

## AFOROS



Edición 2024

Federico Vilaseca

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA)  
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay

[fvilaseca@fing.edu.uy](mailto:fvilaseca@fing.edu.uy)

# INTRODUCCIÓN

## Bibliografía

- ❖ Chow V.T.; Maidment, D.R. & Mays, L.W. (1994), *Hidrología Aplicada*.
- ❖ Chow V.T (1994). *Hidráulica de canales abiertos*.
- ❖ U.S.B.R. (2001), *Water Measurement Manual* (<https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/wmm/>)
- ❖ Sauer, V.B. & Turnipseed, D.P. (2010). *Stage Measurement at Gaging Stations*. U.S.G.S. Techiques and Methods 3-A7 (<https://pubs.usgs.gov/tm/tm3-a7/tm3a7.pdf>)
- ❖ Turnipseed, D.P & Sauer, V.B. (2010). *Discharge Measurement at Gaging Stations*. U.S.G.S. Techiques and Methods 3-A8 (<https://pubs.usgs.gov/tm/tm3-a8/tm3a8.pdf>)
- ❖ Bentancor et al. (2018), *Tecnologías de medición y transmisión de datos en sistemas de riego por gravedad*, INIA FPTA -292. (<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/11070/1/INIA-FPTA-66-292-Riego-Arroz-y-Pasturas.pdf>)

# INTRODUCCIÓN

## ¿Qué es aforar?

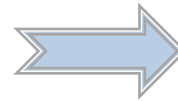
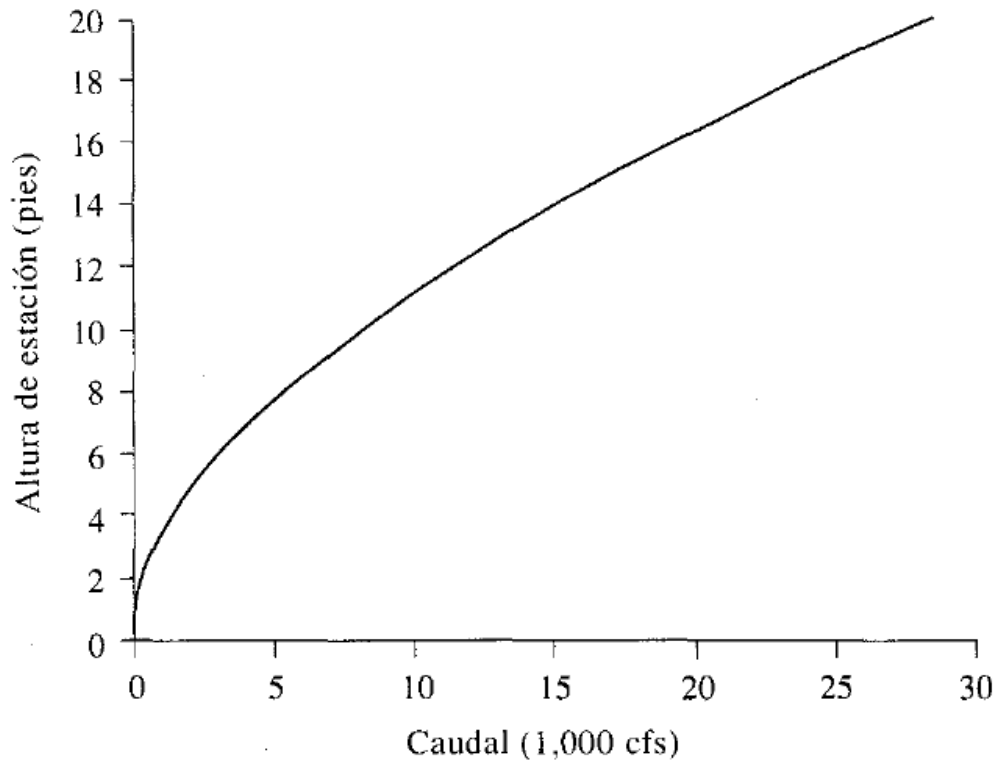
- ❖ Determinar, a través de mediciones, el caudal líquido que pasa por una sección dada en un cauce o canal.

## ¿Para qué aforar?

- ❖ Obtener información sobre los procesos hidrológicos de escorrentía superficial.
- ❖ Cuantificar volúmenes de agua disponibles para su adecuada gestión y distribución.
- ❖ Obtener datos de entrada a modelos de simulación hidrológica, para diseño, predicción, análisis y toma de decisiones.

# INTRODUCCIÓN

Los métodos de aforo tradicionales buscan determinar una curva que vincule el nivel del pelo de agua y el caudal circulante en una sección dada. ¿Por qué?



Para generar esta curva es necesario medir nivel y caudal

Figura extraída de Chow (1994).

# CONTENIDOS

## 1) Medición de niveles

## 2) Medición de caudales

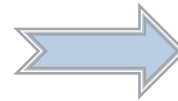
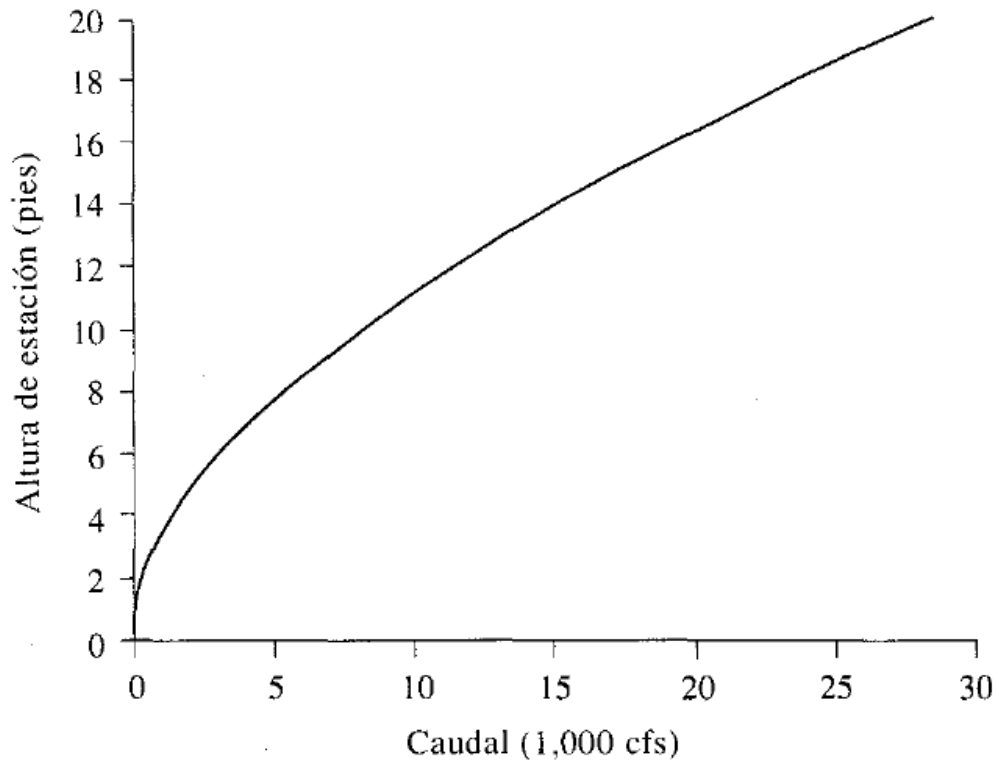
- A) Estructuras de control
- B) Correntómetros
- C) Perfiladores acústicos
- D) Trazadores

## 3) Curvas de aforo



# INTRODUCCIÓN

Los métodos de aforo tradicionales buscan determinar una curva que vincule el nivel del pelo de agua y el caudal circulante en una sección dada. ¿Por qué?



Para generar esta curva es necesario medir nivel y caudal

Figura extraída de Chow (1994).



# MEDICIÓN DE NIVELES

## Reglas



# MEDICIÓN DE NIVELES

## Reglas





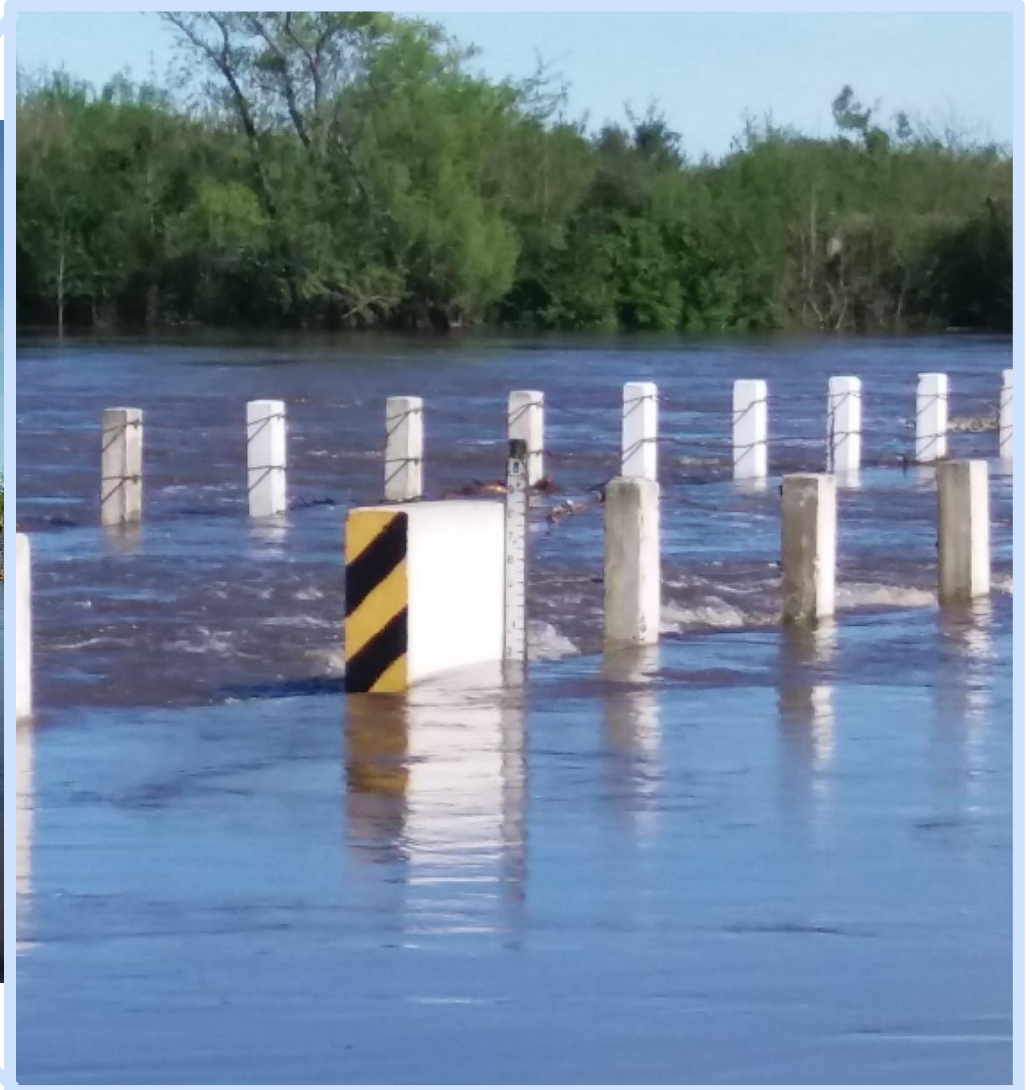
# MEDICIÓN DE NIVELES

## Reglas



# MEDICIÓN DE NIVELES

## Reglas



# MEDICIÓN DE NIVELES

## Sensores de presión sumergibles



\* Imágenes extraídas del manual 3-A7 del USGS “Stage Measurement at Gaging Stations”



# MEDICIÓN DE NIVELES

## Sensores de presión sumergibles



Cañada en Parque Salus

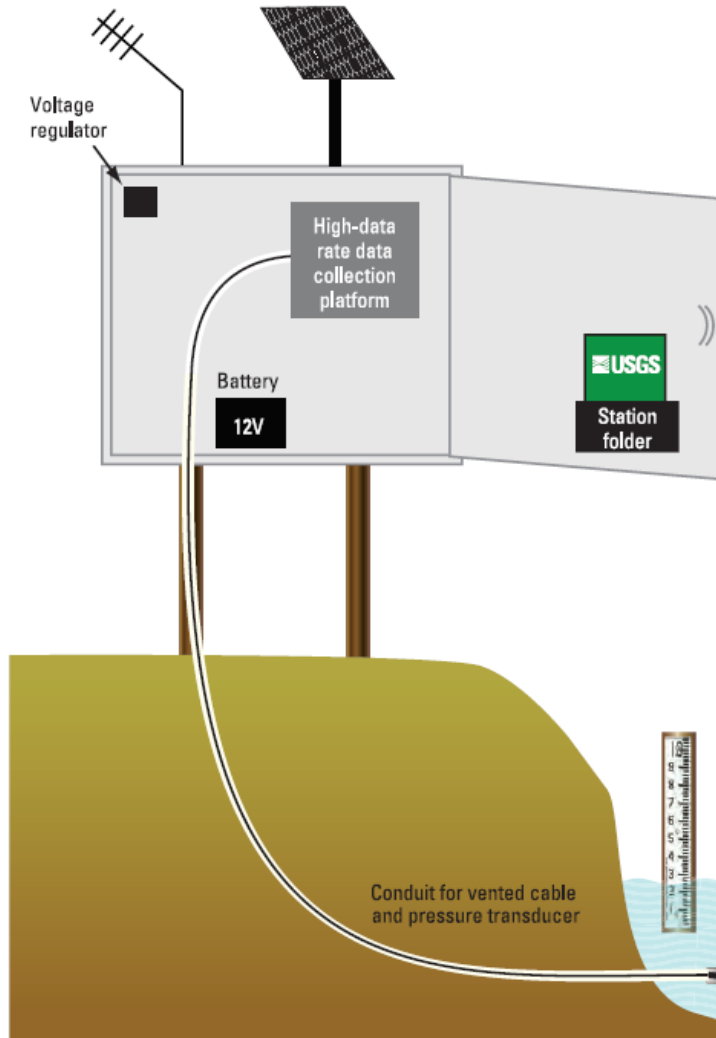


Arroyo Maldonado



# MEDICIÓN DE NIVELES

## Estaciones telemétricas



Río Daymán

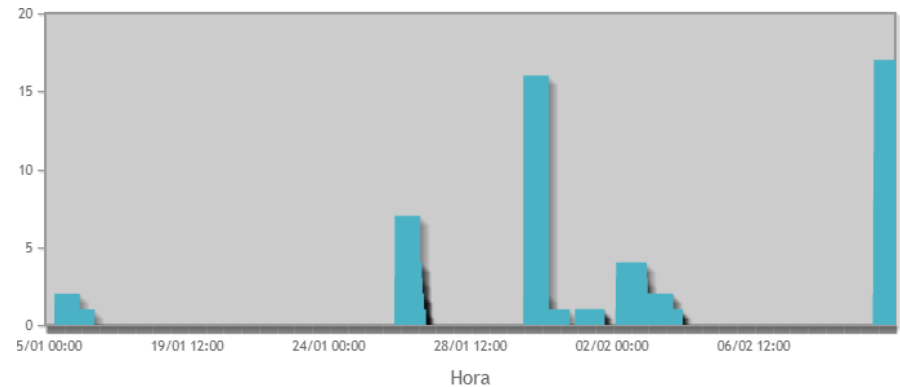
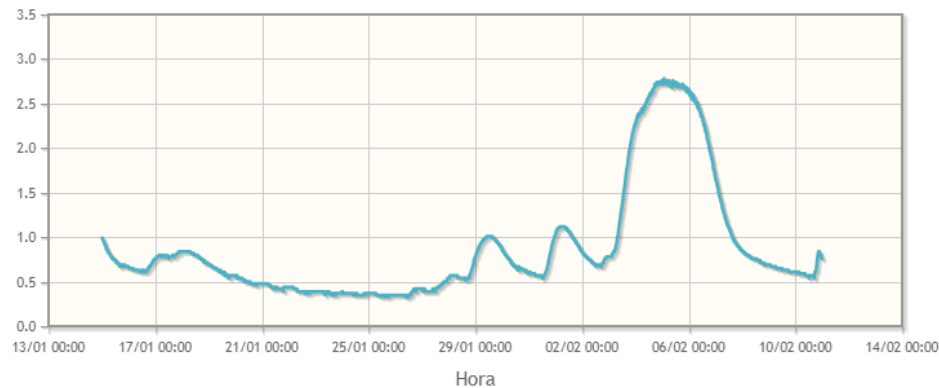
\* Figura extraída del manual 3-A7 del USGS "Stage Measurement at Gaging Stations"

# MEDICIÓN DE NIVELES

## Estaciones telemétricas

Descarga de datos de nivel en Uruguay:

- ❖ <https://www.ambiente.gub.uy/SIH-JSF/paginas/sdh/consultaHDMCApublic.xhtml>
- ❖ [https://www.saltogrande.org/mapa\\_estacion.php](https://www.saltogrande.org/mapa_estacion.php)



# MEDICIÓN DE NIVELES

## Otros métodos

\* Figuras extraídas del manual 3-A7 del USGS “Stage Measurement at Gaging Stations”



A



B

Medidor eléctrico



C



Radar



B

Flotador

# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Criterios para selección de métodos de medición:

- ❖ Precisión requerida en la medida.
- ❖ Costo a corto, mediano y largo plazo.
- ❖ Rango de caudales que se quiere medir.
- ❖ Posibles efectos ambientales (inundabilidad, sedimentos, etc.).
- ❖ Condiciones o restricciones del sitio (accesibilidad, presencia de remansos, confluencias, estructuras, etc.)
- ❖ Frecuencia requerida de las mediciones.
- ❖ Aspectos constructivos (si aplica).
- ❖ Vandalismo.



# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Medición mediante estructuras de control

Estos métodos de aforo se basan en la instalación de estructuras interpuestas en el flujo, para generar una sección de control.

### ¿Qué es una sección de control?

Es una sección en la que existe una condición que determina **una relación única entre el caudal circulante y el tirante en la misma**. Por lo tanto, si se conoce el tirante se puede calcular el caudal.

### ¿Cómo hacemos para generar una sección de control?

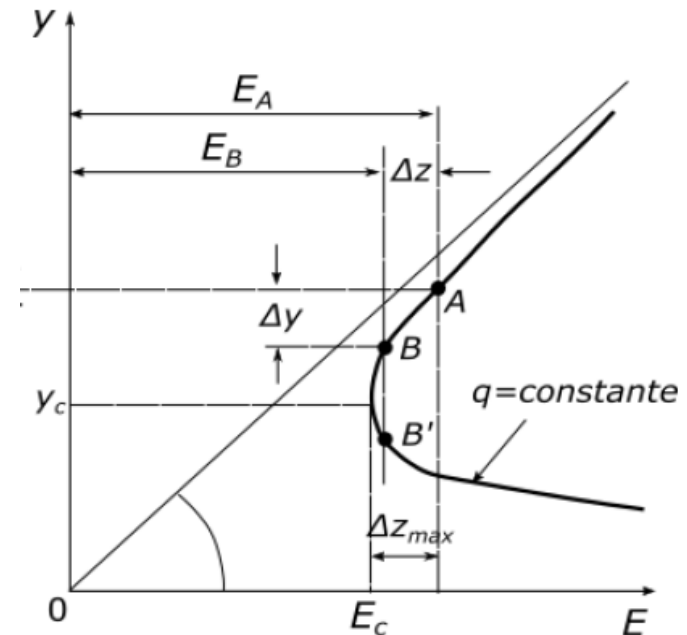
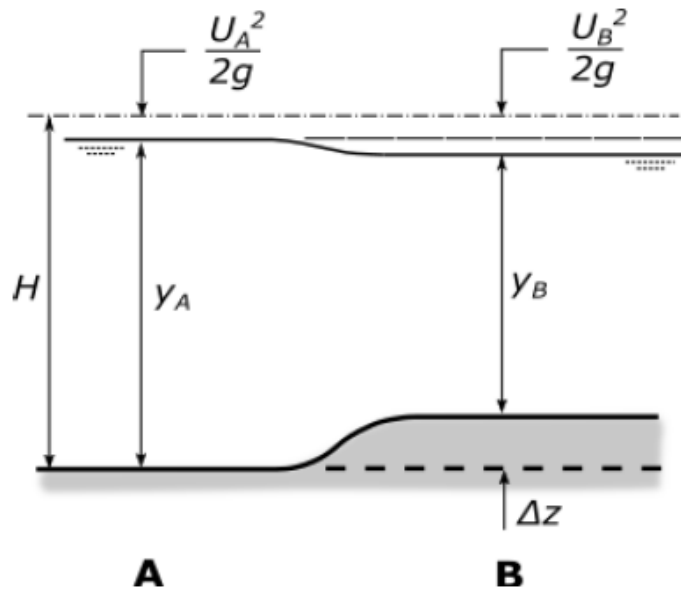
Imponiendo un tirante crítico mediante contracción lateral, sobreelevación del fondo o una caída libre.

# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Medición mediante estructuras de control

Ejemplo: escalón interpuesto en el flujo

- ❖ ¿Cuál es la condición para que se genere una sección de control?
- ❖ ¿Qué altura debe tener el escalón para que eso pase?



# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Medición mediante estructuras de control

Ejemplo: escalón interpuesto en el flujo

- ❖ ¿Cuál es la condición para que se genere una sección de control?

$$y_B = y_C \quad \Longrightarrow \quad E_B = E_C$$

- ❖ ¿Qué altura debe tener el escalón para que eso pase?

Por conservación de la carga:  $H_A = H_B$

Energía específica:  $E_A = y_A + U_A^2/2g$  (*carga respecto al fondo del canal*)

$$E_A = E_B + \Delta z$$

Entonces:  $\Delta z > E_A - E_C \quad \Longrightarrow$  Condición para que se forme la sección de control

# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Medición mediante estructuras de control

Ejemplo: escalón interpuesto en el flujo

$$\Delta z > E_A - E_C \implies \text{Condición para que se forme la sección de control}$$

¿La sección de control se forma para todo el rango de caudales?



# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Medición mediante estructuras de control

- ❖ Las condiciones ideales que se plantean en el ejemplo del escalón no suelen cumplirse.
- ❖ La curva nivel vs. caudal se obtiene a partir de la combinación de desarrollos teóricos derivados de la mecánica de los fluidos y ensayos físicos de laboratorio.
- ❖ Entre los métodos más comunes se encuentran:
  - Vertederos de pared delgada
  - Vertederos de pared gruesa
  - Canales Parshall (o similar)
  - Orificios
  - Compuertas

# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Vertederos de pared delgada

La sección de control se genera a través de un vertido por encima de una placa delgada (espesor del entorno de 2 mm o menos).

Hay una relación entre el tirante en la zona de aproximación y el caudal vertido ( $Q$  vs.  $h$ ), que depende de la geometría del vertedero. De esa forma se determina el caudal indirectamente a través de la medición de nivel.





# MEDICIÓN DE CAUDALES

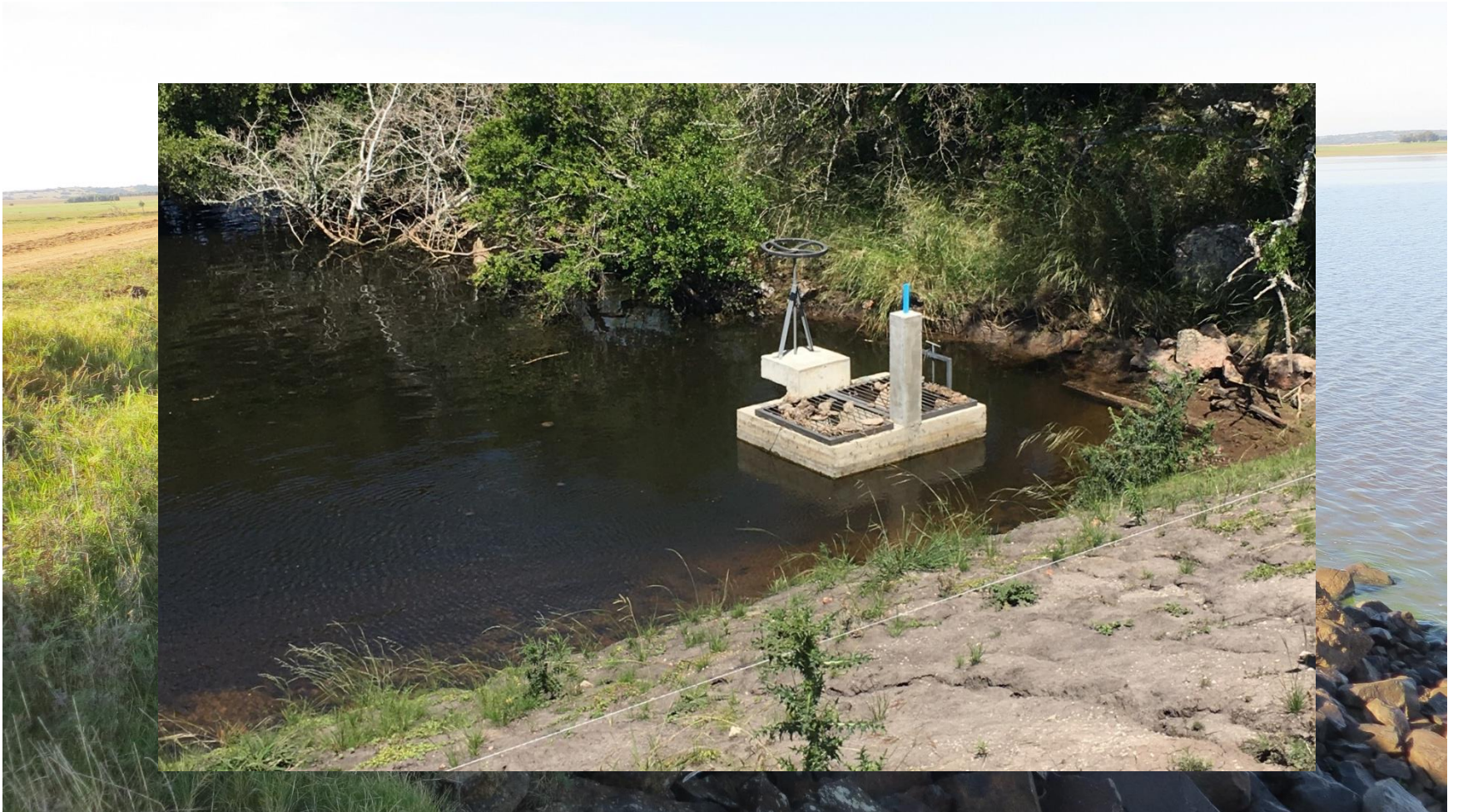
## Vertederos de pared delgada





# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Vertederos de pared delgada





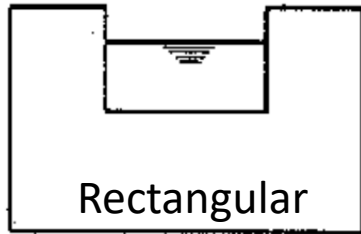
# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Vertederos de pared delgada



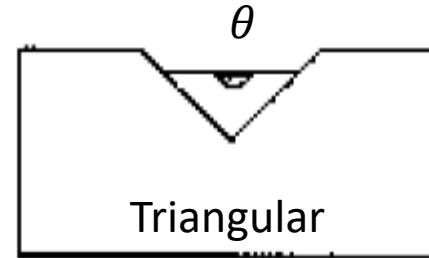
# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Vertederos de pared delgada



Rectangular

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \mu b h^{3/2}$$



Triangular

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \mu \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) h^{5/2}$$

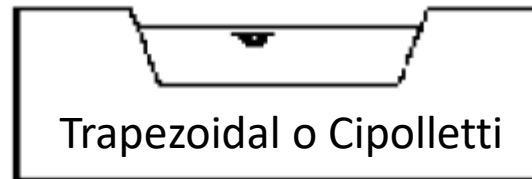
Siendo:

- ❖  $Q$  el caudal
- ❖  $\mu$  coeficiente de gasto empírico.
- ❖  $b$  el ancho del vertedero (caso rectangular)
- ❖  $h$  la altura sobre cota de vertido



# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Vertederos de pared delgada



# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Vertederos de pared delgada



Sección compuesta triangular + vertical

# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Vertederos de pared delgada

- ❖ Útiles en canales artificiales o cauces pequeños.
- ❖ Rango de caudales acotado.
- ❖ Se genera un remanso considerable.
- ❖ Tener en cuenta retención de sedimentos.
- ❖ Alto costo inicial, pero bajo costo de mantenimiento.
- ❖ Método preciso si funciona correctamente.

# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Vertederos de pared gruesa

Se extienden las formulaciones para el caso de pared delgada, agregando un coeficiente de descarga adicional  $\varepsilon$ .

Caso rectangular:  $Q = \varepsilon C_e b h^{3/2}$

Caso triangular:  $Q = \varepsilon C_e \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) h^{5/2}$



# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Vertederos de pared gruesa





# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Canales

En este caso no se impone un vertido sino una contracción lateral y/o elevación del fondo de modo de generar la sección de control sobre la estructura.



Canal Parshall

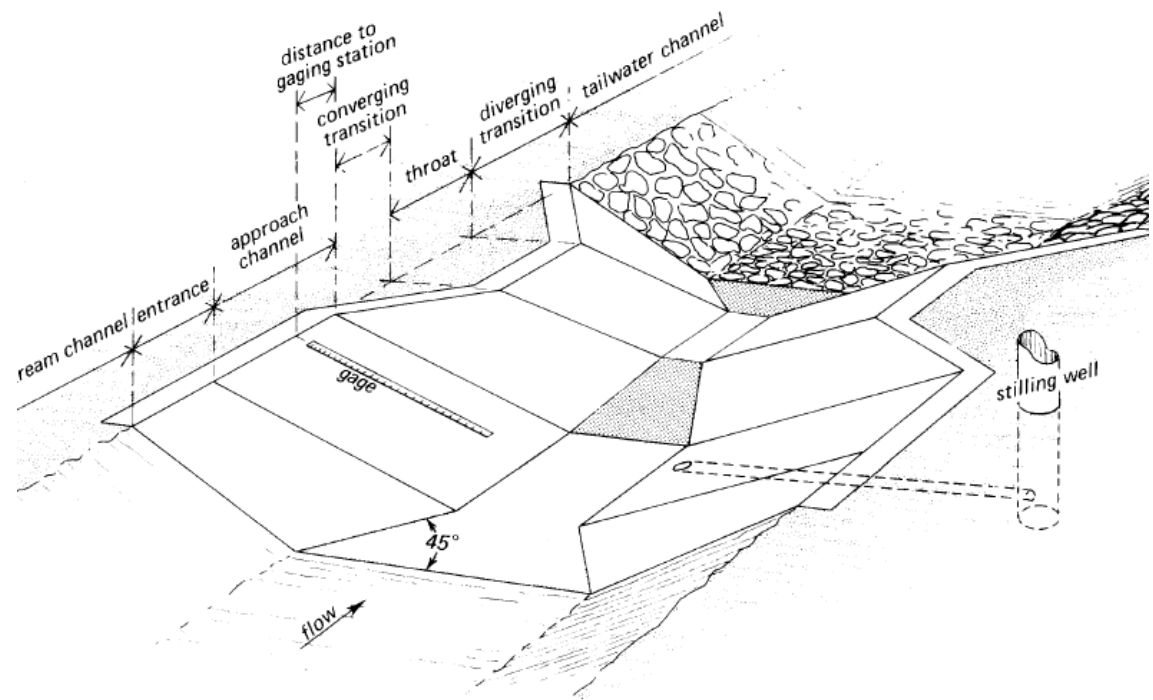


Figura extraída del manual del software WinFlume del USBR.

# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Canales



# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Canales

- ❖ Aplicable a canales de mayor tamaño que los de pared delgada.
- ❖ Se generan remansos menores que con los de pared delgada.
- ❖ En general mayor costo constructivo.
- ❖ No generan tantos problemas de retención de sedimentos.
- ❖ De todas formas método no apto ante gran variabilidad de caudales.
- ❖ Flexibilidad de diseño para adecuarse a cada caso de estudio.
- ❖ Hay diseños predeterminados y ampliamente estudiados (Parshall).



# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Canales



Fotografías  
extraídas de  
Bentancor et al.  
(2018).



# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Canales





# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Métodos basados en medición de velocidades

Se basan en el principio de conservación de la masa, por el cual:

$$Q = V \cdot A$$

Siendo:

- $Q$  el caudal
- $V$  la velocidad media del agua en la sección
- $A$  el área de flujo en la sección

Estos métodos requieren determinar:

1. La geometría de la sección transversal de flujo (relevamiento batimétrico)
2. La velocidad del agua en la sección

# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Métodos basados en medición de velocidades

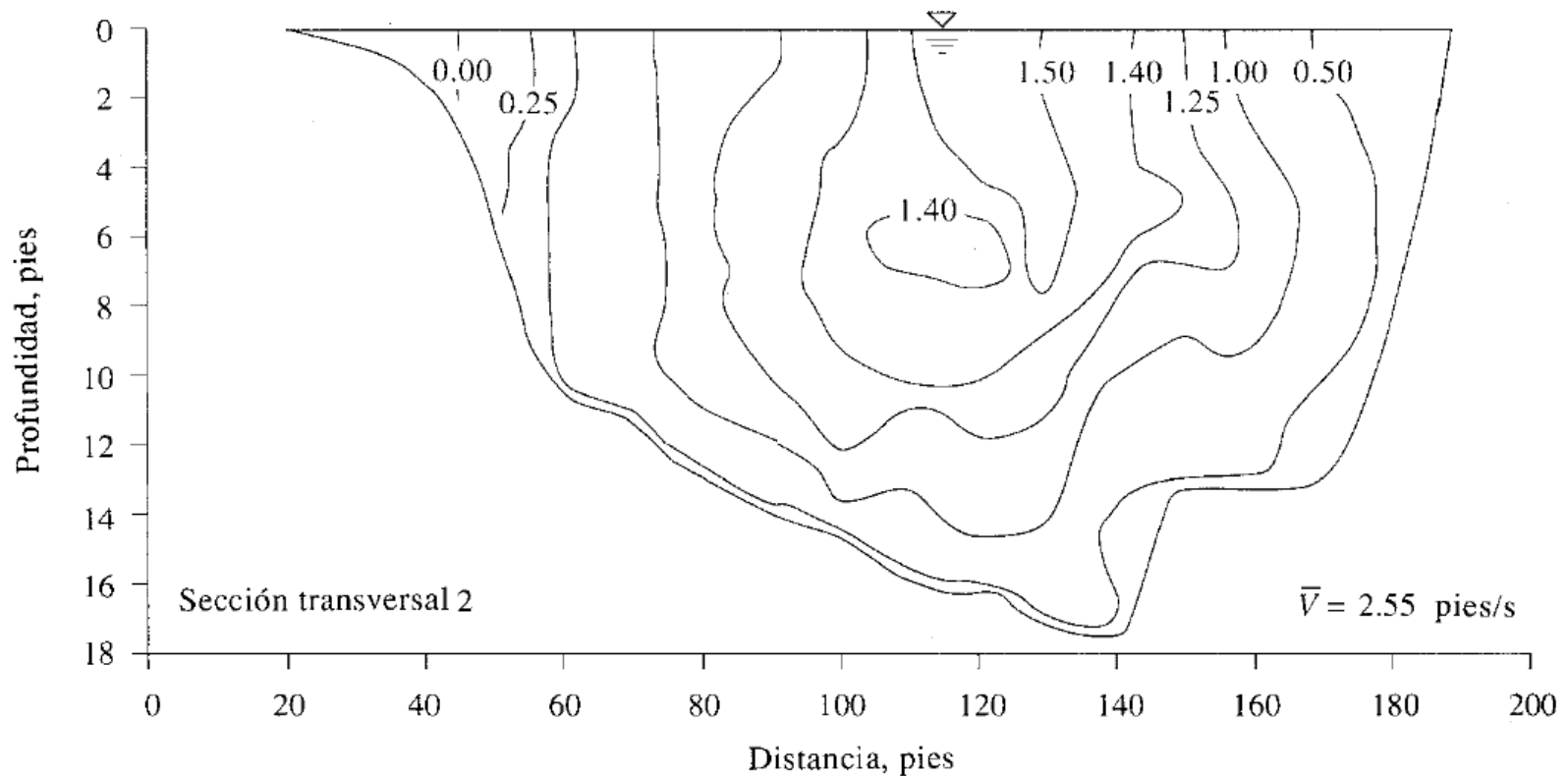


Figura extraída de Chow (1994).

# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Métodos de medición puntual

- ❖ Correntómetro de hélice.
- ❖ Correntómetro magnético
- ❖ Correntómetro acústico (ADV).

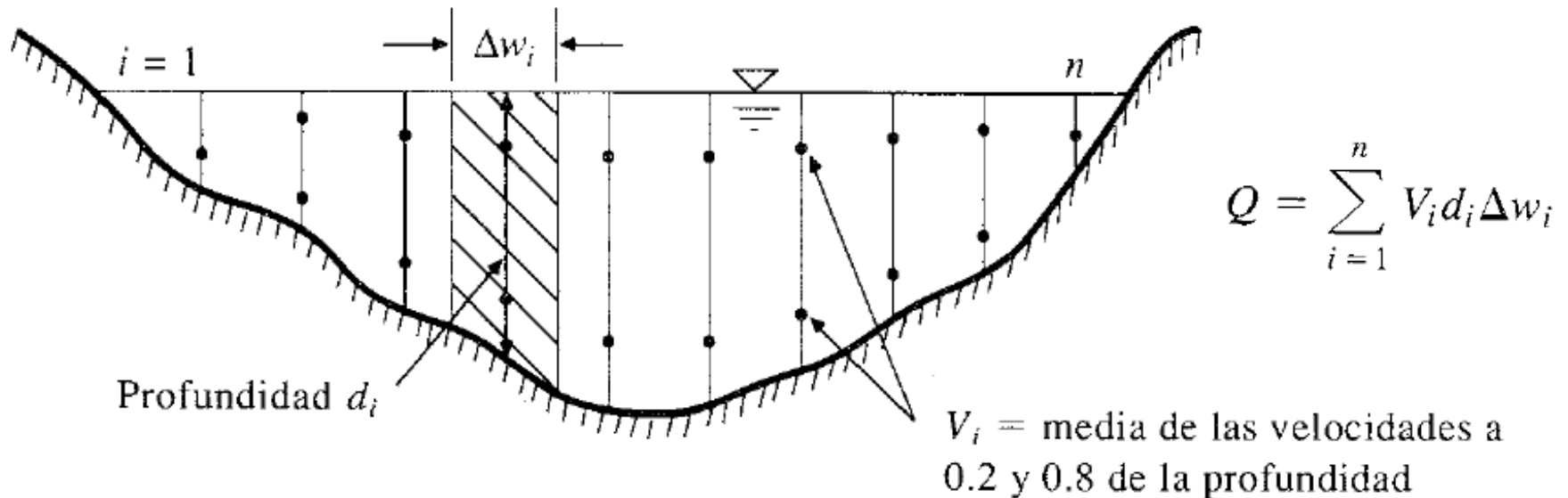
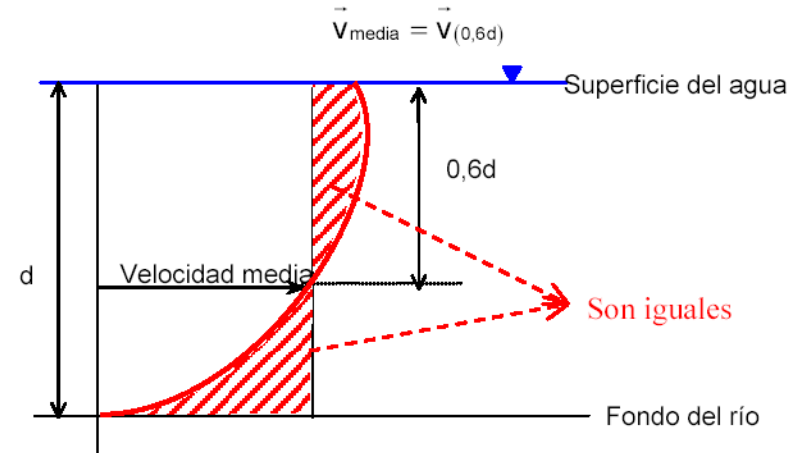
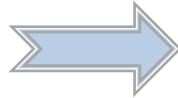


Figura extraída de Chow (1994).

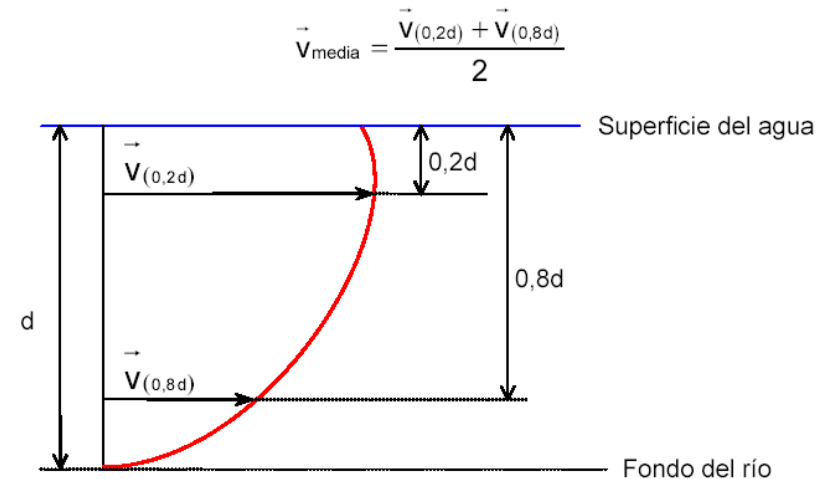
# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Métodos de medición puntual

❖ Profundidad < 0.6 m

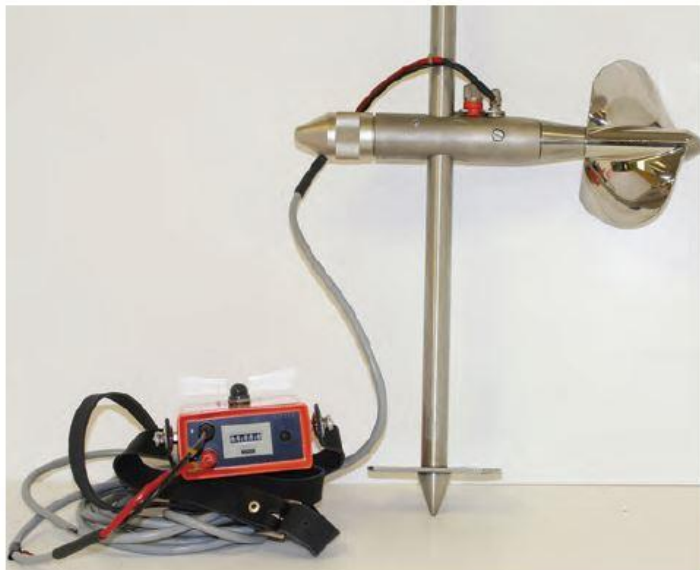


❖ Profundidad > 0.6 m



# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Correntómetro de hélice



\* Figuras extraídas del manual 3-A8 del USGS “Discharge Measurement at Gaging Stations”



# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Correntómetro de hélice

- ❖ Se cuenta la cantidad de vueltas por segundo que denominaremos  $n$
- ❖ La velocidad  $v$  es igual a  $v = K_1 \times n + K_2$
- ❖ Las constantes  $K_1$  y  $K_2$  son provistas por el fabricante.



[VIDEO 1](#)

[VIDEO 2](#)

# MEDICIÓN DE CAUDALES

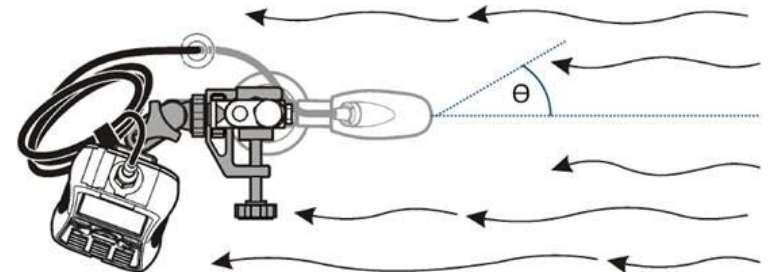
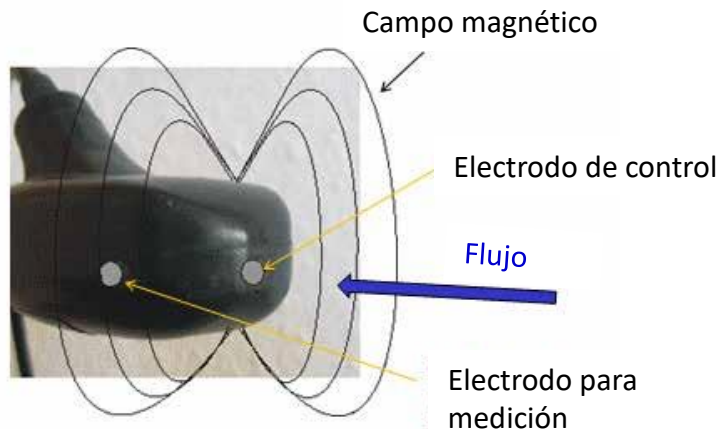
## Correntómetro de hélice

- ❖ Aplicable en cauces y canales de diversa escala.
- ❖ Puede usarse por vadeo o desde puentes.
- ❖ La medición desde puentes requiere equipamiento adicional (linga, grúa, medidor de profundidad), lo que la hace considerablemente más costosa.
- ❖ Mucho error al medir con velocidades y tirantes bajos, no adecuado para casos de estiaje.
- ❖ Sensible al ángulo de esviaje respecto al flujo y a posibles obstrucciones por elementos flotantes arrastrados por el flujo.
- ❖ Funcionamiento mecánico, requiere mantenimiento frecuente.
- ❖ Debido al desgaste deben calibrarse periódicamente.
- ❖ Requiere relevamiento independiente de la batimetría.

# MEDICIÓN DE CAUDALES

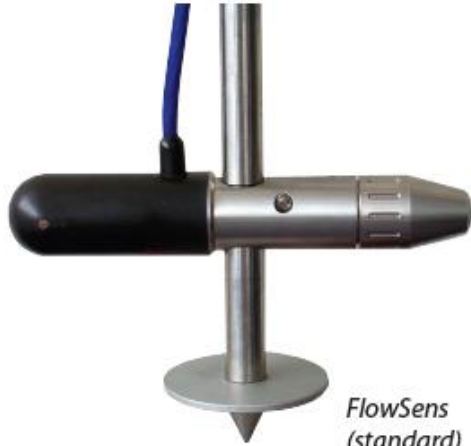
## Correntómetro magnético

- ❖ Utiliza el principio de Faraday que establece que un conductor (el agua en este caso) que se mueve entorno a un campo magnético genera una corriente proporcional a la velocidad.
- ❖ Provee una medida directa de la velocidad, sin curva de calibración.
- ❖ Solo mide una componente de la velocidad, en la dirección en que se alinea el instrumento.

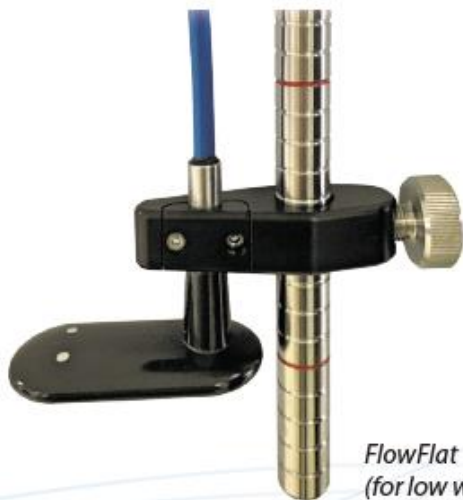


# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Correntómetro magnético



*FlowSens  
(standard)*



*FlowFlat  
(for low water measurements)*





# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Correntómetro magnético

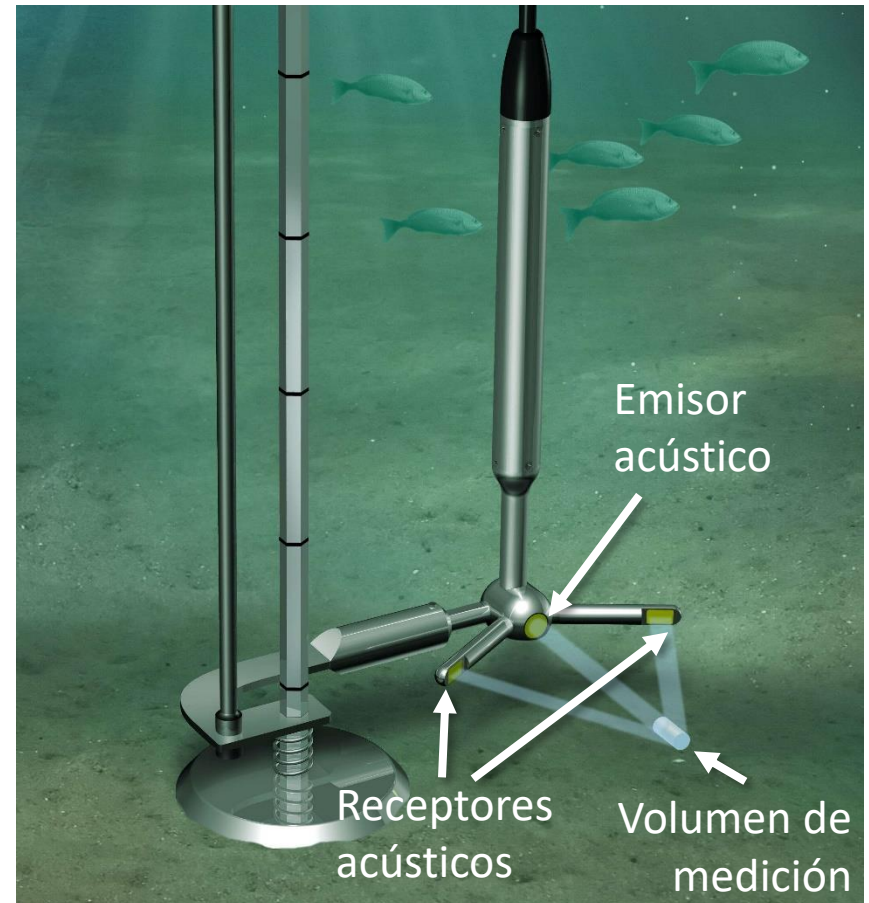
- ❖ Aplicable idealmente en cauces pequeños, para medición por vadeo.
- ❖ Mejora el rango de velocidades de medición respecto al correntómetro de hélice.
- ❖ Mayor precisión que el correntómetro de hélice
- ❖ Sensible al ángulo de esviaje respecto al flujo.
- ❖ No posee elementos mecánicos, no requiere tanto mantenimiento como el de hélice. Tampoco requiere calibración.
- ❖ Requiere relevamiento independiente de la batimetría.

[VIDEO](#)

# MEDICIÓN DE CAUDALES

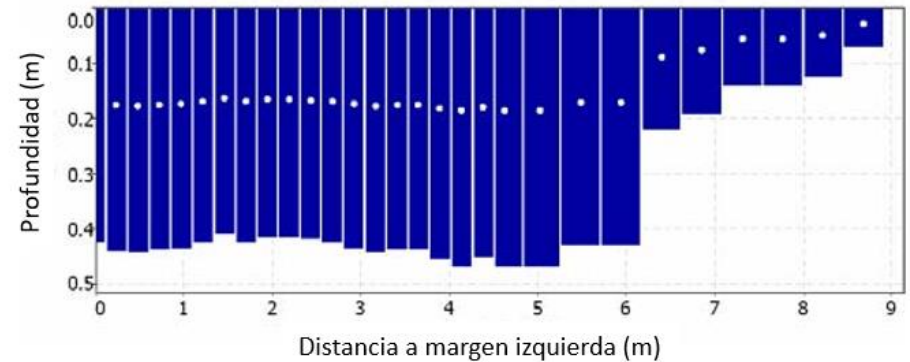
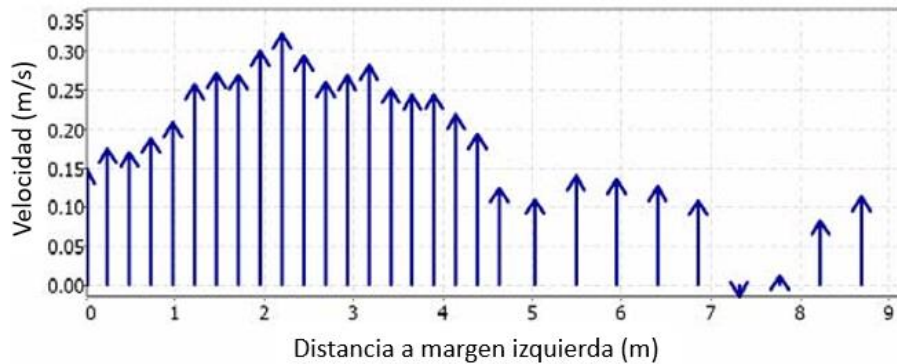
## Correntómetro acústico (ADV)

- ❖ Funciona con un principio acústico, aprovechando el efecto Doppler.
- ❖ ADV = Acoustic Doppler Velocimeter
- ❖ Envía pulsos sonoros mediante el emisor. Estos rebotan en las partículas del flujo y su retorno es captado por los receptores. El instrumento estima la velocidad a partir del cambio en la longitud de la onda sonora entre su emisión y su recepción.
- ❖ Es capaz de medir tantas componentes de la velocidad como receptores tenga. Se comercializan con 2, 3 y hasta 4 receptores.



# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Correntómetro acústico (ADV)



# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Correntómetro acústico (ADV)



Instrumento	Rango de Velocidades (m/s)	Profundidad mínima (m)
Correntómetro de hélice	0.025 – 10	0.05
Correntómetro magnético	$1 \times 10^{-3} - 5$	0.08
Correntómetro acústico	$1 \times 10^{-3} - 4$	0.08



# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Velocímetro acústico (ADV)

- ❖ Aplicable idealmente en cauces pequeños, para medición por vadeo.
- ❖ Igual o mayor precisión que correntómetro magnético.
- ❖ Menor sensibilidad a orientación del instrumento.
- ❖ Tampoco requiere mucho mantenimiento ni calibración.
- ❖ Permite aplicaciones científicas que exceden la medición de caudal.
- ❖ Depende de que haya una concentración adecuada de sedimento o partículas en suspensión.
- ❖ Requiere relevamiento independiente de la batimetría.

[VIDEO](#)

# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Perfilador acústico (ADCP)

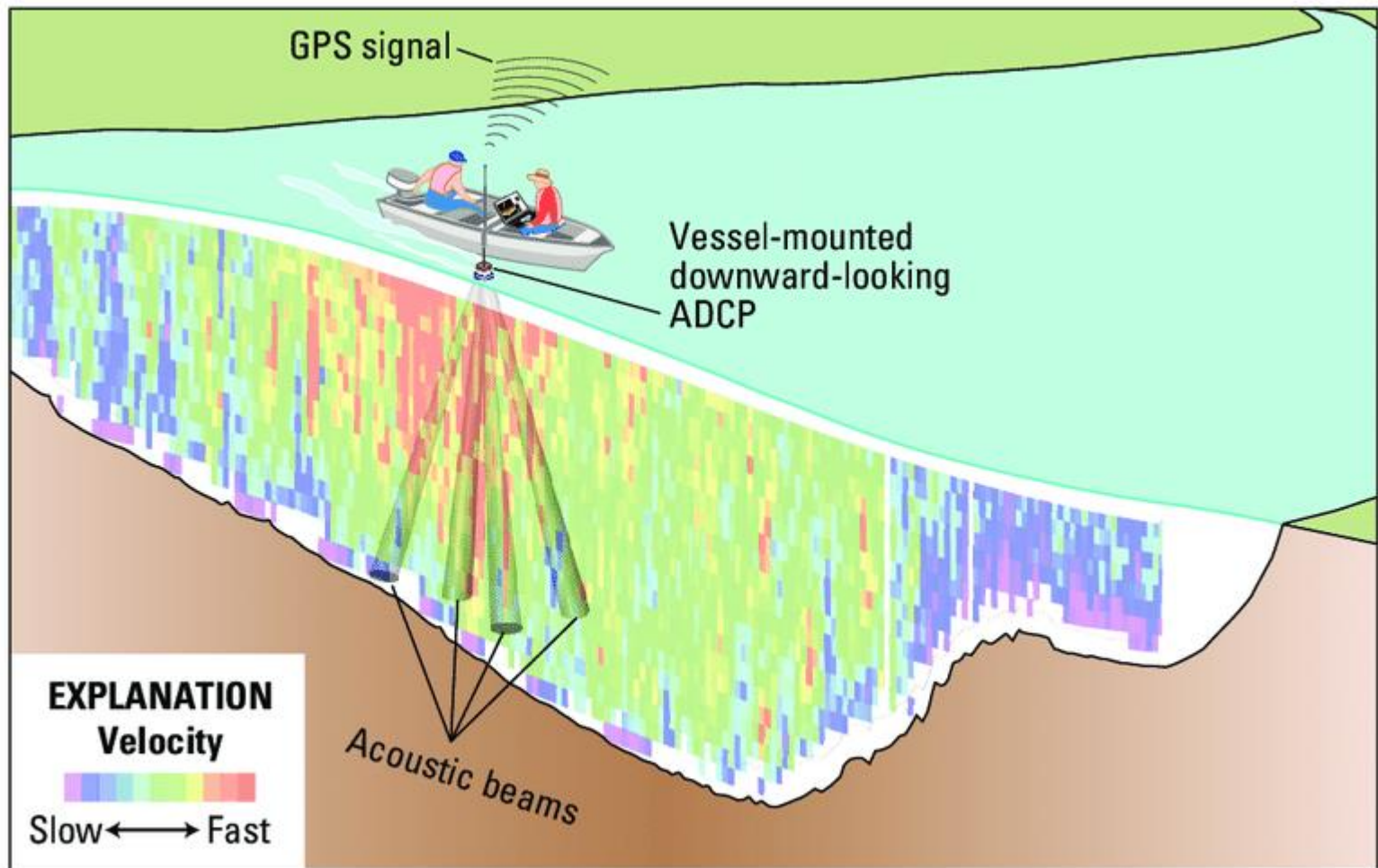
- ❖ Mismo principio de funcionamiento que el ADV.
- ❖ ADCP = Acoustic Doppler Current Profiler
- ❖ Envía pulsos sonoros en 4 direcciones. La diferencia con el ADV es que estima perfiles de velocidad en esas 4 direcciones, en lugar de realizar mediciones puntuales.
- ❖ Desplazándolo a lo ancho del cauce es capaz de medir todo el campo transversal de velocidad. El software del instrumento lo integra para determinar el caudal.



\* Figuras extraídas del manual 3-A8 del USGS  
“Discharge Measurement at Gaging Stations”

# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Perfilador acústico (ADCP)



# MEDICIÓN DE CAUDALES

Perfilador acústico (ADCP)

[VIDEO 1](#)

[VIDEO 2](#)

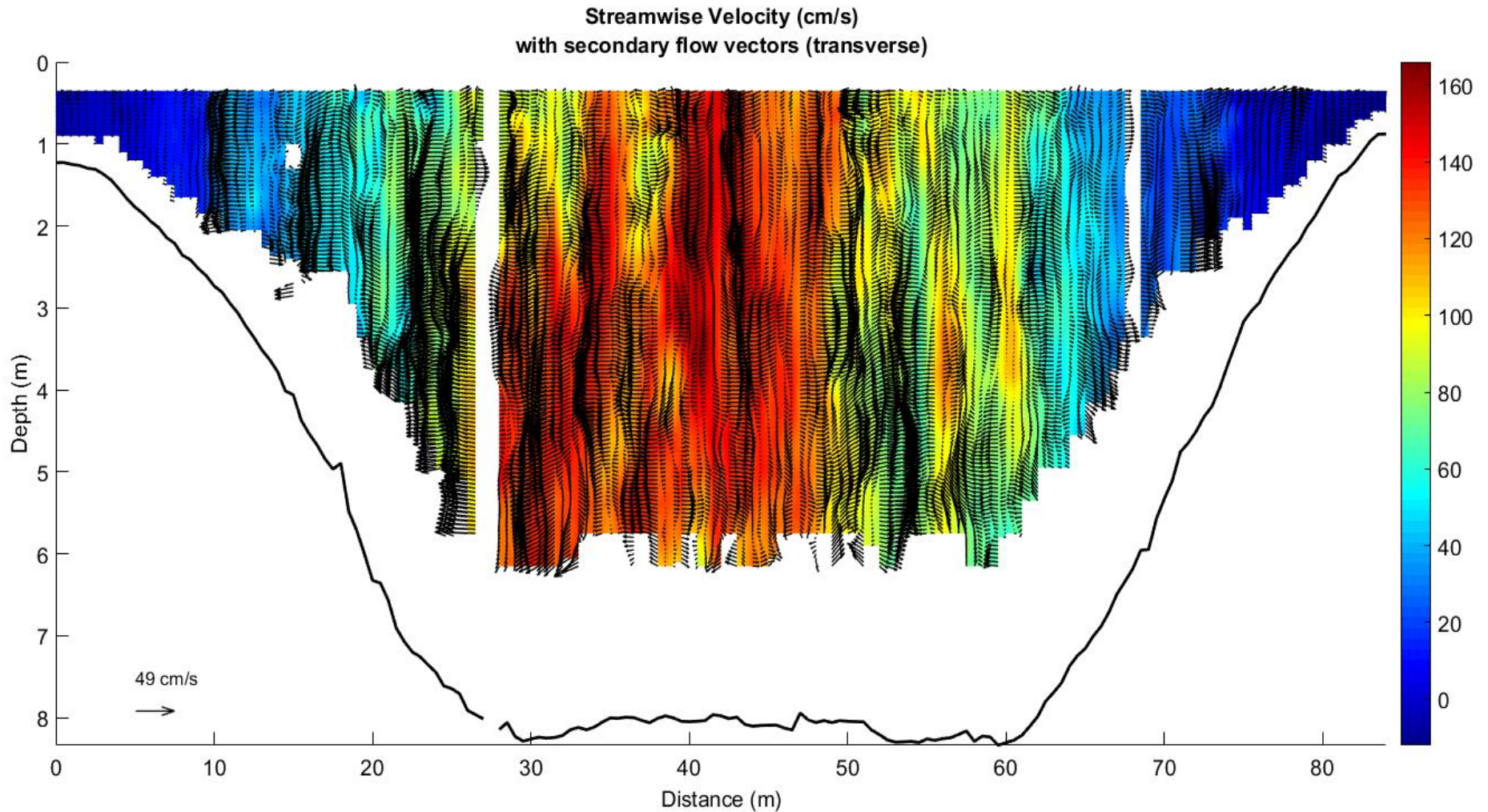
[VIDEO 3](#)

[VIDEO 4](#)



# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Perfilador acústico (ADCP)



# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Perfilador acústico (ADCP)

- ❖ El rango de aplicación depende de las características del instrumento. Los hay aptos para distintos rangos de tirante y caudal.
- ❖ Permite obtener una medida muy precisa del caudal si se usa adecuadamente.
- ❖ Utilizable por vadeo o desde puentes.
- ❖ Depende de que haya una concentración adecuada de sedimento o partículas en suspensión.
- ❖ Elimina la necesidad de relevar la batimetría de la sección, pues utiliza un pulso sonoro adicional con este fin.
- ❖ Puede ser un método de “caja negra”.
- ❖ Instrumento de costo elevado y que requiere personal capacitado para su uso.

# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Medición con trazadores

Se considera un trazador a cualquier elemento o sustancia que se mezcla o se desplaza junto con el flujo y es detectable por algún método.

### Ejemplos:

- Tintas
- Sustancias químicas como fertilizante, sal, etc.
- Radioisótopos
- Elementos flotantes
- Secuencias de presión turbulenta generadas por vórtices

# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Trazador superficial

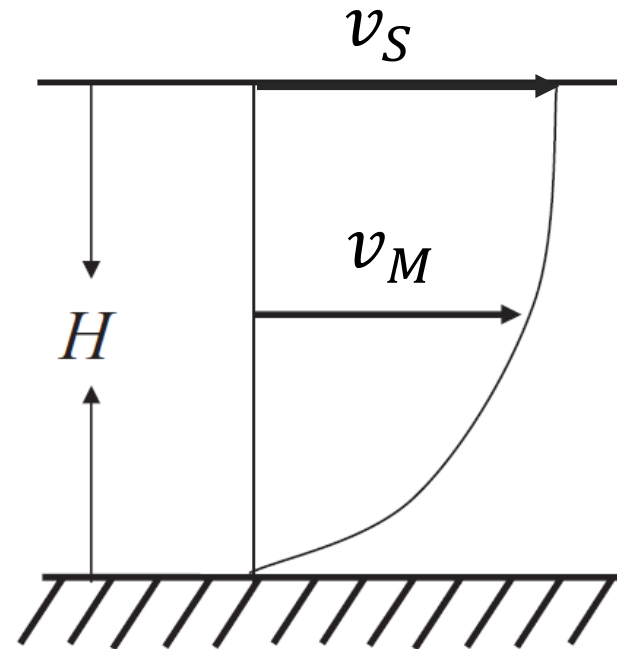
Se determina la velocidad superficial mediante el seguimiento de trazadores flotantes. Luego se estima la velocidad media en vertical a través de un coeficiente empírico  $\alpha$ :

$$v_M = \alpha v_S$$

$v_M$  = velocidad promedio en vertical

$v_S$  = velocidad superficial

$\alpha$  = coeficiente empírico, toma valores entre 0.6 y 0.9



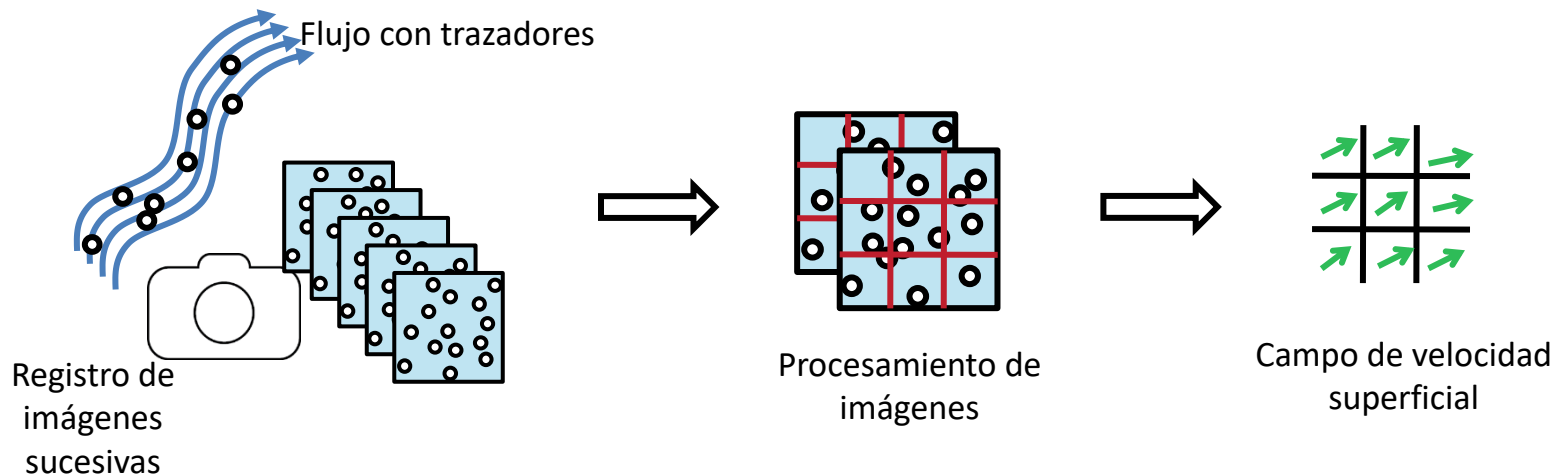
[VIDEO](#)



# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Trazador superficial - Velocimetría por imágenes (PIV)

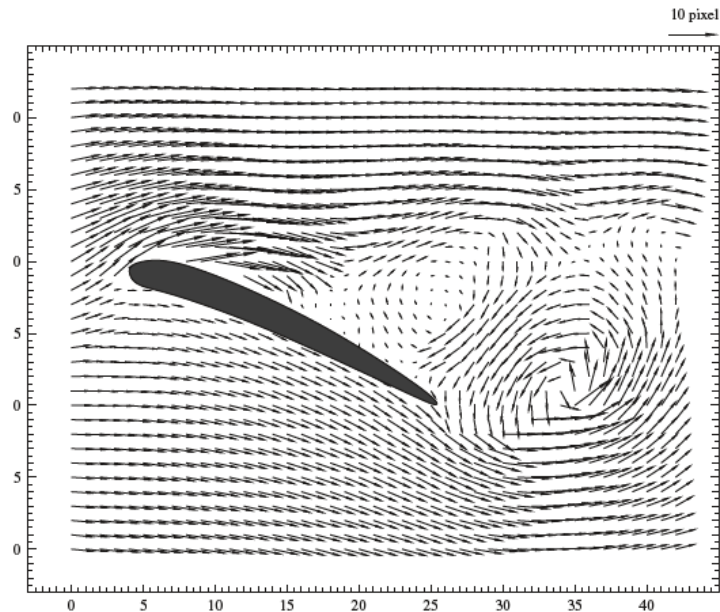
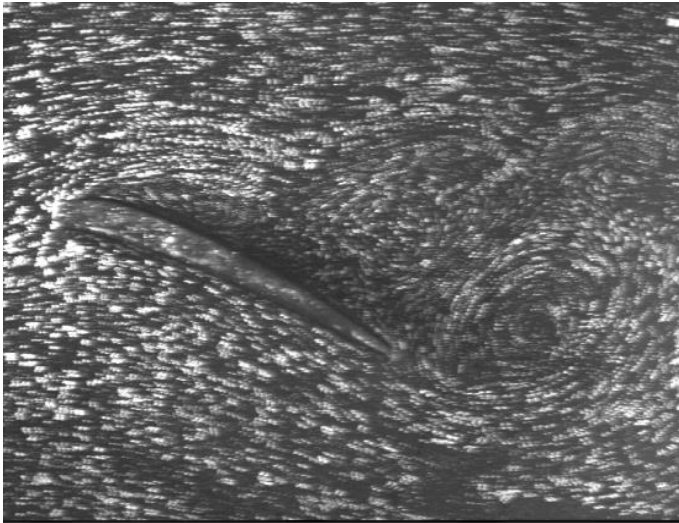
Se realiza un seguimiento de trazadores mediante fotografías sucesivas y luego se procesan las imágenes para obtener velocidades:



# MEDICIÓN DE CAUDALES

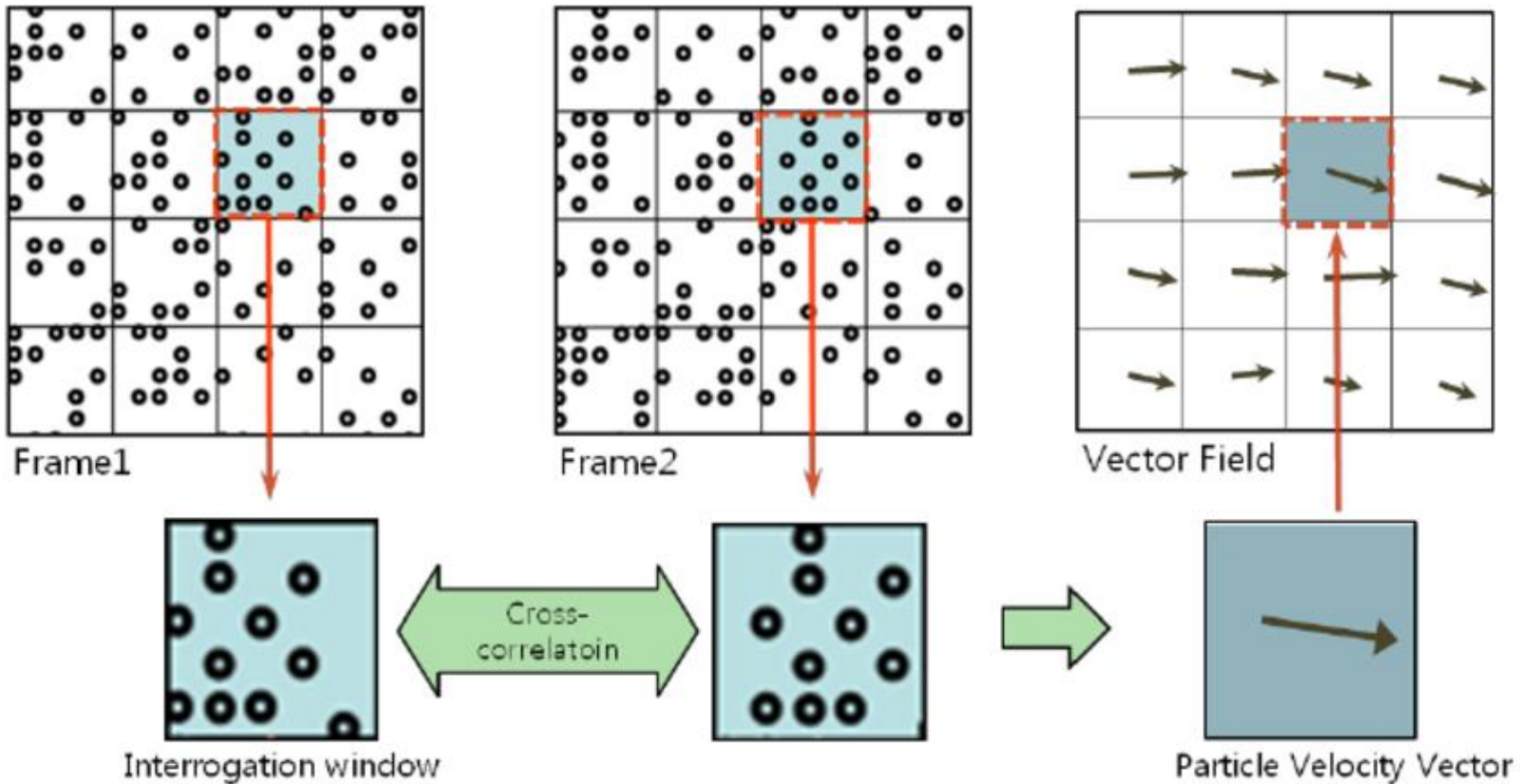
## Trazador superficial - Velocimetría por imágenes (PIV)

Tiene su origen en laboratorio, para la caracterización de flujos turbulentos. Tradicionalmente se utiliza iluminación láser y una cámara de alta velocidad.



# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Trazador superficial - Velocimetría por imágenes (PIV)



# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Trazador superficial - Velocimetría por imágenes de gran escala (LSPIV)

- ❖ Los avances técnicos en equipos de fotografía y de computación permitieron ampliar el método para medición en campo. A esta variante se la denomina LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry).
- ❖ El mismo se utiliza para determinar el campo de velocidad superficial del flujo, que luego se multiplica por el factor  $\alpha$  para estimar el campo de velocidades medias. Este luego se integra en horizontal para el cálculo del caudal
- ❖ En este caso se requieren procesamientos adicionales, como aplicación de filtros y rectificaciones a las imágenes registradas.



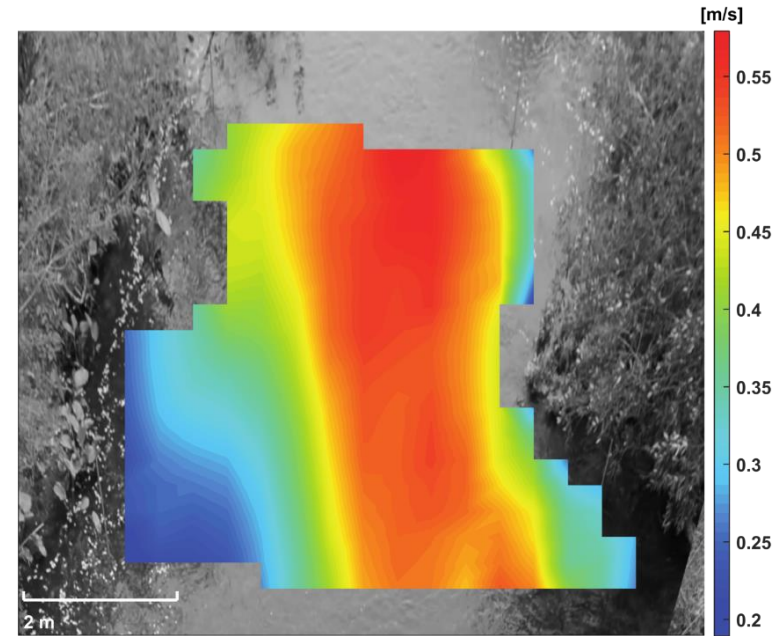
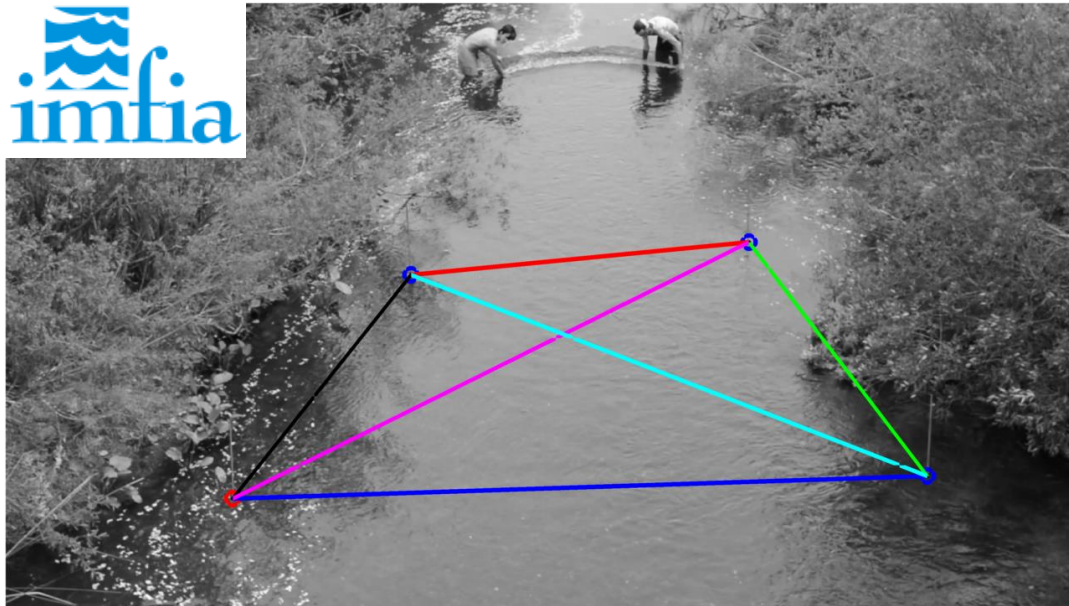
# MEDICIÓN DE CAUDALES

Trazador superficial - Velocimetría por imágenes de gran escala (LSPIV)



# MEDICIÓN DE CAUDALES

Trazador superficial - Velocimetría por imágenes de gran escala (LSPIV)



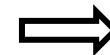
[VIDEO 1](#)

[VIDEO 2](#)

# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Trazador superficial

- ❖ Aplicable a un amplio rango de condiciones, siendo particularmente ventajoso en condición de estiaje
- ❖ Mayor error que los instrumentos tradicionales de medición en la determinación de velocidades y caudales
- ❖ El parámetro  $\alpha$  es variable en función del caudal, la geometría de la sección y el material del fondo. También es fuente importante de incertidumbre
- ❖ Método rápido y de bajo costo.
- ❖ Requiere relevamiento independiente de la batimetría
- ❖ Abre posibilidades al involucramiento ciudadano y crowdsourcing.



[VIDEO](#)



# MEDICIÓN DE CAUDALES

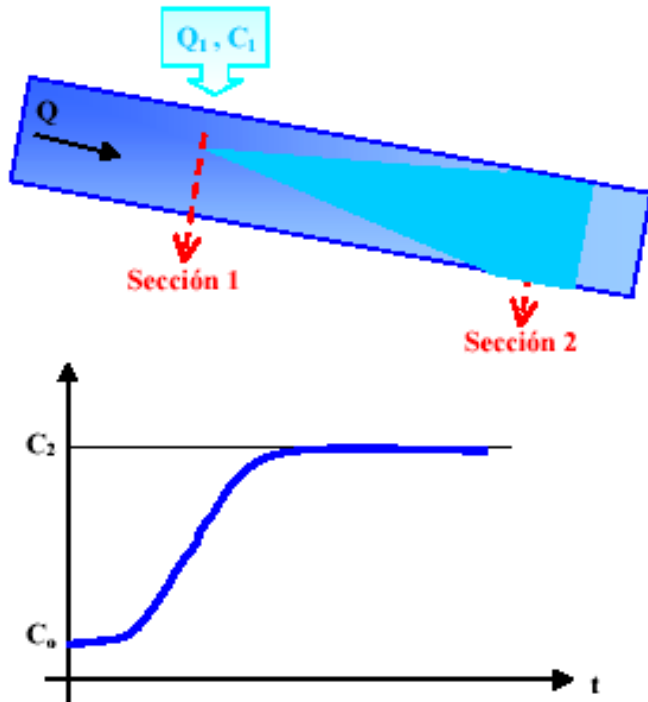
## Trazador químico

- ❖ Se introduce en el flujo una sustancia que se disuelve en el agua y cuya concentración se puede determinar.
- ❖ Comúnmente se utiliza sal.
- ❖ Se necesita:
  - ❖ Trazador conservativo: no se pierde masa.
  - ❖ Baja concentración natural del trazador.
  - ❖ Zona de mezcla que uniformiza concentración.
  - ❖ Caudal constante.



# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Trazador químico



$C_0$  = concentración preexistente en el cuerpo de agua.

$C_1$  = concentración de la solución que se incorpora.

$C_2$  = concentración final en el punto de medición

$$qC_1 + QC_0 = (q + Q)C_2 \quad \Rightarrow \quad Q = q \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0}$$

# MEDICIÓN DE CAUDALES

## Trazador químico

- ❖ Aplicable en canales artificiales o cauces pequeños.
- ❖ Debe asegurarse la mezcla completa del trazador.
- ❖ No requiere conocer la velocidad del flujo ni la geometría de las secciones involucradas.

[VIDEO](#)