

Manual de Medición de Caudales



Guatemala, 2017

ISBN: 978-9929-8241-4-0



Créditos:

Elaborado por: Erick Alvarado

Aportes: Sergio Gil, Juan Andres Nelson y Hector Espinoza

Revisión: Paris Rivera, Lourdes Castilla y Robin de León

Guatemala 2017

ISBN: 978-9929-8241-4-0

Cita bibliográfica

ICC (Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático). 2017. Manual de medición de caudales. Guatemala. 18 p.

ÍNDICE GENERAL

1	Presentación.....	1
2	Introducción	1
3	Conceptos básicos.....	2
3.1	Hidrometría	2
3.2	Importancia	2
3.3	Secciones de control de aforo.....	2
3.4	Métodos de aforo.....	3
3.4.1	Método Volumétrico	3
3.4.2	Medidor Parshall	4
3.4.3	Método de vertederos y orificios.....	5
3.4.4	Método de Sección-Velocidad	8
4	Metodología de aforos adoptada por ICC (Método Sección-Velocidad)	8
5	Ejemplo de Aforo por el método de sección-velocidad, calculando con molinete OTT C31. ...	13
6	Glosario hidrológico	15
7	Referencias.....	16
8	Anexos.....	17

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Medidor Parshall	4
Figura 2	Vertedero rectangular sin contracciones.....	5
Figura 3	Vertedero rectangular con dos contracciones	6
Figura 4	Vertedero triangular.....	6
Figura 5	Vertedero trapezoidal	7
Figura 6	Vertedero circular	8
Figura 7	Secciones parciales de un cauce.	10
Figura 8	Mediciones de profundidad para cada sección del cauce.	11
Figura 9	Partes del molinete OTT C31	11
Figura 10	Boleta de campo para el cálculo del caudal.....	13
Figura 11	Hoja de cálculo para determinar el caudal.....	14
Figura 12	Componentes del molinete OTT C31	17

Figura 13 Aforo por el método de sección- velocidad.	17
Figura 14 Medición de la velocidad utilizando el molinete.....	18

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Espaciamientos de sondeo según el ancho del cauce.....	9
---	---

1 Presentación

Casi las tres partes de la superficie de nuestro planeta están cubiertas por agua, su ubicación y distribución no permiten utilizarla en su totalidad y de manera adecuada.

En la actualidad, existe un sinnúmero de problemas de orden social, político, productivo, ambiental y de salud ocasionados por la mala administración de los recursos hídricos.

El Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático basado en sus líneas de trabajo en manejo integral del agua genera información sobre caudales en los principales ríos de la vertiente del Pacífico de Guatemala; ya que gran parte de los problemas en la administración del agua radica en la deficiencia de contar con registros de caudales y esta información es básica para la planificación y manejo del agua por parte de los usuarios del recurso hídrico.

Dada la necesidad de generar información sobre hidrometría superficial, que es la que se encarga de medir, registrar, calcular y analizar los volúmenes de agua que circulan en una sección transversal de un río o arroyo, se presenta el manual técnico sobre la metodología que utiliza el Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático basado en las normas y aspectos técnicos-científicos viables para la estimación del caudal.

2 Introducción

La disminución en las lluvias tanto espacial y temporal ha afectado la recarga hídrica y así la poca escorrentía superficial en los ríos. Aunado a eso, la deficiente administración y uso irracional del agua por parte de los usuarios son los principales problemas que en la actualidad afectan a las comunidades y sector productivo; este hecho se evidencia en el bajo caudal de los ríos y lagunas, así como la mala distribución y uso del recurso hídrico, asociado a que el país no cuenta con una legislación sobre el recurso hídrico, esto hace que exista una mayor conflictividad social.

De ahí surge la necesidad de la medición de los caudales que permitan monitorear espacial y temporalmente los afluentes, en lugares estratégicos en los cuales se estime la cantidad de agua que circula en los distintos puntos de la cuenca y se construya una base de datos que ayude a tomar decisiones sobre el manejo integral del agua con los diferentes usuarios del agua.

Este manual pretende, con una metodología de fácil aplicación, proporcionar a los interesados en la temática de la estimación de caudales una herramienta para la medición de la cantidad de agua en ríos y canales de distribución de agua superficial.

3 Conceptos básicos

3.1 Hidrometría

La Hidrometría se encarga de medir, registrar, calcular y analizar los volúmenes de agua que circulan en una sección transversal de un río, canal o tubería en la unidad de tiempo.

3.2 Importancia

La hidrometría permite conocer los datos de caudales y volúmenes en forma oportuna y veraz. La información hidrométrica también permite lograr una mayor eficiencia en la programación, ejecución y evaluación del manejo integral del agua. (Organización Meteorológica Mundial, 2011)

El uso de una información hidrométrica ordenada permite:

- a. Dotar de información para los pronósticos de la disponibilidad de agua, esta información es importante para elaborar el balance hídrico y planificar la distribución del agua de riego.
- b. Monitorear la ejecución de la distribución del agua.
- c. La información hidrométrica también permite determinar la eficiencia en el sistema de riego y de apoyo para la solución de conflictos.

3.3 Secciones de control de aforo

Se refiere al punto donde se efectúa la medición del caudal, en una sección transversal de un río. (Organización Meteorológica Mundial, 2011).

Esta sección además, debe cumplir con ciertas características importantes como:

- a) accesibilidad, es decir, que debe existir un poblado cercano o carretera de fácil acceso.
- b) ubicación del tramo de aforo, el cual debe ser estable para que no suceda sedimentación o erosión del mismo
- c) rangos de velocidad del agua del río entre 0.1 a 2.5 m/s.
- d) sección homogénea a lo largo del tramo, tanto arriba como abajo del punto de aforo.
- e) ubicación donde el flujo de agua sea calmado con la menor influencia de turbulencia
- f) libre de malezas o cualquier otro obstáculo que pueda provocar imprecisiones en la medición, principalmente arriba del punto de medición.

g) Tanto arriba como abajo del punto de aforo debe estar libre de la influencia de puentes, presas y cualquier otra construcción que altere la medición

Existen varios tipos de secciones de aforo:

a. Sección de forma natural

Tienen la característica que su área es variable, teniendo el problema que en ella se produce mucha sedimentación o erosión, lo que impide la toma de caudales exactos principalmente en época lluviosa.

b. Sección con tablonces

Este tipo de puntos de aforo, se caracteriza por poseer tablonces enterrados en las orillas del río, obteniéndose una figura o forma geométrica regular, donde se puede calcular el área de la sección y donde no se tendrán muchos problemas de sedimentación o erosión como en el caso anterior.

c. Sección de concreto

Esta sección de aforo es la más ideal, debido a que nos expresa un área permanente o invariable en el tiempo, pero tiene el inconveniente de su elevado costo y trabajos en el cauce del río, así como su mantenimiento.

3.4 Métodos de aforo

Los métodos prácticos de aplicación más utilizados son: (Organización Meteorológica Mundial , 2011).

1. Método volumétrico
2. Medidor Parshall
3. Método de vertederos y orificios
4. Método de sección-velocidad, calculando la velocidad con:
 - Flotador
 - Molinete

3.4.1 Método Volumétrico

Es usado para corrientes pequeñas como nacimientos de agua o riachuelos, siendo el método más exacto, a condición de que el depósito sea bastante grande y de que pueda medir su capacidad de forma precisa.

Consiste en hacer llegar un caudal a un depósito impermeable cuyo volumen sea conocido y contar el tiempo total en que se llena el depósito, así se obtiene:

$$Q = \frac{V}{T}$$

Donde:

Q = es el caudal expresado en m^3/s

V = volumen dado en m^3

T = Tiempo en segundos

Por lo tanto, este método es de utilización práctica, siempre que se trate de mediciones de pequeños caudales, en trabajos experimentales o para tener una idea rápida del caudal aportado por determinado riachuelo.

3.4.2 Medidor Parshall

Método ideado por Ralph Parshall (1,920), el cual se utiliza en el aforo de canales y pequeños ríos, se recomienda para canales de riego de poca pendiente, en drenes, donde no es conveniente instalar estructuras como vertederos que alteren el régimen del escurrimiento.

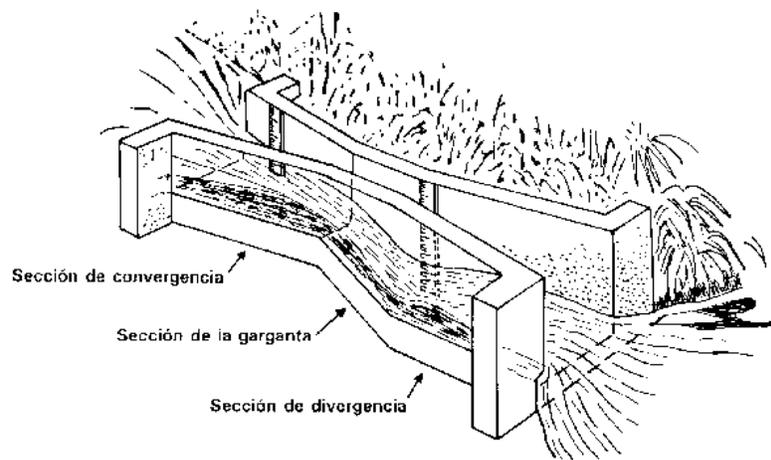


Figura 1. Medidor Parshall.

Fuente: <http://www.hidrojing.com/canal-parshall-casi-cien-anos-midiendo-caudales/>

$$Q = C \times (H)^n$$

Donde:

Q = es el caudal expresado en m^3/s

H = Altura de la lámina de agua

C y n = Son coeficientes que dependen de las dimensionales del canal.

3.4.3 Método de vertederos y orificios

Consiste esencialmente en interponer un tabique ante una corriente de manera que se dé una caída de agua que pase a través de una sección predeterminada. Conociendo las características del vertedero o del orificio que se engloban en el factor (determinado experimentalmente), la sección de la lámina de agua que pasa por ellos y la velocidad teórica de caída libre.

a. Vertedero rectangular sin contracciones

El vertedero rectangular es uno de los más sencillos para construir y por este motivo es uno de los más utilizados.

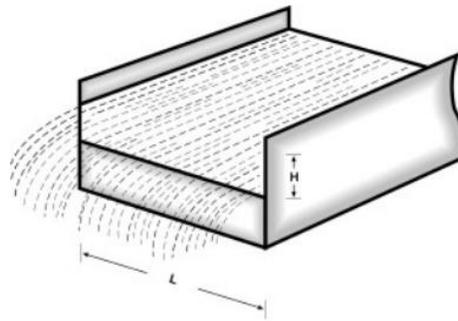


Figura 2. Vertedero rectangular sin contracciones.

$$Q = 1.84 L \times H^{3/2}$$

Donde:

Q = Caudal que fluye por el vertedero, en m³/s

L = Ancho de la cresta, en m

H = Carga del vertedero, en m

b. Vertedero rectangular con dos contracciones

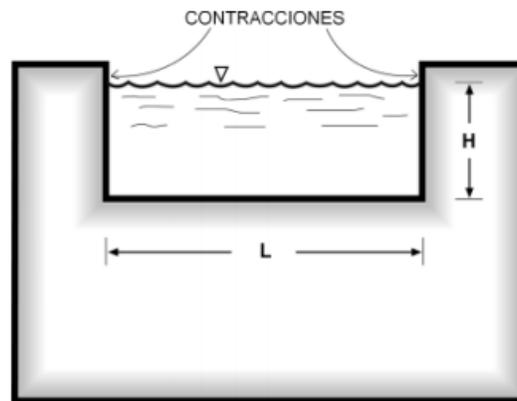


Figura 3. Vertedero rectangular con dos contracciones.

$$Q = 1.84 (L - 0.2H) \times H^{3/2}$$

Donde:

Q = Caudal que fluye por el vertedero, en m³/s

L = Ancho de la cresta, en m

H = Carga del vertedero, en m

c. Vertedero triangular

Los vertederos triangulares permiten obtener medidas más precisas de las alturas de carga (H) correspondientes a caudales reducidos. Por lo general son construidos de placas metálicas. En la práctica únicamente se utilizan los que tienen forma isósceles, siendo los más usuales los de 90°.

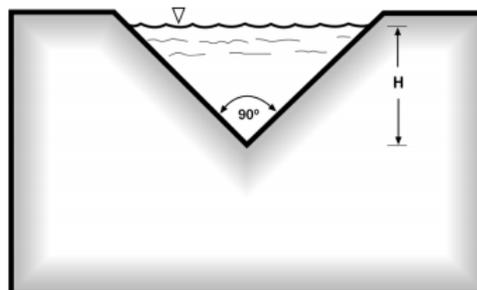


Figura 4. Vertedero triangular.

$$Q = 1.4 \times H^{5/2}$$

Donde:

Q = Caudal que fluye por el vertedero, en m^3/s

H = Carga del vertedero, en m

d. Vertedero trapezoidal

Es un vertedero como su nombre lo indica con forma trapezoidal en su abertura, también conocido como vertedero Cipolletti. El talud será 1:4 (1 horizontal para 4 vertical).

Este vertedero es de construcción más dificultosa que los dos anteriores, razón por la cual es menos utilizado.

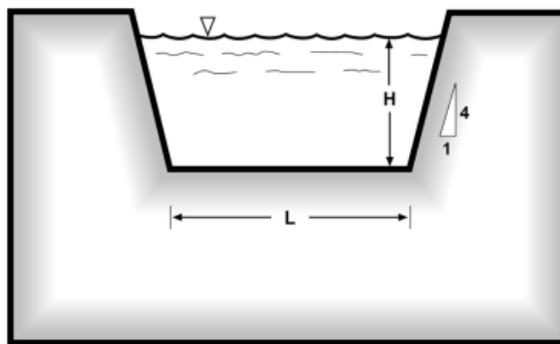


Figura 5. Vertedero trapezoidal.

$$Q = 1.859 \times L \times H^{3/2}$$

Donde:

Q = Caudal que fluye por el vertedero, en m^3/s

L = Ancho de la cresta, en m

H = Carga del vertedero, en m

e. Vertedero circular

Su utilización es menos común que los anteriores, presentando como ventajas: la facilidad en su construcción, así como no requerir el nivelamiento de su cresta debido a su forma geométrica.

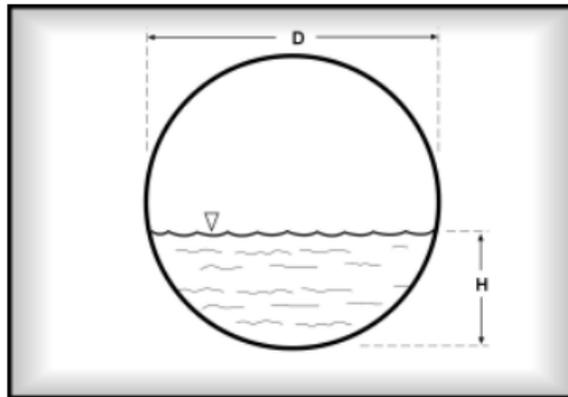


Figura 6. Vertedero circular.

$$Q = 1.518 \times D^{0.693} \times H^{1.807}$$

Donde:

Q = Caudal que fluye por el vertedero, en m³/s

D= Diámetro del círculo, en m

H = Carga del vertedero, en m

3.4.4 Método de Sección-Velocidad

En este método se determinan separadamente la sección transversal del cauce y la velocidad del agua; la sección se determina por medio de sondeos o algún otro procedimiento topográfico y la velocidad por cualquiera de los métodos con molinete, flotador o pendiente hidráulica.

De tal manera que el caudal del río estará dado por:

$$Q = A \times V$$

Donde:

Q = Caudal del agua, en m³/s

A = Área de la sección transversal, en m²

V = Velocidad media del agua, en m/s

La dificultad principal es determinar la velocidad media porque varía en los diferentes puntos de la sección hidráulica.

4 Metodología de aforos adoptada por ICC (Método Sección-Velocidad)

Éste método es el más usado para aforar corrientes superficiales de agua. Consiste básicamente en medir la velocidad en varios puntos de la sección transversal de una

corriente. Así mismo, en determinar la sección a través de la medición de profundidades en la sección transversal del río, para después calcular el gasto por medio de la ecuación de continuidad.

$$Q = A \times V$$

Donde:

Q = Caudal del agua, en m³/s

A = Área de la sección transversal, en m²

V = Velocidad media del agua, en m/s

Antes de estimar el área de la sección y la velocidad es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

a. Determinación del área de la sección

El método para determinar el área de la sección, depende de las condiciones del cauce del río o canales sin revestimiento. Para cauces variables donde el nivel de la corriente sufre cambios considerables mientras se hace el aforo, se recomienda medir sucesivamente las profundidades y las velocidades, conforme se avanza de un extremo a otro de la sección.

Se utiliza un estadal o tubo graduado con escalas en metros para determinar las profundidades de la sección transversal.

La determinación del área de la sección es la siguiente:

- a) Una vez determinada la zona donde se efectuará la medición se deberá colocar dos estacas, una en cada orilla y fijándose que la línea que las une, sea perpendicular a la dirección del río para determinar el ancho del mismo.
- b) Dividir el ancho del cauce en tramos de acuerdo al cuadro 1.

Cuadro 1. Espaciamientos de sondeo según el ancho del cauce.

Ancho del Cauce (m)		Espaciamiento (m)
De:	A:	
0	1	0.20
1	2	0.25
2	4	0.50
4	8	1.00
8	15	1.50
15	25	2.00
25	50	3.00
50	75	4.00
75	125	5.00

- c) Obtener la profundidad al principio y al final de cada tramo como se muestra en la figura 7 y obtener la profundidad media y ancho de cada sección para generar el área por cada tramo medido de la sección transversal.

$$A1 = \frac{a + b}{2} \times L + A2 = \frac{a + b}{2} \times L \dots \dots \dots A10 = \frac{a + b}{2} \times L$$

Donde:

A1: Es el área de la sección, en m²

a: profundidad inicial del tramo, en m

b: profundidad final del tramo, en m

L: Ancho de la sección, en m

$$Area\ total = \sum A1 + A3 \dots A9 + A10$$

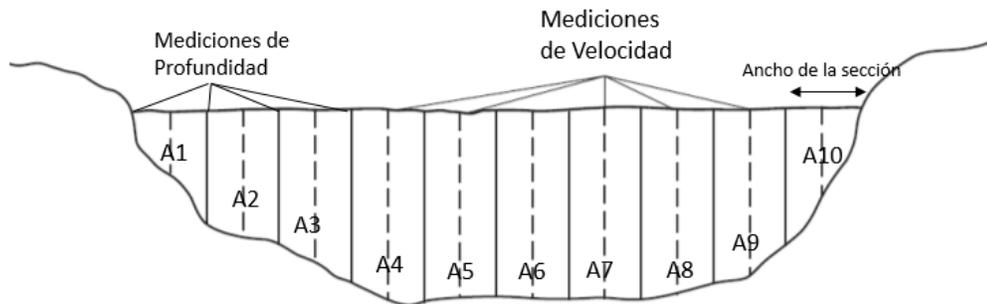


Figura 7. Secciones parciales de un cauce.



Figura 8. Mediciones de profundidad para cada sección del cauce.

b. Determinación de la velocidad por medio del molinete

Esta se efectuará por medio de flotadores o molinetes; el ICC por ser un ente investigativo determina las velocidades a través de molinetes marca OTT C-31.

Estos aparatos son provistos de una hélice o una rueda de copas, la cual gira al chocar el agua de la corriente sobre ella; también son llamados correntómetros. El movimiento de rotación de la hélice es más rápido cuanto mayor sea la velocidad de la corriente de agua.

El molinete está compuesto básicamente como lo muestra la figura 9; por su hélice, OTT-C31, barra, cables de conexión y contador.

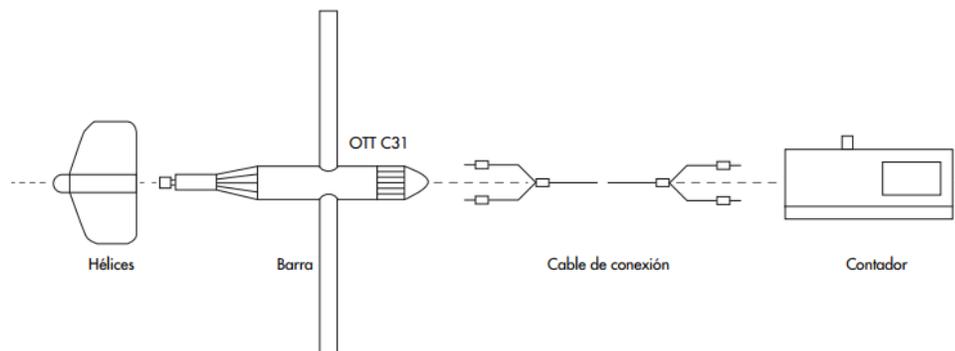


Figura 9. Partes del molinete OTT C31.

La velocidad se determina mediante el número de vueltas que la hélice ejerza sumergida por cierto tiempo (30 a 50 segundos), este lo registra en el contador y automáticamente expresa la velocidad en metros/segundo.

Los métodos para obtener la velocidad media en cada área parcial, empleando el molinete, se diferencian esencialmente por la profundidad a la cual se hacen las mediciones de la velocidad en la vertical. Los más empleados son:

a) Método de los 6/10

Es el método más empleado y práctico por lo que se adoptó por parte de ICC para el cálculo de velocidad.

Dicho método consiste en colocar el molinete a un 60 % de la profundidad del punto sondeado (0.6 H), contando a partir de la superficie del agua hacia abajo. Este método se basa en que a esta profundidad, la velocidad del agua es casi igual a la velocidad media en la vertical del punto en que se está haciendo la observación.

b) Método de los 2/10 y 8/10

Se emplea cuando se requiere una mayor aproximación, es el llamado método de los dos puntos, es este se efectúan dos medidas de la velocidad uno a 20 % (0.2 H) de la profundidad y otro a 80 % (0.8 H), contados a partir de la superficie del agua. El promedio de las dos velocidades será la velocidad en el área parcial.

c) Método de varios puntos

Se emplea cuando se requiere gran precisión del caudal y la profundidad de corriente es mayor a 3 m, y las condiciones de la corriente lo permitan. Generalmente se hace una medición superficial y una cerca del fondo, intercalando mediciones adicionales entre estas dos a intervalos comprendidos entre 20 y 80 % (0.2H, 0.6H, 0.8H) de la profundidad. El promedio de las velocidades será la velocidad buscada.

d) Método de la superficie

Cuando la velocidad del agua es mayor a 2.5 m/s, es preferible prescindir de las observaciones profundas, debido a la dificultad de mantener el molinete en posición vertical, como por el peligro de que sufra desperfectos al ser golpeado por los objetos que transporta la corriente. En este caso se recomienda mediciones a 0.15 m de la profundidad, la velocidad media se obtiene a partir de la velocidad superficial.

$$Vm = 0.90 \times Vs$$

Donde:

Vm: velocidad media, en m/s

Vs: Velocidad superficial a 0.15 m de la profundidad, en m/s

No.	Profundidad (b)	Profundidad (B)	Sector (m)	Área (m ²)	Vel (m/s)	Caudal Q (m ³ /s)
1	0.05	0.40	3.00	0.68	0.10	0.07
2	0.40	0.50	3.00	1.35	0.07	0.10
3	0.50	0.61	3.00	1.67	0.23	0.38
4	0.61	0.80	3.00	2.12	0.33	0.70
5	0.80	1.05	3.00	2.78	0.52	1.44
6	1.05	1.20	3.00	3.38	0.59	1.99
7	1.20	1.30	3.00	3.75	0.75	2.81
8	1.30	1.20	3.00	3.75	0.75	2.81
9	1.20	0.80	3.00	3.00	0.12	0.37
10	0.80	0.40	3.00	1.80	0.11	0.20
11	0.40	0.20	2.00	0.60	0.10	0.06
		Ancho río:	32.00		Total m³/s	10.93
					Total gal/m	173293.07

Figura 11. Hoja de cálculo para determinar el caudal.

Conclusiones:

Después de realizar el levantamiento de datos en campo, se trabaja en gabinete para determinar el caudal mediante una hoja de Excel (figura 11), el cual estima la cantidad de agua que lleva la corriente del Río Madre Vieja en ese momento específico del día.

La respuesta del problema es que el río Madre Vieja a esa hora específica posee un caudal de 10.93 m³/s.

6 Glosario hidrológico

- a. **Aforo de caudales.** Es el conjunto de operaciones para determinar el caudal en un curso de agua para un nivel observado.
- b. **Agua superficial.** Agua que fluye o se almacena en la superficie del terreno.
- c. **Aguas arriba.** Aguas en dirección hacia la cabecera o nacimiento del río.
- d. **Aguas abajo.** En la dirección de la corriente en un río o curso de agua.
- e. **Alerta hidrológica.** Información sobre un fenómeno hidrológico esperado que se considera peligroso.
- f. **Caudal.** Volumen de agua que pasa a través de una sección transversal del río en la unidad de tiempo, se expresa en metros cúbicos por segundo m³/s o litros por segundos.
- g. **Caudal de Estiaje.** Caudal de agua en una corriente durante un periodo seco prolongado.
- h. **Cambio climático.** Se llama cambio climático a la modificación del clima con respecto al historial climático a una escala global o regional. El cambio climático es debido a causas naturales y, en los últimos siglos, también a la acción de la humanidad.
- i. **Ciclo hidrológico.** Es la sucesión de fases por las que pasa el agua en su movimiento de la atmósfera a la tierra y en su retorno a la misma: evaporación del agua del suelo, mar y aguas continentales, condensación del agua en forma de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o en masas de agua y re evaporación.
- j. **Cuenca hidrográfica.** Se define como una unidad territorial en la cual el agua que cae por precipitación o por fusión de la nieve se reúne y escurre a un punto común o que fluye toda al mismo río, lago, o mar. En esta área viven seres humanos, animales y plantas, todos ellos relacionados.
- k. **Curso de agua.** Cauce natural o artificial a lo largo o a través del cual puede fluir el agua.
- l. **Hidrología.** Es la ciencia que estudia las aguas superficiales y subterráneas de la Tierra, y su aparición, circulación y distribución, tanto en el tiempo como en el espacio, sus propiedades biológicas, químicas y físicas, sus reacciones con el entorno, incluyendo su relación con los seres vivos.
- m. **Hidrometría.** Es la ciencia que trata de la medición y análisis del agua incluyendo métodos, técnicas e instrumentos utilizados en hidrología.
- n. **Hidrografía.** Ciencia que trata de la descripción y medición de masas de agua con lámina libre, por ejemplo océanos, lagos, etc. En particular, cartografía de masas de agua para fines de navegación.

- o. **Lecho del río.** Parte inferior de un valle fluvial, conformada por el flujo de agua, y a lo largo de la cual se mueven la mayor parte del caudal y los sedimentos, en los periodos intercrecidas.
- p. **Precipitación.** Son elementos líquidos o sólidos procedentes de la condensación del vapor de agua que caen de las nubes o son depositados desde el aire en el suelo.
- q. **Red hidrográfica.** Conjunto de ríos y otros cursos de agua permanentes o temporales, incluyendo lagos y embalses en una zona determinada.
- r. **Río.** Corriente de agua que sirve de canal natural de drenaje en una cuenca de drenaje.
- s. **Variable hidrológica.** Variable relativa al ciclo hidrológico como por ejemplo nivel de agua, caudal o precipitación.
- t. **Hidrometeorología.** Estudio de las fases atmosférica y terrestre en el ciclo hidrológico, en especial de sus interrelacione.

7 Referencias

- Agricultura, M. d. (2005). *Manual de hidrometría*. Uruguay: Universidad de la Republica Uruguay. Obtenido de <https://www.fing.edu.uy/imfia/cursos/hidrometria/material/hidrometria.pdf>
- Espinoza, H. (2016). *Propuesta para homologar metodologías en el aforo de caudales*. Guatemala.
- Herrera Ibáñez, I. R. (1995). *Manual de hidrología*. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 1995.
- IMEPRE. (2001). *Acotaciones para el cálculo de caudales hidrológicos*. Guatemala.
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Metereología e Hidrología-INSIVUMEH. (2003). *Ríos de Guatemala*.
- Organización Meteorológica Mundial . (2011). *Guía de prácticas hidrológicas. OMM-No. 168* (Sexta ed., Vol. I). Ginebra.
- Organización Meteorológica Mundial. (1994). *Glosario Hidrológico Internacional* (Segunda ed., Vol. II). Ginebra.

8 Anexos



Figura 12. Componentes del molinete OTT C31.



Figura 13. Aforo por el método de sección- velocidad.



Figura 14. Medición de la velocidad utilizando el molinete



Instituto Privado de Investigación
sobre Cambio Climático