0.6d	3	0.36	0.24	0.44	1.04
11	13.8	0.055	1.51	1.67	1.96	0.6d	3	0.31	0.23	0.41	0.95
12	13.8	0.055	1.69	1.71	1.67	0.6d	3	0.35	0.24	0.35	0.93
13	12.8	0.045	1.07	0.98	1.01	0.6d	3	0.21	0.13	0.19	0.52
14	12.8	0.045	0.98	0.94	1.05	0.6d	3	0.19	0.12	0.20	0.51
15	12.8	0.045	1.06	1.01	1.13	0.6d	3	0.20	0.13	0.22	0.55
16	11.8	0.036	0.48	0.52	0.49	0.6d	3	0.08	0.06	0.09	0.23
17	11.8	0.036	0.55	0.56	0.59	0.6d	3	0.10	0.07	0.10	0.27
18	11.8	0.036	0.53	0.5	0.59	0.6d	3	0.09	0.06	0.10	0.26
19	16.3	0.08	3.28	3.85	3.96	0.6d	3	0.80	0.63	0.97	2.40
20	16.3	0.08	2.97	3.76	4.48	0.6d	3	0.73	0.61	1.10	2.43
21	16.3	0.08	2.78	3.13	4.01	0.6d	3	0.68	0.51	0.98	2.17
22	17.3	0.09	4.42	4.44	4.78	0.6d	3	1.15	0.77	1.24	3.16
23	17.3	0.09	4.24	4.47	4.85	0.6d	3	1.10	0.77	1.26	3.13
24	17.3	0.09	4.49	5.36	5.19	0.6d	3	1.17	0.93	1.35	3.44
25	17.0	0.088	4.00	3.84	4.87	0.6d	3	1.02	0.65	1.24	2.91
26	17.0	0.088	4.12	3.98	4.78	0.6d	3	1.05	0.68	1.22	2.95
27	17.0	0.088	4.15	3.91	5.00	0.6d	3	1.06	0.66	1.28	3.00

Nota. Observaciones de velocidad realizadas en un tiempo de lectura de 40seg. Ecuación de caudal: MidSection. Fuente: Elaboración propia.

Lecturas de caudal con equipo Flowtracker2

No.	Altura total	Altura sobre vertedero	Caudal	Método	No. verticales
	H	h	Q		
	cm	m	l/s		
1	10.4	0.022	0.20	0.6d	3
2	10.4	0.022	0.20	0.6d	3
3	12.8	0.046	0.70	0.6d	3
4	12.8	0.046	0.60	0.6d	3
5	13.8	0.055	1.10	0.6d	3
6	13.8	0.055	1.00	0.6d	3
7	14.6	0.062	1.40	0.6d	3
8	14.6	0.062	1.40	0.6d	3
9	15.6	0.073	2.00	0.6d	3
10	15.6	0.073	2.10	0.6d	3
11	17.4	0.091	3.50	0.6d	3
12	17.4	0.091	3.50	0.6d	3

Nota. Observaciones de velocidad realizadas en un tiempo de lectura de 40seg. Ecuación de caudal: MidSection. Fuente: Elaboración propia.

Anexo B: Campaña de aforos realizada en campo

Aforos realizados con equipo Flowtracker2 en la estación Mazán A.J. Matadero

ID	SECCIÓN			NIVEL h (m)		CAUDAL Q (m3/s)	VELOCIDAD MEDIA (m/s)		ERROR VELOCIDAD MEDIA (m/s)		SNR medio (dB)	No. verticales	T media (°C)	Fecha dd/mm/aa hh:mm	Método	Sentido de medición
	Ancho B (m)	Área total A (m2)	Prof. media \bar{y} (m)	Inicio de medición	Fin de medición		Vx	Vy	Vx Err	Vy Err						
1	6.15	1.297	0.211	0.46	0.46	0.297	0.229	-0.06	0.01	0.006	42.484	10	12.519	31/10/2023 10:47	0.2/0.8, 0.6	Md-Mi
2	6.15	1.366	0.222	0.46	0.46	0.352	0.258	-0.054	0.01	0.006	41.152	10	12.846	31/10/2023 11:17	0.2/0.8, 0.6	Mi-Md
3	8.1	2.037	0.224	0.52	0.52	0.53	0.263	-0.047	0.013	0.007	41.528	16	13.168	14/11/2023 10:23	0.2/0.8, 0.6	Md-Mi
4	8.1	1.989	0.246	0.52	0.52	0.511	0.257	-0.076	0.009	0.006	41.872	16	13.26	14/11/2023 11:09	0.2/0.8, 0.6	Mi-Md
5	11	4.288	0.39	0.77	0.78	1.976	0.461	0.086	0.017	0.01	51.944	15	12.859	20/12/2023 15:02	0.6	Md-Mi
6	8.6	2.06	0.24	0.56	0.56	0.513	0.249	-0.023	0.009	0.005	38.497	22	13.336	30/1/2024 10:33	0.2/0.8, 0.6	Md-Mi
7	8.6	2.084	0.242	0.56	0.56	0.529	0.249	-0.017	0.009	0.006	38.851	22	13.618	30/1/2024 11:25	0.2/0.8, 0.6	Mi-Md
8	10.5	3.4815	0.332	0.72	0.72	1.46489	0.421	0.04	0.015	0.008	46	22	12.6	7/2/2024 10:28	0.2/0.8, 0.6	Md-Mi
9	10.5	3.6025	0.343	0.72	0.72	1.36068	0.378	0.014	0.013	0.008	48	22	12.632	7/2/2024 11:22	0.2/0.8, 0.6	Mi-Md
10	10.1	3.052	0.302	0.68	0.68	1.185	0.388	0.036	0.014	0.008	45.973	26	12.424	9/2/2024 10:23	0.2/0.8, 0.6	Md-Mi
11	10.1	3.077	0.305	0.69	0.69	1.135	0.369	0.038	0.013	0.008	45.823	26	12.493	9/2/2024 11:12	0.2/0.8, 0.6	Mi-Md
12	10.2	3.054	0.299	0.69	0.69	1.059	0.347	0.053	0.013	0.008	45.878	22	12.679	6/3/2024 10:30	0.2/0.8, 0.6	Md-Mi
13	9.4	1.951	0.208	0.56	0.56	0.543	0.278	-0.001	0.009	0.005	39.682	24	12.316	9/4/2024 10:32	0.2/0.8, 0.6	Md-Mi
14	9.4	2.028	0.216	0.56	0.56	0.548	0.27	-0.038	0.008	0.005	38.949	23	12.347	9/4/2024 11:06	0.2/0.8, 0.6	Mi-Md

Nota. Md=Margen derecho, Mi=Margen izquierdo. Observaciones de velocidad realizadas en un tiempo de lectura de 40seg. Ecuación de caudal: MidSection. Fuente: Elaboración propia.

Aforos realizados con equipo Flowtracker2 en la estación Culebrillas A.J. Matadero

ID	SECCIÓN			NIVEL h (m)		CAUDAL Q (m3/s)	VELOCIDAD MEDIA (m/s)		ERROR VELOCIDAD MEDIA (m/s)		SNR medio (dB)	No. Verti cales	T media (°C)	Fecha dd/mm/aa hh:mm	Método	Sentido de medición
	Ancho B (m)	Área total A (m2)	Prof. media \bar{y} (m)	Inicio de medición	Fin de medición		Vx	Vy	Vx Err	Vy Err						
1	2.55	0.681	0.267	0.315	0.315	0.035	0.051	-0.002	0.003	0.002	39.617	8	14.834	31/10/2023 12:16	0.2/0.8, 0.6	Md-Mi
2	2.2	0.643	0.292	0.315	0.315	0.028	0.044	-0.005	0.002	0.002	41.538	7	15.142	31/10/2023 12:48	0.2/0.8, 0.6	Mi-Md
3	2.2	0.687	0.312	0.345	0.345	0.054	0.079	-0.005	0.003	0.002	44.669	9	15.06	14/11/2023 12:19	0.2/0.8, 0.6	Md-Mi
4	2.2	0.691	0.314	0.345	0.345	0.053	0.076	-0.006	0.003	0.002	46.888	9	14.986	14/11/2023 12:45	0.2/0.8, 0.6	Mi-Md
5	3	1.175	0.392	0.48	0.48	0.227	0.193	-0.018	0.012	0.007	45.719	12	15.585	30/1/2024 12:31	0.2/0.8, 0.6	Mi-Md
6	3.1	1.173	0.378	0.48	0.48	0.236	0.201	-0.01	0.012	0.006	45.144	12	16.234	30/1/2024 13:09	0.2/0.8, 0.6	Md-Mi
7	6.9	2.2995	0.333	0.615	0.615	0.67331	0.293	0.193	0.011	0.007	47	18	12.671	7/2/2024 12:42	0.2/0.8, 0.6	Md-Mi
8	6.9	2.3435	0.34	0.615	0.615	0.6983	0.298	0.176	0.011	0.007	48	18	13.156	7/2/2024 13:25	0.2/0.8, 0.6	Mi-Md
9	6.7	1.822	0.272	0.55	0.55	0.422	0.242	0.193	0.007	0.006	45.255	20	12.949	9/2/2024 12:43	0.2/0.8, 0.6	Md-Mi
10	6.7	1.854	0.277	0.545	0.545	0.409	0.221	0.193	0.007	0.006	44.769	20	13.069	9/2/2024 13:12	0.2/0.8, 0.6	Mi-Md
11	7	2.441	0.349	0.62	0.62	0.642	0.263	0.158	0.010	0.007	46.26	18	12.388	6/3/2024 11:32	0.2/0.8, 0.6	Md-Mi
12	7	2.422	0.346	0.62	0.62	0.6049	0.25	0.158	0.012	0.007	46	18	12.514	6/3/2024 12:08	0.2/0.8, 0.6	Mi-Md
13	6.9	1.537	0.223	0.6	0.6	0.485	0.315	0.257	0.008	0.007	44.797	19	12.435	9/4/2024 11:48	0.2/0.8, 0.6	Md-Mi
14	6.9	1.54	0.223	0.6	0.6	0.454	0.295	0.228	0.008	0.006	44.361	19	12.58	9/4/2024 12:37	0.2/0.8, 0.6	Mi-Md

Nota. Md=Margen derecho, Mi=Margen izquierdo. Observaciones de velocidad realizadas en un tiempo de lectura de 40seg. Ecuación de caudal: MidSection. Fuente: Elaboración propia.

Anexo C: Registros de caudal y nivel de Estación limnigráfica Mazán A.J. Tomebamba

No.	Nivel (cm)	Caudal Q (m ³ /s)	Fecha y hora	No.	Nivel (cm)	Caudal Q (m ³ /s)	Fecha y hora
1	146.1	1.5188	31/10/2023 10:30	8	170.6	2.6814	7/2/2024 10:10
1	146.1	1.5218	31/10/2023 10:35	8	170.7	2.6845	7/2/2024 10:15
1	146.5	1.5336	31/10/2023 10:40	8	170.9	2.6992	7/2/2024 10:20
1	146.6	1.5368	31/10/2023 10:45	8	170.8	2.6935	7/2/2024 10:25
1	146.3	1.5256	31/10/2023 10:50	8	170.8	2.6906	7/2/2024 10:30
1	146.0	1.5180	31/10/2023 10:55	8	170.7	2.6876	7/2/2024 10:35
2	146.0	1.5151	31/10/2023 11:00	8	170.4	2.6701	7/2/2024 10:45
2	146.0	1.5161	31/10/2023 11:05	8	170.5	2.6762	7/2/2024 10:50
2	146.3	1.5261	31/10/2023 11:10	8	170.2	2.6562	7/2/2024 10:55
2	146.0	1.5170	31/10/2023 11:15	8	170.5	2.6727	7/2/2024 11:00
2	146.2	1.5233	31/10/2023 11:25	9	170.8	2.6919	7/2/2024 11:05
2	146.1	1.5187	31/10/2023 11:30	9	171.0	2.7027	7/2/2024 11:10
3	148.2	1.5956	14/11/2023 10:05	9	170.4	2.6688	7/2/2024 11:20
3	148.1	1.5940	14/11/2023 10:10	9	170.3	2.6630	7/2/2024 11:25
3	148.4	1.6023	14/11/2023 10:15	9	170.0	2.6465	7/2/2024 11:30
3	148.6	1.6102	14/11/2023 10:20	9	170.2	2.6589	7/2/2024 11:35
3	148.6	1.6123	14/11/2023 10:25	9	170.0	2.6421	7/2/2024 11:40
3	148.5	1.6084	14/11/2023 10:30	9	170.2	2.6568	7/2/2024 11:45
3	148.4	1.6035	14/11/2023 10:35	9	170.4	2.6653	7/2/2024 11:50
3	148.4	1.6044	14/11/2023 10:40	9	169.9	2.6405	7/2/2024 11:55
3	148.2	1.5963	14/11/2023 10:50	10	166.8	2.4570	9/2/2024 10:05
3	148.2	1.5960	14/11/2023 10:55	10	166.5	2.4399	9/2/2024 10:10
4	148.2	1.5942	14/11/2023 11:00	10	167.3	2.4824	9/2/2024 10:20
4	148.4	1.6014	14/11/2023 11:05	10	166.5	2.4375	9/2/2024 10:25
4	148.5	1.6058	14/11/2023 11:10	10	166.5	2.4382	9/2/2024 10:30
4	148.6	1.6102	14/11/2023 11:15	10	166.6	2.4433	9/2/2024 10:35
4	148.5	1.6084	14/11/2023 11:20	10	166.3	2.4272	9/2/2024 10:40
4	148.3	1.5984	14/11/2023 11:25	10	166.4	2.4344	9/2/2024 10:45
4	148.2	1.5955	14/11/2023 11:30	10	167.0	2.4639	9/2/2024 10:50
4	148.0	1.5900	14/11/2023 11:35	10	166.5	2.4359	9/2/2024 10:55
4	148.2	1.5965	14/11/2023 11:45	11	166.2	2.4218	9/2/2024 11:00
5	165.3	2.3737	20/12/2023 14:45	11	166.9	2.4595	9/2/2024 11:10
5	165.3	2.3691	20/12/2023 14:50	11	166.6	2.4452	9/2/2024 11:15
5	165.5	2.3805	20/12/2023 14:55	11	167.4	2.4918	9/2/2024 11:20
5	165.4	2.3764	20/12/2023 15:00	11	166.3	2.4257	9/2/2024 11:25
5	165.4	2.3772	20/12/2023 15:05	11	166.5	2.4407	9/2/2024 11:30
5	164.8	2.3455	20/12/2023 15:10	11	166.5	2.4399	9/2/2024 11:35
5	165.7	2.3933	20/12/2023 15:15	11	166.8	2.4563	9/2/2024 11:40
5	165.5	2.3832	20/12/2023 15:25	12	170.0	2.6465	6/3/2024 10:15
5	165.9	2.4033	20/12/2023 15:30	12	169.8	2.6327	6/3/2024 10:20
5	165.9	2.4028	20/12/2023 15:35	12	169.9	2.6351	6/3/2024 10:25

5	166.7	2.4470	20/12/2023 15:40
5	166.4	2.4300	20/12/2023 15:45
5	167.4	2.4891	20/12/2023 15:50
6	156.8	1.9479	30/1/2024 10:15
6	157.1	1.9591	30/1/2024 10:20
6	156.6	1.9392	30/1/2024 10:30
6	156.3	1.9259	30/1/2024 10:35
6	156.8	1.9474	30/1/2024 10:40
6	156.5	1.9352	30/1/2024 10:45
6	156.7	1.9425	30/1/2024 10:50
6	156.9	1.9527	30/1/2024 10:55
6	156.9	1.9502	30/1/2024 11:00
7	157.3	14	6/6/1900 19:33
7	156.9	14	6/6/1900 13:42
7	157.0	14	6/6/1900 16:19
7	156.9	14	7/6/1900 3:14
7	156.8	14	6/6/1900 18:38
7	156.7	14	6/6/1900 14:09
7	156.4	1.9297	6/6/1900 14:54
7	156.4	1.9307	6/6/1900 16:24
7	156.2	1.9223	30/1/2024 11:50
7	156.0	1.9103	30/1/2024 11:55

12	169.7	2.6275	6/3/2024 10:30
12	169.8	2.6317	6/3/2024 10:35
12	170.0	2.6445	6/3/2024 10:40
12	169.8	2.6315	6/3/2024 10:50
12	169.7	2.6233	6/3/2024 10:55
13	156.5154	1.9347	9/4/2024 10:15
13	156.829	1.9488	9/4/2024 10:20
13	156.8577	1.9501	9/4/2024 10:25
13	156.9316	1.9534	9/4/2024 10:30
13	157.2242	1.9667	9/4/2024 10:35
13	156.8311	1.9489	9/4/2024 10:40
13	156.8479	1.9496	9/4/2024 10:45
14	202.8	5.6442	9/4/2023 10:55
14	202.9	5.6682	9/4/2023 11:00
14	201.6	5.4948	9/4/2023 11:05
14	201.8	5.5222	9/4/2023 11:10
14	200.9	5.4133	9/4/2023 11:15
14	201.5	5.4768	9/4/2023 11:20
14	201.4	5.4736	9/4/2023 11:25

Nota. Datos correspondientes a las fechas y horas de los aforos realizados. Estación Mazán A.J. Tomebamba con coordenadas WGS 84 / UTM zona 17S 712586.00 m E, 9682797.00 m S. Fuente: ETAPA EP.

Anexo D: Mapas

UCUENCA

INGENIERÍA

TÍTULO Estimación de las curvas de descarga en dos ríos al noroeste de la ciudad de Cuenca

CONTIENE Cuencas y cauces delimitadas a partir de las estaciones Mazán A.J. Matadero y Culebrillas A.J. Matadero

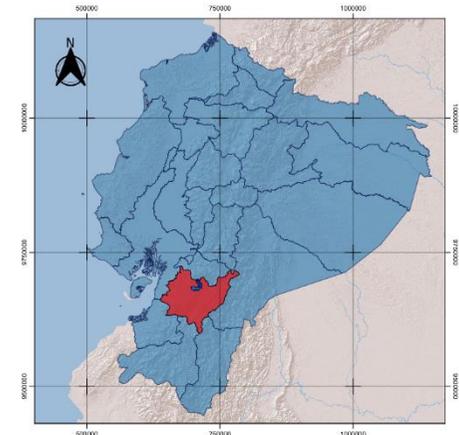
UBICACIÓN Mazán (Sector Turuyacu), Culebrillas (Vía a Buenos Aires en puente Picota Cucho)

TUTOR Ing. Vladimiro Alexis Tobar Solano

ELABORÓ Kevin Marcelo Farfán Fajardo
Pamela Thalia Villa Cajilima

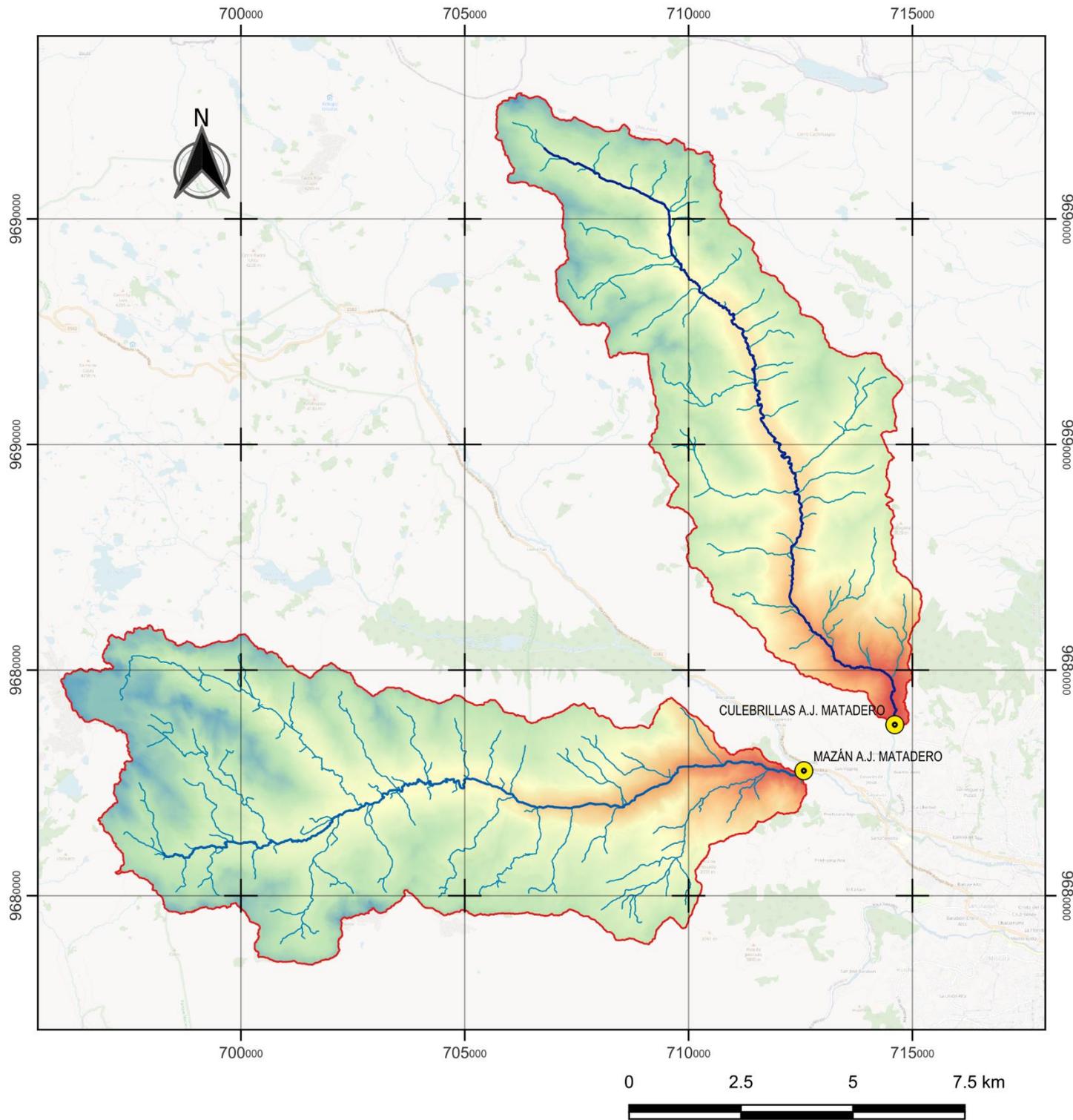
ESCALA
1:125000

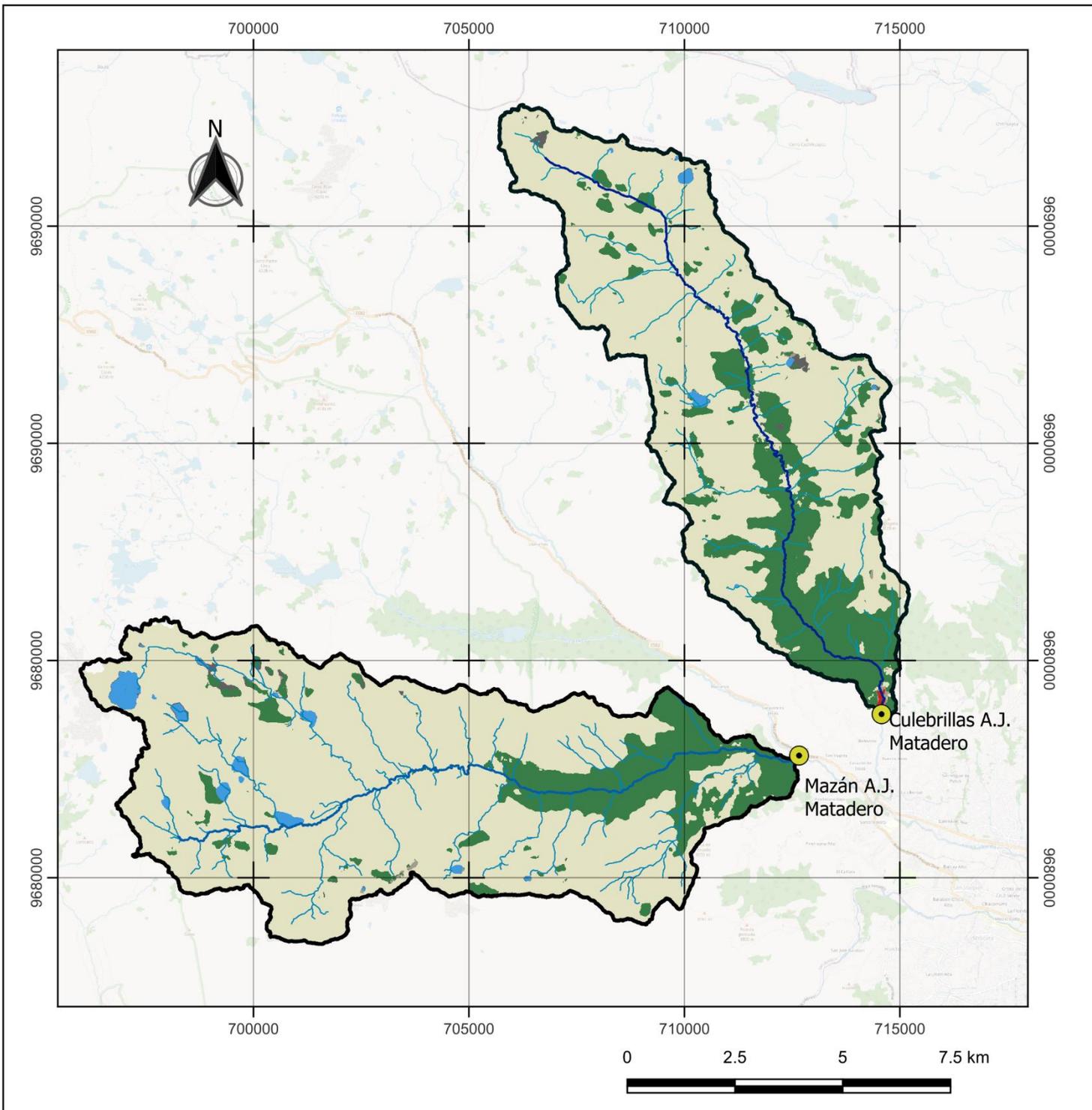
UBICACIÓN GENERAL



LEYENDA

- Estaciones de Aforo
- Cauces Principales
- Cauces
- Cuencas Hidrográficas
- MDE
- 4360
- 2797





TÍTULO Estimación de las curvas de descarga en dos ríos al noroeste de la ciudad de Cuenca

CONTIENE Uso y cobertura del suelo de las cuencas Mazán y Culebrillas

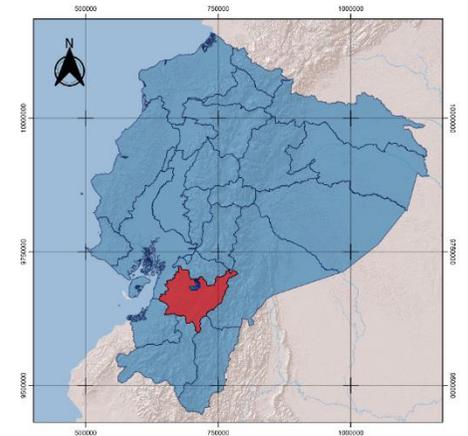
UBICACIÓN Mazán (Sector Turuyacu), Culebrillas (Vía a Buenos Aires en puente Picota Cucho)

TUTOR Ing. Vladimiro Alexis Tobar Solano

ELABORÓ Kevin Marcelo Farfán Fajardo
Pamela Thalia Villa Cajilima

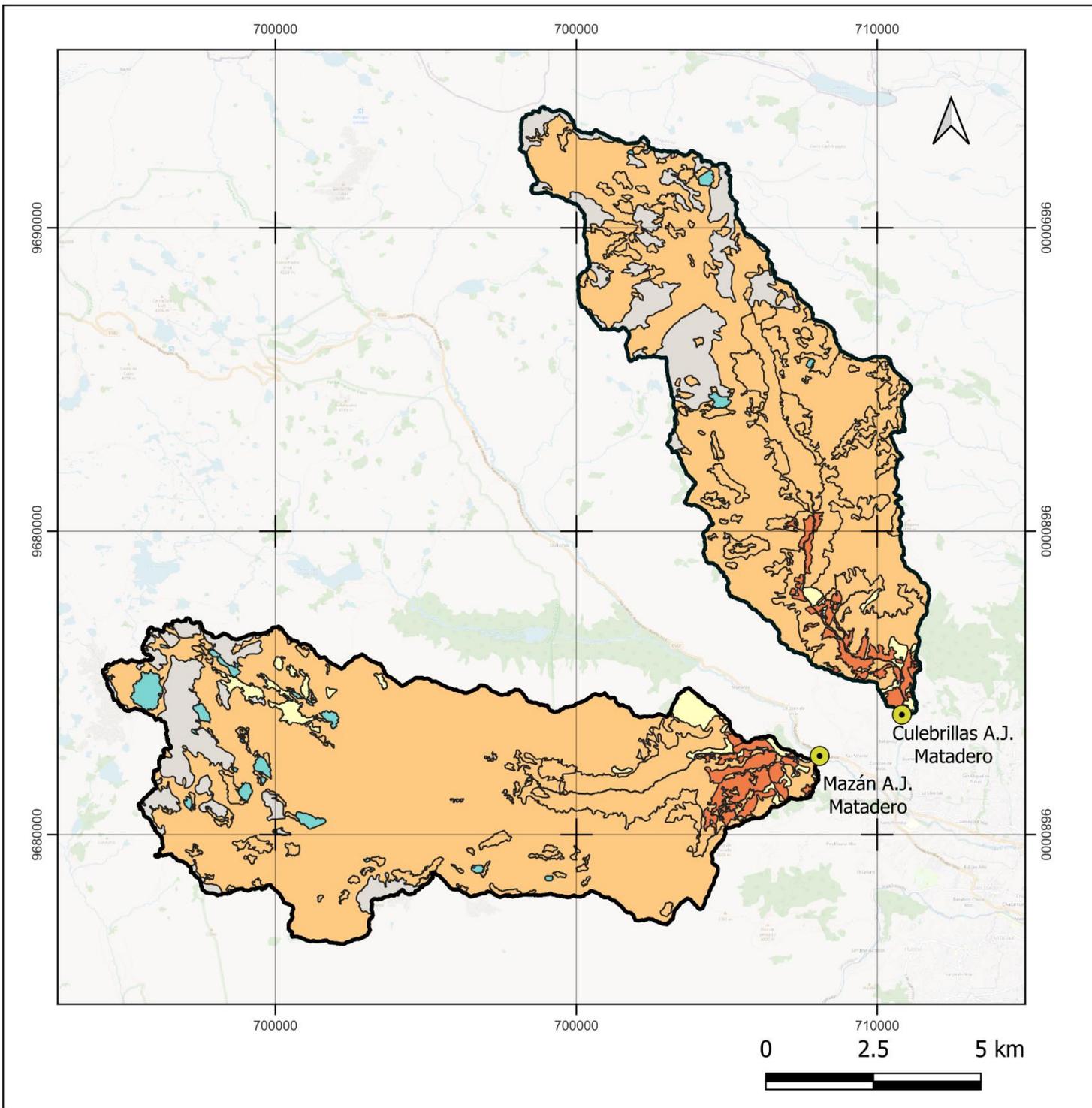
ESCALA
1:125000

UBICACIÓN GENERAL



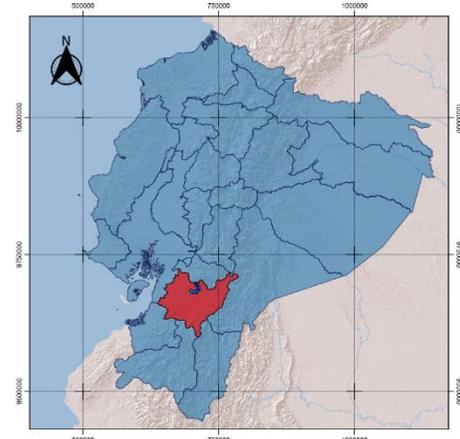
LEYENDA

- Estaciones
- CUENCA HIDROGRÁFICA
- Uso de suelo
 - Cuerpo de agua natural
 - Bosques
 - Área de construcción
 - Suelo desnudo
 - Sin información por nubosidad
 - Pastizal



TÍTULO	Estimación de las curvas de descarga en dos ríos al noroeste de la ciudad de Cuenca	
CONTIENE	Cobertura y uso de tierra en microcuencas del Río Mazán y Río Culebrillas	
UBICACIÓN	Mazán (Sector Turuyacu), Culebrillas (Vía a Buenos Aires en puente Picota Cucho)	
TUTOR	Ing. Vladimiro Alexis Tobar Solano	
ELABORÓ	Kevin Marcelo Farfán Fajardo	ESCALA
	Pamela Thalia Villa Cajilima	1:125000

UBICACIÓN GENERAL



LEYENDA

- Estaciones
- CUENCA HIDROGRÁFICA
- CUERPO DE AGUA
- TIERRA AGROPECUARIA
- TIERRA ARBUSTIVA Y HERBACEA
- TIERRA FORESTAL
- TIERRA SIN COBERTURA VEGETAL
- ZONA ANTROPICA

TÍTULO Estimación de las curvas de descarga en dos ríos al noroeste de la ciudad de Cuenca

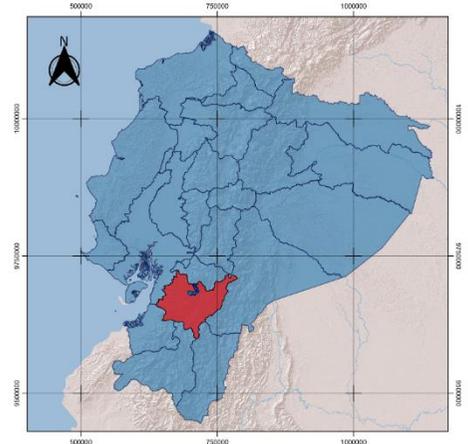
CONTIENE Tipo de suelo de las microcuencas del Río Mazán y Río Culebrillas

UBICACIÓN Mazán (Sector Turuyacu), Culebrillas (Vía a Buenos Aires en puente Picota Cucho)

TUTOR Ing. Vladimiro Alexis Tobar Solano

ELABORÓ Kevin Marcelo Farfán Fajardo **ESCALA**
 Pamela Thalia Villa Cajilma 1:125000

UBICACIÓN GENERAL



LEYENDA

- Estaciones
- CUENCA HIDROGRÁFICA

Taxonomía

- ALFISOL
- INCEPTISOL
- MOLLISOL

OpenStreetMap

