



RESOLUCIÓN DE PRESIDENCIA EJECUTIVA
N° 066 -2019-SENAMHI/PREJ

Lima, 24 ABR. 2019

CONSIDERANDO:



Que, la Ley N° 24031, Ley del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI modificada por la Ley N° 27188, establece que dicha entidad es un organismo público descentralizado, con personería jurídica de derecho público interno y autonomía técnica, administrativa y económica, dentro de los límites del ordenamiento legal del Sector Público;



Que, mediante la Primera Disposición Complementaria Final del Decreto Legislativo N° 1013, se adscribe la referida entidad, como organismo público ejecutor, al Ministerio del Ambiente;

Que, el artículo 60 del Reglamento de Organización y Funciones del SENAMHI, aprobado por el Decreto Supremo N° 003-2016-MINAM, señala que la Dirección de Hidrología *“Es el órgano de línea responsable de conducir, normar, formular, proponer y ejecutar planes, programas, proyectos, estudios e investigaciones en el área de hidrología; así como realizar el monitoreo y la predicción hidrológica en las diferentes escalas de tiempo. Realiza estudios del impacto del clima en los recursos hídricos. Depende jerárquicamente de la Presidencia Ejecutiva”*;



Que, en cumplimiento de la citada norma, la Dirección de Hidrología elaboró el Documento Técnico N° 001-SENAMHI-DHI-2018, Manual de Hidrometría, el cual fuera aprobado mediante Resolución de Presidencia Ejecutiva N° 182-2018/SENAMHI-PREJ de fecha 13 de setiembre de 2018;

Que, mediante Nota de Elevación N° D000053-2019-SENAMHI-DHI de fecha 9 de abril de 2019, el Director de Hidrología remitió a la Presidencia Ejecutiva el citado documento, con algunas modificaciones;

Que, el literal f) del artículo 11 del Reglamento de Organización y Funciones del SENAMHI, aprobado por el Decreto Supremo N° 003-2016-MINAM, establece como función de la Presidencia Ejecutiva, *“Expedir Resoluciones Presidenciales Ejecutivas en el ámbito de su competencia”*;

Con el visado de la Gerencia General y del Director de la Oficina de Asesoría Jurídica; y,

De conformidad con lo dispuesto en la Ley N° 24031, Ley del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI, modificada por la Ley N° 27188; el Reglamento de Organización y Funciones del SENAMHI, aprobado mediante el Decreto Supremo N° 003-2016-MINAM;

SE RESUELVE:

Artículo 1.- Aprobar las modificaciones efectuadas en el Documento Técnico N° 001-SENAMHI-DHI-2018, Manual de Hidrometría, conforme al anexo que forma parte integrante de la presente Resolución de Presidencia Ejecutiva.

Artículo 2.- Disponer la publicación de la presente Resolución y su Anexo en el Portal Institucional del SENAMHI (www.senamhi.gob.pe).

Regístrese y comuníquese



KEN TAKAHASHI GUEVARA
Presidente Ejecutivo
Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
del Perú – SENAMHI





MANUAL DE HIDROMETRÍA

Documento Técnico 001
SENAMHI-DHI-2018



PERÚ
Ministerio
del Ambiente

EL PERÚ PRIMERO





DIRECTORIO

Ph.D Ken Takahashi Guevara
PRESIDENTE EJECUTIVO DEL SENAMHI

Ing. Oscar Gustavo Felipe Obando
DIRECTOR DE HIDROLOGÍA DEL SENAMHI

AUTORES

Ing. Juan Fernando Arboleda Orozco
Ing. Oscar Gustavo Felipe Obando
Ing. Jorge Enrique Yerrén Suarez

COLABORADORES

Subdirección de Predicción Hidrológica

Lima - Perú
2018

Citar como:

Arboleda J.; Felipe O.; Yerrén J. – DHI/SPH (2018). Manual de Hidrometría Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Dirección de Hidrología (DHI), Subdirección de Predicción Hidrológica (SPH).

Contenido

RESUMEN	9
I. INTRODUCCIÓN	12
II. OBJETIVO	13
III. ALCANCES	13
IV. CONCEPTOS GENERALES	14
4.1 Ciclo hidrológico	14
4.2 Cuenca hidrográfica	14
4.3 Hidrometría	15
4.4 Sistema de observación hidrológico	15
4.5 Estación hidrométrica	15
4.6 Red hidrométrica	15
4.7 Sección de aforo o de control hidrométrico	15
4.8 Aforo de corrientes	16
4.9 Nivel de agua	16
4.10 Caudal	17
4.11 Exactitud de las mediciones hidrológicas	17
V. METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN EN ESTACIONES DE AFORO	19
5.1 Mediciones de nivel de agua	19
5.2 Métodos y procedimientos de medición de las profundidades	26
5.3 Métodos y procedimientos de medición de velocidad media en una vertical	30
5.4 Procedimiento para la realización de los aforos	36
5.5 Procedimiento de cálculo del caudal	52
5.6 Consideraciones complementarias en la utilización del molinete o equipo correntómetro	77
5.7 Curva de gasto	83
VI. CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD EN TRABAJOS HIDROMÉTRICOS	108
6.1 Seguridad en las estaciones hidrométricas	108
6.2 Seguridad para la realización de aforos	108
VII. CONSIDERACIONES FINALES	111
7.1 Respecto a los aforos	111
7.2 Respecto a la elaboración de los informes de campo en campaña de aforos	111
7.3 Respecto a los trabajos topográficos de la sección de aforo	112
VIII. GLOSARIO DE TÉRMINOS	113
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116
ANEXOS	119

Lista de Figuras

Figura 4.1 Representación esquemática la teoría del error aplicado a las mediciones hidrológicas	18
Figura 5.1 Reglas limnimétricas, modelo topográfica.	19
Figura 5.2 Reglas limnimétricas instaladas en cursos de agua	20
Figura 5.3 Casetas limnigráficas, de toma directa. A la Izquierda, Estación Socsi – río Cañete; a la derecha Estación Antapucro –río Lurín	22
Figura 5.4 Equipos limnigráficos de eje horizontal y vertical	23
Figura 5.5 Trabajos de monumentación de puntos geodésicos y nivelación del cero de la escala limnimétrica	24
Figura 5.6 Ficha descriptiva de punto geodésico en estación hidrométrica	25
Figura 5.7 Sección de control en un curso de agua, donde se ha graficado las líneas verticales de sondeo de profundidad	26
Figura 5.8 Perfil de profundidad de la sección de aforo, obtenida con ADCP en la sección del río Amazonas en Obidos, Brasil.....	30
Figura 5.9 Método de aforo al 60% de profundidad	32
Figura 5.10 Método de aforo al 20% y 80% de profundidad.....	33
Figura 5.11 Método de aforo al 20%, 60% y 80% de profundidad.	34
Figura 5.12 Preparación para el aforo desde carro huaro en la Estación de Chosica-Río Rímac-Lima	36
Figura 5.13 Aforo desde Puente Unacolla, en el río Coata-Puno	37
Figura 5.14 Aforo del río Pisco, en la EHA-Letrayoc	37
Figura 5.15 Aforo por vadeo, río Mala, estación La Capilla.	38
Figura 5.16 a) Aforo desde carro huaro con ADCP RiverRay. b) Aforo desde puente con ADCP M-9 c) Aforo con ADCP M-9 desde embarcación con motor fuera de borda	39
Figura 5.17 Pantalla de salida grafica de resultados del aforo con ADCP M-9	40
Figura 5.18 Regiones hidrológicas del Perú donde el SENAMHI realiza aforos con diferentes equipos ADCP	42
Figura 5.19 Esquema del principio de funcionamiento del radar de velocidad	43
Figura 5.20 Vista de diferentes formas de utilizar la pistola radar en cursos naturales	44
Figura 5.21 Calibración de la pistola mediante mediciones comparativas con ADCP	45
Figura 5.22 Curva de calibración de velocidad media con método de índice de velocidad. El índice de velocidad en este caso es la velocidad superficial obtenida con pistola	46
Figura 5.23 Aforo del río Chancay-Huaral en Pte. Cuchuanca, con pistola radar SVR	47
Figura 5.24 Tramo en la sección de control en un curso de agua, aforando con flotadores	49
Figura 5.25 Procedimiento para determinar el área en la sección de control en un curso de agua, en suspensión.....	51
Figura 5.26 Procedimiento para determinar el área en la sección de control en un curso de agua, en suspensión	51
Figura 5.27 Integración de la curva de velocidad	52
Figura 5.28 Sección de control, para aforo por método de sección media	54
Figura 5.29 Representación de la línea de energía o línea de gradiente hidráulico en canales abiertos, donde L es la longitud del tramo 1-2	67

Figura 5.30 Esquema para el cálculo de la diferencia de nivel entre dos puntos	68
Figura 5.31 Relación matemática entre altura de mira y el factor K, estimado para los datos de aforo de flotadores de contraste.	73
Figura 5.32 Relación matemática entre altura de mira y el Área Mojada, estimado para los datos de aforo de flotadores de contraste.	74
Figura 5.33 Sección de control, para la estimación del área mojada para el aforo por método de flotadores.	75
Figura 5.34 Molinete OTT – Modelo C31	78
Figura 5.35 Molinete A OTT – Modelo Arkansas	78
Figura 5.36 Estimación de la profundidad tomando como referencia el eje del molinete o correntómetro.	79
Figura 5.37 Estimación de la profundidad tomando como referencia línea de toca fondo y/o escandallo del molinete o correntómetro	80
Figura 5.38 Esquema para la corrección de la profundidad debido a la no verticalidad del equipo correntómetro	81
Figura 5.39 Vista del Angulo de arrastre (Φ) en aforo por suspensión desde carro huaro	82
Figura 5.40 Transportador para medir ángulo de arrastre	82
Figura 5.41 Diferentes tipos de curvas de gasto para diferentes condiciones hidráulicas	84
Figura 5.42 Representación gráfica del fenómeno de histéresis.....	87
Figura 5.43 Regionalización hidrológica	90
Figura 5.44 Régimen de lluvias en la zona 01	91
Figura 5.45 Régimen de caudales en la Zona 01	92
Figura 5.46 Régimen de lluvias en la Zona 02	94
Figura 5.47 Régimen de caudales en la Zona 01.	94
Figura 5.48 Representación del nivel ho según la ubicación del cero de la regla de la estación hidrométrica	96
Figura 5.49 Determinación de ho mediante método de prueba y error	97
Figura 5.50 Procedimiento para obtener la línea recta que define la proporcionalidad geométrica de los caudales para la obtención de ho	98
Figura 5.51 Procedimiento gráfico para la obtención de ho	98
Figura 5.52 Curva altura gasto compuesta	99
Figura 5.53 Gráfico de dispersión de los aforos (X: nivel, Y: caudal) para la obtención del $h_{crit}=0.6$ Escala del gráfico log-log	100
Figura 5.54 Curvas de gastos compuesta para diferentes períodos en la estación EHA-Chosica. Las bandas de incertidumbre paramétrica y total corresponde a franja celeste y ploma. Los parámetros de dichas curvas son las que se presenta en Tabla 5.18.	101
Figura 5.55 Curvas de nivel-área-velocidad para la extrapolación de la curva de gasto	103
Figura 5.56 Gráfico de la relación de K en función del nivel del agua. En eje Y valores del nivel del agua	104
Figura 5.57 A la izquierda de la figura se muestra las ecuaciones disponibles para el ajuste de la curva incluyendo el método de Manning, mientras que a la derecha, se puede apreciar historial de curvas de gasto para diferentes períodos de calibración.	105
Figura 5.58 A la izquierda e la figura se observa historial de perfiles de la sección de aforo, mientras que a la derecha de la figura se muestra el historial de la velocidad media para diferentes períodos de calibración de la curva de gasto.	107

Figura 5.59 A la izquierda de la figura se puede apreciar el historial del coeficiente de Manning (n) para diferentes niveles de agua, mientras que a la derecha, se aprecia el historial del radio hidráulico para diferentes períodos de calibración de la curva de gasto.107

Figura 6.1 Cuadrilla de personas que realizan las campañas de aforo. Estación de Chosica – río Rímac, departamento de Lima.....109

Lista de Tablas

Tabla 5.1 Relación entre el ancho superficial del río y la separación entre los puntos de medición de la velocidad 28

Tabla 5.2 Relación entre el ancho superficial del río y el número de verticales para la medición de la velocidad 29

Tabla 5.3 Método de los puntos reducidos 31

Tabla 5.4 Relación entre el ancho superficial del río y la cantidad de flotadores a emplear 48

Tabla 5.5 Extracto de tabla de control de descarga (Planilla SENAMHI)..... 56

Tabla 5.6 Control de descarga del río Rímac, aforo por método de la sección media 61

Tabla 5.7 Extracto de Tabla de Control de Descarga, método semi sección..... 63

Tabla 5.8 Control de descarga del río la Leche, aforo por método de semi sección 65

Tabla 5.9 Hoja resumen del control de descarga 69

Tabla 5.10 Determinar el tiempo promedio en la sección de control de los flotadores 70

Tabla 5.11 Determinación del valor K. 72

Tabla 5.12 Determinación y comparación de las áreas mojadas estimadas para el aforo por método de flotadores. 76

Tabla 5.13 Determinación de los caudales en base a los datos del aforo por método de flotadores. 77

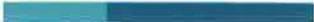
Tabla 5.14 Valores de K para la corrección de la altura 81

Tabla 5.15 Número de aforos requerido según la variación de la banda de dispersión 2SD y para una precisión de 5% 89

Tabla 5.16 Cantidad de aforos necesarios para los ríos de la Zona 01 93

Tabla 5.17 Cantidad de aforos necesarios para los ríos de la Zona 2 95

Tabla 5.18 valores de los parámetros de curvas altura-gasto compuesta obtenida para diferentes períodos en la Estación EHA-Chosica 101



PRESENTACIÓN

El SENAMHI, desde aproximadamente hace medio siglo, en el ámbito de sus actividades como servicio meteorológico e hidrológico del país busca generar y proveer información de manera oportuna y confiable. Para este propósito realiza actividades de medición en los ríos del país, tarea en ocasiones un poco difícil de cumplir ante una serie de factores y condiciones a veces extremas.

En el marco de la Hidrometría, actividades como la medición, registro, cálculo y análisis de los volúmenes de agua de una fuente natural nos permite conocer la cantidad de agua que fluye por un río y/o riachuelo. Además es posible determinar los caudales máximos durante los periodos lluviosos para alertar la población frente a una posible amenaza de inundación, al verse influenciado por condiciones meteorológicas.

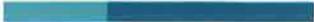
Actualmente, existen diversas teorías y técnicas de medición de flujos de agua; y la disponibilidad de información y los avances tecnológicos han permitido agilizar algunos procesos. Por ello, se hace necesario dejar un rastro para seguir el dinámico camino de la hidrología basada en la experiencia de los profesionales de la Dirección de Hidrología en coordinación con las Direcciones Zonales del SENAMHI y aportes de expertos extranjeros que siempre han visto fascinante la hidrografía nacional, que a través de observaciones y mediciones nos han ayudado a explicar la hidrología del país.

I. INTRODUCCIÓN

El agua, elemento del ciclo hidrológico, es un bien cada vez más escaso en nuestro planeta; la situación peruana no está exenta de ello, el real problema se presenta en un crecimiento vertiginoso de las poblaciones en zonas poco favorecidas por el recurso hídrico, como es la costa peruana o vertiente occidental, donde la disponibilidad de agua es abundante en cuatro o cinco meses del año (periodo de avenidas) y el resto del periodo (periodo de estiaje) es mínimo y a veces nulo, por condiciones de extrema aridez, lo cual crea situaciones de desequilibrio hídrico por la alta presión que ejerce la demanda poblacional y agrícola. En el periodo de estiaje, el abastecimiento de agua poblacional se hace complejo por la limitada disponibilidad de agua para atender una mayor demanda, el cual se ve agravado por la falta de conciencia ciudadana y buenos hábitos en torno al uso eficiente y conservación del agua.

Para asegurar el abastecimiento de agua en forma permanente, el gobierno peruano viene realizando importantes obras de afianzamiento hídrico que incluyen represamiento de fuentes de agua, sistemas hidráulicos de trasvases para derivar aguas de la región hidrográfica del Amazonas hacia la del Pacífico que permite el incremento de la oferta de hídrica durante los meses de estiaje.

Este panorama del aprovechamiento del recurso hídrico en el país exige un marco de gestión eficiente el cual debe tener como base fundamental la información hidrológica que se genera en los diferentes puntos de control hidrométrico instaladas en las principales cuencas. En ese sentido, el estado peruano ha realizado durante los últimos cinco años importantes inversiones para el fortalecimiento de la red hidrométrica nacional en número y tecnología; todo ello implica disponer de información hidrológica de buena calidad para lo cual la práctica hidrométrica en el país debe ser ejecutada bajo los estándares y directrices de las Guías Hidrométricas de la Organización Meteorológica Mundial – OMM, reglamento técnico de hidrología, entre otros. Para alcanzar este objetivo, el SENAMHI en su calidad de ente rector de las actividades hidrológicas en el país, a través de su Dirección de Hidrología, ha elaborado el presente Manual de Hidrometría, el cual debe servir como documento orientador al personal técnico y profesional que realiza actividades hidrométricas en el país, contribuyendo de esta manera a mejorar las estimaciones del caudal en nuestros ríos para un adecuado aprovechamiento y gestión del recurso hídrico.



Este manual recoge las experiencias de campo de los profesionales del SENAMHI que realizan actividades hidrométricas en el país. Cabe señalar que los procedimientos hidrométricos expuestos son de carácter general, por lo que en sitios o emplazamientos complejos los métodos expuestos podrían ser refinados o adaptados para obtener mediciones más confiables. Se espera que este manual sea útil no solamente al personal técnico y profesional que realiza actividades hidrométricas; sino también a otros usuarios que administran sus propias redes de observación hidrológica en el país.

II. OBJETIVO

Normar y estandarizar aspectos, prácticas, métodos y procedimientos hidrométricos en el Perú, recomendados por la OMM, a fin de garantizar una buena práctica para la generación de información hidrológica.

III. ALCANCES

El presente manual contiene la información de referencia técnica dirigida a los técnicos hidromensores del SENAMHI, así como a otros operadores públicos y privados de redes hidrológicas existentes en el país, que realizan actividades hidrométricas y generan información hidrológica con diferentes propósitos.

El manual se centra en los aspectos normativos generales, las bases teóricas y metodológicas, así como los procedimientos de campo para una buena práctica hidrométrica asociada a la estimación de los caudales, variable hidrológica fundamental para la Gestión del agua y la Gestión del Riesgo de Desastres. En ese sentido, los temas abordados en este documento se sustentan en las normas técnicas internacionales contenidas en el Reglamento Técnico de Hidrología de OMM, el Manual de aforos de caudales de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la Guía de prácticas hidrológicas- OMM y diferentes normas ISO que se lista líneas abajo.

- ISO 1100-1, 1996, Measurement of liquid flow in open channels - Part 1: Establishment and operation of a gauging station
- ISO 1100-2, 1998, Measurement of liquid flow in open channels - Part 2: Determination of the stage-discharge relation
- ISO 4373, 1995, Measurement of liquid flow in open channels - Water-level measuring devices
- ISO 748, 1997, Measurement of liquid flow in open channels - Velocity-area methods
- ISO 3454, Hydrometry — Direct depth sounding and suspension equipment
- ISO 5168, Measurement of fluid flow — Procedures for the evaluation of uncertainties

IV. CONCEPTOS GENERALES

4.1 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico está compuesto por diferentes variables, las cuales se relacionan entre sí por medio de los procesos hidrológicos. En general, se entiende por proceso a una serie de acciones que producen un cambio o desarrollo en un sistema y para el caso particular de la hidrología, los procesos están asociados con aquellos fenómenos que intervienen tanto en el movimiento del agua como en los cambios que sufre ésta en sus características físicas, químicas y biológicas al desplazarse por diversos medios. Para entender el ciclo global del agua, se necesita medir sistemáticamente las variables hidrológicas que están involucradas en este proceso.

4.2 Cuenca hidrográfica

En su acepción más simple, se conoce como cuenca hidrográfica al área drenada por un río. La cuenca es una unidad natural hidrológica y geofísica, con límites definidos que facilitan la planificación y el aprovechamiento de sus recursos. Los límites de la cuenca dependen de su topografía y están determinados por la línea divisoria de aguas.



4.3 Hidrometría

La palabra hidrometría proviene del griego hydro- 'agua' y - metría 'medición'. Por lo tanto, hidrometría se entiende como la técnica de medición del agua en un riachuelo, río o canal. La hidrometría se encarga de tomar y proveer datos relacionados con la distribución espacial y temporal del agua sobre la tierra.

4.4 Sistema de observación hidrológico

Un sistema de observación hidrológica debería incluir una red de estaciones de observación hidrológica, observadores, dispositivos de observación, métodos de observación, procedimientos y enlaces de comunicación. Además de facilitar las observaciones hidrológicas de acuerdo con un plan determinado, en concordancia con el Reglamento Técnico de Hidrología de la OMM.

4.5 Estación hidrométrica

Estación que registra datos del agua en los ríos, lagos y embalses, de uno o varios de los elementos siguientes: niveles, flujo de las corrientes, transporte y depósito de sedimentos, temperatura del agua y otras propiedades físicas y químicas del agua.

Para instalar y operar adecuadamente una estación hidrométrica, se debe considerar el Protocolo de Instalación y Operación de estaciones meteorológicas, agrometeorológicas e hidrológicas, elaborado por el SENAMHI en el 2013.

4.6 Red hidrométrica

Es el conjunto de estaciones hidrométricas que forman parte de una cuenca, región hidrográfica o país que son operadas de acuerdo a un Plan de observaciones hidrológicas.

En el Perú, el SENAMHI tiene a cargo la administración de la Red Nacional de Estaciones meteorológicas, agrometeorológicas e hidrológicas.

4.7 Sección de aforo o de control hidrométrico

Es la sección transversal al lecho del río donde se realiza mediciones periódicas de los caudales a fin de establecer la relación altura-gasto. Esta sección de aforo

está asociada a la estación hidrométrica. Por lo tanto, una buena sección debe cumplir los requisitos que se indica en el ítem 4.2 a fin de garantizar una adecuada medición y representatividad del caudal.

Para evaluar la geometría y características de fondo de la sección de aforos, se debe realizar levantamientos topobatemétricos, determinando el ancho de la sección transversal, profundidad efectiva, área, pendiente hidráulica, distanciamiento y señalización de las líneas verticales para medición de velocidad del flujo de agua con correntómetro.

Es recomendable realizar estos trabajos topográficos por lo menos dos veces al año, antes y después del período de avenidas. Esta información será de utilidad para la extrapolación de la curva altura-gasto por el método de área- pendiente.

En la medida de lo posible es importante identificar en la sección de aforo marcas del nivel de agua dejado por inundaciones históricas; esto ayudará a definir umbrales críticos de inundación para el monitoreo y Alerta temprana.

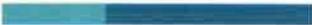
4.8 Aforo de corrientes

La medición de la velocidad en una corriente, la información geométrica de la sección donde se mide y el registro de los valores de nivel del agua, proporcionan la base para determinar el volumen que pasa por el cauce en la unidad de tiempo; a este proceso de cuantificación se le denomina aforo y aplica en ríos y canales.

4.9 Nivel de agua

El nivel de agua es la altura del espejo de agua de una corriente, lago o fuente de agua; en relación a una referencia fija, relativa o absoluta. Según la Guía de Prácticas Hidrológicas de la OMM N°168, la precisión en el nivel de agua, debe tener una exactitud de un centímetro, mientras que en estaciones donde se hace actividades de aforo, y efectúan registros continuos, la exactitud debe ser de tres milímetros.

Las observaciones del nivel de agua se realizan en las estaciones hidrométricas de forma manual y automática. Las lecturas del nivel de agua deben estar referenciadas a una cota de referencia relativa o absoluta. La cota del "nivel cero" de la escala limnimétrica debe estar amarrado a un punto geodésico de Orden "C" que se debe ubicar cerca a la estación. Dicho punto geodésico a su vez estará



enlazado a la red geodésica de rastreo permanente del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

4.10 Caudal

Es la descarga líquida en un río, representa el volumen de agua que pasa por una sección transversal o sección de control en un intervalo de tiempo. Generalmente sus unidades de medición se expresan en metros cúbicos por segundo (m^3/s) o litros por segundo (l/s). Se debe mencionar que generalmente el caudal medido en una sección de control o estación hidrométrica está relacionado a un nivel relativo y/o absoluto.

4.11 Exactitud de las mediciones hidrológicas

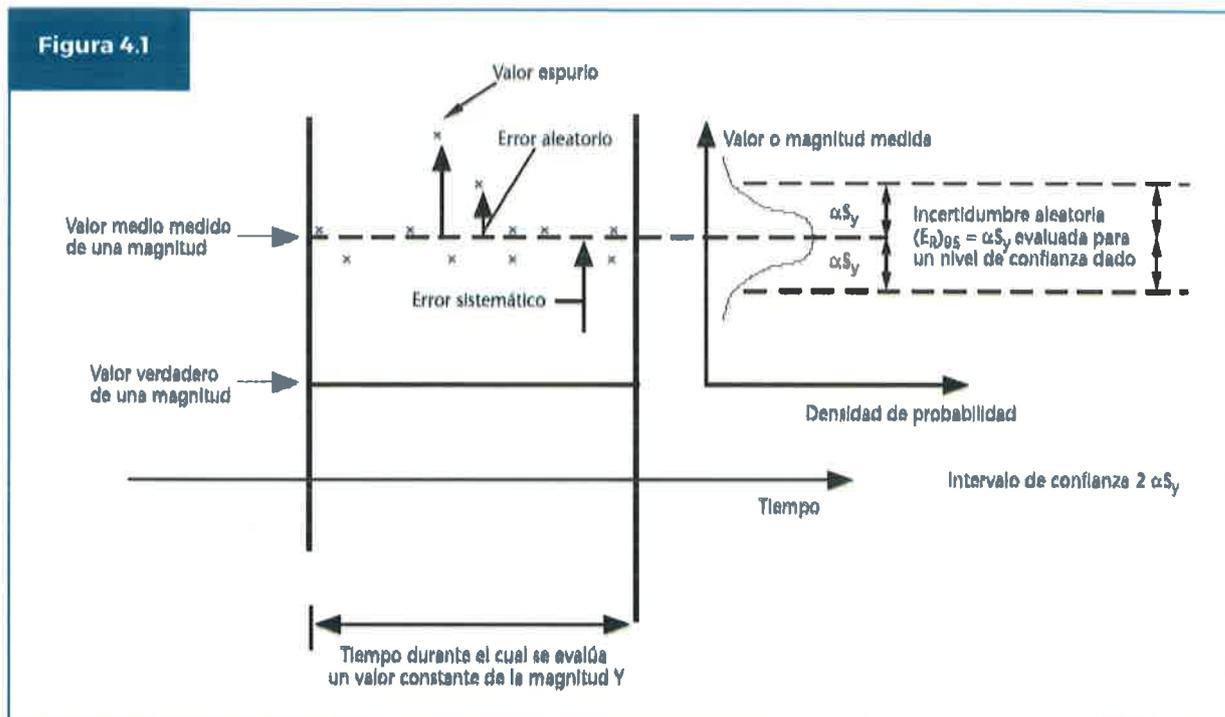
Teóricamente, no es posible determinar mediante mediciones los valores verdaderos de los elementos hidrológicos, ya que no es posible eliminar completamente los errores de medición. La incertidumbre de las mediciones tiene un carácter probabilístico que puede definirse como el intervalo en que se espera que esté situado el valor verdadero con una cierta probabilidad o nivel de confianza. La anchura del intervalo de confianza se denomina también franja de error.

La incertidumbre está definida como el intervalo en torno al valor de medición en el que cabe esperar que se sitúe el valor verdadero de una magnitud con una probabilidad predeterminada. El valor numérico de la incertidumbre es el producto de la desviación típica verdadera de los errores y de un parámetro numérico que depende del nivel de confianza.

Para caracterizar una incertidumbre se utiliza habitualmente el nivel de confianza del 95 por ciento. En otras palabras, en un 5 por ciento de los casos el error podría situarse fuera del intervalo de confianza especificado.

En un curso de agua o canal, en general no es posible determinar el error de la medida exactamente, pero se podría analizar las mediciones individuales que son requeridas para obtener el caudal y hacerse estimaciones estadísticas de la probable magnitud del error. La estimación estadística de la magnitud del error se denomina incertidumbre de la medición. (Helmbrecht, J. et al).

La OMM recomienda que la exactitud de la medición a un nivel de 95% de confianza; para la medición del nivel de agua debe ser de 10.0 a 20.0 mm; para la



Representación esquemática la teoría del error aplicado a las mediciones hidrológicas
Fuente: Guía de Prácticas hidrológicas de la OMM

profundidad del agua 0.2 m a 2%; para la anchura de la superficie de agua 0.5%; para la velocidad del flujo de agua de 2 a 5%; para el caudal 5%.

El Manual on Stream Gauging (Volumen II) recomienda que en las estimaciones de caudal a través de la curva altura-gasto, es aceptable un desvío de hasta 5% con respecto a los caudales observados. Errores superiores a 5% implicaría la recalibración de la curva de gasto.

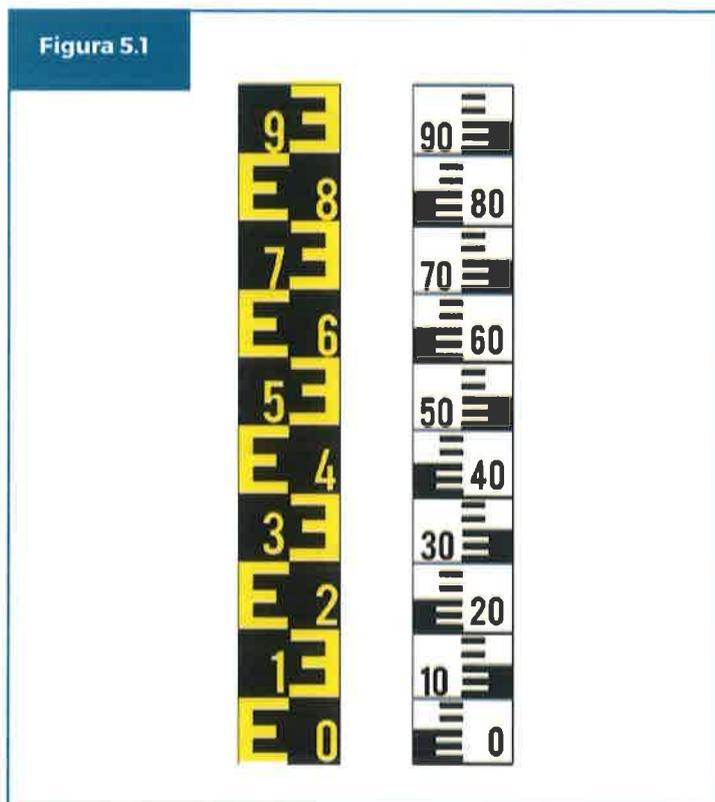
Para profundizar en el análisis de las fuentes de error y cálculo de la incertidumbre en las mediciones hidrológicas, se recomienda revisar el Reglamento Técnico de Hidrología y la Guía de Instrumentos y métodos de observación meteorológicos de la OMM.

V. METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN EN ESTACIONES DE AFORO

Todas las acciones orientadas a las actividades hidrométricas, se registran en campo. Entre ellas, la medición de niveles (instantáneos, horarios, diarios y mensuales), estimación de velocidades, área mojada y caudales puntuales. Cada una se desarrolla a continuación:

5.1 Mediciones de nivel de agua

Existen diferentes formas de medir el nivel agua en una estación hidrométrica. Se puede realizar en horarios establecidos o en forma continua mediante equipos registradores o sensores de nivel de agua. En el primer caso, se procede a utilizar una regla limnimétrica, instrumento segmentado con graduaciones en centímetros, pintado o en alto relieve, según el material con la cual se elabore (hierro fundido, acrílicas, láminas esmaltadas, entre otros). Ver Figura 5.1 y 5.2



Reglas limnimétricas, modelo topográfica
Fuente: SENAMHI

Figura 5.2



Reglas limnimétricas instaladas en cursos de agua
Fuente: SENAMHI

La regla limnimétrica debe estar preparada para su contacto permanente con el agua (de preferencia sobre agua tranquilas). Se adhiere a listones de madera y estos son atornillados a estructuras metálicas (en forma de U), que a su vez son fijadas sobre obras civiles como columnas, estribos de puente u otros, topográficamente niveladas, uno sobre otro, y ligeramente desfasadas lateralmente para una mejor percepción. Para el caso de los ríos amazónicos, las reglas son instaladas en forma escalonada, como se puede visualizar en la Figura 5.2.

Los limnímetros o reglas limnimétricas, deben ser instaladas de tal manera que su nivel de agua histórico registrado, esté por encima del valor cero "0" de la regla limnimétrica (se recomienda un metro por lo menos). Esto nos permitirá evitar registros de lecturas de nivel de agua negativos; por eso es importante verificar anualmente mediante una nivelación, las referencias relativas de cada estación, para su corrección de ser necesario. En ríos amazónicos, la fluctuación del nivel del agua es tan grande que al instalar la estación, se recomienda que el "0"



de la primera regla limnimétrica que está en contacto con el agua, corresponda a la cota relativa "10 m", de tal forma que cuando se presenten niveles de agua más bajos se puedan instalar en la parte inferior de la instalación limnimétrica, nuevas reglas sin necesidad de corregir el acotamiento inicial ni tener valores negativos de niveles de agua.

La información obtenida con este tipo elementos (reglas limnimétricas) es relacionada con los caudales de los ríos, volumen de agua almacenados en los embalses y lagos, a la vez referenciados con el nivel medio del mar (m.s.n.m.) mediante la monumentación física (BM ó hito, elemento físico próximo al cauce) que permita la reinstalación en la misma ubicación, de las reglas limnimétricas que eventualmente son destruidas por alguna crecida extrema del caudal o por vandalismo.

En las estaciones limnimétricas de la red hidrométrica nacional del SENAMHI, se realizan cuatro (04) lecturas diarias de nivel en épocas de estiaje o mínimos caudales; y eventualmente cinco (05) en épocas de avenida o máximos caudales. Esta última lectura, se estima que es la altura del nivel de agua máxima referenciada en el cauce del río, durante el día.

Las cuatro lecturas establecidas se registran en los siguientes horarios: 06:00 horas, 10:00 horas, 14:00 horas y 18:00 horas, por ende, el promedio aritmético de los cuatro valores sería un estimado del nivel promedio diario.

Los equipos limnigráficos son instalados en pozas laterales tranquilizadoras o en el cauce del río directamente, tal como se muestra en la Figura 5.3.

Figura 5.3



Casetas limnigráficas, de toma directa. A la izquierda, Estación Sosci – río Cañete; a la derecha Estación Pacarán – río Cañete
Fuente: SENAMHI

En relación a los limnógrafos, pueden ser de tipo analógico o digital. El primero registra gráficos sobre un papel cuadrículado (diagramado), a escala, la abscisa (escala diaria, semanal, mensual, trimestral), la ordenada (escala 1:10, 1:20); que consiste en la utilización de un eje biacanalado helicoidal, que transmite el movimiento del flotante o flotador hacia el brazo registrador. Figura 5.4.

Figura 5.4



Equipos limnigráficos de eje horizontal y vertical
Fuente: OTT Hydromet

En los últimos años, se viene utilizando equipos electrónicos y automáticos que emplean sensores de nivel acústico, radárico, presión, burbuja entre otros. Cada uno de ellos con características y bondades particulares. Estos equipos almacenan los datos de nivel de agua en una memoria interna, que para fines operativos, pueden ser descargados a través de un periférico o transmitidos por módem celular, HF o vía satelital, este último muy usado por el SENAMHI que mantiene comunicación con el satélite GOES.

5.1.1. Georeferenciación y nivelación de la cota cero de la estación hidrométrica

Para el análisis de sistemas hidrológicos continuos es esencial contar con series de niveles que se puedan expresar sobre un mismo plano de referencia. En ese sentido, resulta necesario establecer puntos geodésicos de referencia cercanos a las estación hidrométrica, para llevar el cero de la escala limnimétrica a una cota absoluta (BM). Por otro lado, estos BM serán de utilidad para verificar periódicamente la cota cero o para restituir con precisión la posición inicial en

caso de ser removidas (robadas) o destruidas por eventos naturales. Estos puntos deberán estar colocados en sitios seguros, sobre del nivel de aguas máximas y en un terreno estable que no sufra alteraciones.

El SENAMHI, en el marco de la georeferenciación de la red hidrométrica nacional, realiza trabajos de levantamiento geodésico y topográfico para colocar hitos o BM en el sitio de la estación. Estos puntos son de Orden C y están amarrados a la red geodésica nacional del Instituto Geográfico Nacional – IGN. En Figuras 5.5 y 5.6 se ilustra alcances de dicha actividad.

Figura 5.5



Trabajos de monumentación de puntos geodésicos y nivelación del cero de la escala limnimétrica
Fuente: SENAMHI

Figura 5.6



DESCRIPCIÓN MONOGRAFÍA DEL PUNTO GEODÉSICO

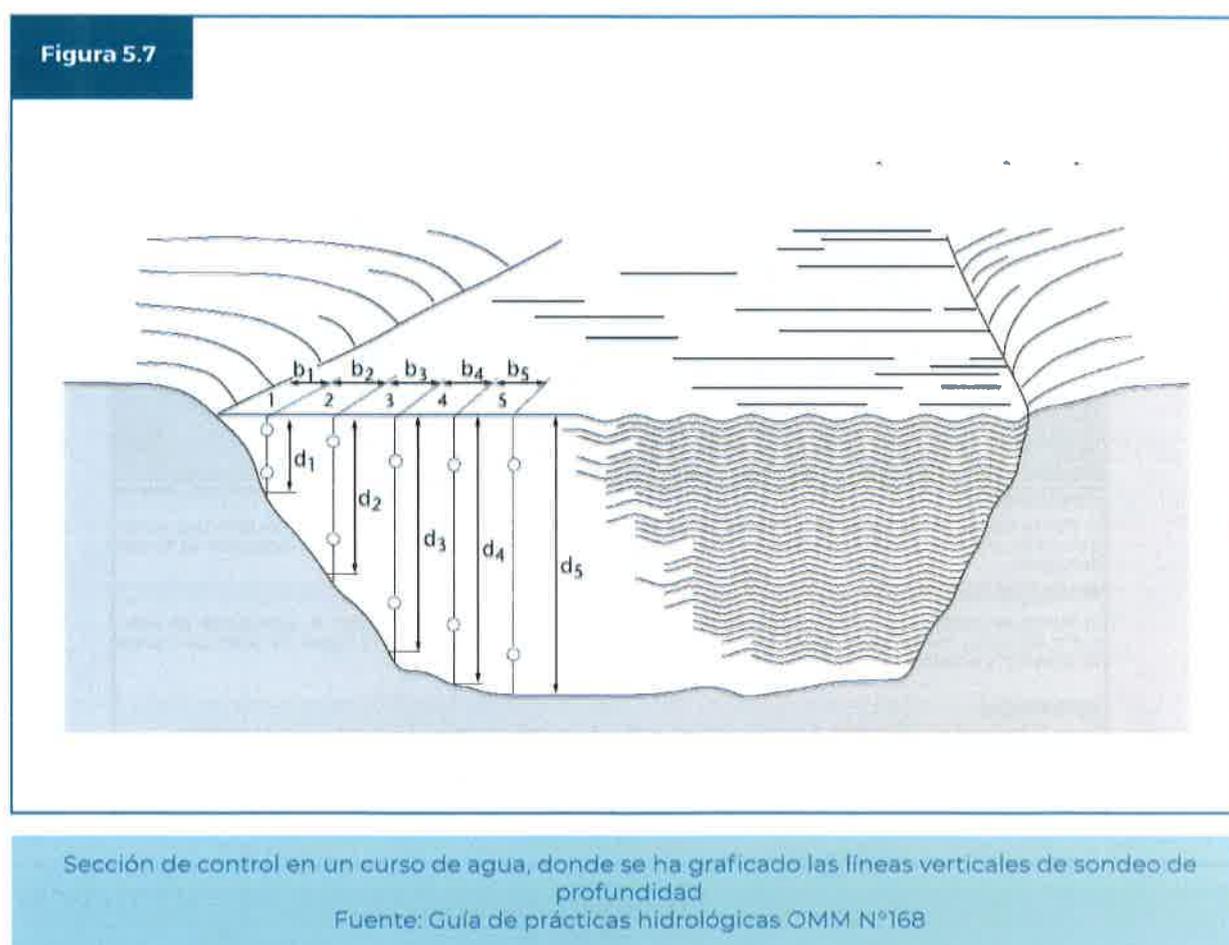
DIRECCIÓN DE REDES DE OBSERVACIÓN Y DATOS
DESCRIPCIÓN MONOGRÁFICA

NOMBRE DEL PUNTO Estación B-1 Huatiapa		LOCALIDAD APLAO		ESTABLECIDA EN: Comisión de Servicio DZ06 / Abril-2018	
UBICACIÓN: Dpto: Arequipa Prov: CASTILLA			ZONA UTM: 18 Sur		ORDEN: "C"
LATITUD (S) WGS-84 16° 00' 31.05473"			LONGITUD (O) WGS-84 72° 28' 58.37672"		
NORTE WGS-84: 8228477.857 m			ESTE WGS-84: 769372.781 m		
ALTITUD ORTOMETRICA: 689.830 msnm		ALT. ELIPSOIDAL: 726.890 m		ELEV. GEOIDAL:	
				FACTOR DE ESCALA: 1.00038312	
CROQUIS - IMAGEN:			FOTOGRAFIA:		
<p>DESCRIPCIÓN: El Punto Geodésico Estación B-1. Huatiapa, está ubicado en base que soporta el wiche, al lado izquierdo del río. Se accede cruzando un puente rústico de madera llamado Puente Quiscay en dirección al Fundo San Isidro.</p> <p>MARCA DE LA ESTACIÓN: El Punto de medición físico lo constituye una arandela metálica circular de 30 mm Ø, incrustada en concreto ciclopeo, de base que soporta la estructura metálica de Wiche para carro huaro. Se pinto de blanco la superficie pulida y rojo la arandela para diferenciarlo.</p> <p>REFERENCIA: Carta Nacional Esc. 1/100 000, hoja 33-r APLAO. A 10' de pueblo de Aplao, agua arriba del río Camana.</p>					
DESCRITA POR:		REVISADA POR:		APROBADO POR:	
				FECHA:	

Ficha descriptiva de punto geodésico en estación hidrométrica
Fuente: SENAMHI

5.2 Métodos y procedimientos de medición de las profundidades

Para el aforo con correntómetro, se utiliza el método Área - Velocidad. Para el caso de las actividades hidrológicas, el área se determina mediante sondeos de las profundidades a tramos constantes, y a lo ancho de la sección de control; la velocidad se determina utilizando equipos como el molinete y/o sensores de velocidad. Ver Figura 5.7.





Los puntos de control hidrométrico, deben tener características específicas que permitan obtener información. Por ello, la ubicación del lugar es determinante en los resultados de los caudales.

A continuación, se detallan las características específicas:

- Estar comprendida dentro de un tramo del curso de agua que presente características altiplanimétricas regulares. Regularidad en los perfiles longitudinal y transversal del cauce, con el objeto de garantizar un escurrimiento tranquilo y uniforme, exento de arremolinamientos, y aprovechable para mediciones puntuales o continuas de caudal.
- Quedar comprendida dentro de un tramo recto y uniforme, con una longitud no menor de siete veces el ancho del río, dispuesta así: aguas arriba, mínimo cinco veces el ancho, y aguas abajo, mínimo dos veces el ancho. Se aclara que, dadas las características del cauce, no es posible encontrar tales rectitudes y uniformidad del tramo.
- Las orillas del río deben ser permanentes, lo suficientemente altas para contener las crecidas y no debe estar sujeto a socavaciones ni a rellenos.
- El caudal deberá tener un flujo cuya orientación debe ser paralela a las líneas de ribera; por ende, perpendicular a la sección de control.
- El fondo del río debe ser suave y libre de plantas acuáticas, piedras u otros obstáculos, que por sus dimensiones puedan interferir en la medición de la velocidad de la corriente.
- El flujo del agua no debe ser muy lento, para evitar el crecimiento de plantas acuáticas que alteren el área de la sección de control.
- Para el caso de grandes cursos naturales de agua, la profundidad mínima del tirante de agua deberá ser superior a 0,30 m.
- El sitio de aforo debe estar lo suficientemente aguas arriba de la confluencia con otro río o de los efectos de la marea, para evitar toda influencia variable que puedan ejercer sobre el nivel en el sitio de la estación.
- Deben evitarse las secciones cercanas a los estribos de los puentes.
- Muy pocas veces se encontrará un sitio que satisfaga todos esos criterios; por lo tanto, se deberá seleccionar el sitio que más convenga y sobre todo que sea accesible para las mediciones.

La determinación de la cantidad de secciones y puntos de medición, tiene como base la precisión que se quiere obtener; es decir, cuanto más secciones y puntos de medición, mayor será la precisión.

Es importante tener en cuenta, las irregularidades del fondo del cauce, para determinar la cantidad de verticales de medición, según la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Relación entre el ancho superficial del río y la separación entre los puntos de medición de la velocidad

Tabla 5.1
Relación entre el ancho superficial del río y la separación entre los puntos de medición de la velocidad

Ancho superficial de la sección del río B (m)	Distancia entre los puntos de medición o ancho del tramo M (m)
Menos de 10	Porcentaje de 10% -15%
10 - 20	Ancho superficial l
20 - 40	2
40 - 60	3
60 - 80	4
80 - 100	5
100 - 150	6
150 - 200	10
Más de 200	15

Otro criterio para determinar el número de verticales o dovelas a considerar, es el que establece la norma ISO 748 "Measurements of liquid flow in open channels Velocity-Área methods", contenido en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2

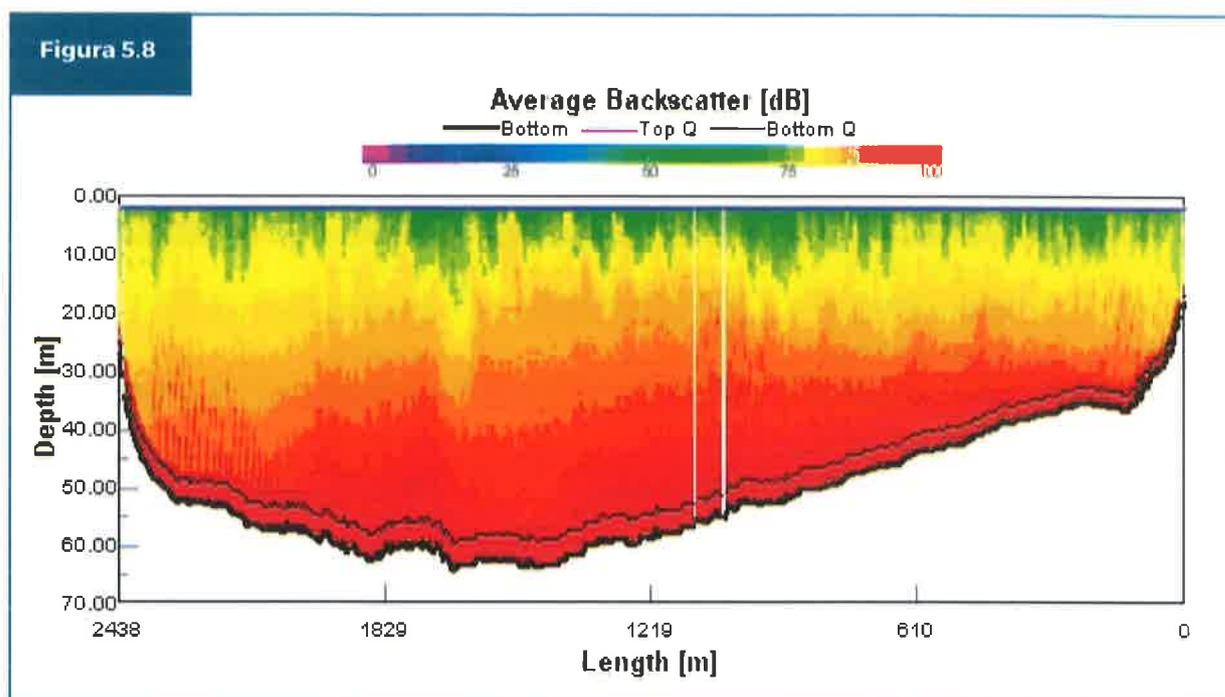
Relación entre el ancho superficial del río y el número de verticales para la medición de la velocidad

Ancho del cauce B (m)	Numero de verticales (n)
$0 < B < 0,5$ m	n = 3 a 4
$0,5 \text{ m} < B < 1,0$ m	n = 4 a 5
$1,0 \text{ m} < B < 3,0$ m	n = 5 a 8
$3,0 \text{ m} < B < 5,0$ m	n = 8 a 10
$5,0 \text{ m} < B < 10,0$ m	n = 10 a 20
$10,0 \text{ m} < B$	n \geq 20

El precitado ISO 748, recomienda que la cantidad de franjas verticales donde se mide la velocidad, debe ser tal que el caudal no supere el 10 % del caudal total a medir, como forma orientativa e indicadora de la calidad del aforo.

Para la estimación de las profundidades, se debe considerar la forma del aforo a efectuar, por ejemplo si es por vadeo o suspensión. El aforo por vadeo se realiza cuando el curso de agua es pequeño, poco profundo y de fondo resistente, para ello es necesario tener una cinta o alambre graduado de un margen a otra (línea de medición), y se mide las velocidades a diferentes profundidades y puntos equidistantes a lo largo de la línea de referencia.

Cuando se afora con ADCP, la batimetría de la sección de aforo se obtiene de manera automática y con mayor precisión. (Figura 5.8).



Perfil de profundidad de la sección de aforo, obtenida con ADCP en la sección del río Amazonas en Obidos, Brasil
Fuente: IRD, HYBAM

En ausencia de este equipo, la ecosonda se convierte en un buen sustituto para realizar trabajos de sondeo de profundidades y batimetría de alta precisión, dependiendo del tipo de equipo. Se recomienda el uso de ecosondas acopladas con GPS y dispositivo de Bluetooth.

5.3 Métodos y procedimientos de medición de velocidad media en una vertical

Para uso de correntómetro, la velocidad media del agua en cada vertical de la sección de aforo se puede determinar mediante alguno de los siguientes métodos:

- a) Método de distribución de velocidad
- b) Método de puntos reducidos
- c) Método de integración

La selección del método apropiado para la medición de la velocidad depende del tiempo disponible para el aforo, el ancho de la sección, la profundidad del agua, las condiciones del lecho, las variaciones del nivel del agua y la exactitud requerida. Para una revisión detallada de los métodos se puede remitir a la Guía de Prácticas hidrológicas de OMM, Volumen I, Capítulo V.

En la Tabla 5.3 se muestra una regla práctica del método de los puntos reducidos.

Tabla 5.3
Método de los puntos reducidos

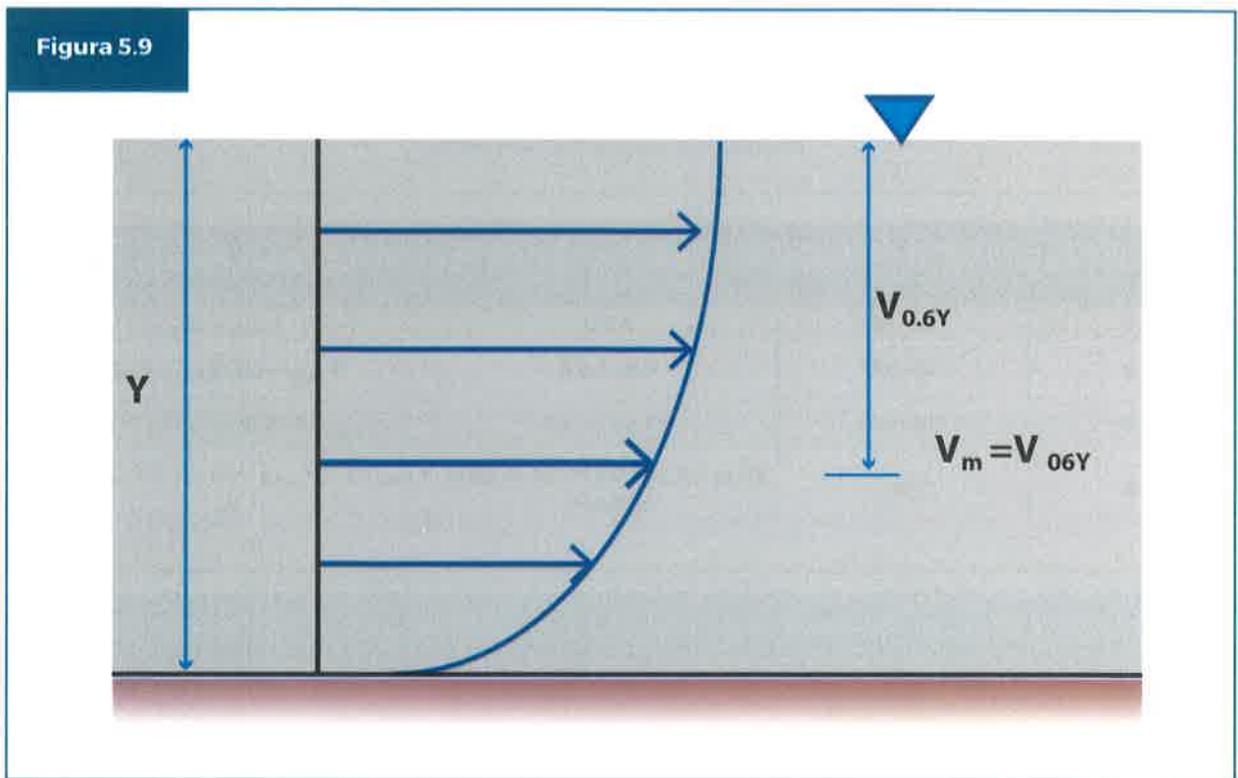
Número de mediciones	Profundidad del curso de agua en cm.	Puntos de observación (medidos desde la superficie libre)	Velocidad media
1	30 - 60	0.6 D	$V_{media} = V_{0.6}$
2	60 - 300	0.2 y 0.8 D	$V_{media} = 0.5 (V_{0.2} + V_{0.8})$
3	300 - 600	0.2, 0.6 y 0.8 D	$V_{media} = 0.25 (V_{0.2} + 2 V_{0.6} + V_{0.8})$
5	600	30 cm, 0.2, 0.6, 0.8 D y 30 cm sobre el fondo	$V_{media} = 0.1 (V_{superf.} + 3V_{0.2} + 2 V_{0.6} + 3V_{0.8} + V_f)$

Fuente: Solange Dussaubat, Ximena Vargas
Donde: "D" es la profundidad del agua en cm

Para el SENAMHI la aplicación del método de los puntos reducidos se consideran los siguientes criterios:

- Medición en un punto
- Medición en dos puntos
- Medición en tres puntos

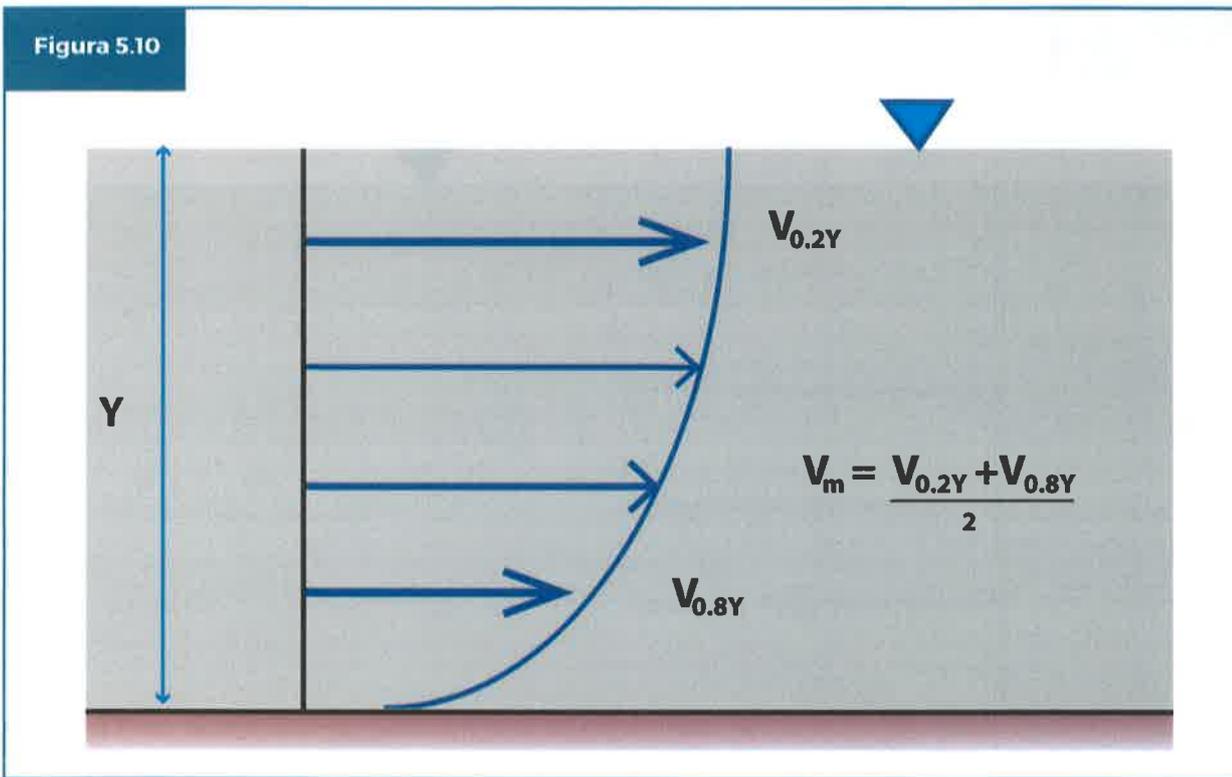
- ♦ **Método de un punto.** Este método consiste en obtener la velocidad colocando el molinete a 0,6 de profundidad a partir de la superficie, considerando esta medición como la velocidad media (V_m) en la vertical. Se aplica este método cuando las profundidades en la vertical sean inferiores a 0,70 m. Ver Figura 5.9.



Método de aforo al 60% de profundidad
Fuente: Elaboración propia

$$V_m = V_{0.6y} \quad (5.2.1)$$

- ♦ **Método de dos puntos.** Este método consiste en obtener la velocidad colocando el molinete a 0,2 y 0,8 de profundidad a partir de la superficie o fondo del cauce, por lo que la velocidad media (V_m) en la vertical se obtiene de la siguiente forma. Este método se aplica cuando las profundidades en la

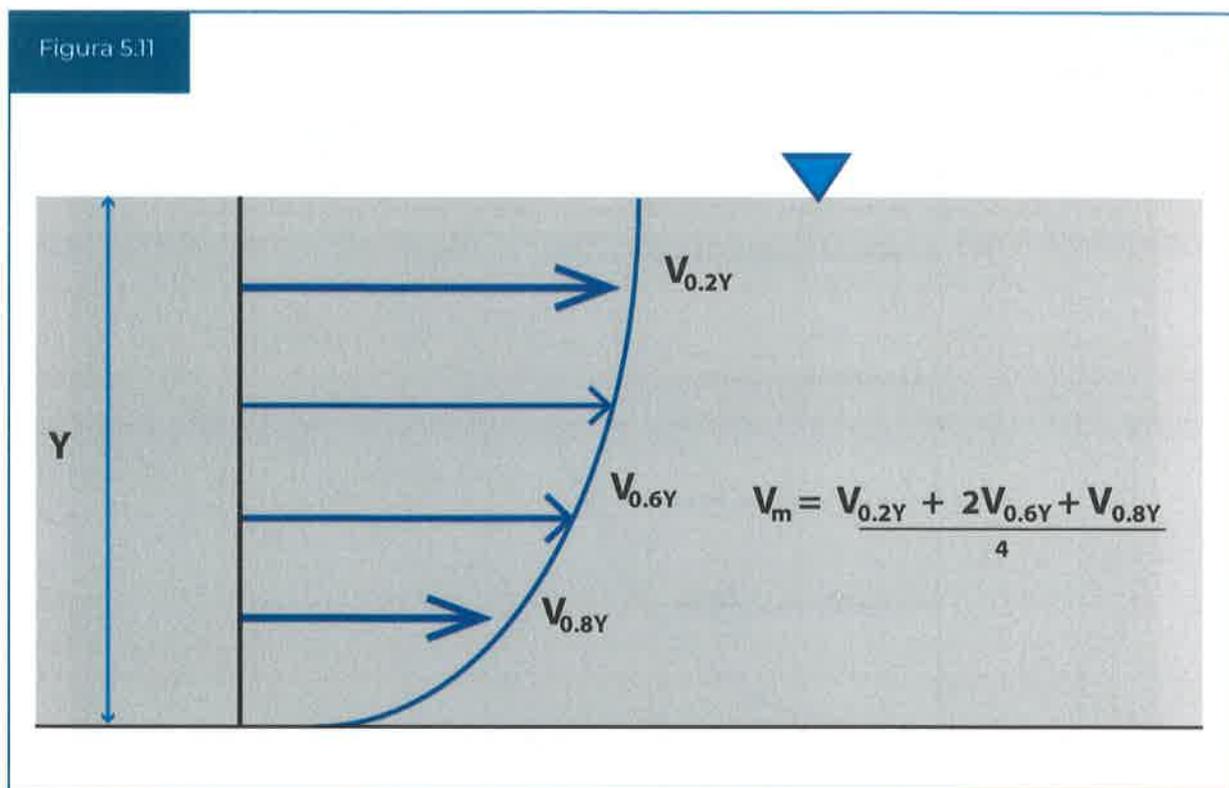


Método de aforo al 60% de profundidad
Fuente: Elaboración propia

$$\frac{V_m = V_{0.2y} + V_{0.8y}}{2} \quad (5.2.2)$$

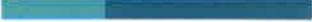
vertical son superiores a 0,70 m. Ver Figura 5.10.

- ♦ **Método de tres puntos.** Este método consiste en obtener la velocidad colocando el molinete a 0,2, 0,4 y 0,8 por ciento a partir de la superficie, por lo que la velocidad media (V_m), en la vertical, se obtiene de la siguiente forma. Ver Figura 5.11.



Método de aforo al 20%, 60% y 80% de profundidad
Fuente: Elaboración propia

$$V_m = \frac{V_{0.2y} + V_{0.6y} + V_{0.8y}}{4} \quad (5.2.3)$$



Este método se aplica cuando las profundidades en la vertical sean superiores a 0,70 m o para mediciones bajo hielo o en canales cubiertos por vegetación acuática.

A continuación, se describen otros métodos para obtener una mejor precisión en los cálculos, empleados normalmente con fines de investigación, o cuando la distribución vertical de las velocidades es muy irregular:

♦ **Método de cinco puntos.** La velocidad media (V_m), en la vertical, se obtiene de la forma siguiente:

$$V_m = \frac{(V_{Superf} + 2V_{0.2y} + 3V_{0.6y} + 3V_{0.8y} + V_{lecho})}{10} \quad (5.2.4)$$

5.3.1 Fuentes de error en la medición de la velocidad media:

Cuando se miden velocidades por cualquiera de los métodos descritos, se cometen errores de origen aleatorio o sistemático, por consiguiente es conveniente determinar un orden de magnitud de este error, de tal manera que se pueda estimar la incertidumbre total de la medición.

Según el Manual de Procedimientos Hidrométricos de la Corporación Autónoma Regional del Valle de Cauca, los errores en la medición de la velocidad media, se originan por:

- El flujo es inestable, es decir el nivel de agua cambia considerablemente durante la medición.
- El material en suspensión interfiere el molinete, distorsionando el valor de velocidad.
- La dirección del flujo no es paralela a la hélice del molinete.
- Se usa un molinete para medir velocidades que se encuentran fuera de su rango de calibración (en algunos casos se mide con molinetes que poseen dos

curvas de calibración, y esta condición no se tiene en cuenta al momento de medir).

- Los equipos para la medición (tales como barras de vadeo o cables de suspensión) son diferentes a los que se utiliza para la calibración del molinete, en cuyo caso se introducen errores sistemáticos.
- Es significativa la perturbación de la superficie libre del agua por acción del viento, o cualquier otra causa, cuando se va a medir la velocidad superficial.
- El molinete no es sostenido de manera estable en el lugar correcto durante la medición.

5.4 Procedimiento para la realización de los aforos

5.4.1 Aforo con correntómetro

5.4.1.1 Aforo por suspensión

El aforo por suspensión se realiza desde una estructura (generalmente un puente o un carro huero), sobre la cual se miden las profundidades y velocidades de flujo en cada una de las verticales seleccionadas, aplicando los procedimientos señalados en ítem 4.2 y 4.3. La medición de la velocidad

del agua se obtiene utilizando un molinete o correntómetro, tal como se ilustra en la Figura 5.12.

Para realizar este tipo de aforo se necesita un correntómetro con lastre de 25 Kg o mayor dependiendo de las condiciones de flujo y volumen de agua circulante en el río. Al carro huero se acopla un winche con cable acerado para medir la profundidad del agua en cada vertical. Para el desarrollo del aforo por suspensión, se necesitan dos personas como mínimo.

Preparación para el aforo desde carro huero
en la Estación de Chosica-río Rímac-Lima
Fuente: SENAMHI

Figura 5.12

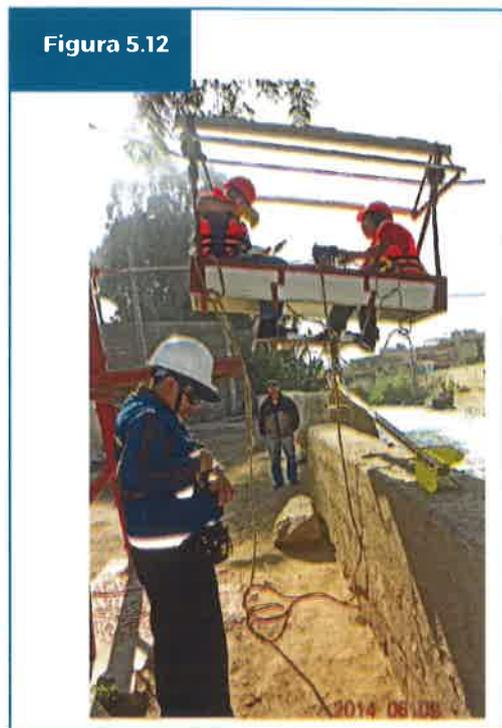


Figura 5.13



Para el aforo por suspensión desde puentes, adicionalmente al equipamiento indicado en el párrafo anterior, es conveniente utilizar una estructura (tipo grúa) portátil y robusta provista de un mecanismo de poleas que permita sumergir el correntómetro y lastre al río, como se ilustra en la Figura 5.13.

Aforo desde Puente Unacolla, en el río Coata-Puno
Fuente: SENAMHI-Puno

En algunas estaciones del SENAMHI se han implementado estructuras de aforo por suspensión con sistema traveller, como el que se ilustra en la Figura 5.14.

En condiciones de mucha turbulencia del flujo de agua, es una práctica común medir la velocidad superficial del agua en las verticales de la sección, y luego ajustar a valores de velocidad media con un factor de reducción de 0.85, según la OMM.

Figura 5.14

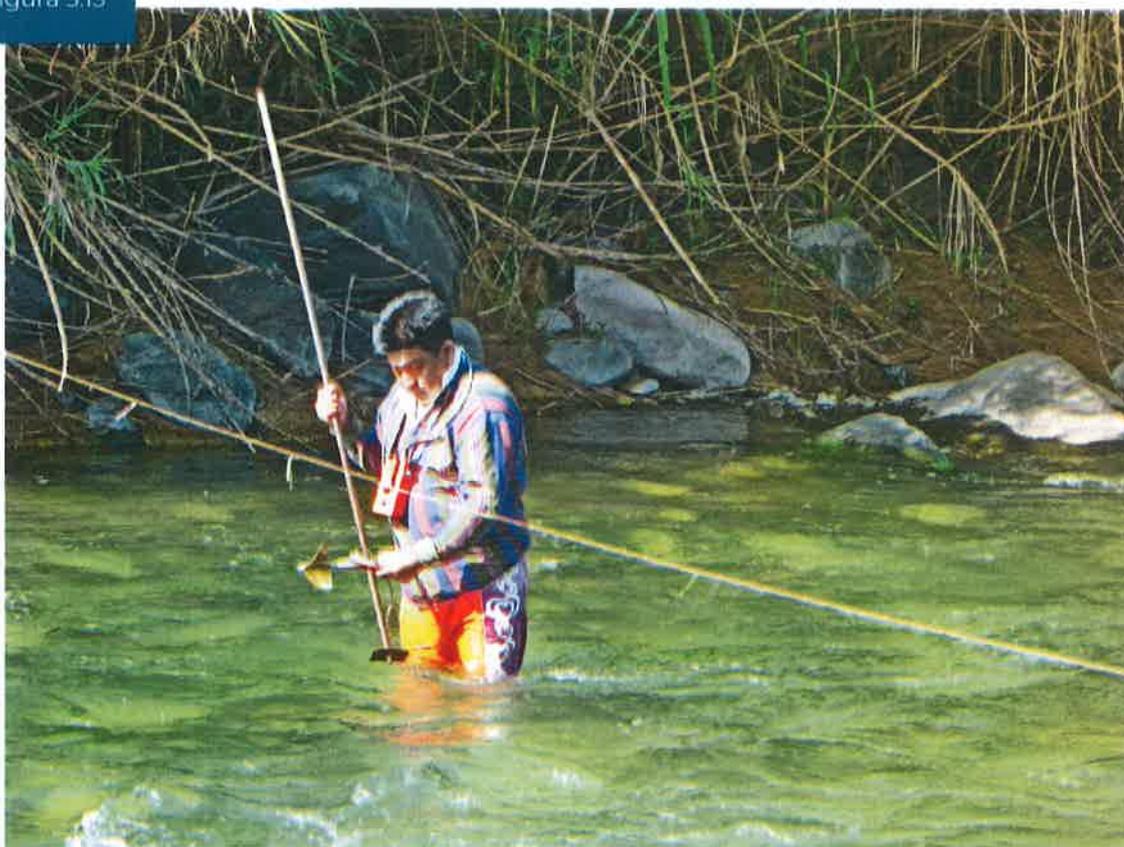


Aforo del río Pisco, en la EHA-Letrayoc
Fuente: SENAMHI-Ica

5.4.1.2 Aforo por vadeo

Se emplea cuando la corriente es poco profunda, pequeña y de fondo resistente, debido a que permite la inmersión del hidromensurador al río. Al igual que en el método de aforo por suspensión, es necesario tener una sección definida que permita determinar la posición de las verticales sobre las cuales se hace la medición de profundidades y velocidades de flujo. Para medir estos parámetros, el técnico entra al río con el equipo de medición, varillas de hierro y contómetro; toma como referencia una cuerda driza o una cinta métrica y se efectúa las mediciones en cada vertical. Ver Figura 5.15.

Figura 5.15



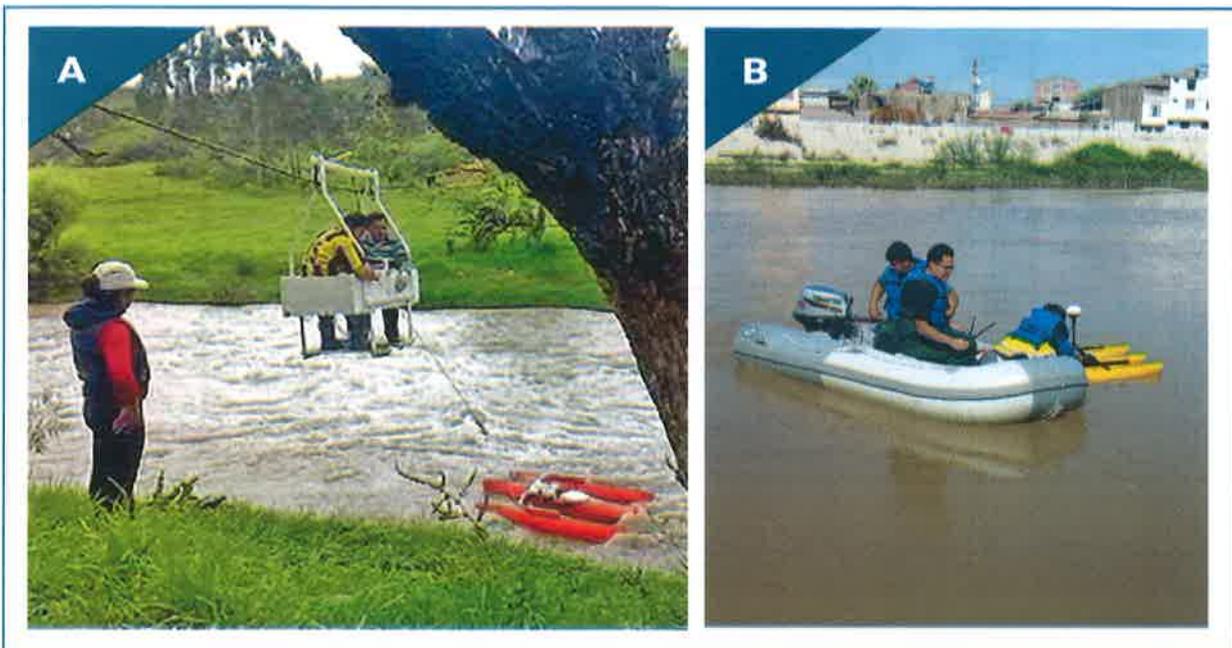
Aforo por vadeo, río Mala, estación La Capilla
Fuente: SENAMHI

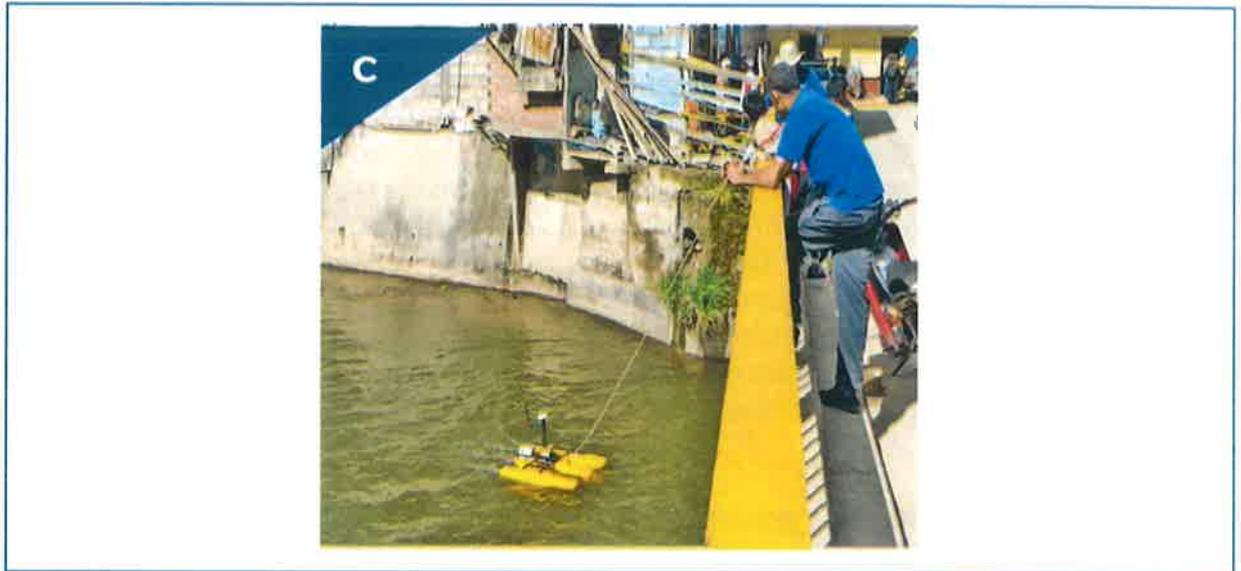
5.4.2 Aforo con ADCP

Un importante avance en hidrometría es el uso de los correntómetros hidroacústicos, con base en la tecnología Doppler, que inicialmente fueron diseñados para monitorear corrientes marinas, luego para realizar aforos en grandes ríos y actualmente existen en el mercado equipos que permiten realizar aforos en ríos cada vez más pequeños. Tales equipos permiten obtener rápidamente una lectura de la distribución de velocidades en la sección de aforo, discretizada en celdas de un tamaño predefinido, y además, viene implementado con un software que permite, entre otras funciones, visualizar los resultados mientras se realiza la medición; los datos que genera son de calidad, y su implementación y operación es sencilla.

El SENAMHI, con el apoyo de proyectos interinstitucionales, viene implementando con éxito sus estaciones hidrométricas con Perfiladores Acústicos de Corriente de efecto Doppler - ADCP SONTEK M9 y RiverRay. La utilización de estos equipos ha permitido mejorar la oferta de caudales en estaciones poco aforadas, donde sólo se dispone de datos de niveles de agua.

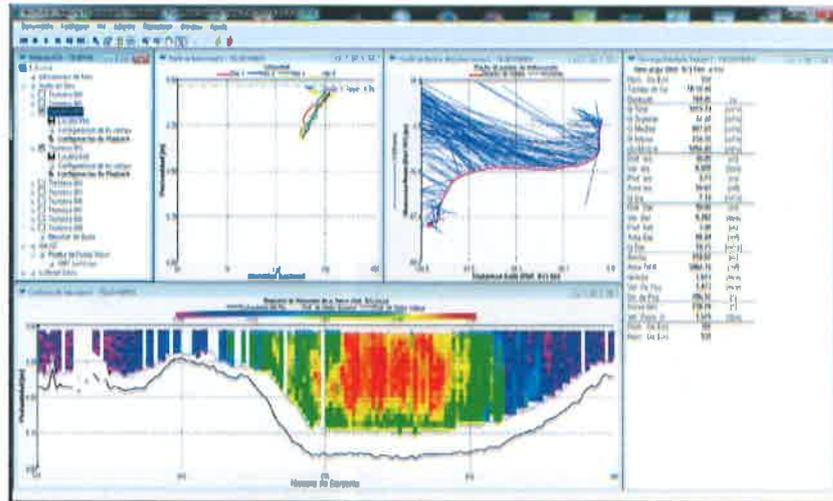
Los aforos con estos equipos se realizan desde carro huaro, puentes y sobre embarcaciones tipo bote, deslizador, tal como se ilustra en la Figura 5.16.





A) Aforo desde carro huario con ADCP RiverRay, B) Aforo desde puente con ADCP M-9
C) Aforo con ADCP M-9 desde embarcación con motor fuera de borda
Fuente: SENAMHI de Cajamarca, Huánuco y Piura

Figura 5.17



Pantalla de salida gráfica de resultados del aforo con ADCP M-9
Fuente: SENAMHI



A continuación, se describen los pasos a seguir para realizar las mediciones hidrológicas con el ADCP M9 Sontek:

- Como parte de las actividades previas al trabajo de campo, se recomienda elaborar una lista de chequeo que contemple revisar baterías (del ADCP y de los dispositivos móviles de recepción de datos), herramientas, barco y accesorios del mismo, soga o elemento de traslación del barco (en caso de que no sea autopropulsada), entre otros. La comisión precisa de al menos tres operarios, dos para mover el barco con el equipo de lado a lado, y uno que maneje el equipo de recepción (computadora portátil o teléfono celular).
- Seleccionar la sección en donde se realizará el aforo, considerando su buena accesibilidad, ya sea para operar el instrumento desde las márgenes y/o desde los puentes.
- Armar los instrumentos: colocación del ADCP junto al módulo de energía y comunicación, y el receptor GPS sobre la embarcación.
- Parametrización del instrumental utilizando el programa computacional específico e incorporación de los datos requeridos y específicos de cada localización (declinación magnética, sumergencia del perfilador, etc.).
- Calibrar la brújula del instrumento para que el equipo realice las correcciones de posición frente a los balanceos y cabeceos de la embarcación.
- Colocar la embarcación (junto con todo el instrumental) en una margen del río.
- Realizar 4 transeptos o cruces desde las márgenes o desde puentes, como mínimo, manteniendo velocidad y dirección constantes de la embarcación. De esta manera se obtendrán las velocidades y profundidades de flujo que permiten determinar caudales en cada cruce. El valor de caudal adoptado se obtiene promediando los valores de los 4 cruces realizados.
- Al realizar los transeptos, se debe mantener la velocidad de la embarcación constante, para evitar que las mediciones se vean afectadas. Es importante lograr que la velocidad de avance de la embarcación o sistema de flotación sea siempre menor a la velocidad del agua, de tal forma que el error relativo sea el mínimo posible.

- No siempre se puede acceder a ambas márgenes del río, o llegar por la vía terrestre a una de ellas, por el tiempo que se requiere. En estos casos, será necesario contar con un bote o kayak con capacidad para transportar personas de lado a lado del río.
- Para determinar la temperatura y la conductividad, se colocará el sensor de la sonda multiparamétrica dentro del agua y se tomará la lectura en el lector correspondiente. Estas mediciones se deben realizar desde una de las márgenes de los cursos de agua.

Información detallada sobre características y operación de este ADCP se encuentra en el “Protocolo para el uso y operación del perfilador acústico de efecto doppler – ADCP multifrecuencia Sontek M-9”, elaborado por el SENAMHI-2014. En la Figura 5.19 se muestra un panorama de los equipos ADCP que dispone el SENAMHI para realizar las mediciones de caudal en las diferentes regiones hidrológicas del país.



Regiones hidrológicas del Perú donde el SENAMHI realiza aforos con diferentes equipos ADCP
Fuente: SENAMHI-DHI

5.4.3 Aforo con pistola radar de velocidades

La necesidad de contar con datos de caudal en aguas altas para mejorar la calibración de las curvas altura gasto y una mejor estimación de los caudales extremos, ha motivado la aparición de nuevo tipo de equipos hidrométricos, agrupados bajo la denominación de "equipos no intrusivos", que permiten realizar estimaciones indirectas del caudal sin estar en contacto con el agua; dentro de este grupo, se encuentra la pistola radar utilizada para medir la velocidad superficial del flujo de agua.

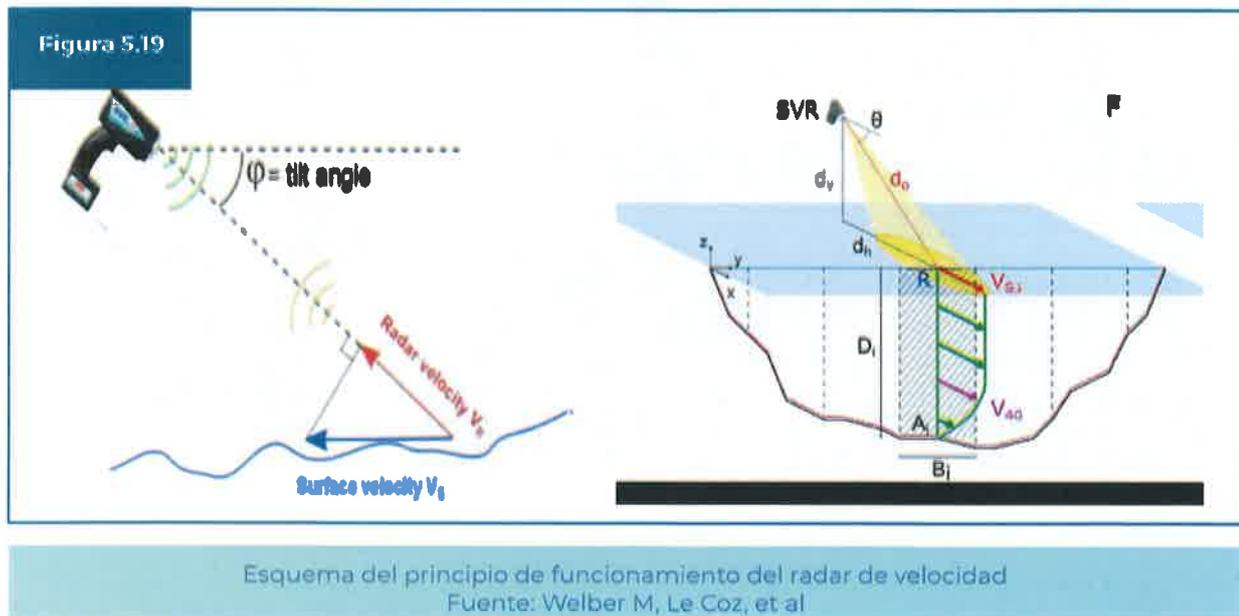
Los velocímetros de radar utilizan el efecto Doppler para proporcionar una estimación de la velocidad de la superficie del agua. Las unidades de radar emiten una señal de radio que es retrodispersada a la antena por ondas superficiales cortas generadas por turbulencia, lluvia o viento [Costa et al., 2006; Plant et al., 2005]. La longitud de las ondas de dispersión λ_b viene dada por la condición de Bragg como:

$$\lambda_b = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (5.4.1)$$

Donde:

λ_b : Longitud de onda de la señal incidente

θ : Ángulo de incidencia



El ángulo de incidencia deberá ser determinado en campo con mediciones frecuentes, a fin de determinar la inclinación más confiable para determinar la velocidad del flujo de agua.

En la Figura 5.20 se puede apreciar diferentes formas de uso del radar de velocidad en cursos naturales, con apoyo de trípode o manualmente.



Vista de diferentes formas de utilizar la pistola radar en cursos naturales
Fuente: Welber M. Le Coz, et al

Para obtener mediciones confiables de velocidad con la pistola radar, se debe realizar el contraste con el correntómetro o ADCP. Se debe seleccionar el mejor ángulo de inclinación para que el operador realice la medición. Se recomienda efectuar el mayor número de pruebas para determinar el ángulo de incidencia que mejor represente la velocidad superficial del flujo de agua. Los manuales de este tipo de equipos recomiendan un ángulo de 45° y 2 minutos como el tiempo de medición en cada punto.

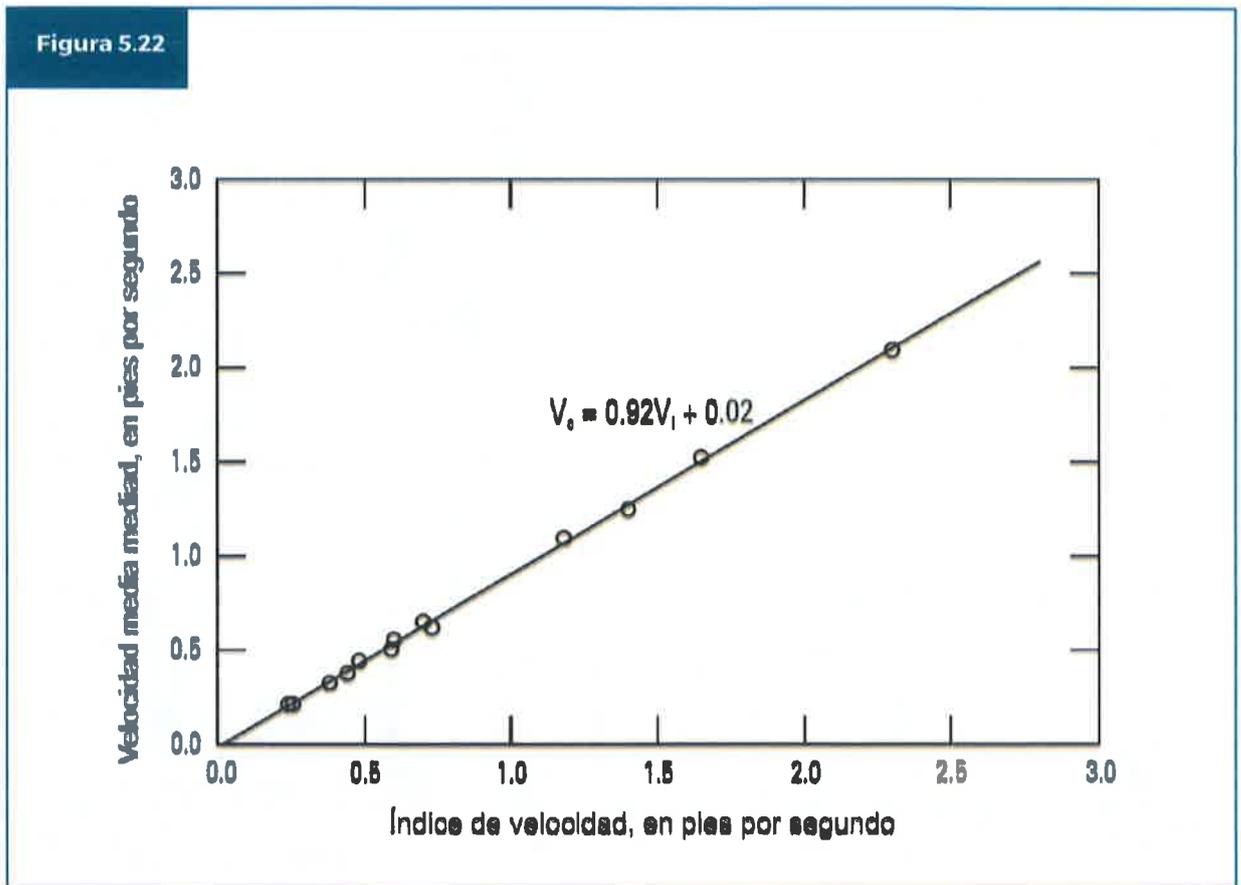
Figura 5.21



Calibración de la pistola mediante mediciones comparativas con ADCP
Fuente: <https://my.usgs.gov/confluence/display/SurfBoard/Guidelines+for+Siting+and+Operating+Surface-water+Velocity+Radars>

En cada vertical de la sección de aforo, se debe tener una muestra representativa de mediciones simultáneas de velocidad con la pistola y con correntómetro o ADCP, a fin de calcular la velocidad media del flujo de agua como una función lineal de la velocidad superficial obtenida con la pistola para diferente nivel de agua. Esta relación lineal se obtiene utilizando el método del "Índice de Velocidad" del USGS (ver Figura 5.22).

Para mayor información del método del Índice de Velocidad, revisar el manual Computing Discharge Using the Index Velocity Method, publicado por el USGS.



Curva de calibración de velocidad media con método de índice de velocidad. El índice de velocidad en este caso es la velocidad superficial obtenida con pistola
Fuente: United States Geological Survey, USGS

El SENAMHI cuenta con pistolas radar que son utilizadas en las estaciones de aforo en época de crecida de los ríos de la región hidrográfica del pacífico. Se ha encontrado resultados satisfactorios para velocidad de flujo de aguas altas, lo cual es alentador teniendo en cuenta que en época de avenida no se puede realizar aforos con ADCP ni correntómetro.

Figura 5.23



Aforo del río Chancay-Huaral en Pte. Cuchuanca, con pistola radar SVR
Fuente: SENAMHI

5.4.4 Aforo con flotadores

A pesar de que existen diversos equipos que facilitan el registro de las velocidades en los cursos de agua, es posible utilizar el método de flotadores en condiciones de excesiva velocidad del agua por la presencia de cuerpos extraños que podrían colocar en riesgo la integridad de los hidromensores. En esta situación, será necesario desarrollar el aforo por medio de flotadores, para medir la velocidad superficial del flujo de agua y estimar de manera indirecta el caudal, conociendo la sección transversal del río.

Este método consiste en utilizar objetos que floten y permitan medir el tiempo que se demora en recorrer una distancia predeterminada.

El flotador es un elemento natural o artificial en condiciones de mantenerse sobre el agua y que podría ser arrastrado por las aguas ya sea parcial o totalmente sumergido en ella. Los objetos más utilizados como flotadores, son trozos de madera, palos, botellas plásticas parcialmente con agua o cualquier otro objeto del lugar que sirva para dicho objetivo.

El aforo se realiza en un tramo donde el curso del río sea lo más recto posible. Se recomienda conocer la distancia del río, y en distancias mayores o iguales a 30 metros o según las condiciones del lugar. Se deberá utilizar la mayor cantidad de flotadores posibles, que cubran todo el ancho del río en franjas proporcionales y además que tengan forma y peso similares. Ver Figura 5.24.

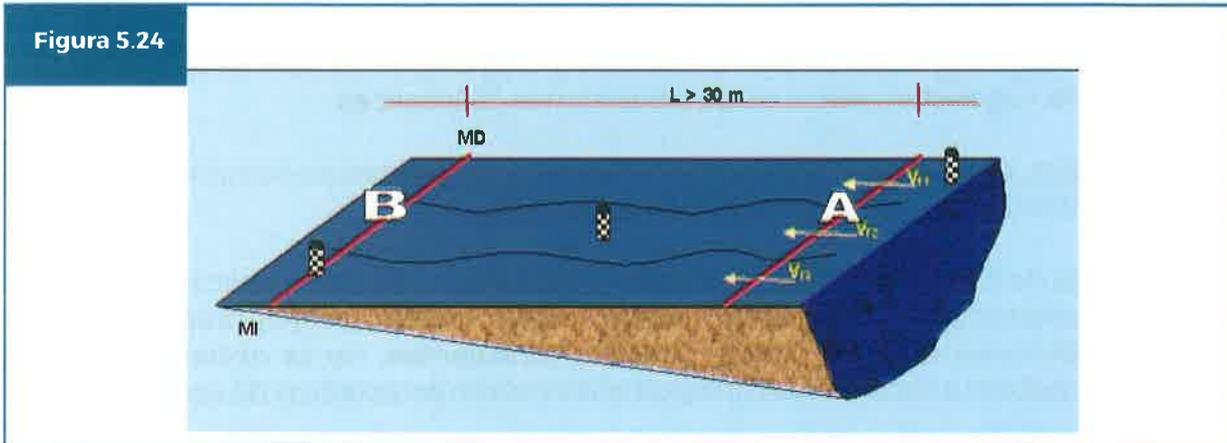
En la Tabla 5.4, se presenta la relación de proporcionalidad entre el ancho del río y la cantidad de flotadores a emplear.

Tabla 5.4
Relación entre el ancho superficial del río y la cantidad de flotadores a emplear

Ancho de sección	Menor a 50 m	50 – 100 m	100 – 200 m	200 – 400 m	400 – 800 m	Mayor a 800 m
Número de tramos que se subdivide la sección de control y cantidad mínima de aforos.	3	4	5	6	7	8

Fuente: Elaboración propia

Asumiendo que la trayectoria de los flotadores sea recta y paralela a la corriente, se obtendrán tiempos para un mismo espacio; que al ser remplazados en la ecuación que a continuación presentamos, se determinará las velocidades parciales para cada uno de los flotadores.



Tramo en la sección de control en un curso de agua, aforando con flotadores
Fuente: Elaboración propia

$$V_i = \frac{L}{t_i} \quad (5.4.2)$$

Donde:

- L** : Distancia del tramo recto en metros (mayor o igual a 30 metros).
- t_i** : Tiempo que demora en recorrer la distancia "L" el flotador número "i".
- V_i** : Velocidad del flotador número "i".
- i** : Número del flotador. $i = 1, 2, \dots, N$.

Al promediar las velocidades parciales, se obtendrá la velocidad superficial promedio (V_{sp}) a todo lo ancho del cauce. Este punto se desarrollará con más detalle en la parte de aplicaciones.

Una vez determinado la V_{sp} se definirá la velocidad promedio de la sección (V_m), para lo cual hay que tener en cuenta la relación V_m / V_{sp}

$$K = \frac{V_m}{V_{sp}} \quad (5.4.3)$$

Donde:

- V_m : Velocidad promedio en la sección.
- V_{sp} : Velocidad superficial promedio.
- K : Constante.

En general V_m / V_{sp} suele oscilar entre 0.45 y 0.95 dependiendo de la morfología del cauce, la rugosidad, entre otras condiciones hidráulicas.

En la práctica, el valor de la constante "K" se estima realizando campañas de aforo con correntómetro y flotadores en forma paralela.

Una ventaja de este método es la forma práctica y sencilla de su aplicación, que no requiere construcción de estructuras especiales, su costo es bajo y la aproximación de las mediciones es buena. En corrientes turbulentas, no se obtienen buenos resultados debido a los cambios bruscos que ocurren en este tipo de escurrimiento.

Determinación del área de la sección transversal

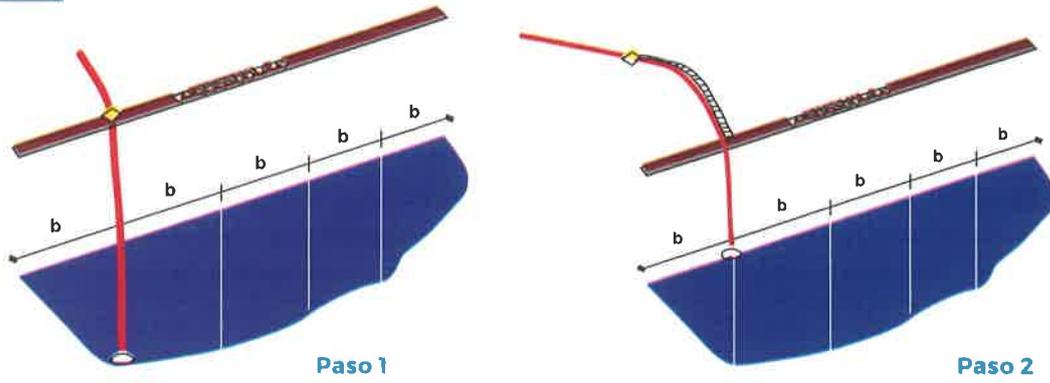
Para determinar el área en la sección de control, se empleará la metodología utilizada en el aforo por vadeo o suspensión según sea el caso. Figuras 5.25 y 5.26.

$$A = bh_1 + bh_2 + \dots + bh_N \quad (5.4.4)$$

Donde:

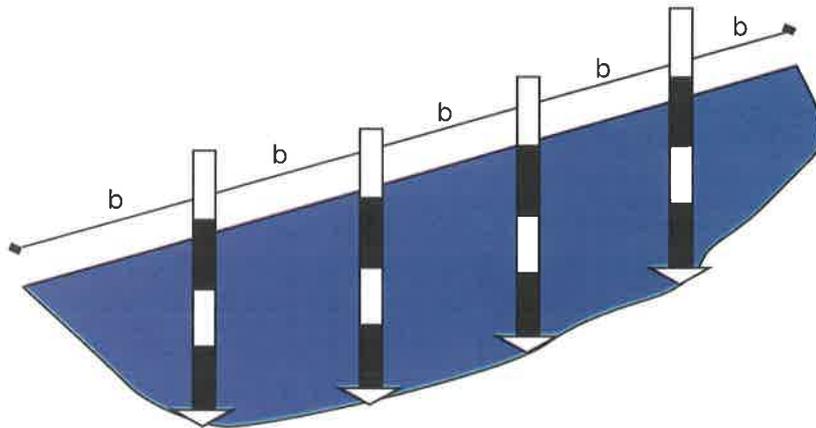
- b : amplitud de cada segmento del tramo.
- h_N : profundidad en cada línea de medición.
- N : número de la línea de medición.

Figura 5.25



Procedimiento para determinar el área en la sección de control en un curso de agua, en suspensión.
Fuente: Elaboración propia

Figura 5.26



Procedimiento para determinar el área en la sección de control en un curso de agua, en suspensión.
Fuente: Elaboración propia

5.5 Procedimiento de cálculo del caudal

El caudal es una variable que depende directamente del área de la sección y la velocidad media del agua, por lo que se obtendrá de la siguiente manera:

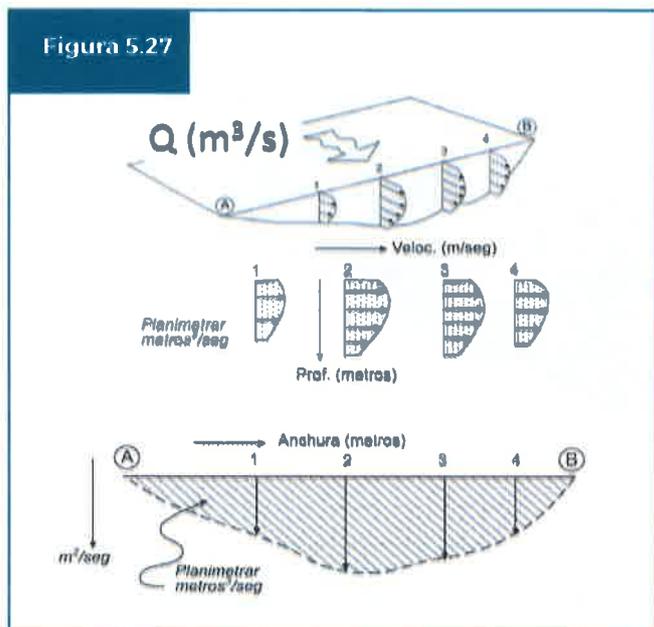
$$Q = V_m * A \quad (5.5.1)$$

Donde :

- V_m : velocidad media en la sección en metros por segundos (m/s).
- A : área de sección de control en metros cuadrados (m²).
- Q : caudal en metros cúbicos por segundo (m³/s).

La información de campo obtenida en las secciones de aforo como profundidad y velocidad deberán ser procesadas en planillas para realizar el cálculo del caudal. Existen diversos métodos para realizar este proceso, tales como:

- ♦ Métodos gráficos; como el método de la integración de la curva de la velocidad y del trazado de la curva de velocidad.
- ♦ Métodos aritméticos; existen dos métodos. El primero de Sección Media y el segundo de Semi Sección. Ambos son los más utilizados en el Perú y se describen a continuación.



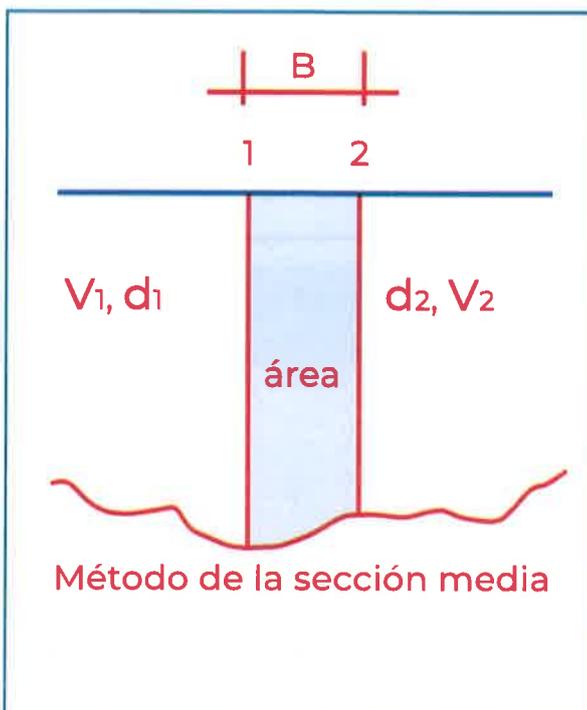
Integración de la curva de velocidad
Fuente: <http://ocw.usal.es/ciencias-experimentales/hidrologia>

5.5.1 Método de la sección media

Este método se emplea para determinar el caudal promedio en dos verticales consecutivas y el área contemplada entre las mismas.

Si V_1 es la velocidad media en la primera línea de medición y V_2 la velocidad media en la segunda línea de medición, independientemente del método que se haya utilizado para determinar estos valores (mediciones a 0.6 y 0.2-0.8 de profundidad), y siendo d_1 y d_2 las profundidades totales de las respectivas líneas de medición, y B la distancia horizontal entre ellas. Entonces el caudal del tramo 1-2 será igual:

$$q_{1-2} = \frac{V_1 + V_2}{2} * \frac{d_1 + d_2}{2} * B \quad (5.5.2)$$

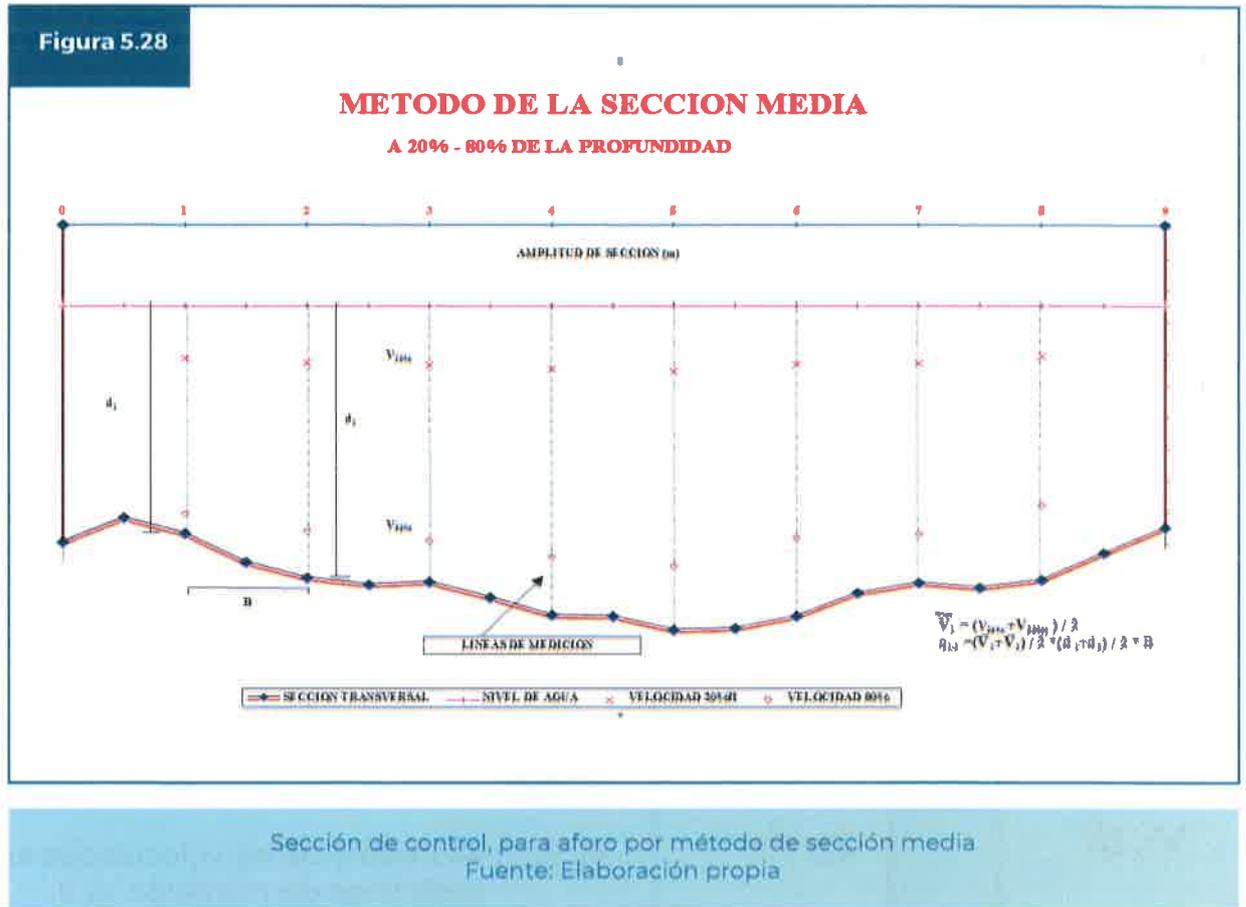


Donde:

- V_1, V_2 : Promedio de las velocidades en cada línea de medición 1 y 2.
- d_1, d_2 : Profundidades de las líneas de medición.
- B : Ancho entre las líneas de medición 1-2.
- q_{1-2} : Caudal parcial en el tramo 1-2.

La ecuación que se detalla, es utilizada para cada una de los tramos en que se divide la sección de control, por lo tanto, el caudal total circulante, será la sumatoria de todos los caudales parciales de cada

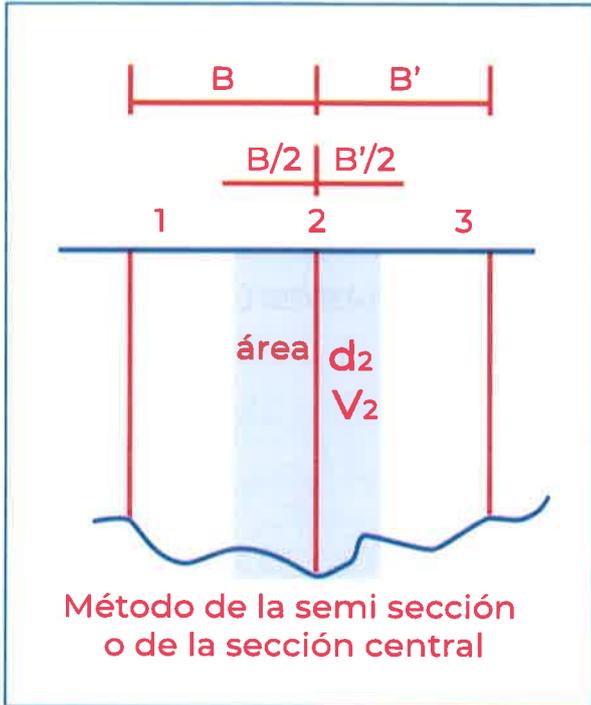
$$Q = \sum q_{i-i+1} \left[\frac{m^3}{seg} \right] \quad (5.5.3)$$



uno de los tramos, es decir:

5.5.2 Método de la semi sección

Este método emplea, para determinar el caudal, el promedio de las velocidades en la línea de medición y el área calculada con la profundidad en la línea de medición multiplicada por la mitad de la separación anterior más la mitad de la separación en relación a la línea de medición siguiente.



$$q_2 = V_2 * \left(\frac{B}{2} + \frac{B_1}{2} \right) * d_2 \quad (5.5.4)$$

$$q_2 = V_2 * A_2$$

$$Q = \sum_{i=1}^n q_{i-1+i} \left[\frac{m^3}{seg} \right] \quad (5.5.5)$$

Donde :

- q₂ : Caudal parcial en el tramo
- V₂ : Promedio de velocidades en la línea de medición 2.
- d₂ : Profundidad en la línea de medición 2.
- B, B' : Ancho entre las líneas de medición*.
- Q : Caudal total que discurre por la sección transversal.

(*) Generalmente en las actividades de aforo en nuestras estaciones hidrométricas B y B', son magnitudes iguales.

Nota:

- a. El caudal puede ser ligeramente diferente si el método utilizado es V_{0.6}, V_{0.2} - V_{0.8}, u otro método.
- b. El caudal puede ser ligeramente diferente si él cálculo es por el método de la sección media o semi sección.

5.5.3 Cálculo de control de descarga por el método de la sección media

Para la explicación de este método, utilizaremos un control de descarga de la Estación Hidrométrica de Chosica del río Rímac, perteneciente a la cuenca del río Rímac, departamento de Lima.

El formato es la planilla SENAMHI-15 que se visualiza en la Tabla 5.

La ecuación del correntómetro OTT C-31 135693, HEL. N°: 1-135051 Lastre: 25 kg:

$$N < 0.56$$

$$V = 0.2440 * N + 0.0130 \quad (\text{m/s})$$

$$0.56 \leq N < 9.27$$

$$V = 0.2602 * N + 0.0040 \quad (\text{m/s})$$

Donde:

N =Revoluciones/Tiempo.

Nota:Cabe indicar que cada equipo molinete está calibrado para un cuerpo de correntómetro, un tipo de hélice y un lastre determinado; en caso se utilice el método de suspensión. Para el caso de vadeo, se considera el cuerpo de correntómetro y el tipo de hélice.

Tabla 5.5
Extracto de tabla de control de descarga (Planilla SENAMHI)

SONDEOS			CORRENTOMETRO				VELOCIDAD			SECCION			DESCARGAS	
PTOS	DIST AL PTO	PROFUND	PROFUND. DE OBSERACION		REV	TIEMPO	N	EN EL PTO	EN SUPERF	MED EN EL TRAMO	PROFUND MEDIA	ANCHO		AREA
	m	m	metodo	m		s		m/s	m/s	m/s	m	m	m ²	m ^{3/s}
MARGEN IZQUIERDA														
0	3	0.50	0.8	0.30	102	30.0	3.4	0.889	0.889					
1	4	0.55	0.8	0.33	135	30.0	4.5	1.175	1.175	1.032	0.53	1.0	0.53	0.542
2	5	0.50	0.8	0.30	160	30.0	5.3	1.392	1.392	1.283	0.53	1.0	0.53	0.674
3	6	0.70	0.8	0.42	149	30.0	5.0	1.298	1.298	1.344	0.60	1.0	0.60	0.806
4	7	0.70	0.8	0.42	179	30.0	6.0	1.557	1.557	1.426	0.70	1.0	0.70	0.998
5	8	0.60	0.8	0.38	179	30.0	6.0	1.557	1.557	1.557	0.65	1.0	0.65	1.012
6	9	0.65	0.8	0.39	255	30.0	8.5	2.216	2.216	1.886	0.63	1.0	0.63	1.179
7	10	0.80	0.2	0.18	276	30.0	9.2	2.398	2.034	2.125	0.73	1.0	0.73	1.540
			0.8	0.48	192	30.0	6.4	1.889						
8	11	0.90	0.2	0.18	287	30.0	9.6	2.493	2.038	2.038	0.85	1.0	0.85	1.730
			0.8	0.54	182	30.0	6.1	1.583						

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detalla el desarrollo del aforo presentado en planilla de Tabla 5.5

Punto 0.

La distancia al punto inicial es 3.0 m.

Profundidad (d_0) = 0.50 m

Como este valor es menor 0.70 m, solo se medirá la velocidad en un solo punto (60% de d), es decir 0.30 m, de profundidad del pelo de agua.

Revoluciones del contador (Rev.)=102, para un tiempo de 30 segundos (s).

El valor de

$$N = 102/30 = 3.4,$$

$$0.56 \leq N < 9.27$$

$$V_0 = 0.2602 * (3.4) + 0.0040 \text{ (m/s)}$$

$$V_0 = 0.889 \text{ m/s}$$

corresponde a la velocidad media en la vertical 0.

Punto 1.

Profundidad

$$d_1 = 0.55 \text{ m} \quad d_1 < 0.70 \text{ m}$$

Prof., de medición (60%) = 0.33 m

Rev = 135 Tiempo = 30 s

$$N = 135/30 = 4.5$$

$$0.56 \leq N < 9.27$$

$$V_1 = 0.2602 * (4.5) + 0.0040 \text{ (m/s)}$$

$$V_1 = 1.175 \text{ m/s}$$

corresponde a la velocidad media en la vertical 1.

Punto 7.

Profundidad

$$d_7 = 0.80 \text{ m} \quad d_7 > 0.70 \text{ m}$$

Prof., de medición en dos puntos.

$$d_{20\%} = 0.16 \text{ m}$$

$$d_{80\%} = 0.32 \text{ m}$$

Rev_{20%} = 276

Tiempo = 30 s

$$N = 276/30 = 9.2 \quad N > 0.56$$

$$V_{7\ 20\%} = 0.2602 * (9.2) + 0.0040 \text{ (m/s)}$$

$$V_{7\ 20\%} = 2.398 \text{ m/s}$$

Rev_{80%} = 192

Tiempo = 30 s

$$N = 192/30 = 6.4 \quad N > 0.56$$

$$V_{7\ 80\%} = 0.2440 * (6.4) + 0.0040 \text{ (m/s)}$$

$$V_{7\ 80\%} = 1.669 \text{ m/s.}$$

La velocidad media en la vertical 7, será:

$$V_7 = (V_{7\ 20\%} + V_{7\ 80\%})/2$$

$$V_7 = (2.398 + 1.669)/2 = 2.034 \text{ m/s}$$

Punto 8.

Profundidad $d_8 = 0.90 \text{ m.}$ $d_8 > 0.70 \text{ m.}$

Prof., de medición en dos puntos.

$$d_{20\%} = 0.18 \text{ m.}$$

$$d_{80\%} = 0.54 \text{ m.}$$

$$\text{Rev}_{20\%} = 287 \quad \text{Tiempo} = 30 \text{ s.}$$

$$N = 287/30 = 9.6 \quad N > 0.56$$

$$V_{8\ 20\%} = 0.2602 * (9.6) + 0.0040 \text{ (m/s)}$$

$$V_{8\ 20\%} = 2.493 \text{ m/s.}$$

$$\text{Rev}_{80\%} = 182 \quad \text{Tiempo} = 30 \text{ s}$$

$$N = 182/30 = 6.1 \quad N > 0.56$$

$$V_{7\ 80\%} = 0.2440 * (6.1) + 0.0040 \text{ (m/s)}$$

$$V_{7\ 80\%} = 1.583 \text{ m/s.}$$

La velocidad media en la vertical 8, será:

$$V_8 = (V_{8\ 20\%} + V_{8\ 80\%})/2$$

$$V_8 = (2.493 + 1.583)/2 = 2.038 \text{ m/s}$$

Para los tramos será:

Tramo 0-1.

La velocidad media será:

$$V_{0-1} = (V_0 + V_1) / 2 = (0.889 + 1.775) / 2$$

$$V_{0-1} = 1.032$$

El área mojada es:

$$A_{0-1} = d_{prom} * B$$

$$A_{0-1} = (d_0 + d_1) / 2 * B = (0.50 + 0.55) / 2 * 1.00$$

$$A_{0-1} = 0.53$$

$$\bar{A}_{0-1} = 0.53 \text{ m}^2$$

Una vez obtenidas las velocidades parciales y las áreas parciales reemplazamos en la ecuación de forma:

$$\begin{aligned}q_{0-1} &= \bar{V}_{0-1} * \bar{A}_{0-1} \\q_{0-1} &= 1.032 * 0.53 \\q_{0-1} &= 0.542 \text{ m}^3/\text{s}\end{aligned}$$

Tramo 1-2.

La velocidad media será:

$$\begin{aligned}V_{1-2} &= (1.175 + 1.392) / 2 \\ \bar{V}_{1-2} &= 1.283 \text{ m/s}\end{aligned}$$

El área mojada es:

$$\begin{aligned}A_{1-2} &= d_{\text{prom}} * B \\ A_{1-2} &= (0.55 + 0.53) / 2 + 1.00 \\ A_{1-2} &= 0.53 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Una vez obtenidas las velocidades parciales y las áreas parciales reemplazamos en la ecuación de forma:

$$\begin{aligned}q_{1-2} &= \bar{V}_{1-2} * \bar{A}_{1-2} \\ q_{1-2} &= 0.674 \text{ m}^3/\text{s}\end{aligned}$$

Y todos los que hubiera en la misma forma. Entonces el caudal total es igual a la suma de todos los caudales de cada tramo.

$$\begin{aligned}Q_{\text{Total}} &= q_{0-1} + q_{1-2} + \dots + q_{i-1,i} \\ Q_{\text{Total}} &= 21.573 \text{ m}^3/\text{s}\end{aligned}$$

Del mismo modo para el área

$$A_{Total} = A_{0-1} + A_{1-2} + \dots + A_{i-1,i}$$

$$A_{Total} = 12.53 \text{ m}^2$$

$$\bar{V}_{med.tramo} = \bar{V}_{0-1} + \bar{V}_{1-2} + \dots + \bar{V}_{i-1,i}$$

$$\bar{V}_{med.tramo} = 1.689 \text{ m/s}$$

En el Tabla 6 se muestra el control de descarga en forma completa.

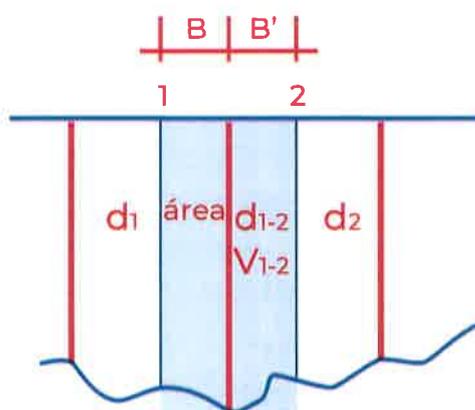
5.5.4 Cálculo del control de descarga por el método de la semi sección

Es otro método para evaluar el caudal que fue adaptado en la región de Lambayeque, con la finalidad de mejorar la estimación del área mojada en cada tramo y por ende, del caudal total.

Para el ejemplo, utilizaremos el control de descargas de la Estación Hidrométrica Puchaca del río La Leche, perteneciente a la cuenca del río Motupe-La Leche, departamento de Lambayeque.

Ecuación sin modificación.

$$q_2 = V_2 * \left(\frac{B}{2} + \frac{B'}{2} \right) * d_2 \quad (5.5.4)$$



Ecuación adaptada

$$q_{1-2} = V_{1-2} * 2B * \frac{(d_1 + 2d_{1-2} + d_2)}{4} \quad (5.5.5)$$

$$q_{1-2} = V_{1-2} * a_{1-2} \quad (5.5.6)$$

Donde:

a_{1-2} : Área perteneciente al tramo 1-2

La ecuación del correntómetro es:

$$V = 0.2603 * N + 0.003 \quad (\text{m/s})$$

$$N = \text{Revoluciones/Tiempo.}$$

Nº de correntómetro: AOTT 135692 HEL.Nº: 1 Lastre: Vadeo.

Tabla 5.7
Extracto de Tabla de Control de Descarga, método semi sección

SONDEOS			CORRENTOMETRO				VELOCIDAD			SECCION			descargas m ³ /seg	
PTOS	DISTAN AL PTO	PROFUND	PROFUND DE OBSERVACIÓN		REV	TIEMPO	N	EN EL PTO	EN SUPERF	MED EL EL TRANC	PROFUND MEDIA	ANCHO		AREA
	m	m	metodo	metros		segundos		m/seg	m/seg	m/seg	m	m	m ²	
margen derecha														
0	20.0	0.23												
	21.0	0.40	0.6	0.24	78	60	1.30	0.341	0.341	0.341	0.35	2.0	0.70	0.237
1	22.0	0.36												
	23.0	0.36	0.6	0.22	87	60	1.45	0.380	0.380	0.380	0.37	2.0	0.74	0.282
2	24.0	0.40												
	25.0	0.48	0.6	0.29	41	60	0.68	0.181	0.181	0.181	0.48	2.0	0.96	0.173
3	26.0	0.55												

Fuente: Elaboración propia

A continuación detallaremos el desarrollo del aforo.

Para la aplicación del método de semi-sección el cálculo del aforo será de la siguiente manera:

$$q_{1-2} = V_{1-2} * 2B * \frac{(d_1 + 2d_{1-2} + d_2)}{4}$$

$$q_{1-2} = V_{1-2} * a_{1-2}$$

Tramo 0-1

$$V_{0-1} = 0.2603 * (78/60) + 0.003$$

$$V_{0-1} = 0.341 \text{ m/s}$$

$$a_{0-1} = 2 * 1 * (0.23 + 2 * 0.40 + 0.36) / 4$$

$$a_{0-1} = 0.70 \text{ m}^2$$

Por lo tanto:

$$q_{0-1} = 0.341 * 0.70$$

$$q_{0-1} = 0.237 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tramo 1-2

$$\begin{aligned} V_{1-2} &= 0.2603 * (87/60) + 0.003 \\ V_{1-2} &= 0.380 \text{ m/s} \\ A_{1-2} &= 2 * 1 * (0.36 + 2 * 0.36 + 0.40) / 4 \\ A_{1-2} &= 0.74 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{1-2} &= 0.380 * 0.74 \\ q_{1-2} &= 0.282 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Tramo 2-3

$$\begin{aligned} V_{2-3} &= 0.2603 * (41/60) + 0.003 \\ V_{2-3} &= 0.181 \text{ m/s} \\ A_{2-3} &= 2 * 1 * (0.40 + 2 * 0.48 + 0.55) / 4 \\ A_{2-3} &= 0.96 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{2-3} &= 0.181 * 0.96 \\ q_{2-3} &= 0.173 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Y los demás tramos que hubiera se trabajan de la misma manera. Por lo tanto, el caudal será la suma de todos los caudales en cada uno de los tramos.

$$\begin{aligned} Q_{total} &= q_{0-1} + q_{1-2} + \dots + q_{l-i+1} \\ Q_{total} &= 7.344 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Del mismo modo para el área

$$\begin{aligned} A_{total} &= A_{0-1} + A_{1-2} + \dots + A_{l-i+1} \\ A_{total} &= 8.12 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Por lo tanto la Velocidad media será igual a:

$$\underline{V_{media}} = 3.002 \text{ m/s}$$

En la Tabla 5.8, se presenta los cálculos en forma completa.

5.5.5 Método área - pendiente para la estimación del caudal

El método más usado para la estimación indirecta de caudales en cursos naturales se realiza mediante la ecuación de Manning, y para su aplicación se necesita conocer el área de la sección transversal del río, el radio hidráulico, el coeficiente de rugosidad y la pendiente hidráulica de un tramo del río que se extiende desde aguas arriba y aguas debajo de la sección de aforo. El método resulta útil para la estimación de caudales de crecida.

$$Q = \frac{1}{n} A^{2/3} S^{1/2} \quad (5.5.7)$$

Q: Caudal

A: área de sección transversal del río

R: radio hidráulico (A/P), siendo P. perímetro mojado de la sección

S: pendiente hidráulica

N: coeficiente de rugosidad de Manning

Para determinar la pendiente hidráulica se aplica el concepto de línea de energía de la hidráulica de canales abiertos según esquema de la Figura 5.30

De acuerdo a Herschy R, la pérdida de energía en un tramo de canal está dado por:

$$h_f = \left(Z_1 + \frac{a_1 \bar{v}_1^2}{2g} \right) - \left(Z_2 + \frac{a_2 \bar{v}_2^2}{2g} \right) \quad (5.5.8)$$

Donde:

h_f : es la pérdida de energía entre las secciones 1 y 2 de la figura

Z_1 y Z_2 : cota de la elevación de la superficie del agua en secciones 1 y 2 con respecto a nivel de referencia

d_1 y d_2 : es la carga de profundidad de agua en secciones 1 y 2

V_1 y V_2 : representan la velocidad media del flujo de agua en secciones 1 y 2

g : aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

La pendiente "S" de la línea de energía se calcula mediante la ecuación

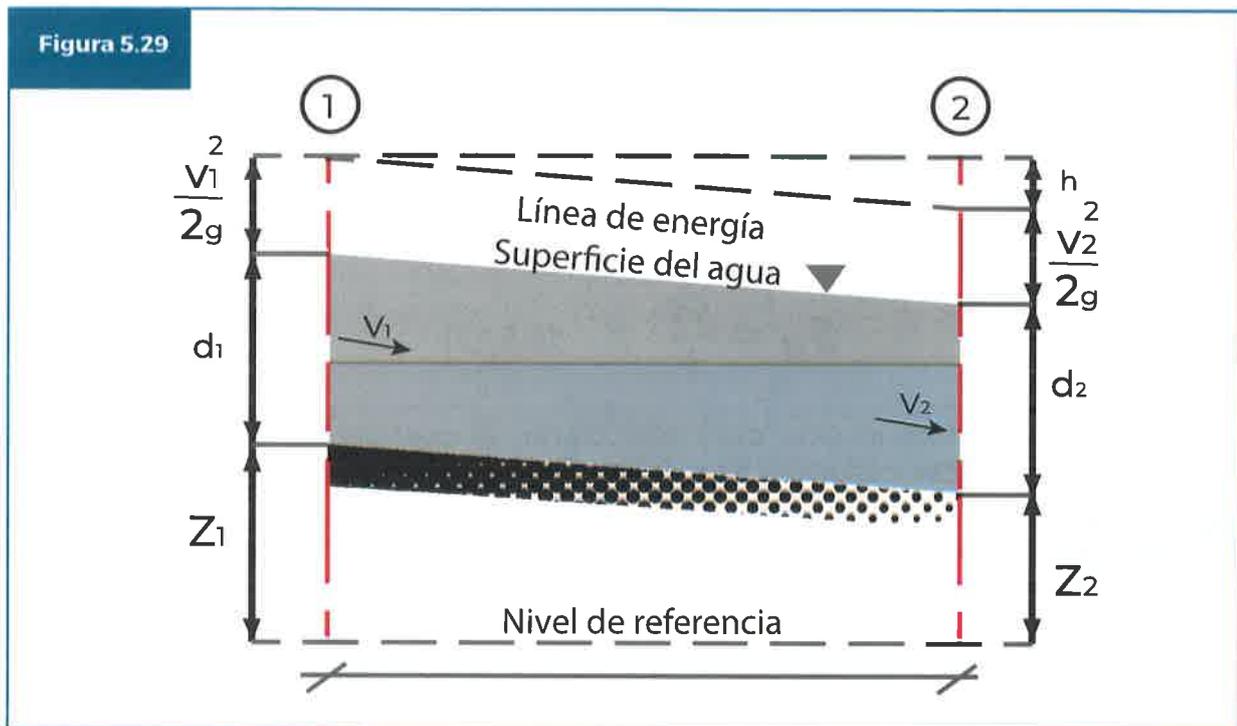
$$S = \frac{(Z_1 - Z_2) + \left(\frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \right)}{L} \quad (5.5.9)$$

El cálculo de la velocidad, se obtiene según:

$$\bar{v}_1 = Q/A_1$$

$$\bar{v}_2 = Q/A_2$$

Siendo A_1 y A_2 , el área de la sección del canal en puntos 1 y 2.



Representación de la línea de energía o línea de gradiente hidráulico en canales abiertos, donde L es la longitud del tramo 1-2

Fuente: <https://civilgeeks.com/2010/11/10/comparacion-entre-flujo-en-tuberias-y-flujo-en-canales-abiertos/>

En la práctica, según Herschy, el caudal se estima en base a la ecuación simplificada de Manning;

$$Q = \sqrt{(K_1 K_2 S)} \quad (5.5.10)$$

Donde K (factor de conveyance) se calcula para cada sección del tramo 1-2, siendo igual a:

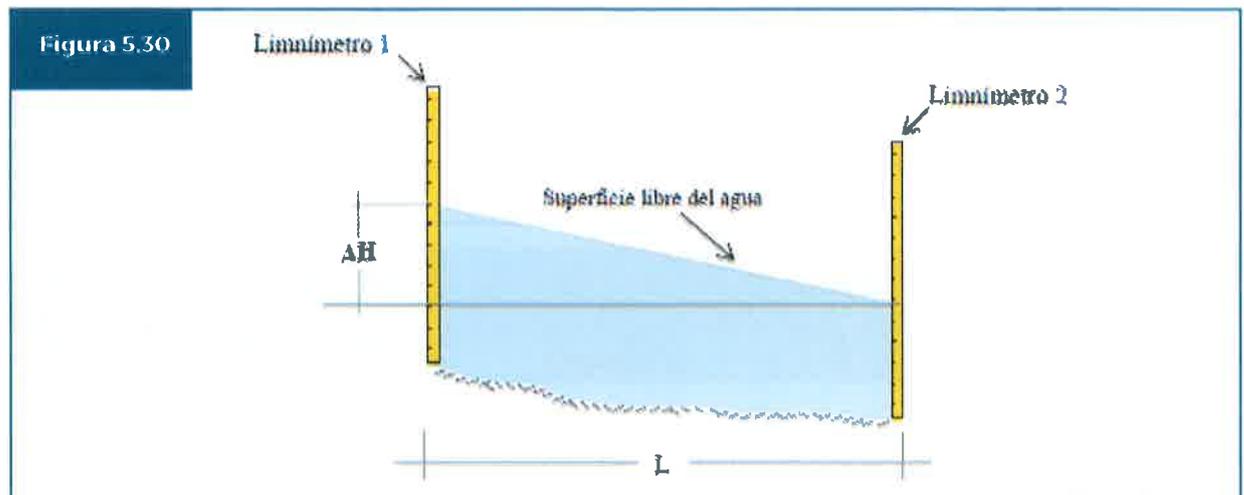
$$K = \frac{1}{n} AR^{2/3} \quad (5.5.11)$$

El coeficiente de rugosidad de Manning se puede estimar con información directa de los aforos. Por ello, se recomienda medir el caudal y registrar la información de parámetros geométricos e hidráulicos de la sección de aforo, de tal manera que se obtiene las variaciones del área de la sección transversal, radio hidráulico, rugosidad y velocidad media en función de la cota o nivel de la superficie de agua que se registra en la escala limnimétrica. De esta manera, se podrá estimar los parámetros, conociendo solo la lectura del nivel de agua y determinar el caudal por el método área pendiente.

La pendiente hidráulica S_H puede ser calculada haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$S_H = \frac{\Delta H}{L} \quad (5.5.12)$$

En ausencia de datos in situ, para seleccionar el coeficiente de rugosidad de Manning para cauces naturales se puede consultar tablas del libro de hidráulica



Esquema para el cálculo de la diferencia de nivel entre dos puntos.
Fuente: Universidad del Valle

de canales abiertos de Ven Te Chow; o en su defecto hacer uso de ecuaciones empíricas, existente en la literatura especializada. Una ecuación empírica para la estimación del coeficiente "n" es la que sugiere Fernández, J.

$$n = \frac{(X-1) \cdot d^{\frac{1}{6}}}{5,57 \cdot (X+0,95)} \quad (5.5.13)$$

Donde:

- d : es la profundidad de la vertical en m
- X : es el ratio de velocidad $V_{0.2}/V_{0.8}$, medidos a profundidades 0.2d y 0.8d, respectivamente.

5.5.6 Método práctico para estimar el caudal con información de flotadores

Consiste en utilizar la información de flotadores en una sección de control definido. Permite calcular caudales en periodo lluvioso, donde la información es insuficiente; a modo de ejemplo se muestra la información registrada en la Estación Hidrométrica de Obrajillo del río Chillón perteneciente a la cuenca del río Chillón, departamento de Lima.

Tabla 5.9
Hoja resumen del control de descarga

FECHA	MIRA (m)	DESCARGA (m ³ /s)	AREA (m ²)	VELOCIDAD med (m/s)	Med	Last (Kg)	Flotadores		
							M ₁	C	M ₂
16/04/2011	1.18	13.393	7.07	1.71	Corremt. Flot.	25 kg			
18/04/2011	1.16						8	7	10
							9	7	8
08/05/2011	1.02	6.185	5.85	0.92	Corremt. Flot.	25 kg.			
	1.02						12	10	9
							10	10	11
12/05/2011	1.00	5.613	5.63	0.89	Corremt. Flot.	25 kg.			
	1.00						11	11	14
							14	11	11
19/05/2011	0.95	4.342	5.59	0.683	Corremt. Flot.	25 kg.			
	0.95						11	12	12
							12	11	13
23/05/2011	0.94	3.161	5.55	0.5104	Corremt. Flot.	25 kg.			
	094						13	13	12
							15	13	14
06/06/2011	0.91	2.357	5.22	0.3991	Corremt. Flot.	25 kg.			
	091						13	14	13
							13	15	15
							13	12	15

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5.9 se muestra la información resumida de los controles de descarga o aforos realizados con correntómetro y paralelamente la estimación de las velocidades superficiales con flotadores.

Para el caso donde se utilizaron los flotadores, se presentaron inconvenientes de estimación de, que se detallan a continuación:

- ♦ Se obtendrá velocidad superficial con base en el tiempo que los flotadores tomaron para recorrer una distancia definida (20 m), en una sección recta del curso de agua.
- ♦ No se cuenta con la información de las verticales de las líneas de medición, por ende, no se podrá obtener al área mojada del aforo.
- ♦ Como resultado de los puntos anteriores, no se puede estimar caudal.

La información presentada en el ejemplo, contempla los mismos días en los que se realizó los aforos con correntómetro y la estimación de velocidades superficiales con flotadores. En el primero de los casos, se contará con información como: **nivel de agua, caudal, área mojada velocidad media del aforo** entre otros. Para el caso del flotador la información obtenida es: **nivel de agua y la velocidad superficial de flotadores** (se necesita también contar con información de levantamientos topográficos detallados de las secciones de control para determinar los parámetros geométricos de la sección de aforo en todos los casos).

De lo expresado anteriormente, en base a aforos simultáneos realizados con correntómetro y flotadores es posible encontrar un ratio de **velocidad media y velocidad superficial del flotador**; este ratio es un factor de ajuste "K" que varía en función del nivel o cota de la superficie de agua.

Tabla 5.10
Determinar el tiempo promedio en la sección de control de los flotadores

Mi.	C	Md.	Promedio
8	7	10	
9	7	8	
9	7	9	Vertical
	8	8	Tramo
	8		Sección

Como ejemplo realizaremos el análisis de estas actividades del día 18-04-2011.

En la primera acción determinaremos los tiempos promedios en cada **vertical**, luego en el **tramo** y finalmente en la **sección**.

Si consideramos que el tiempo promedio que tardaron los flotadores para recorrer el tramo de 20 m fue 8 s, entonces la velocidad promedio superficial (V_{sup}), será:

$$V_{sup} = d/t \quad (5.5.14)$$
$$V_{sup} = 20/8$$
$$V_{sup} = 2.45 \text{ m/s}$$

Tomando como referencia la Tabla 5.10, tenemos:

Nivel agua es $H_{18-04-11} = 1.16$ m, y para un día anterior.

Nivel de agua $H_{16-04-11} = 1.18$ m, si consideramos que las condiciones hidrológicas son cuasi similares.

Asumimos que existe una relación biunívoca, que para un mismo nivel le corresponde un mismo valor de velocidad media y viceversa, entonces, los valores de las velocidades deben ser próximos.

$$V_{med} = K * V_{sup} \quad (5.5.15)$$

$$K \approx \frac{V_{med}}{V_{sup}}$$

$$K \approx \frac{1.71}{2.45}$$

$$K \approx 0.68$$

Entonces la velocidad media superficial corregida del día 18-04-11, cuyo nivel de agua o altura de mira es $H_{18-04-11} = 1.16$ m.

$$V_{med} = K * V_{sup} \quad (5.5.15)$$

$$V_{med} = 0.68 * 2.45$$

$$V_{med} = 1.67 \text{ m/s}$$

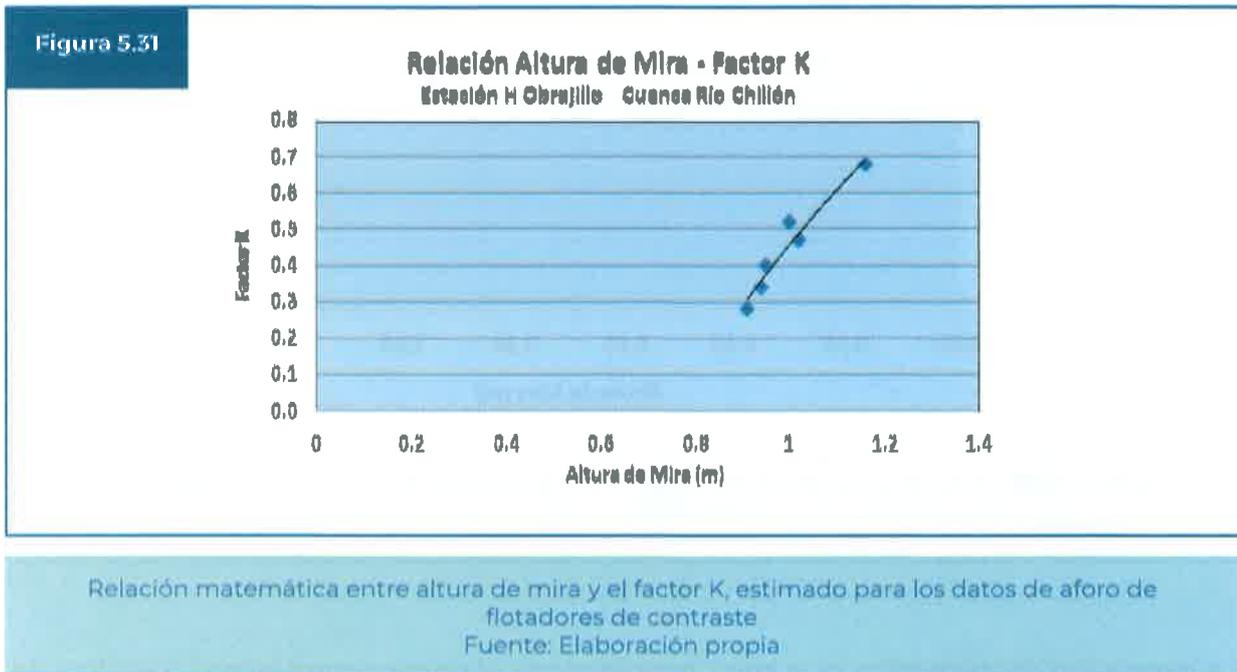
De la forma se realiza para los subsiguientes días y los resultados se muestran en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11
Determinación del valor K

FECHA	MIRA (m)	DESCARGA (m ³ /s)		AREA (m ²)	VELOCIDAD med (m/s)			Med	Last (Kg)	Flotadores			
		Corrent.	Flot (Estimado)		med (m/s)	med (correg)	sup (m/s)			Mi.	C	Md.	K
16/04/2011	1.18	13.393		7.07	1.71			Corrent.	25 kg				
18/04/2011	1.16					1.67	2.45	Flot.		8	7	10	0.68
										9	7	8	
08/05/2011	1.02	6.185		5.85	0.92			Corrent.	25 kg.				
	1.02					0.91	1.94	Flot.		12	10	9	0.47
										10	10	11	
12/05/2011	1.00	5.613		5.63	0.89			Corrent.	25 kg.				
	1.00					0.87	1.67	Flot.		11	11	14	0.52
										14	11	11	
19/05/2011	0.95	4.342		5.59	0.68			Corrent.	25 kg.				
	0.95					0.68	1.69	Flot.		11	12	12	0.40
										12	11	13	
23/05/2011	0.94	3.161		5.55	0.51			Corrent.	25 kg.				
	0.94					0.51	1.50	Flot.		13	13	12	0.34
										15	13	14	
06/06/2011	0.91	2.357		5.22	0.40			Corrent.	25 kg.				
	0.91					0.40	1.45	Flot.		13	14	13	0.28
										13	15	15	
										13	12	15	

Fuente: Elaboración propia

Para determinar el factor "K" de la corrección de la velocidad superficial en el cálculo de la velocidad media, es necesario considerar que este factor no es constante y varía de acuerdo a la altura de mira, en ese sentido se debe relacionar el nivel de agua y el factor "K". Figura 5.31.



La expresión matemática que mejor representa el comportamiento es variable, y para el ejemplo se aplica de la siguiente manera:

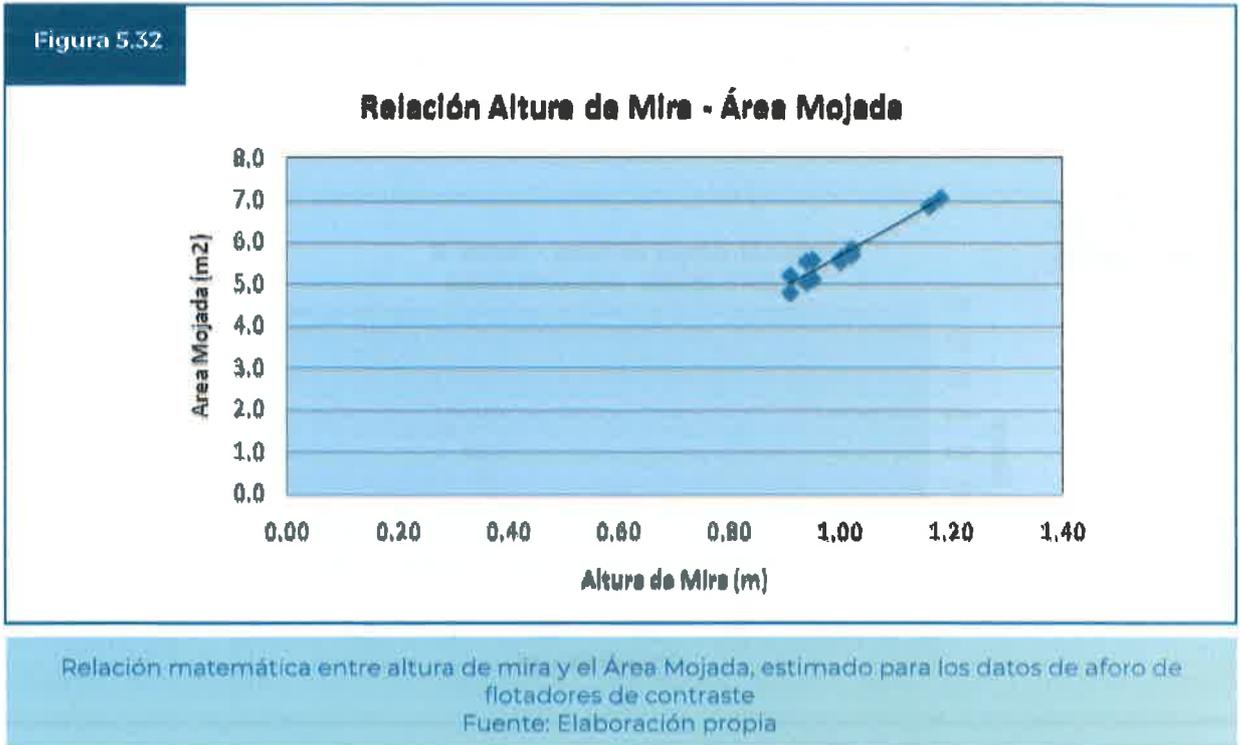
$$K = 1.5958 \ln(H) + 0.4588$$

Donde:

- K : Constante de corrección de las velocidades.
- H : Altura de mira en metros.

Debemos considerar que la muestra para el ejemplo es de seis (06) valores, que se podría mejorar realizando más muestreos en campo.

La determinación del área mojada para los aforos por flotadores, se puede estimar haciendo una correlación entre la altura de mira y el área mojada, de la cual se obtendría la expresión matemática que refleje esta relación. Figura 5.32.



La expresión matemática que mejor representa el comportamiento se realiza de la siguiente forma:

$$A = 6.3239 H - 0.5189$$

Donde:

- A : Área estimada en metros cuadrados.
- H : Altura de mira en metros.

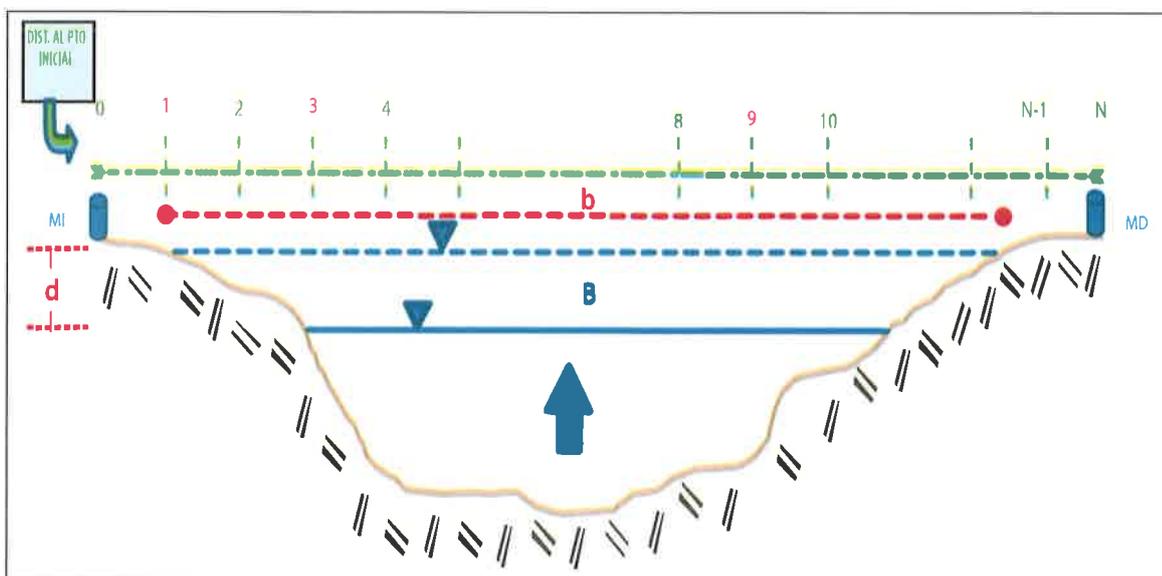
Otra forma de obtener el área mojada, es en base a un aforo con correntómetro realizado anteriormente, adicionándole el área incrementada (diferencia de niveles multiplicado por la amplitud del espejo de agua). Figura 33.

$$A_{mojada} = A + d * (B + b) / 2 \quad (5.5.16)$$

Donde:

- A : Área mojada del aforo para un nivel agua conocido en metros cuadrados.
- d : Diferencia de nivel, entre el valor del aforo conocido y el valor de nivel de agua del aforo por flotador.
- b : Amplitud del espejo de agua durante el aforo realizado por flotador.
- B : Amplitud del espejo de agua durante el aforo realizado con correntómetro.

Figura 5.33



Sección de control, para la estimación del área mojada para el aforo por método de flotadores
Fuente: Elaboración propia

Independientemente del método a utilizar para determinar el área mojada, el especialista determinará, en base a su experiencia y al conocimiento de la sección de control, el valor a utilizar. Tabla 5.12.

Tabla 5.12
Determinación y comparación de las áreas mojadas estimadas para el aforo por método de flotadores.

FECHA	MIRA (m)	VELOCIDAD med (m/s)		
		Medida	Ecuación	Gráfica
16/04/2011	1.18	7.07		
18/04/2011	1.16		6.82	6.87
08/05/2011	1.02	5.85		
	1.02		5.93	5.47
12/05/2011	1.00	5.63		
	1.00		5.81	5.27
19/05/2011	0.95	5.59		
	0.95		5.49	4.77
23/05/2011	0.94	5.55		
	0.94		5.47	4.67
06/06/2011	0.91	5.22		
	0.91		5.24	4.37

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, y con el dato de las velocidades medias y áreas mojadas, se podrá estimar los caudales con la información de los aforos por flotadores. Tabla 5.13.

Tabla 5.13

Determinación de los caudales en base a los datos del aforo por método de flotadores.

FECHA	MIRA (m)	DESCARGA (m ³ /s)		AREA (m ²)	VELOCIDAD med. (m/s)			Med	Last (Kg)	Flotadores			
		Corrent	Flot (Estimado)		med (m/s)	med (correg)	sup (m/s)			h1	G	Md	K
16/04/2011	1.18	13.393		7.07	1.71			Corremt.	25 kg.				
18/04/2011	1.16	11.352		6.82		1.67	2.45	Flot.		8	7	10	0.68
										9	7	8	
08/05/2011	1.02	6.185		5.85	0.92			Corremt.	25 kg.				
	1.02	5.396		5.93		0.91	1.94	Flot.		12	10	9	0.47
										10	10	11	
12/05/2011	1.00	5.613		5.63	0.89			Corremt.	25 kg.				
	1.00	5.031		5.81		0.87	1.67	Flot.		11	11	14	0.52
										14	11	11	
19/05/2011	0.95	4.342		5.59	0.68			Corremt.	25 kg.				
	0.95	3.711		5.49		0.68	1.69	Flot.		11	12	12	0.40
										12	11	13	
23/05/2011	0.94	3.161		5.55	0.51			Corremt.	25 kg.				
	0.94	2.767		5.43		0.51	1.50	Flot.		13	13	12	0.34
										15	13	14	
06/06/2011	0.91	2.357		5.22	0.40			Corremt.	25 kg.				
07/06/2011	0.91	2.145		5.24		0.41	1.46	Flot.		13	14	13	0.28
										13	15	15	
										13	12	15	

Fuente: Elaboración propia

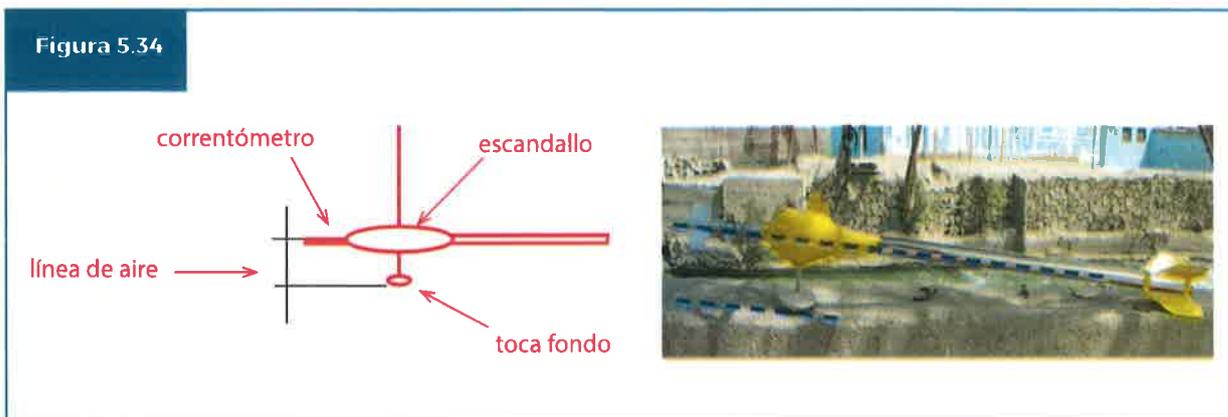
5.6 Consideraciones complementarias en la utilización del molinete o equipo correntómetro

5.6.1 Corrección de la línea de aire

La distancia existente entre la línea del eje de correntómetro y el extremo del lastre, se mide una sola vez, al inicio de un aforo por suspensión.

Cuando se realiza un aforo por suspensión, los errores comunes que se presentan en la medición de los caudales, se encuentran en la ubicación exacta de las profundidades para la medición de velocidades en cada la línea de la sección.

Como se puede visualizar en las **Figuras 5.34 y 5.35**, entre el eje de la línea del correntómetro y la línea de toca fondo y/o escandallo, existe una distancia que se denomina línea de aire (valor que representa aproximadamente unos 0.25 m., de distancia), y es la longitud que mayormente genera un error de sobre estimación o sub estimación en la medición del área mojada y la velocidad media en la vertical, considerando la línea de referencia que se utilice (eje de la línea del correntómetro o la línea de toca fondo y/o escandallo).

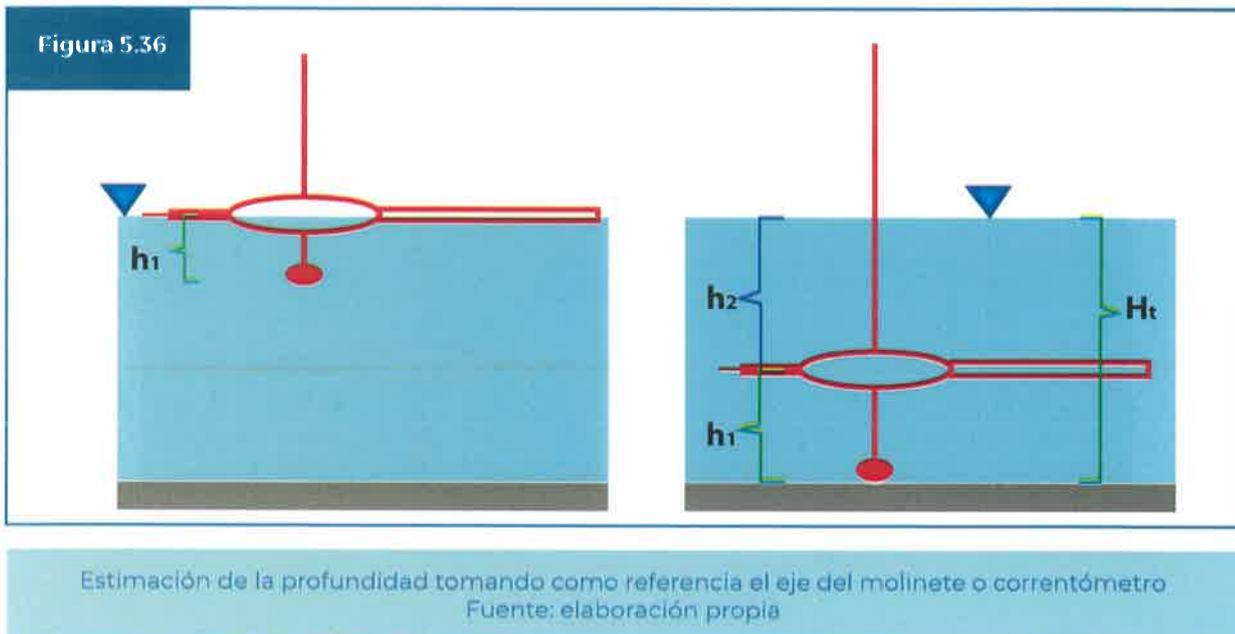


Molinete OTT - Modelo C31
Fuente: SENAMHI



Molinete A OTT - Modelo Arkansas
Fuente: SENAMHI

En el primer caso, cuando la referencia es el eje del correntómetro (Figura 5.36)



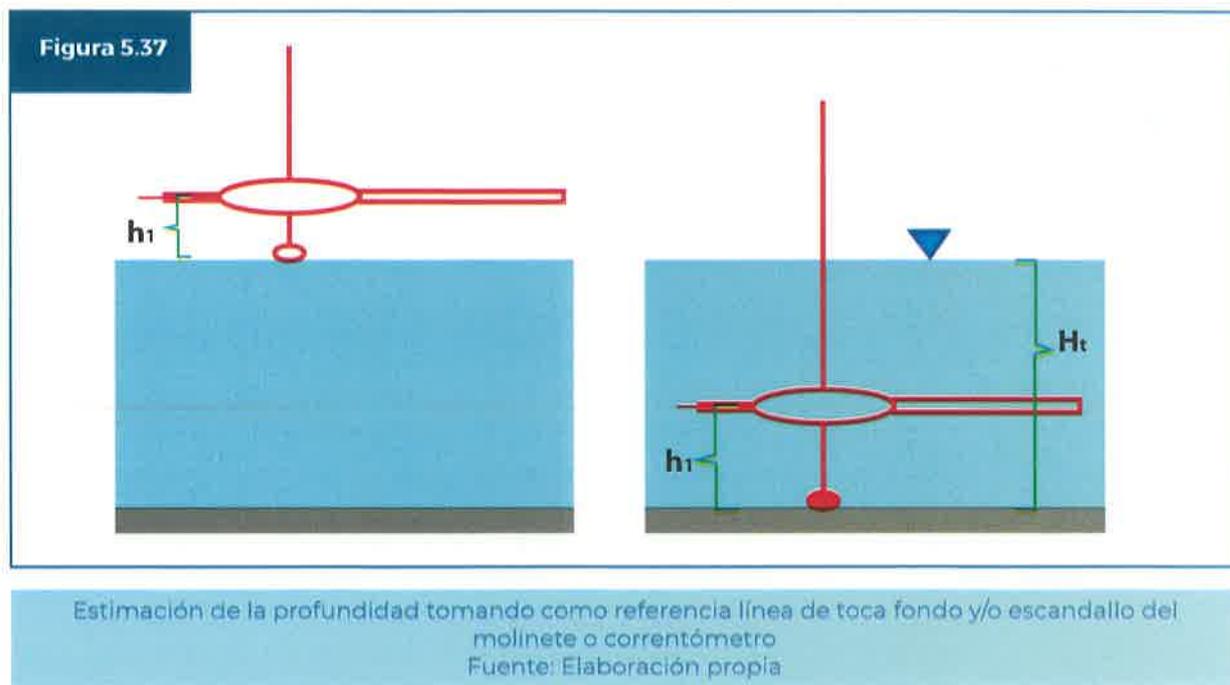
En este caso profundidad total será igual a:

$$H_t = h_2 + h_1 \quad (5.6.1)$$

Donde:

- h_1 : Distancia entre el eje de la línea del correntómetro y la línea de toca fondo.
- h_2 : Profundidad máxima que registra el molinete hasta tocar fondo con el sensor de fondo.
- H_t : Profundidad total en la línea de medición.

En el segundo caso, cuando la referencia es la línea que toca fondo y/o escandallo del correntómetro. Ver Figura 5.37.



En este caso, la profundidad total se estima en base a la referencia de toca fondo y/o escandallo.

Para determinar la velocidad puntual en la vertical o línea de medición (a 0.6, 0.2 - 0.8 u otros), se debe considerar la correcta ubicación de la hélice en la vertical ya que la referencia para determinar la profundidad en esta línea fue el toca fondo y/o escandallo.

5.6.2 Corrección de la línea de profundidad por ángulo de arrastre

Otro caso de error en el desarrollo de los aforos, se presenta cuando el equipo correntómetro no ha mantenido su perpendicularidad. Esta situación genera un posible error en la determinación de la profundidad total en la línea de medición; por lo cual se forma un ángulo mayor de 4° con la vertical. En este caso, se necesita corregir el valor de profundidad, para lo que se debe determinar el ángulo (β) que se forma entre la línea de la plomada o lastre y la vertical. Ver Figura 5.38, en el caso que este ángulo sea mayor a 30° se debe repetir la medición.



Teniendo en cuenta la ilustración presentada en la Figura 5.38, la ecuación utilizada para la corrección del ángulo de arrastre, es de la forma:

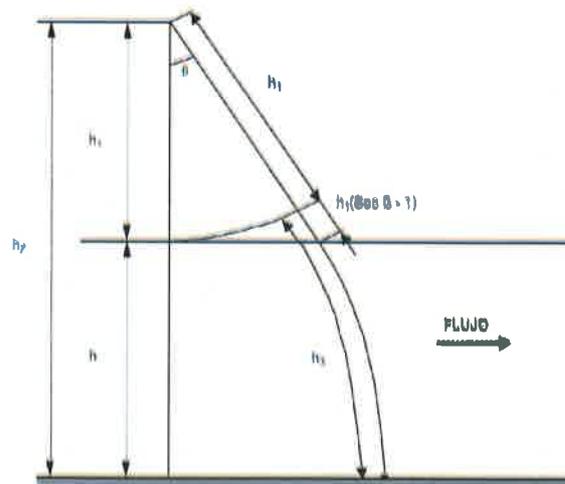
$$h = (h_s - h_1(\sec \beta - 1))(1 - K) \quad (5.6.2)$$

Los valores de K se muestran en la Tabla 5.14

Tabla 5.14
Valores de K para la corrección de la altura

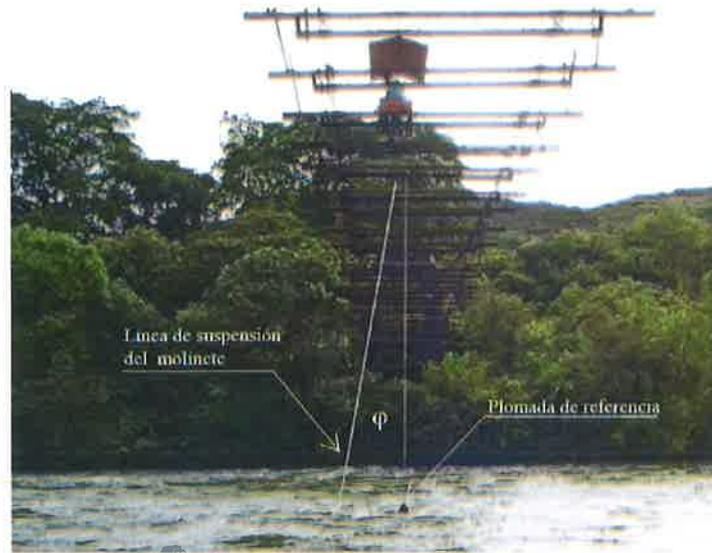
β°	K	β°	K	β°	K
4	0,0006	16	0,0128	28	0,0408
6	0,0016	18	0,0164	30	0,0472
8	0,0032	20	0,0204	32	0,0544
10	0,0050	22	0,0248	34	0,0620
12	0,0072	24	0,0256	36	0,0698
14	0,0098	26	0,0350		

Figura 5.38



Esquema para la corrección de la profundidad debido a la no verticalidad del equipo correntómetro.
Fuente: Guía de prácticas hidrológicas OMM 168

Figura 5.39



Vista del Angulo de arrastre (Φ) en aforo por suspensión desde carro huaro
Fuente: Universidad del Valle

Figura 5.40



Transportador para medir ángulo de arrastre
Fuente: Universidad del Valle



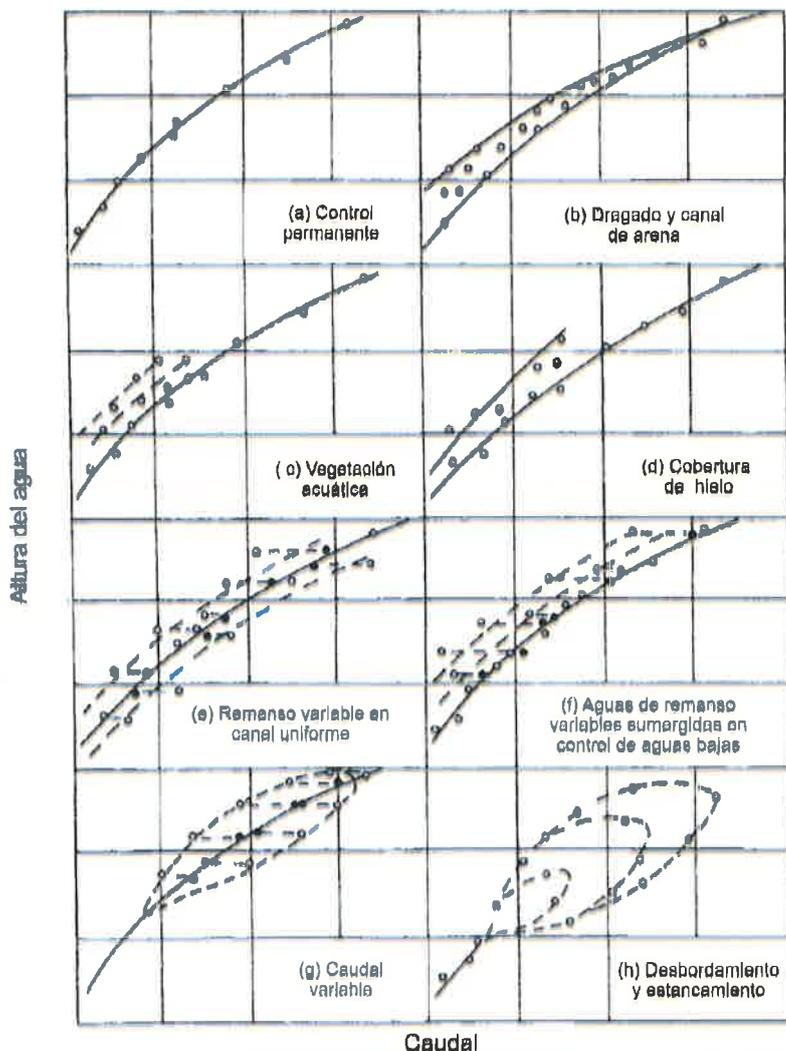
5.7 Curva de gasto

La curva de gasto de la estación de aforo o curva altura-gasto es el elemento más importante en la práctica hidrométrica, toda vez que a partir de la relación nivel-caudal se determina el caudal circulante en un río o canal en cualquier instante de tiempo, y luego esta información puntual pasa a ser parte de las estadísticas de las series de tiempo de caudales horarios, diarios, mensuales, anuales de la estación hidrométrica. De la adecuada calibración de la curva de Gasto, en base a los registros de aforos disponibles, dependerá la calidad de la información continua de los caudales generados.

En el presente Manual, se expone un marco general teórico-práctico de la curva de Gasto, toda vez que mayor alcance de procedimientos, cálculos numéricos y análisis de incertidumbre se podrá encontrar el Manual de procedimientos para la elaboración de Curvas de Gasto que próximamente publicará el SENAMHI.

En general, la forma de la curva altura – gasto está condicionado por diferentes procesos físicos que inciden en el cambio de la geometría y parámetros hidráulicos de la sección de aforo. En los cauces de los ríos ubicados en la parte baja y media de nuestras cuencas hidrográficas, por tener lechos inestables, durante las crecidas se presenta inicialmente un proceso de erosión o socavación y luego un proceso de sedimentación o colmatación. Por ello, es necesario realizar mediciones periódicas de los caudales, a fin de establecer la validez de la curva de calibración.

Figura 5.41



Diferentes tipos de curvas de gasto para diferentes condiciones hidráulicas
Fuente: Herschi R.

Para establecer un plan de aforos no sólo se debe tener en cuenta la cantidad mínima necesaria de los aforos, sino también la distribución de los mismos en el año hidrológico en función a la variación estacional del régimen hídrico del río. Los aforos se deben realizar para todo el rango de variación del nivel de agua durante el año hidrológico.

5.7.1 Frecuencia de los aforos para construir la curva altura-gasto

Las características de las curvas Altura - Gasto, en cuanto a su variabilidad y complejidad, dependerán fundamentalmente de las condiciones del sitio, el régimen hidrológico de la cuenca, el tipo de control de la sección de aforo, lo cual a su vez, condiciona la cantidad y distribución de aforos necesarios para definir correctamente su comportamiento.

La pregunta que surge es ¿Cuán frecuentes deben ser los aforos para obtener una curva Altura - Gasto que permita estimar los caudales a partir de los niveles de manera confiable?

Como referencia, en la Guía de Prácticas Hidrológicas N° 168 de la OMM indica lo siguiente "En las estaciones de medición nuevas serán necesarias numerosas mediciones del caudal para definir la relación altura-caudal durante todo el recorrido de alturas. Seguidamente será necesario efectuar mediciones periódicas con el fin de definir las variaciones de la relación altura-caudal. Se recomienda un mínimo de 10 mediciones del caudal por año" (Capítulo 5. Medición cuantitativa del agua superficial y de sedimentos 1.5-27); la norma técnica ISO 1100-2, 1998, indica de 12 a 15 aforos al año, como mínimo. Otros autores como el Ing. Juan Martínez Plata, en su trabajo de grado para optar el título de Magister en Hidrosistemas se refiere: "...realizar hasta 70 aforos al año en estaciones hidrométricas ubicadas en cuencas de fuerte pendiente (Karasirov, Shumkov, 1985).

La información básica para la elaboración de las curvas Altura - Gasto o curvas de gasto, son los aforos directos. Estos aforos pueden haberse realizado con diferentes equipos como molinetes, perfiladores de corriente (ADCP), flotadores u otros que cumplan esta función.

Saber la cantidad adecuada de aforos para elaborar una curva de gasto, implica necesariamente conocer:

- ♦ La información del punto de control del río donde se va a elaborar la curva de calibración, si es punto de control nuevo o antiguo.
- ♦ Muchos de nuestros ríos, especialmente de la región hidrográfica del pacífico, son de tipo estacional; tienen un comportamiento bien marcado entre el periodo húmedo, seco y un periodo transicional, que implicaría variabilidad de altura del espejo de agua.

- ♦ En relación a lo anterior, es importante realizar aforos directos y distribuidos en todo el rango de alturas del espejo de agua, sin dejar de lado la variabilidad del caudal por la estacionalidad.
- ♦ En relación a la configuración hidráulica y a la estacionalidad, podrían considerarse curvas complementarias para el periodo seco, transicional y húmedo; tanto para el periodo de ascenso y descenso del régimen pluviométrico, según la región hidrográfica donde se ubica el curso de agua (región hidrográfica del Pacífico, Amazonas y Titicaca), sin dejar de lado sus pisos ecológicos.

Los ríos por naturaleza son elementos dinámicos, presentan cambios en su sección hidráulica (altura del nivel de agua, área y perímetro mojado, radio hidráulico y espejo de agua); estas variaciones pueden ser continuas o estacionales durante el año hidrológico, y pueden ser motivadas por causas naturales o antrópicas.

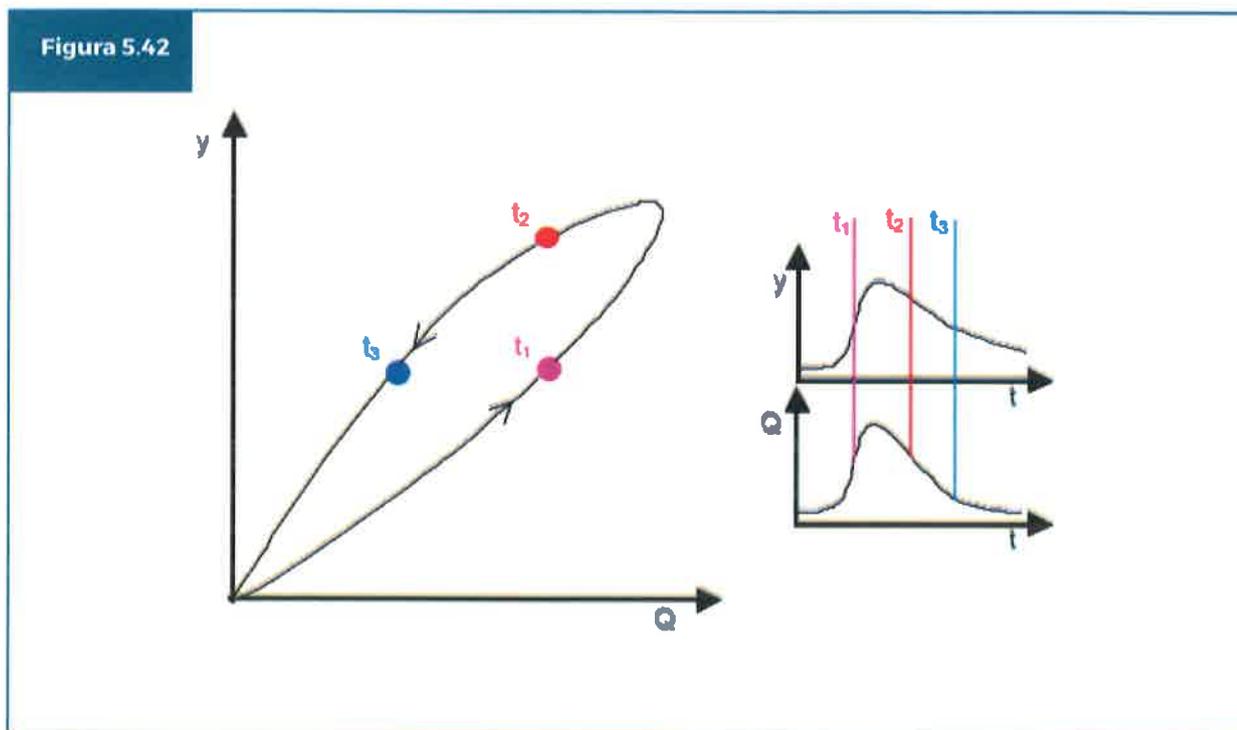
Este proceso de inestabilidad hidráulica, independientemente del causante, hace que las mediciones de los caudales en los puntos de control sean indispensables, ya que nos permitirá saber la disponibilidad hídrica en cada curso de agua.

La estimación de los caudales se basan en las mediciones de las velocidades del fluido en una área determinada, complementada con las cotas relativas de cada punto de control; lo cual permitirá construir las curvas Altura - Gasto, que representadas por una expresión matemática, servirá para la obtención de la disponibilidad hídrica en un momento determinado; lo cual es necesario para propósitos de vigilancia y pronóstico de caudales.

La curva Altura - Gasto en secciones ideales o regulares, representan una relación biunívoca del nivel con el caudal; es decir, para un caudal A, le corresponde un nivel B, y para un nivel B, el caudal siempre será A, independientemente del periodo de crecida o descenso. Sin embargo, se debe tener en cuenta lo siguiente:

Se puede dar el caso, que una modificación del cauce que se produzca a varios kilómetros aguas abajo de la sección de aforo, puede generar un remanso que afecte la curva Altura - Gasto, haciendo que para diferentes valores de nivel de agua se tenga un mismo caudal; similar situación de remanso ocurre cuando una sección de aforo se ubica en un afluente menor y muy cerca de su confluencia con el río principal (que generalmente suele ser de mayor tamaño), o cuando una estación de aforo se ubica muy cerca a la desembocadura del río en una gran lago o laguna y el espejo de agua del lago o la laguna supera la cota del fondo del

cauce del río, lo que hace que en la curva ascendente de la crecida, represente un mayor caudal comparado con el mismo nivel de la curva descendente de la crecida, este fenómeno se le denomina histéresis. Figura 5.42.



Representación gráfica del fenómeno de histéresis.
Fuente: <http://hercules.cedex.es/hidraulica/Archivos/CGasto.pdf>

5.7.1.1 Número mínimo de aforos basado en criterios estadísticos

Se debe tener en consideración que toda actividad operativa siempre está supeditada a la disponibilidad presupuestal y técnica, la cual podría ser ajustada a criterio del profesional responsable de la actividad. En general se sabe que, a mayor cantidad de aforos realizados y la buena calidad de estos, son determinantes para que la curva de calibración sea más precisa y la generación de caudales horarios, diarios, máximos y mínimos tendrá una mejor representatividad. Así mismo, debemos remarcar que las curvas de calibración en cursos naturales son dinámicas, es decir cambian en el tiempo según las consideraciones descritas en párrafos anteriores.

La literatura especializada referenciada en el ítem 5.7.1, recomienda de manera general cantidades mínimas que van desde 10, 12, 15 a más aforos para la construcción de las curvas altura gasto; sin embargo en el Manual on Procedure in Operational Hydrology, se ha encontrado la aplicación de un método estadístico, en base a muestras de aforos y curvas de calibración disponibles; para ello sugiere que para obtener la cantidad de aforos mínimo para establecer la relación nivel-caudal se debe aplicar la ecuación 5.7.1:

$$n > \left(\frac{2s_D}{E} \right)^2 \quad (5.7.1)$$

Donde:

- n : es la cantidad de aforos
- s_D : es la desviación estándar (%) de los desvíos del caudal observado y el estimado por la curva altura-gasto (2SD es el ancho permitido de la banda de dispersión)
- E : Es el grado de precisión de la curva y usualmente es de 5%.

El cálculo de SD es determinado según las ecuaciones 5.7.2 y 5.7.3

$$P = \frac{Q_m - Q_r}{Q_r} \cdot 100\% \quad (5.7.2)$$

$$s_D = \sqrt{\frac{\sum (P - \bar{P})^2}{n - 1}} \quad (5.7.3)$$

Donde:

- P : Es el porcentaje de la desviación de caudal
- P : Es la media del porcentaje de desviación
- Q_m : Caudal observado
- Q_r : caudal estimado por curva altura - gasto

La idea del método es calcular la media y la desviación estándar de una muestra "P" que mide la anomalía relativa del aforo observado con respecto al caudal estimado con curva altura-gasto. Con estas consideraciones y aplicando las ecuaciones 5.1, 5.2 y 5.3 se ha elaborado la Tabla 5.15 que indica la cantidad mínima de aforos necesarios para construir la curva altura-gasto.

Tabla 5.15
Número de aforos requerido según la variación de la banda de dispersión 2SD
y para una precisión de 5%

2 SD (%)	Número mínimo de aforos
12	6
15	9
20	16
25	25
30	36
35	49
40	64

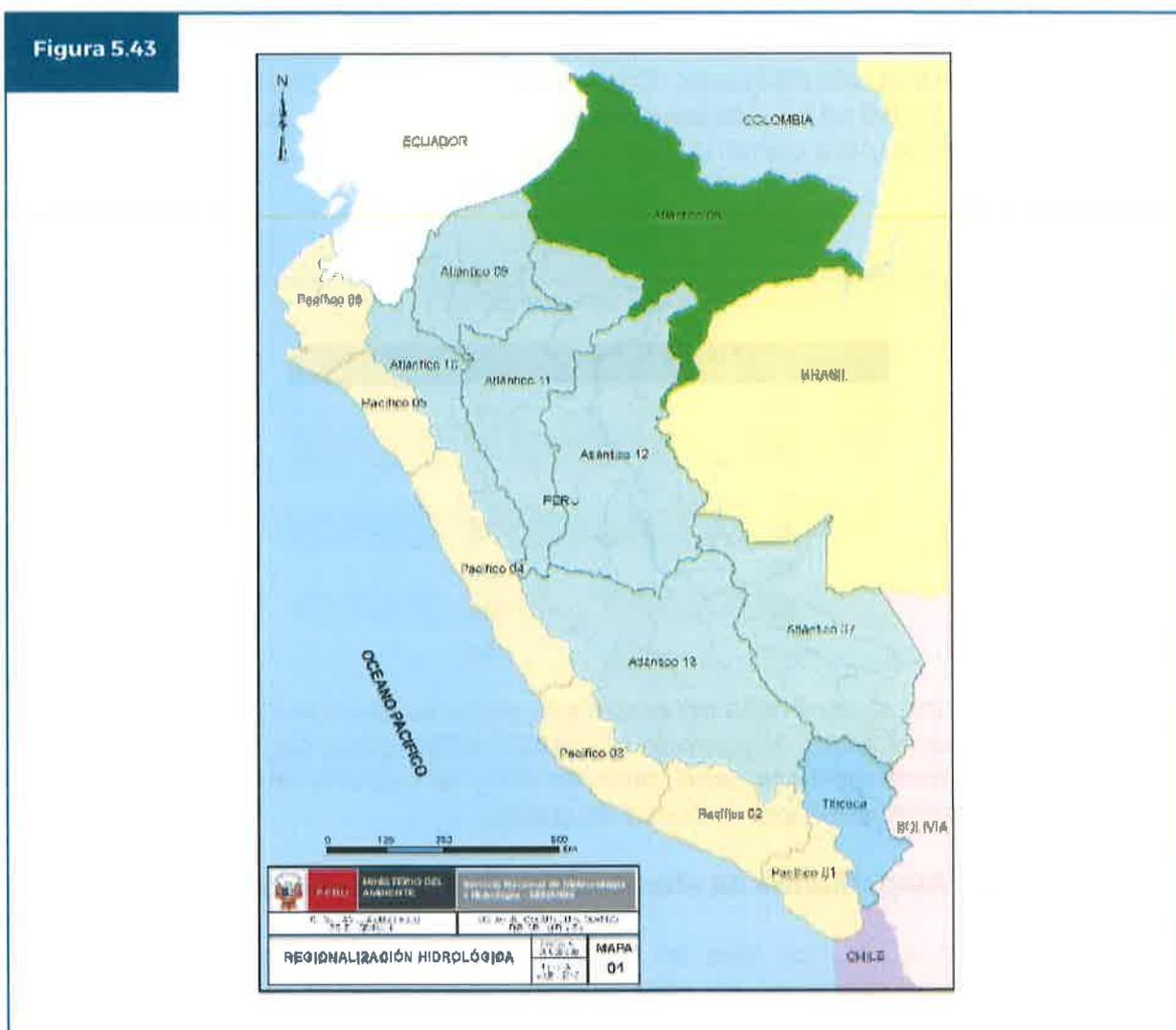
Para el caso de ríos, si tenemos en cuenta la recomendación OMM de tener por lo menos 10 aforos al año, y siguiendo el criterio estadístico, según la Tabla 5.15, la variación de la banda de dispersión, sería de 16% y se lograría una precisión del 5% de los caudales estimados por la curva de gasto.

5.7.1.2 Cantidad mínima de aforos según regiones hidrológicas en el Perú

En relación a los ríos que se encuentran dentro del territorio peruano y los criterios técnicos, se recomienda una cantidad mínima de aforos necesarios para construir curvas de calibración confiables; para ello se realizó una zonificación a partir del análisis de los hidrogramas mensuales de algunas estaciones del territorio nacional, para identificar el régimen fluvial que presentan y en base a ello identificar su comportamiento típico.

Seguidamente, en el gráfico de una curva de calibración teórica, se ubicaron las posibles zonas de aforo dentro de un año hidrológico (propuesta presentada por el Ing. César Arbulú R.).

Se han podido zonificar dos comportamientos típicos, los cuales se tratan a continuación:

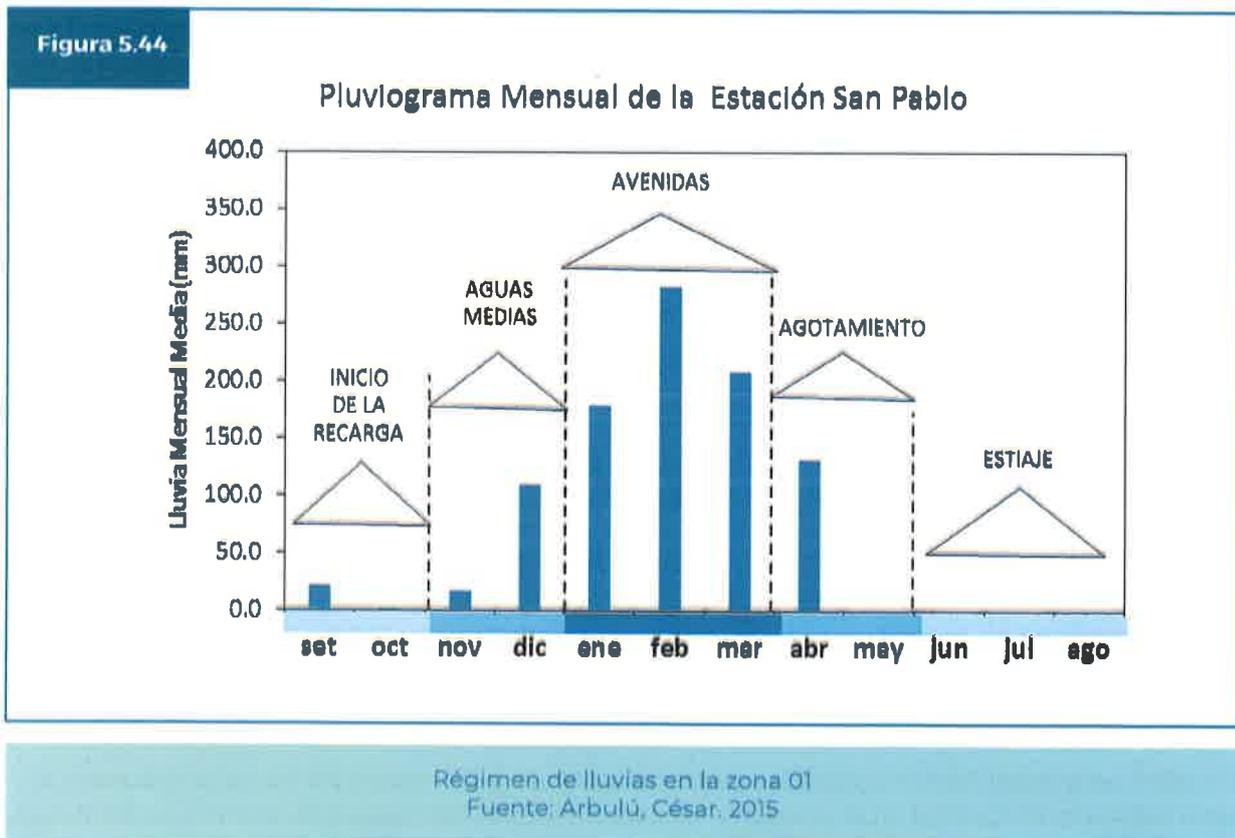


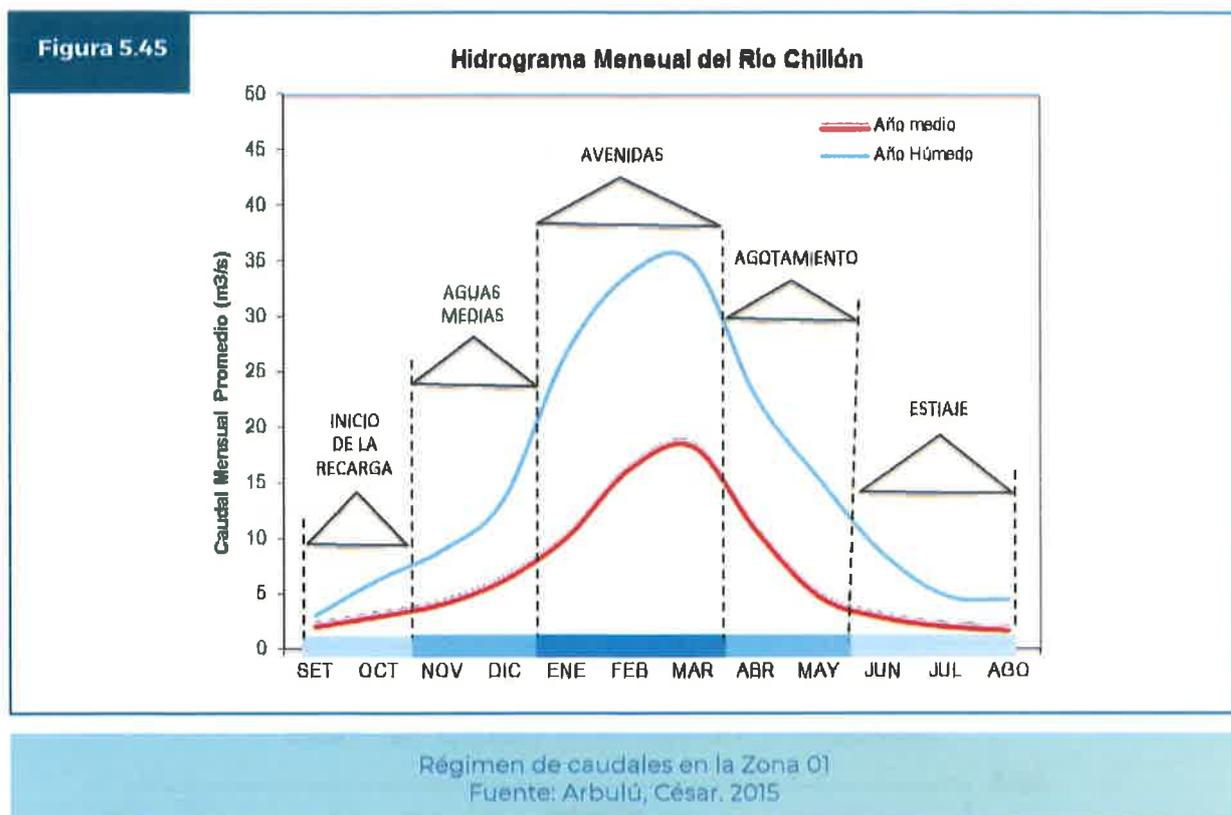
Regionalización hidrológica
Fuente: Arbulú, César. 2015

Zona 01.

Está conformada por los ríos de la Región Hidrográfica del Pacífico, de la Sierra, de la Selva Central, de la Selva Sur y de la Región Hidrográfica del Titicaca, es decir todos los ríos de la Regionalización Hidrológica, excepto la Región Amazonas 08 (Ver Figura 5.43), para los cuales la época de estiaje y de avenidas es coincidente.

Los ríos que integran esta zona, presentan el estiaje en los meses de junio, julio y agosto en los cuales la descarga base, está compuesta por el flujo del agua subterránea almacenada en la época de lluvias y también por el agua proveniente de los deshielos en las cuencas que cuentan con nevados (Figura 5.44 y Figura 5.45).





En los meses de setiembre y octubre, la ocurrencia de las precipitaciones comienza a recargar la humedad del suelo para ir generando paulatinamente una escasa escorrentía (gráficos citados).

En los meses de noviembre y diciembre (zona de aguas medias), continúa la recarga de los acuíferos; cuando la cuenca se presenta húmeda, gran parte de las precipitaciones se convierten en escorrentía (gráficos citados).

Enero, febrero y marzo son los meses del verano austral, en los cuales la cuenca está saturada y ocurren precipitaciones con mayor frecuencia e intensidad, convirtiéndose la mayor parte de ellas en escorrentía, aunque la recarga de los acuíferos continúa, ella es mínima; éste es el periodo de las avenidas (ver gráficos citados).

En abril se presentan muy pocas precipitaciones y en mayo ya no se producen; en este periodo el caudal que discurre en los ríos, está compuesto por agua de lluvia

y por el agua subterránea y si en la cuenca se encuentran nevados, también se incorpora el componente de agua de deshielo. Se puede decir entonces que en estos meses comienza el agotamiento del agua almacenada gracias a las lluvias de los meses anteriores (gráficos citados).

Finalmente durante los meses de junio, julio y agosto, en condiciones normales, ya no hay precipitaciones y el agua de los ríos corresponde al agua recargada por las lluvias y a los deshielos en las cuencas que poseen nevados; éstos son meses enteramente de disminución del agua subterránea.

Es así que para la Zona 01, en cada uno de los ríos de la Región Hidrográfica del Pacífico, de la Sierra, de la Selva Central, de la Selva Sur y la Región Hidrográfica del Titicaca se considera aforar por lo menos diez (10) veces al año para cubrir mínimamente los diferentes tramos según la distribución indicada en Tabla 5.16

Tabla 5.16
Cantidad de aforos necesarios para los ríos de la Zona 01

Cantidad de aforos mínimo en Zona 1					
Régimen hídrico	Inicio de la recarga	Aguas medias	Avenidas	Agotamiento	Estiaje
Número de aforos	2	2	3	2	1

Fuente: Elaboración propia

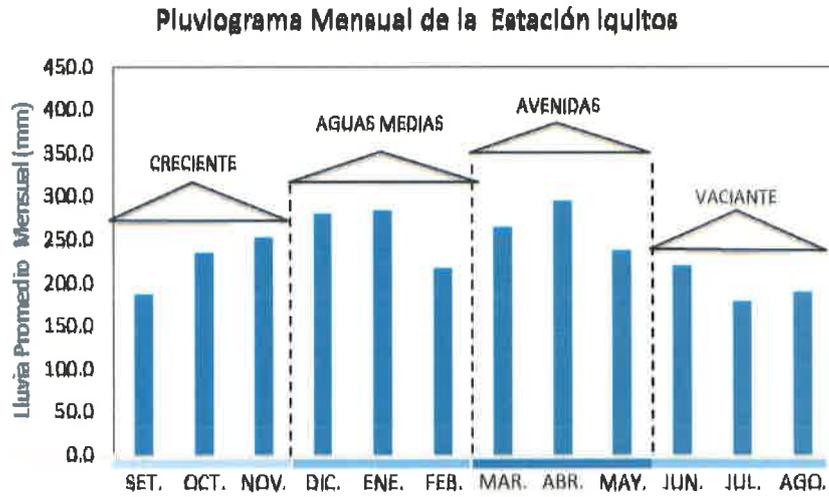
En época de avenidas se debe utilizar ADCP, pistola radar o flotadores

Zona 02.

Conforman este grupo, los ríos de la Selva Norte, que corresponde a la Región Amazonas 08 de la Regionalización Hidrológica (Figura 5.43), cuyo régimen hidráulico marca la diferencia, con respecto a la Zona 1 (Figura 5.46, Figura 5.47).

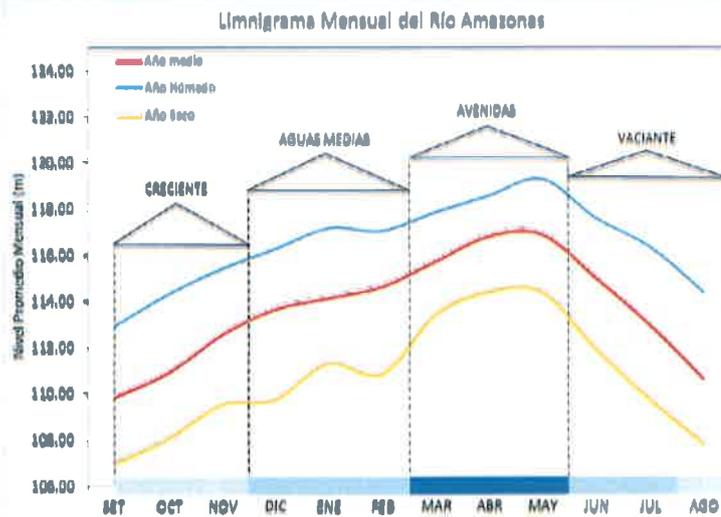
En esta zona, los ríos no presentan estiaje debido a que todo el año llueve; sin embargo, se pueden identificar cuatro regímenes claramente diferenciados (Figuras 5.47, 5.48).

Figura 5.46



Régimen de caudales en la Zona 02
Fuente: Arbulú, César, 2015

Figura 5.47



Régimen de caudales en la Zona 02
Fuente: Arbulú, César, 2015

En los meses de setiembre, octubre y noviembre, comienzan a incrementarse las precipitaciones elevando paulatinamente el caudal de los ríos, a esta época podríamos denominar creciente.

Pese a que en el pluviograma, las precipitaciones de diciembre, enero y febrero no difieren significativamente de las de marzo, abril y mayo; sin embargo en el hidrograma corresponde a dos períodos diferentes que podríamos denominar de aguas medias y avenidas, respectivamente. Este fenómeno ocurre debido al tiempo de concentración, que origina un retardo en la llegada de la escorrentía producida en la parte alta de la cuenca.

Finalmente, tenemos una cuarta zona del hidrograma que podemos denominar vaciante, que se origina por la disminución de las precipitaciones en la parte baja de la cuenca y por la época de estiaje en los afluentes de la parte alta.

De acuerdo al régimen hidráulico de los ríos pertenecientes a esta zona, considera aforar por lo menos ocho (08) veces al año para cubrir mínimamente los diferentes tramos según la distribución indicada en Tabla 5.17

Tabla 5.17
Cantidad de aforos necesarios para los ríos de la Zona 02

Cantidad de aforos mínimo en Zona 02				
Régimen hídrico	Creciente	Aguas medias	Avenidas	Vaciante
Número de aforos	2	2	2	2

Fuente: Elaboración propia

Los aforos en esta zona sólo deben ser realizados con ADCP sobre embarcaciones con motor fuera de borda.

5.7.2 Métodos para el establecimiento de la curva de gasto

La forma general de la representación de la curva Altura-Gasto viene representada por la ecuación de la forma:

$$Q = C (h - h_0)^n \quad (5.7.4)$$

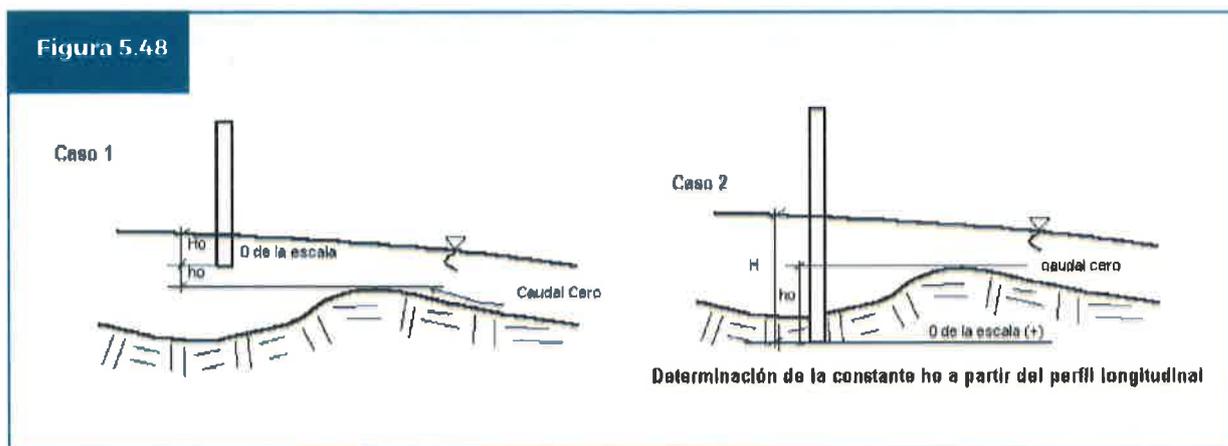
Donde :

- Q : Caudal (m³/s).
- h : Nivel de agua leído en la escala (m).
- h₀ : Nivel para caudal nulo (m).
- C,n : Constantes de la ecuación

El valor de h₀, es la altura de escala o de la regla limnimétrica para cuando el caudal es nulo; este valor puede ser positivo o negativo, según la posición de la regla con respecto al fondo de la sección de aforo, tal como se ilustra en la Figura 5.48. Es por ello la importancia de una sección de control estable y así evitar las variaciones; en el caso que no sea así, se podrá determinar un valor medio.

El nivel h₀ se obtiene por diferentes aproximaciones gráficas y analíticas que se indican a continuación:

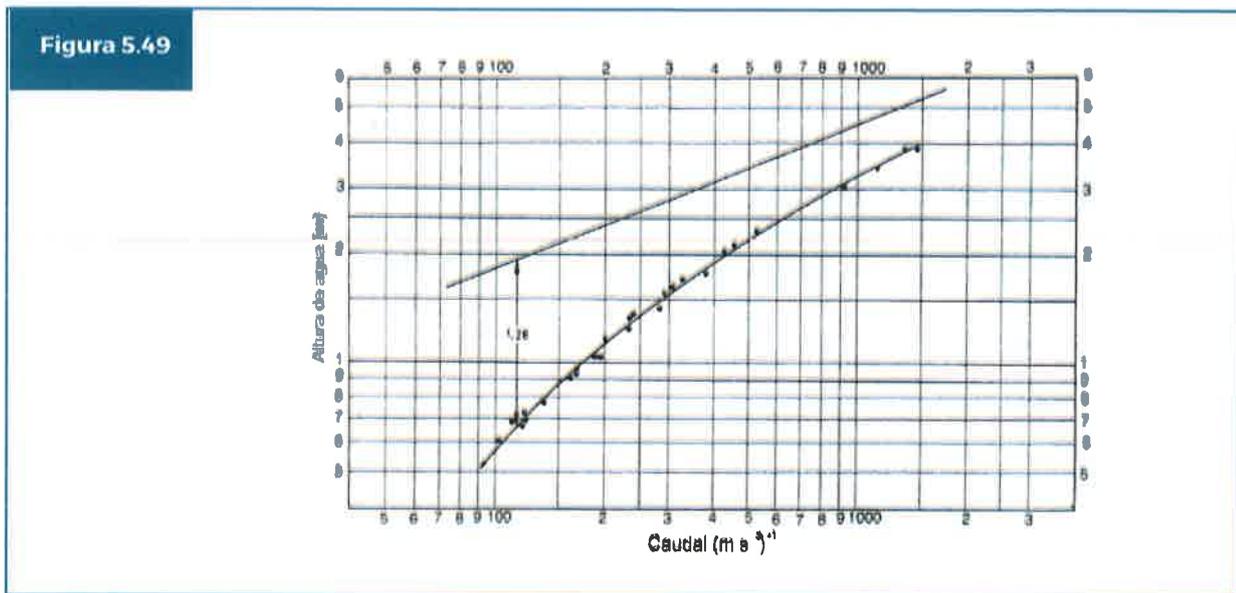
- a) Método de prueba y error
- b) Método aritmético
- c) Método gráfico



Representación del nivel h₀ según la ubicación del cero de la regla de la estación hidrométrica
Fuente: Elaboración propia

Método prueba y error

El método consiste en asumir al tanto un valor de h_o , luego se plotea la diferencia $(h-h_o)$ en una gráfica logarítmica doble con el caudal correspondiente al valor del nivel de agua h . Si el resultado es una curva, se deberá seguir tanteando con el valor h_o hasta obtener una línea recta, tal como se ilustra en la Figura 5.49.



Representación del nivel h_o según la ubicación del cero de la regla de la estación hidrométrica
Fuente: Elaboración propia

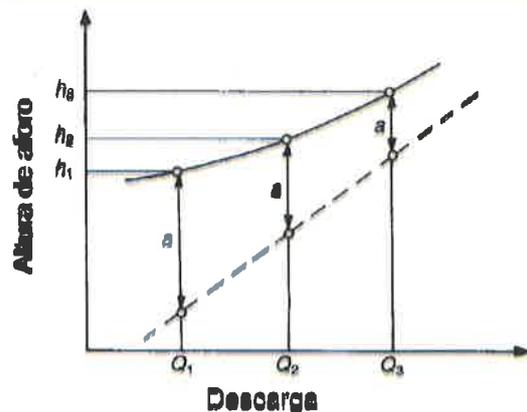
Método aritmético

El método se basa en seleccionar 3 puntos de la curva de calibración altura-caudal en un gráfico doble logarítmico, donde se cumpla que:

$$Q_2^2 = Q_1 Q_3 \quad (5.7.5)$$

$$H_o = \frac{h_1 h_3 - h_2^2}{h_1 + h_3 - 2h_2} \quad (5.7.6)$$

Figura 5.50

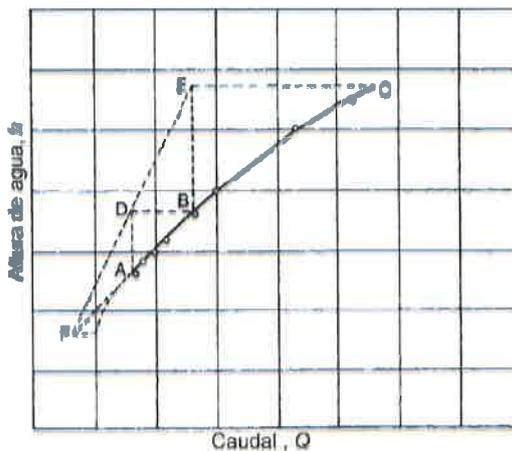


Procedimiento para obtener la línea recta que define la proporcionalidad geométrica de los caudales para la obtención de h_0
Fuente: Herschy R.

Método gráfico

El método consiste en seleccionar tres puntos en progresión geométrica (A, B y C) de la curva de descarga, según Figura 5.52 a partir de estos puntos trazar líneas verticales por A y B; líneas horizontales por B y C que intersecta a los puntos D y E; finalmente las rectas DE y AB se intersectan en el punto F, cuya ordenada es h_0 .

Figura 5.51

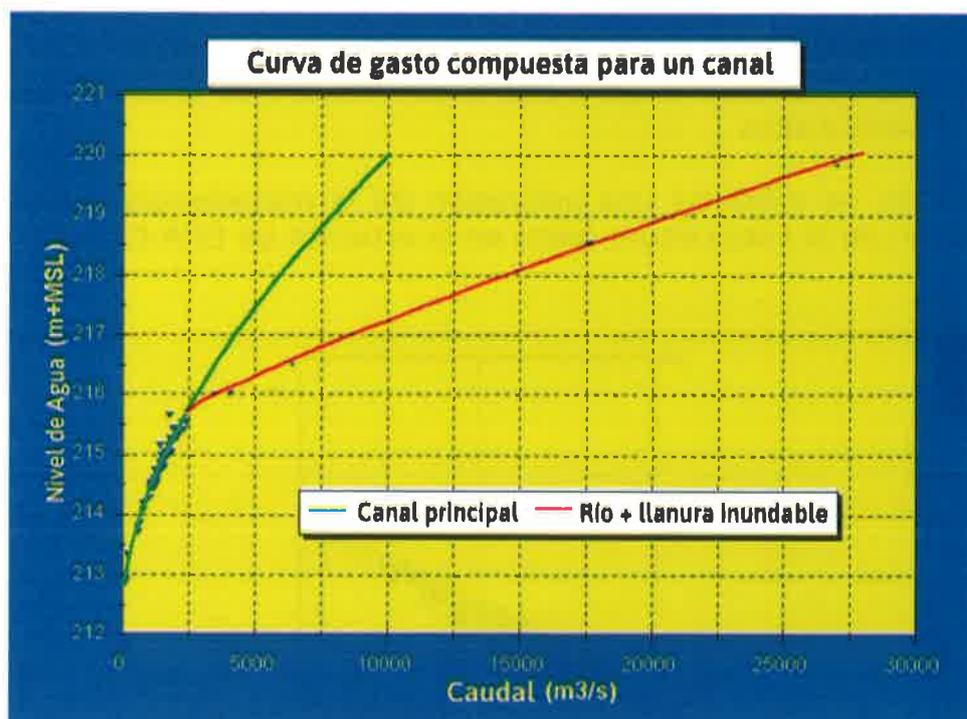


Procedimiento gráfico para la obtención de h_0
Fuente: Herschy R.

5.7.3 Curva de gasto compuesta

En ríos de la región hidrográfica del Pacífico no siempre es posible construir una sola curva altura-gasto para representar el ciclo anual de los caudales; por lo general la curva altura-gasto es compuesta o segmentada por tramos de acuerdo a la variabilidad de los niveles de agua; cada segmento es representado por una curva altura-gasto diferente, siendo lo más común identificar dos segmentos en base a los aforos que cubren el rango de variabilidad de los niveles de agua para el período de estiaje y avenidas; en casos muy particulares donde la sección de aforos presenta mucha variabilidad es posible la existencia de curvas hasta con 3 segmentos. En la Figura 5.52, se muestra el caso típico de curvas compuestas de dos segmentos.

Figura 5.52



Curva altura-gasto compuesta
Fuente: HP Hydrology Project

Para algunos ríos, donde se dispone de una buena densidad de aforos durante el año el SENAMHI viene aplicando métodos de mayor rigor técnico-científico para la calibración de las de las curvas de gasto compuestas y el cálculo de la incertidumbre asociada a la estimación de los caudales. La ecuación 5.7.7, 5.7.8 y 5.7.9 se vienen utilizando para estimar los parámetros de la curva altura gasto.

$$Q = \begin{cases} a_1(h + h_0)^{b_1} & \text{si } h \leq h_{crit} \\ a_2(h + h_2)^{b_2} & \text{si } h > h_{crit} \end{cases} \quad (5.7.7)$$

Donde:

$$a_2 = a_1(h_{crit} + h_0)^{b_1} \quad (5.7.8)$$

$$h_2 = h \frac{1-h_{crit}}{h_{crit}} \quad (5.7.9)$$

El h_{crit} se obtiene gráficamente a partir del ploteo de los puntos (nivel, caudal) correspondiente a los aforos disponibles; en dicho gráfico se identifica visualmente el nivel donde es mayor la dispersión de los aforos, tal como se ilustra en Figura 5.53

Bajo estas consideraciones se garantiza la continuidad de la curva altura gasto para niveles bajos y altos.

A continuación, se presenta una aplicación de la metodología descrita en la determinación de la curva altura-gasto en la estación de EHA-Chosica, en el río Rímac.

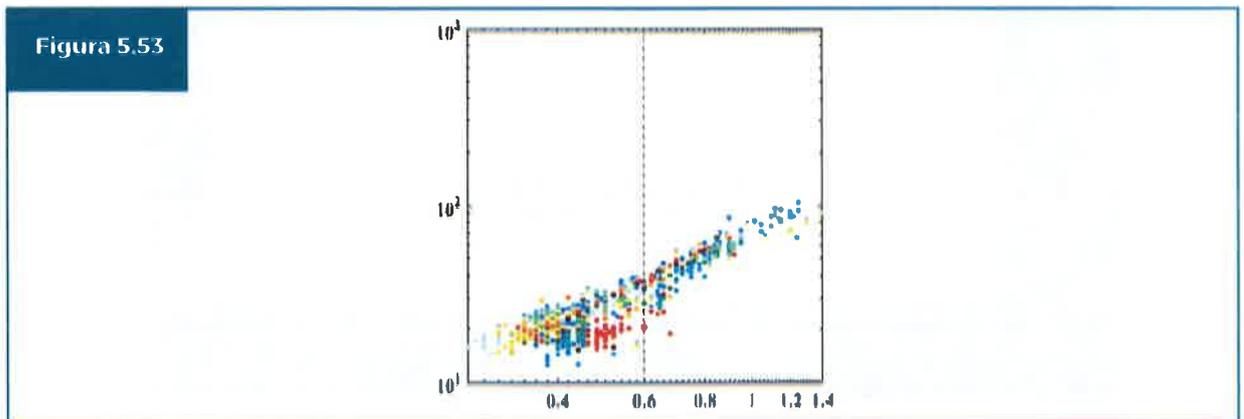
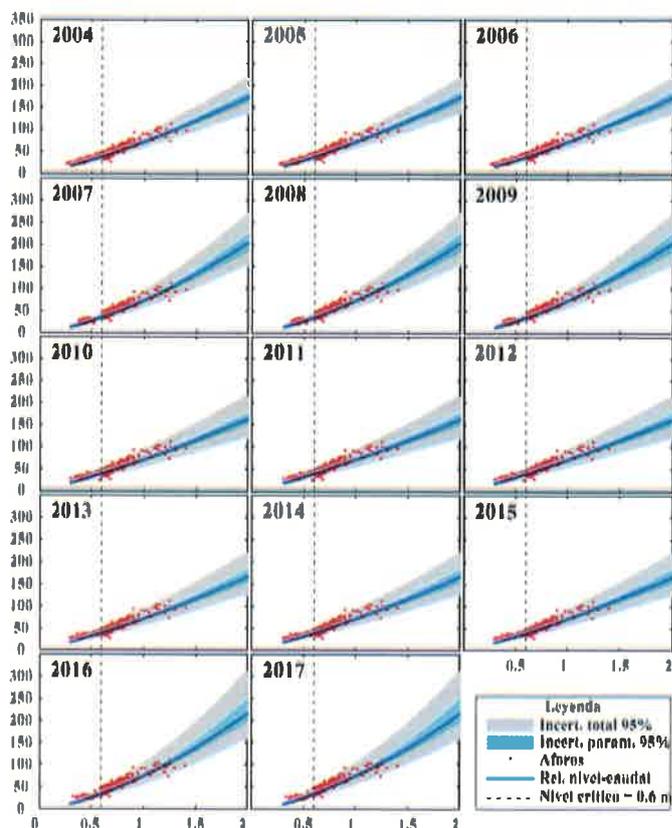


Figura 5.53 Gráfico de dispersión de los aforos (X: nivel, Y: caudal) para la obtención del $h_{crit}=0.6$ Escala del gráfico log-log Fuente: DHI

Tabla 5.18 valores de los parámetros de curvas altura-gasto compuesta obtenida para diferentes períodos en la Estación EHA-Chosica

Período	a1		h0		b1		b2		RMSE m ³ /s
	MAP	STD	MAP	STD	MAP	STD	MAP	STD	
2004-2006	66.113	1.008	-0.008	0.001	1.160	0.004	1.294	0.030	1.127
2007-2009	77.559	1.048	-0.021	0.028	1.558	0.109	1.497	0.052	1.148
2010-2012	70.650	1.013	-0.015	0.002	1.913	0.006	1.209	0.038	1.154
2013-2015	69.838	1.014	-0.016	0.002	1.204	0.006	1.251	0.041	1.149
2016-2017	85.106	1.078	-0.020	0.019	1.799	0.133	1.576	0.060	1.180

Figura 5.54



Curvas de gasto compuesta para diferentes períodos en la estación EHA-Chosica. Las bandas de incertidumbre paramétrica y total corresponde a franja celeste y ploma. Los parámetros de dichas curvas son las que se presenta en Tabla 5.18

Fuente: DHI, SENAMHI

5.7.4 Extrapolación de la curva de gasto

El Reglamento Técnico de Hidrología de la OMM señala que de preferencia, una curva del caudal no debería utilizarse fuera de la gama de observaciones en la que se funda. Cuando sea necesario hacer una extrapolación, los resultados obtenidos deberían ser verificados por varios métodos.

La literatura especializada recomienda el uso de diferentes métodos para la extrapolación de la curva de gastos, siendo los más comunes:

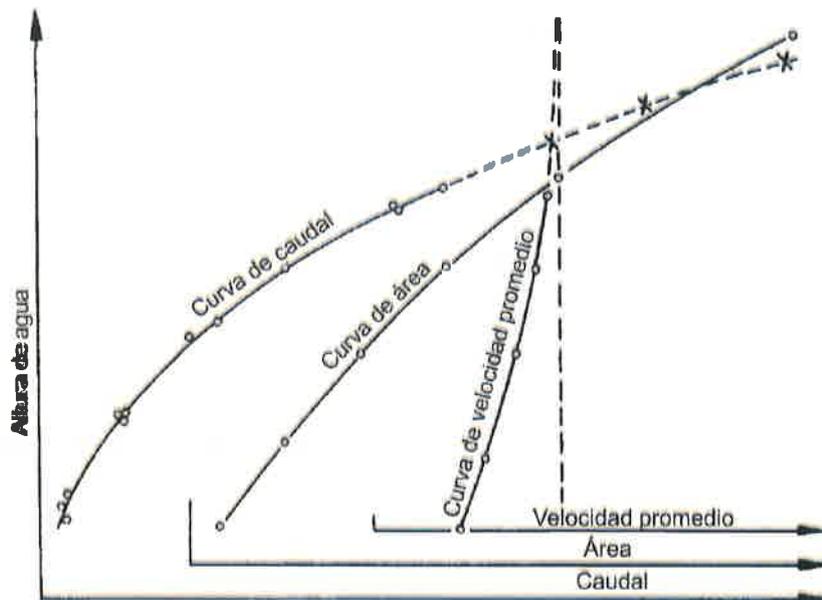
- a) Método Nivel- Área-velocidad
- b) Método de Manning
- c) Método de Steven
- d) Modelos hidráulicos

En este manual se abordará los dos primeros métodos.

a) Método nivel-área-velocidad

Este método es el más simple y resulta eficiente siempre y cuando se tenga un buen control del área de sección transversal del río. En base a los aforos disponibles se recomienda construir gráficos de la relación nivel de regla vs velocidad media y nivel vs área de la sección transversal. De esta manera se obtiene de manera independiente la extrapolación de la velocidad y el área en base a la lectura del nivel de agua; finalmente el caudal se obtiene como el producto de la velocidad por área para cualquier lectura del nivel de agua. Este caudal estimado será un punto adicional (Q,H) para extrapolar la curva de gasto.

Figura 5.55



Curvas de nivel-área-velocidad para la extrapolación de la curva de gasto
Fuente: Herschy

b) Método de Manning

Este método utiliza la ecuación de Manning para la estimación del caudal. El gasto en la Ecuación de Manning está dado por la expresión:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad (5.7.10)$$

Donde:

- A : Área de la sección de control o de aforo (m²).
- S : Pendiente del canal en (m/m).
- R : Radio hidráulico, $R = A / P$.
- P : Perímetro mojado de la sección de control (m).
- n : Coeficiente de rugosidad. Ver Tabla 14.
- Q : Caudal o descarga en (m³/s).

Para aplicar la extrapolación de la curva de gasto se debe utilizar simplificaciones de la ecuación general de Manning según las ecuaciones 5.7.11, 5.7.12, 5.7.13 y 5.7.14

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (5.7.11)$$

$$v = \left(\frac{1}{n}\right) R^{2/3} S^{1/2} \quad (5.7.12)$$

$$K = \frac{1}{n} S^{1/2} \quad (5.7.13)$$

$$V = KR^{2/3} \quad (5.7.14)$$

Los valores de K se obtienen a partir de los aforos disponibles y se ajusta a la curva de la Figura 5.56 para extrapolar hacia valores altos del nivel de agua. Con el valor extrapolado de K se obtiene el valor de velocidad media para niveles altos del río y conocida el área de la sección transversal se estima el caudal por el producto de la velocidad por el área. Este caudal estimado es un punto adicional (Q,H) para extrapolar la curva de gasto.

El USGS recomienda que la aplicación de este método es confiable para extrapolar caudales que no supera 2 veces el caudal máximo aforado.

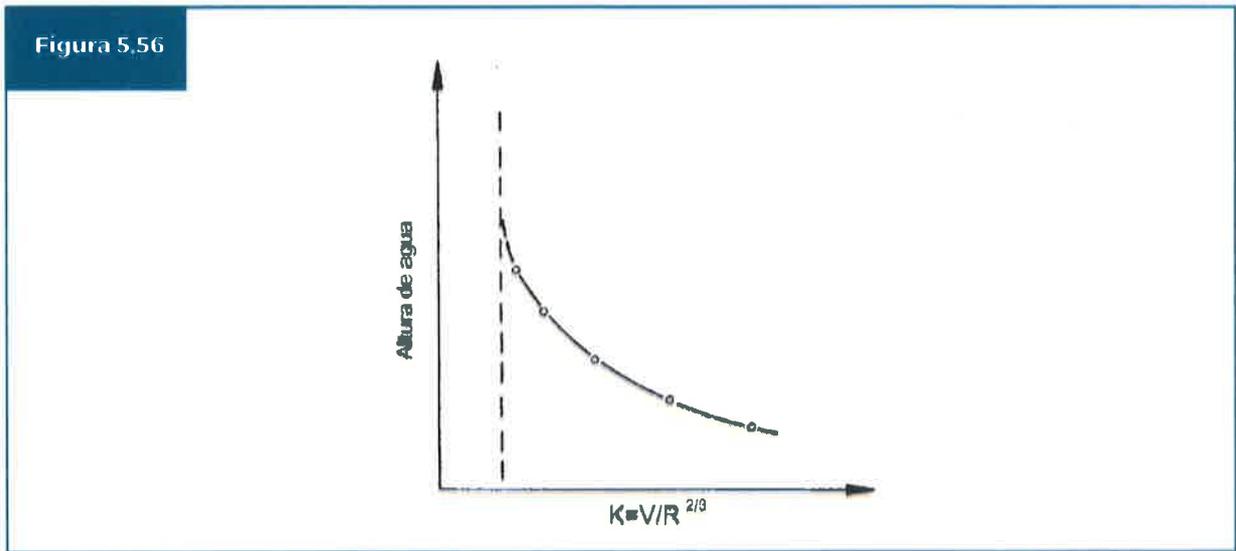
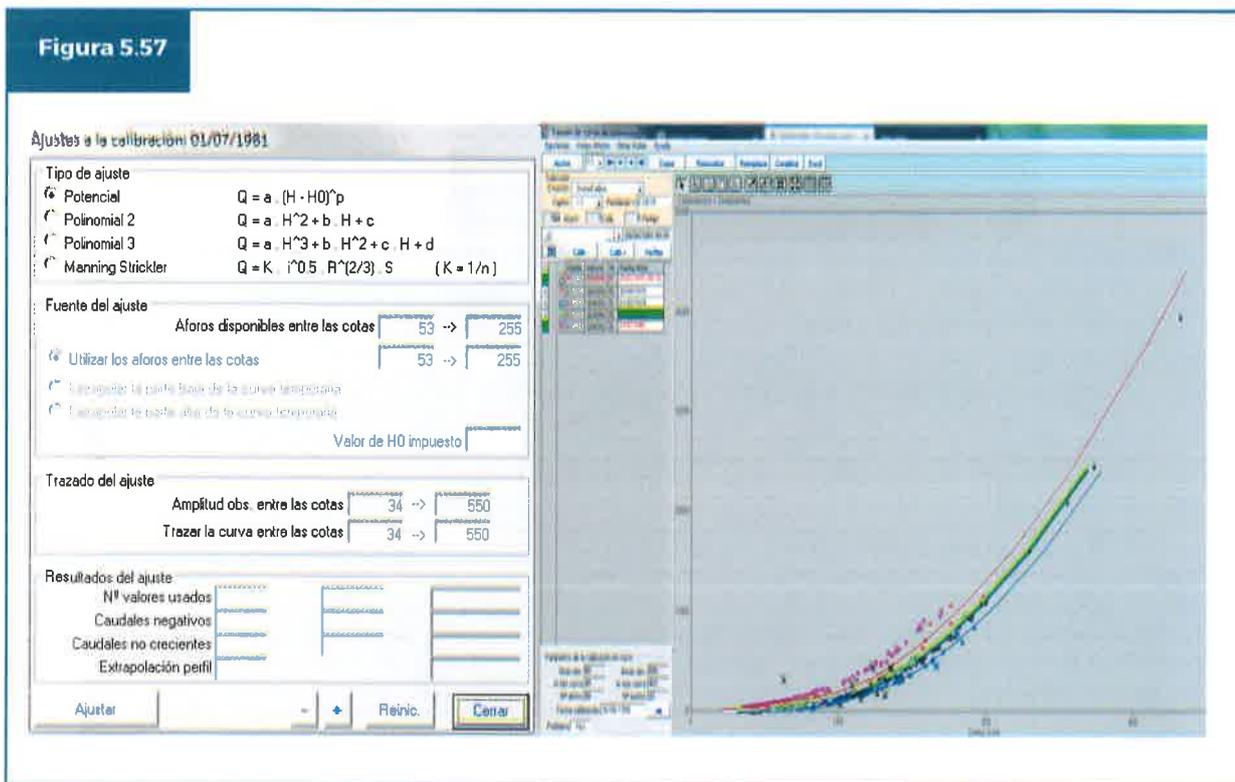


Gráfico de la relación de K en función del nivel del agua. En eje Y valores del nivel del agua
Fuente: Herschy R.

5.7.5 Automatización para el procesamiento de la curva de gasto

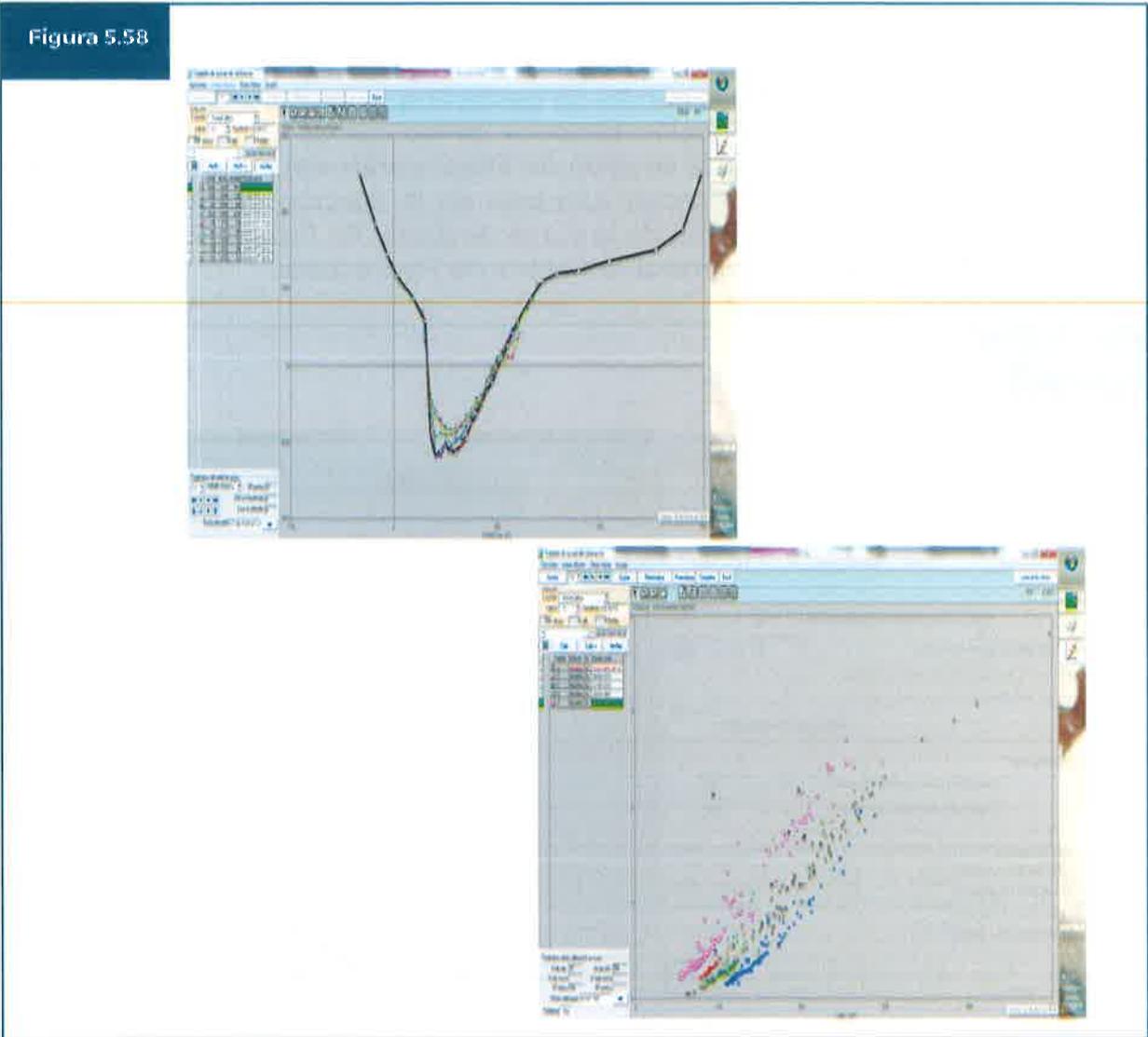
Un programa o plan de aforos deberá prever la disponibilidad de aplicativos, códigos o software especializado para la elaboración automática de las curvas de gasto. Para ello, es de suma importancia tener una secuencia ordenada de los aforos para su procesamiento. El módulo Calibra del software hidrológico Hydraccess, desarrollado por el IRD de Francia, es una valiosa herramienta de apoyo para la calibración de las curvas de gasto, con la capacidad de almacenar en su base de datos la información histórica de las curvas de calibración de la estación de aforos, perfiles de la sección de aforo, parámetros hidráulicos, entre otros, de importancia para detectar cambios en la sección del río asociado a diferentes períodos de calibración de la curva de gasto. En figuras 5.57, 5.58 y 5.59 se ilustra diferentes salidas del módulo Calibra de Hydraccess.



A la izquierda de la figura se muestra las ecuaciones disponibles para el ajuste de la curva incluyendo el método de Manning, mientras que a la derecha, se puede apreciar historial de curvas de gasto para diferentes períodos de calibración.

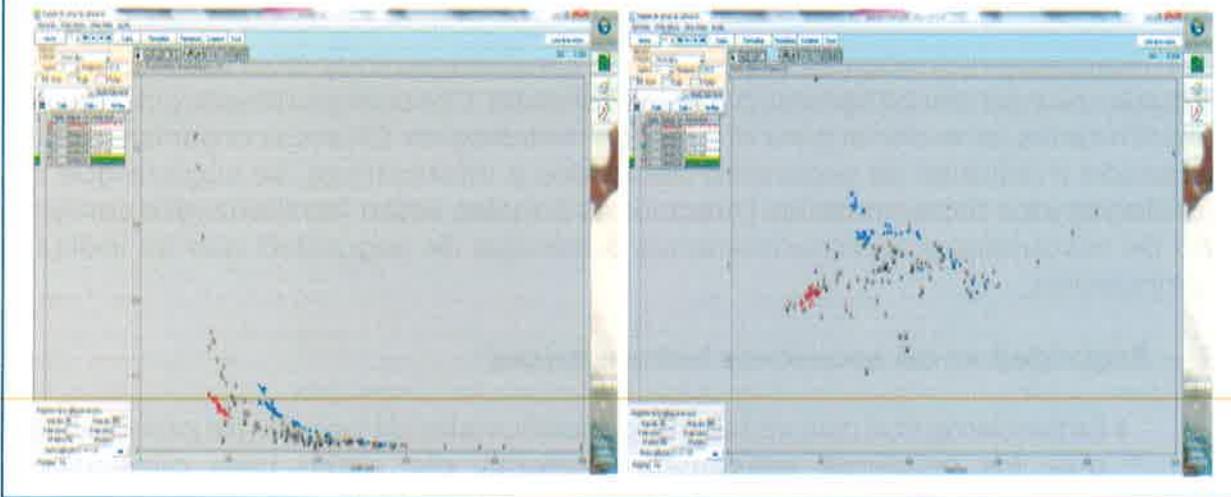
Fuente: Elaboración propia

Para que se active la ecuación de ajuste de curva por Manning es necesario disponer de toda la información requerida para la aplicación del método, como es la pendiente de la línea de energía, evaluada en un tramo recto en la dirección del flujo de agua; el caudal aforado, el radio hidráulico.



A la izquierda de la figura se observa historial de perfiles de la sección de aforo, mientras que a la derecha de la figura se muestra el historial de la velocidad media para diferentes periodos de calibración de la curva de gasto
Fuente: Elaboración propia

Figura 5.59



A la izquierda de la figura se puede apreciar el historial del coeficiente de Manning (n) para diferentes niveles de agua, mientras que a la derecha, se aprecia el historial del radio hidráulico para diferentes períodos de calibración de la curva de gasto
Fuente: Elaboración propia

Un aspecto importante para determinar a tener en cuenta en el proceso de reajuste de la curva de gasto, es la estimación de la incertidumbre o banda de confianza de validez. Los documentos revisados concuerdan que es aceptable hasta un 5% de variación del caudal estimado por la curva con respecto al caudal aforado. En el Manual de Curva de Gasto que publicará el SENAMHI los próximos meses, se profundizará más en el tema.

VI. CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD EN TRABAJOS HIDROMÉTRICOS

Las mediciones hidrológicas se realizan en condiciones muy diversas, muchas de las cuales pueden ser peligrosas para el observador. Conocer los riesgos y los medios para limitarlos es esencial para el personal hidrológico. Diversos organismos han elaborado manuales de seguridad detallados e informativos. Se sugiere que los hidrólogos y los técnicos de las Direcciones Zonales estén familiarizados con este tipo de materiales y recomendaciones generales de seguridad que se indica a continuación.

6.1 Seguridad en las estaciones hidrométricas

- ◆ Es fundamental que en las márgenes fluviales de pendiente pronunciada que, los senderos, escalones, escaleras, etc. estén bien contruidos. Deberán permitir un acceso seguro en tiempo lluvioso y, si se diera el caso, en la oscuridad. Al comenzar la construcción de una estación, se terminarán en primer lugar los accesos.

- ◆ Las plataformas y pasarelas elevadas tendrán superficies no resbaladizas y deben estar provistas de barandillas.

6.2 Seguridad para la realización de aforos

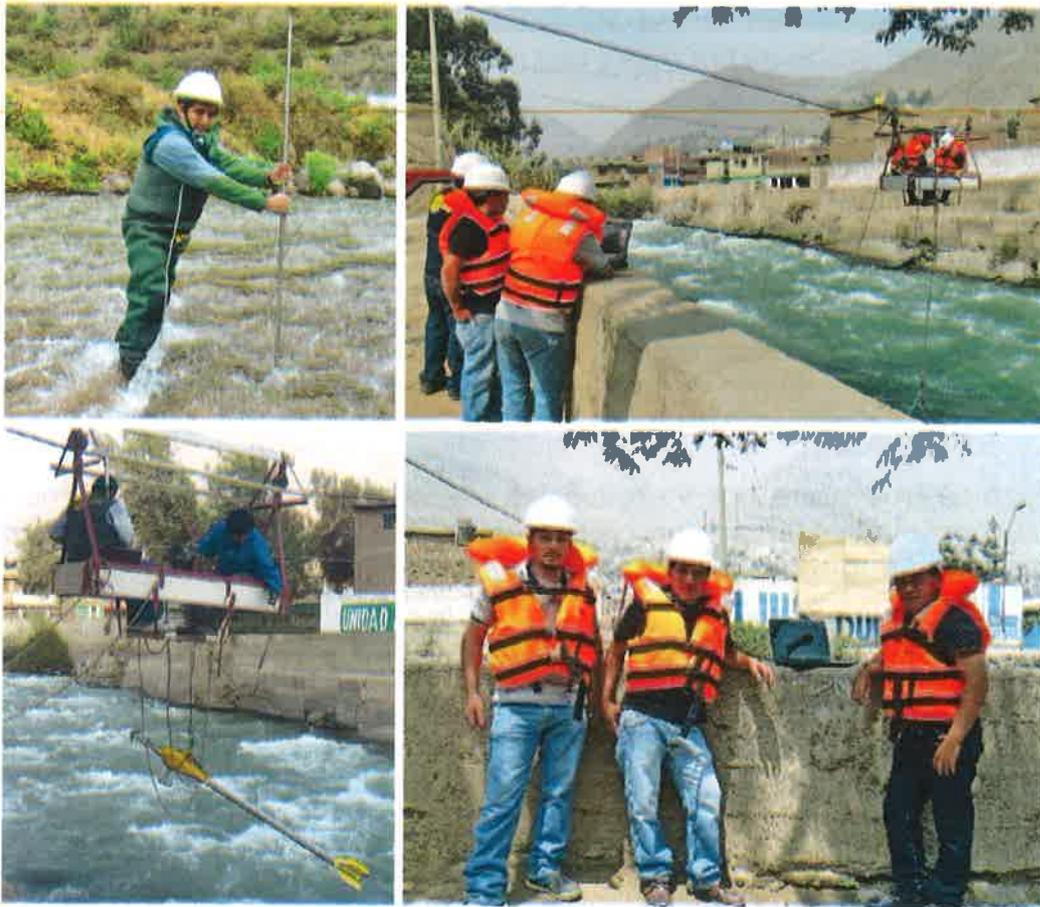
- ◆ La medición de caudales es una actividad considerada de alto riesgo, por lo tanto es importante y necesario tomar todas las precauciones para evitar que se produzcan daños personales y materiales que lamentar. Por ello, el personal que realiza actividades hidrométricas debe contar con equipos de protección personal. Figura 6.1.

Entre los equipos e implementos indispensables que se debe utilizar para cualquier actividad de aforos, se encuentran:

- Cascos dieléctricos
- Botas de jebe
- Botas pantalón de jebe, para el caso de aforos glaciares, estos deben ser isotérmicos.
- Chalecos de salvavidas
- Arnés de seguridad

- Línea de vida
- Guantes de protección con jebe antideslizante
- Casacas y pantalones Impermeables
- Radio de comunicación
- Estacas de fierro de 1" de diámetro y 0,60 m de longitud
- Drizas, sogas
- Comba y herramientas menores

Figura 6.1



Cuadrilla de personas que realizan las campañas de aforo. Estación de Chosica - Río Rímac, departamento de Lima
Fuente: SENAMHI

- ♦ En el caso de aforos desde puentes, el personal técnico debe vestir ropa fluorescente o brillante y utilizar señaladores portátiles (conos, triángulos) para desviar el tráfico del área de trabajo. En sitios de alto tránsito, es preferible solicitar apoyo policial para el control del tráfico vehicular durante la ejecución del aforo.
- ♦ Durante los aforos en época de crecidas, es necesario prestar atención a la superficie libre del agua en el río aguas arriba del molinete, con el fin de sacar rápidamente el equipo en caso de observarse objetos flotantes que puedan enredarse en el cable o golpear el conjunto hidrométrico. Si los materiales arrastrados por el agua ponen en peligro la seguridad de los operadores, el aforo se desarrolla en forma abreviada tomando velocidades superficiales mediante el método de flotador o con molinete si las condiciones de la corriente lo permiten.
- ♦ Para los aforos desde carro huaro, se deberá revisar las condiciones físicas, tensión y estado del cable, canastilla y apoyos. Para esta operación desde carro huaro se necesita 02 hidromensores.
- ♦ Los aforos por vadeo son adecuados para profundidades que permitan físicamente al operador mantenerse firme al contacto con la fuerza de la corriente de agua. El uso de botas musleras o traje de pescador es básico para evitar daños en pies y piernas.
- ♦ El técnico que afora por vadeo debe mantenerse alejado lateralmente del instrumento orientando sus piernas a la dirección del escurrimiento, para reducir a un mínimo la perturbación del flujo cerca del correntómetro.
- ♦ Para los aforos desde embarcaciones, el uso de los chalecos salvavidas es obligatorio así como la línea de vida. El operador del bote debe estar capacitado para este tipo de actividad. El uso de los botes inflables no es recomendable cuando el río se carga de palizada y otros elementos, debido que un impacto sobre el bote podría ocasionar averías.
- ♦ Dependiendo de las condiciones del lugar donde se realiza los aforos, se debe utilizar equipo necesario para la protección climática y frente a rayos UV, así como la protección ante picadura de insectos.

- ♦ Para operaciones en zonas de montaña, es recomendable desplazar a los técnicos que tengan buena condición física y capacitación especial (curso de supervivencia) para operar en condiciones de clima extremo.

VII. CONSIDERACIONES FINALES

7.1 Respecto a los aforos

Los aforos se ejecutarán de acuerdo a un Plan Anual. Dicho documento debe ser formulado según las indicaciones descritas en el apartado 5.7.1. El contenido del Plan contempla el cronograma de ejecución de los aforos por cada ámbito regional de las oficinas desconcentradas, así como el presupuesto por estación. La Dirección de Hidrología tiene a cargo la formulación del Plan de aforos así como la supervisión del mismo.

En períodos excepcionalmente húmedos, es necesario incrementar la frecuencia de los aforos a efecto de tener estimaciones de las crecidas extraordinarias y analizar los cambios que se ocasiona en la sección de aforo y afecta la curva de gasto de la estación.

7.2 Respecto a la elaboración de los informes de campo en campaña de aforos

Los aforos con correntómetro serán procesados en gabinete de acuerdo al formato del Anexo A.1 (Ver sección Anexo). En la tabla, el hidromensor debe consignar todas las variables descritas en ítems antecedentes relativas a determinación de profundidades en cada vertical, procesamiento de velocidades en cada punto de la vertical según método seleccionado; área de la sección transversal, entre otros parámetros geométricos e hidráulicos de la sección de aforo.

Es importante consignar también la serie del correntómetro utilizado y las ecuaciones de calibración del tipo de hélice utilizado para la conversión de velocidad lineal.

7.3 Respecto a los trabajos topográficos de la sección de aforo

Los trabajos de topobatimetría en la sección de aforo deberán realizarse, por lo menos dos veces al año, antes y después del período de avenidas de los ríos, a fin de observar los cambios en el fondo del lecho del río y zonas inundables. Estos levantamientos topográficos deben ejecutarse amarrando las cotas de los BM monumentados en el sitio de la estación hidrométrica, tal como fue indicado en ítem 5.1.1. Los planos topográficos de la estación deberán contar con las vistas de planta y perfil de la sección de aforo así como perfiles transversales cada 20 m en un transecto de 50 m aguas arriba y 50m aguas abajo de la estación de aforo.

En Anexo A.2 se ilustra un modelo de presentación del plano de planta y perfil de la sección de aforo de la EHA-Balsas, ubicada en el río Marañón. En Anexo A.3 se ilustra un modelo de plano de secciones transversales en un transecto del río Marañón, en el sector de la Estación hidrológica de Huallape.

Es importante determinar en campo, a partir de las marcas o huellas dejadas por las inundaciones de crecidas históricas, las cotas de desborde del río asociada al nivel de la escala limnimétrica de la estación hidrológica; esto permitirá calcular los umbrales de peligro para la alerta de inundaciones. En este caso, en los planos topográficos se incluirá los niveles de Alerta hidrológica, como se ilustra en Anexo A.4.

7.4 Respecto a las operaciones de mantenimiento de equipos de aforo

- ♦ Para cada comisión de servicio y cumplimiento de las actividades de aforo, el equipo y cada una de las partes a operar, deben ser probadas con anterioridad en gabinete.
- ♦ Realizar mantenimiento continuo de los correntómetros (lubricación, ajuste, secar y guardar adecuadamente después de cada uso).
- ♦ Recalibrar en laboratorio el equipo después de un determinado número de horas de uso (300 horas) o después de una reparación importante.

VIII. GLOSARIO DE TÉRMINOS

Aforo. Conjunto de operaciones realizadas con el propósito de medir el caudal de una corriente superficial para un nivel determinado. Su principal objetivo es correlacionar los datos obtenidos de niveles y caudales mediante una curva de calibración.

ADCP. Equipo de aforo utilizado para mediciones instantáneas de caudales. Perfilador acústico de corriente de efecto Doppler.

Ángulo de arrastre. Ángulo que se forma entre la vertical y el cable que sujeta el equipo hidrométrico durante la ejecución de un aforo por suspensión. En algunos documentos se denomina ángulo de deriva.

Batimetría. Proceso mediante el cual se miden las profundidades de corrientes superficiales para determinar la topografía del fondo. Actualmente, las mediciones son realizadas por GPS diferencial para una posición exacta y con ecosondas mono o multifrecuencia.

Bench Mark (BM). Puntos de control vertical materializados en estructuras identificadas en el terreno mediante diferentes tipos de monumentos, cuya elevación en metros está referida a la red de nivelación nacional ó datum vertical nacional asociado al geoide.

Datum. En Geodesia, es un conjunto de puntos de referencia en la superficie terrestre, en base a la cual se toma las medidas de posición y se adopta un modelo matemático de referencia de la forma de la Tierra (elipsoide de referencia), para definir el sistema de coordenadas geográficas.

Carro Huaro. Estructura que se utiliza para realizar aforos por suspensión en ríos. Consta de par de columnas y canastilla sobre las cuales se tiende un cable acerado (amarrado en sus extremos) el cual permite el desplazamiento tanto de equipos como de personal técnico sobre la sección de medición.

Caudal. Cantidad de agua que fluye a través de una sección transversal expresada en unidades de volumen por unidad de tiempo.

Curva de gasto. Representación gráfica de niveles de agua y caudales por medio de la cual se define la relación existente entre estas variables. Se utiliza para generar datos de caudales diarios a partir de lecturas de nivel de agua sin tener que realizar el aforo.

Escandallo o lastre. Pieza utilizada en la ejecución de aforos por suspensión, cuyo objetivo es evitar que la corriente arrastre el equipo hidrométrico, de tal manera que conserve su verticalidad.

Flotador. Elemento natural o artificial que está en condiciones de flotar y ser arrastrado por las aguas de manera parcial o totalmente sumergido en ellas

Histéresis. Variabilidad de la relación nivel-caudal en una estación de aforo sujeta a una pendiente de la superficie del agua variable donde, para la misma altura de agua, el caudal en la fase de crecida es diferente que en la fase de descenso.

Línea de aire. Distancia existente entre el punto terminal del cable del malacate y el extremo del lastre. Se mide una sola vez, al inicio de un aforo por suspensión.

Limnógrafo. Instrumento que consta de una mira graduada en centímetros la cual permite el registro puntual de los niveles de agua presentados por una corriente. Requiere de un observador que haga las lecturas a unas horas determinadas con base en los requerimientos de información.

Limnómetro. Instrumento que consta de una mira graduada en centímetros la cual permite el registro puntual de los niveles de agua presentados por una corriente. Requiere de un observador que haga las lecturas a unas horas determinadas con base en los requerimientos de información.

Nivel del agua. Distancia vertical de la superficie del agua de una corriente, lago, o embalse con relación a una cota determinada.

Nivel de referencia. Distancia vertical del cero de una escala con relación a una cota determinada.

Pendiente hidráulica. Diferencia en elevación de la superficie libre por unidad de longitud, medida horizontalmente en el sentido del flujo.

Punto o vértice geodésico. Es una señal informativa permanente que podemos encontrar en el campo, indica la altura exacta de ese punto sobre el nivel del mar, y que forma parte de una red de triángulos cuyas coordenadas se han calculado con la mayor precisión posible. La red de triángulos es de carácter planetario.



Punto geodésico de Orden "C". Este orden debe destinarse al establecimiento de control suplementario en áreas urbanas y rurales, al apoyo para el desarrollo de proyectos básicos de ingeniería y de desarrollo urbano-rural, así como a trabajos que requieran una precisión a un nivel máximo de 10.00 mm.

Remanso. Aumento gradual y continuo (en un tramo determinado) en la profundidad de flujo de una corriente por acción de ciertos fenómenos como las mareas altas (en ríos que desembocan en el mar), la reducción de la sección transversal en un punto del río (el remanso se produce en este caso para caudales altos), la desembocadura de ríos tributarios en dirección normal al principal, etc.

Tirante. Valor de la profundidad de flujo en un canal o río, es decir, la distancia que existe entre la superficie libre del agua y el lecho.

Vadeo. Método de aforo aplicado en ríos pequeños y medianos en las cuales el técnico aforador entra en la corriente y determina de manera directa las profundidades y velocidades de flujo para luego calcular el caudal.

Winche. Máquina a manera cabrestante que tiene el tambor en lo alto y debajo las palancas a las que se enganchan las caballerías que lo mueven. Se emplea para subir y bajar el equipo hidrométrico durante la realización de un aforo por suspensión.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA - BRASIL "Medição de descarga líquida em grandes ríos" Agência Nacional de Aguas Brazil 2009.

Arbulú Rojas, César "Procesamiento automatizado de la información de aforos y del estudio de la relación altura gasto" Tesis de Grado U.N.A. LA MOLINA, Lima – Perú, 1987.

Breña Puyol, Agustín y JACOBO VILLA Marco, "Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial" Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México-México, Enero 2006.

Fernández, C, et. Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales. Revista cubana de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XXXIX, No. 1, Ene-Abr2018, p. 17-31

Herschy, R. Streamflow Measurement. Third edition. London: Routledge, 2009.

Hydrology Proyect. How to extrapolate rating curve. Training module # SWDP – 31. New Delhi, November 1999.

Hien T. Nguyen¹ and John D. Fenton². Using two-point velocity measurements to estimate roughness in streams. Proc. 4th Austral. Stream Management Conf., Launceston, Tasmania, 19-22 Oct 2004, Ed. I. D. Rutherford, I. Wiszniewski, M. Askey-Doran, & R. Glazik, pp445-450, Dept of Primary Industries, Water and Environment, Hobart.

Martínez, Felipe. Propagación de errores en cálculos hidrológicos con caudales obtenidos mediante curvas nivel-caudal construidas con una baja densidad de aforos líquidos. Tesis de grado de magister en hidrosistemas, Pontificia Universidad Javeriana. Colombia. 2012.

Marbello Perez, Ramiro. Manual de Prácticas de Laboratorio de Hidráulica - Universidad Nacional de Colombia, Medellín - Colombia 2005.



Norwegian Agency for International Development (NORAD). Manual on Procedures in Operational Hydrology Volume 1. Establishment of Stream Gauging Stations. 1979

Norma ISO 4373, 1995, Measurement of liquid flow in open channels - Water-level measuring devices

Norma ISO 748 "Measurements of liquid flow in open channels Velocity-Área methods"-1997

Norma ISO 1100-1, 1996, Measurement of liquid flow in open channels - Part 1: Establishment and operation of a gauging station

Norma ISO 1100-2, 1998, Measurement of liquid flow in open channels - Part 2: Determination of the stage-discharge relation

Norma ISO 3454, Hydrometry—Direct depth sounding and suspension equipment OMM. "Guía de Instrumentos y métodos de observación meteorológicos" N° 8 – 1990

OMM. Guía de prácticas hidrológicas. Volumen I: Hidrología- De la medición a la información hidrológica. Sexta Edición, 2011.

Ray K. LINSLEY, JR "Hidrología para Ingenieros" México, D.F., 1988.

SOLANGE DUSSAUBAT, XIMENA VARGAS. "Aforo en un cauce natural". Proyecto MECESUP UCH 0303-Universidad de Chile: Chile 2005.

Valdivia Ponce, Jorge "Meteorología general" U.N.M.S.M., Lima – Perú, 1977.

Ven Té Chow. "Hidrología aplicada". Bogotá, 1994.

Ven Té Chow. "Hidráulica de canales abiertos". México, D.F., 1983

USGS. Discharge Measurements at Gaging Stations. Techniques and Methods 3–A8. Chapter 8 of Book 3, Section A. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia: 2010.

USGS. Stage Measurement at Gaging Stations. Techniques and Methods 3–A7. Chapter 7 of Book 3, Section A U.S. Geological Survey, Reston, Virginia: 2010.

USGS. Computing Discharge Using the Index Velocity Method. Techniques and Methods 3–A23. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia: 2012

W.Boiten. Hydrometry. IHE Delft Lecture Note Series.2003

WMO. 2010. Manual on Stream Gauging. Volum I: Fieldwork

WMO. 2010. Manual on Stream Gauging. Volum II: Computation of Discharge

Zakwan, M, Muzzammil, M. and Alam, J. (2017). Application of Data Driven Techniques in Discharge Rating Curve - An Overview. Aquademia: Water, Environment and Technology, 1(1), 02. doi: 10.20897/awet.201702



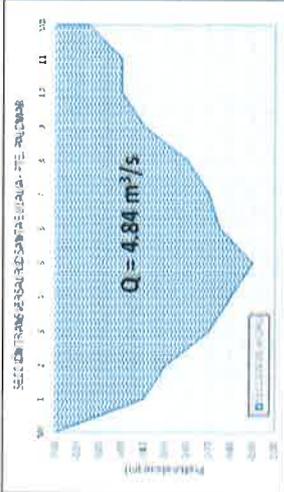
ANEXOS

Anexo A.1

Formato de presentación de la planilla de aforo, documentado con fotografías y el gráfico de la sección transversal correspondiente. Además de incluir información resumen del aforo. Caso Estación de aforo Palomar en el río Santa Eulalia



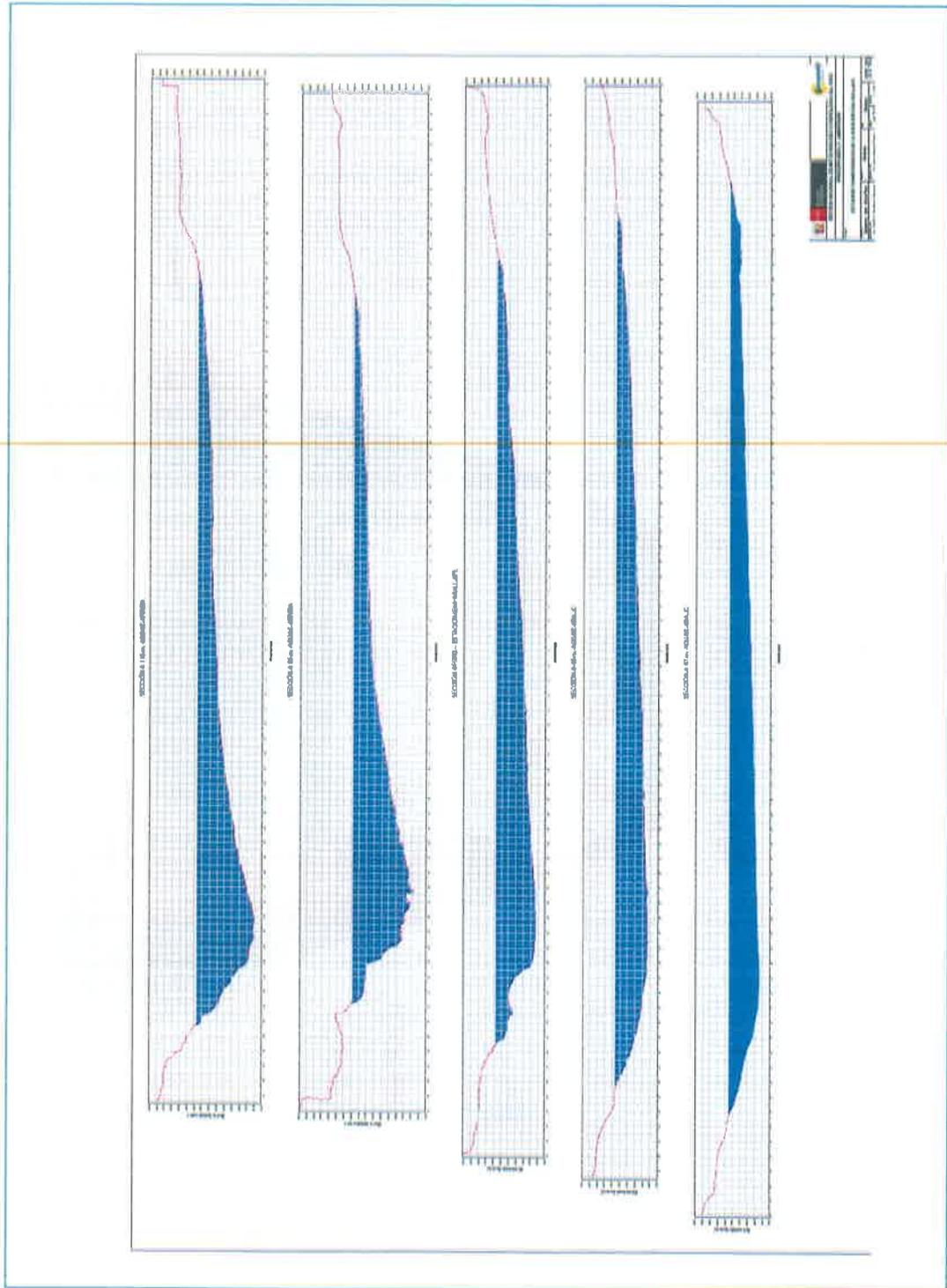

Altura de agua		Módulo de aforo		Velocidad media		Caudal	
Alt. Med. (m)	C	Alt. Med. (m)	C	Veloc. (m/s)	C	Veloc. (m/s)	Caudal (m³/s)
0.84	C	0.49	C	0.18	C	0.18	1.92
0.83	C	0.48	C	0.17	C	0.17	1.71
0.81	C	0.47	C	0.16	C	0.16	1.60
0.82	C	0.48	C	0.16	C	0.16	1.65



SECCION		CORRECCIONES		VELOCIDADES		SECCIONES		DESPUES	
Nº	ANCHO (m)	VELOCIDAD (m/s)	VELOCIDAD CORREGIDA (m/s)	VELOCIDAD (m/s)	VELOCIDAD CORREGIDA (m/s)	Nº	ANCHO (m)	VELOCIDAD (m/s)	VELOCIDAD CORREGIDA (m/s)
1	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	1	1.5	0.15	0.15
2	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	2	1.5	0.15	0.15
3	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	3	1.5	0.15	0.15
4	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	4	1.5	0.15	0.15
5	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	5	1.5	0.15	0.15
6	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	6	1.5	0.15	0.15
7	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	7	1.5	0.15	0.15
8	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	8	1.5	0.15	0.15
9	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	9	1.5	0.15	0.15
10	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	10	1.5	0.15	0.15
11	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	11	1.5	0.15	0.15
12	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	12	1.5	0.15	0.15
13	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	13	1.5	0.15	0.15
14	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	14	1.5	0.15	0.15
15	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	15	1.5	0.15	0.15
16	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	16	1.5	0.15	0.15
17	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	17	1.5	0.15	0.15
18	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	18	1.5	0.15	0.15
19	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	19	1.5	0.15	0.15
20	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	20	1.5	0.15	0.15
21	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	21	1.5	0.15	0.15
22	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	22	1.5	0.15	0.15
23	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	23	1.5	0.15	0.15
24	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	24	1.5	0.15	0.15
25	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	25	1.5	0.15	0.15
26	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	26	1.5	0.15	0.15
27	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	27	1.5	0.15	0.15
28	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	28	1.5	0.15	0.15
29	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	29	1.5	0.15	0.15
30	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	30	1.5	0.15	0.15
31	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	31	1.5	0.15	0.15
32	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	32	1.5	0.15	0.15
33	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	33	1.5	0.15	0.15
34	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	34	1.5	0.15	0.15
35	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	35	1.5	0.15	0.15
36	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	36	1.5	0.15	0.15
37	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	37	1.5	0.15	0.15
38	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	38	1.5	0.15	0.15
39	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	39	1.5	0.15	0.15
40	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	40	1.5	0.15	0.15
41	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	41	1.5	0.15	0.15
42	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	42	1.5	0.15	0.15
43	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	43	1.5	0.15	0.15
44	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	44	1.5	0.15	0.15
45	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	45	1.5	0.15	0.15
46	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	46	1.5	0.15	0.15
47	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	47	1.5	0.15	0.15
48	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	48	1.5	0.15	0.15
49	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	49	1.5	0.15	0.15
50	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	50	1.5	0.15	0.15
51	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	51	1.5	0.15	0.15
52	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	52	1.5	0.15	0.15
53	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	53	1.5	0.15	0.15
54	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	54	1.5	0.15	0.15
55	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	55	1.5	0.15	0.15
56	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	56	1.5	0.15	0.15
57	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	57	1.5	0.15	0.15
58	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	58	1.5	0.15	0.15
59	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	59	1.5	0.15	0.15
60	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	60	1.5	0.15	0.15
61	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	61	1.5	0.15	0.15
62	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	62	1.5	0.15	0.15
63	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	63	1.5	0.15	0.15
64	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	64	1.5	0.15	0.15
65	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	65	1.5	0.15	0.15
66	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	66	1.5	0.15	0.15
67	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	67	1.5	0.15	0.15
68	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	68	1.5	0.15	0.15
69	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	69	1.5	0.15	0.15
70	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	70	1.5	0.15	0.15
71	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	71	1.5	0.15	0.15
72	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	72	1.5	0.15	0.15
73	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	73	1.5	0.15	0.15
74	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	74	1.5	0.15	0.15
75	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	75	1.5	0.15	0.15
76	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	76	1.5	0.15	0.15
77	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	77	1.5	0.15	0.15
78	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	78	1.5	0.15	0.15
79	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	79	1.5	0.15	0.15
80	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	80	1.5	0.15	0.15
81	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	81	1.5	0.15	0.15
82	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	82	1.5	0.15	0.15
83	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	83	1.5	0.15	0.15
84	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	84	1.5	0.15	0.15
85	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	85	1.5	0.15	0.15
86	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	86	1.5	0.15	0.15
87	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	87	1.5	0.15	0.15
88	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	88	1.5	0.15	0.15
89	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	89	1.5	0.15	0.15
90	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	90	1.5	0.15	0.15
91	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	91	1.5	0.15	0.15
92	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	92	1.5	0.15	0.15
93	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	93	1.5	0.15	0.15
94	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	94	1.5	0.15	0.15
95	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	95	1.5	0.15	0.15
96	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	96	1.5	0.15	0.15
97	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	97	1.5	0.15	0.15
98	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	98	1.5	0.15	0.15
99	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	99	1.5	0.15	0.15
100	1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	100	1.5	0.15	0.15

Anexo A.3

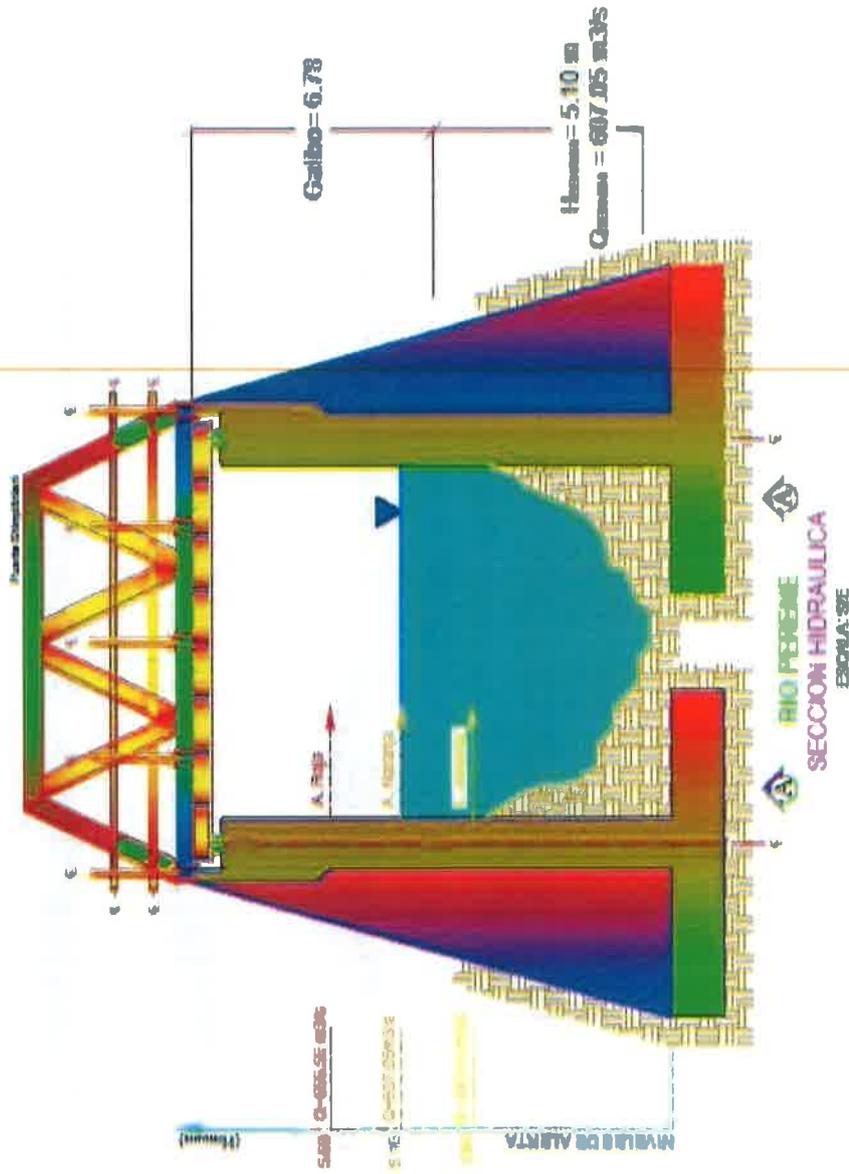
Plano de secciones transversales aguas arriba y aguas debajo de la estación hidrológica
CASO: Estación Huallape en el río Marañón



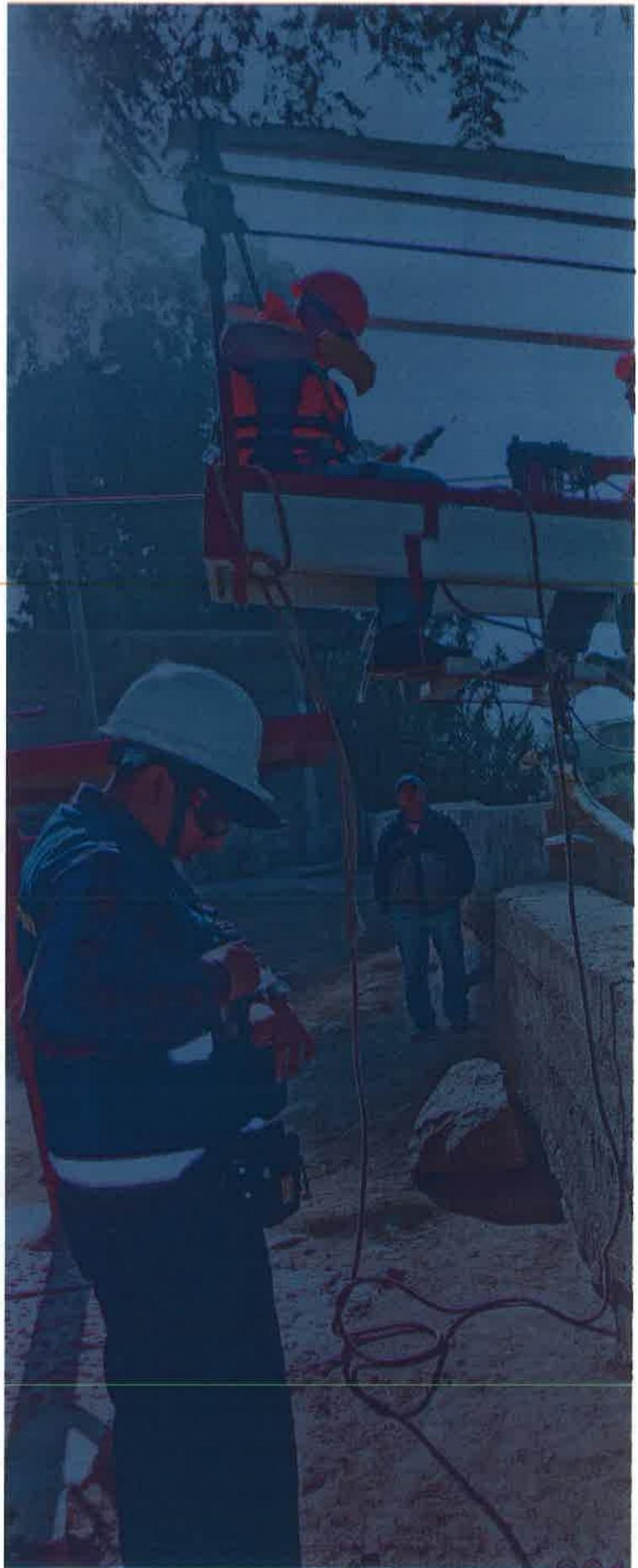
Anexo A.4

Delimitación de los niveles de alerta para la emisión de los avisos de crecidas. CASO: Estación hidrológica río Perené.

RÍO PERENÉ (HLC Río Perené)



→ Todas las dimensiones se encuentran en metros





Central telefónica: (511) 614-1414
Atención al usuario: (511) 470-2867
Dirección de Hidrología: (511) 614-1414 anexo 465

Consultas y sugerencias:
ofelipe@senamhi.gob.pe / hidrologia_dgh@senamhi.gob.pe

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI

