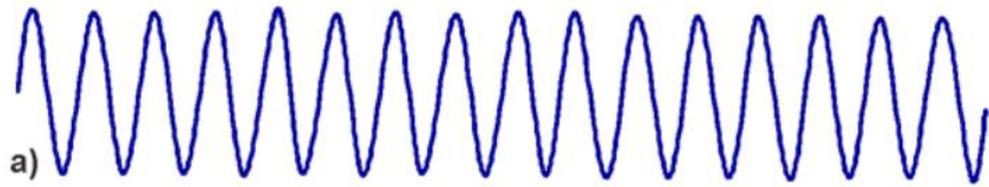


¿Cómo estimar el perfil de velocidades con ultrasonido?

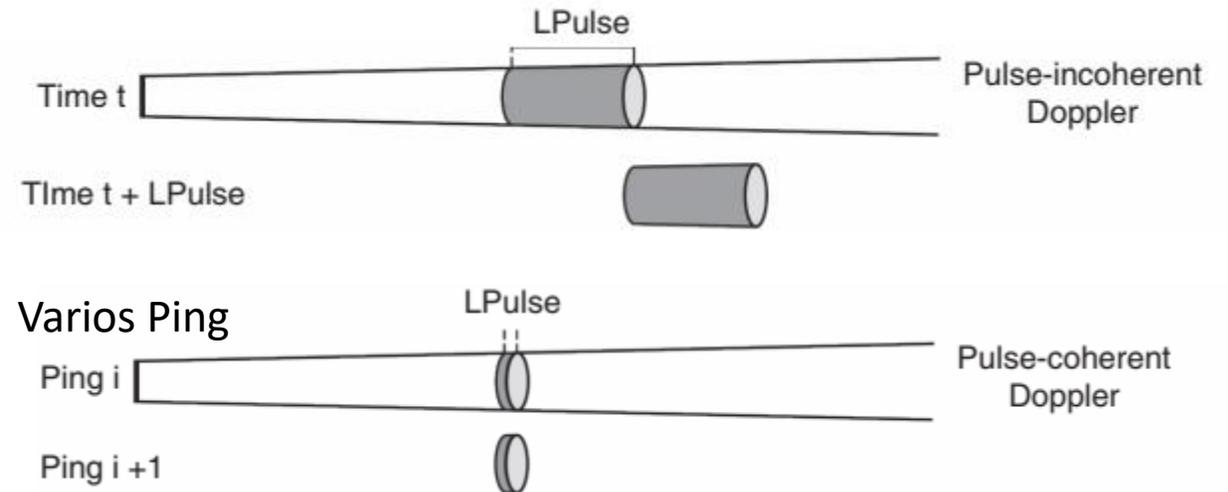
# Generación de pulsos

- Banda estrecha (Narrowband)

Pulso monocromático



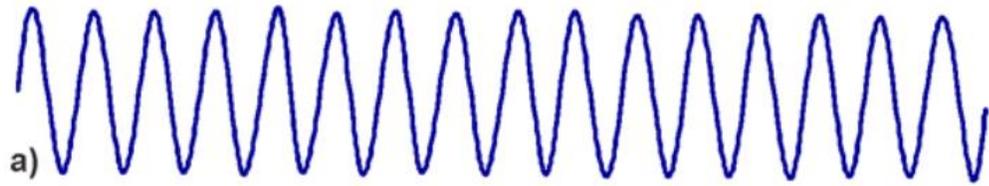
- Un solo pulso en el agua a la vez
- Hay dos tipos
  1. Un pulso largo (Incoherent)
  2. Varios pulsos cortos (Coherent)



# Generación de pulsos

- Banda estrecha (Narrowband)

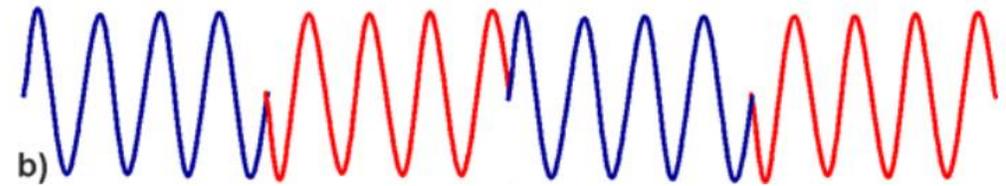
Pulso monocromático



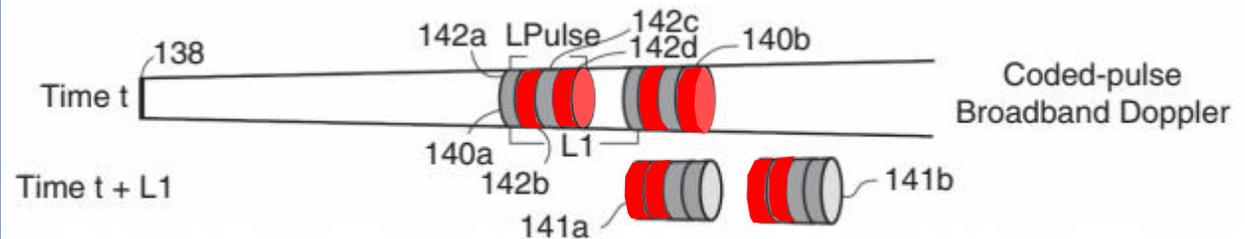
- Un solo pulso en el agua a la vez
- Hay dos tipos
  1. Un pulso largo (Incoherent)
  2. Varios pulsos cortos (Coherent)

- Banda ancha (Broadband)

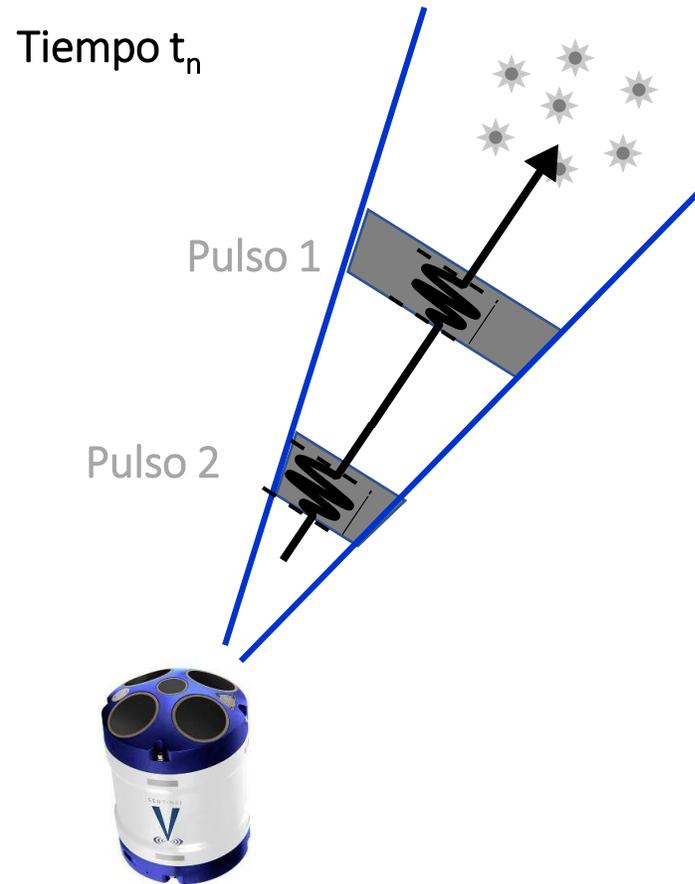
Pulso codificado



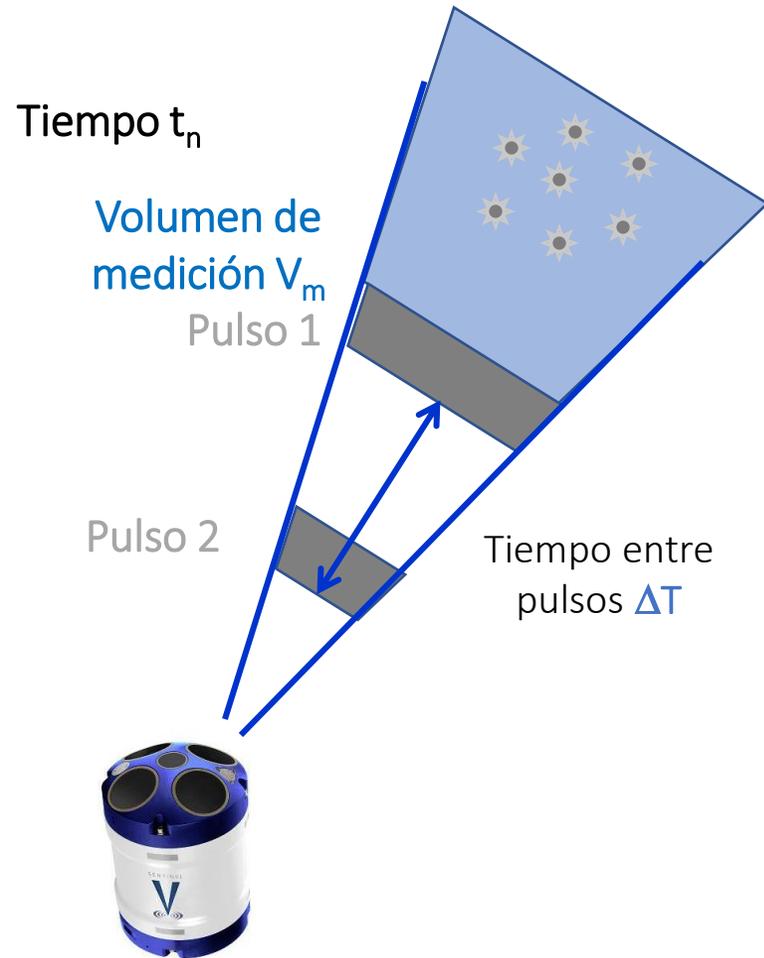
Elemento codificado



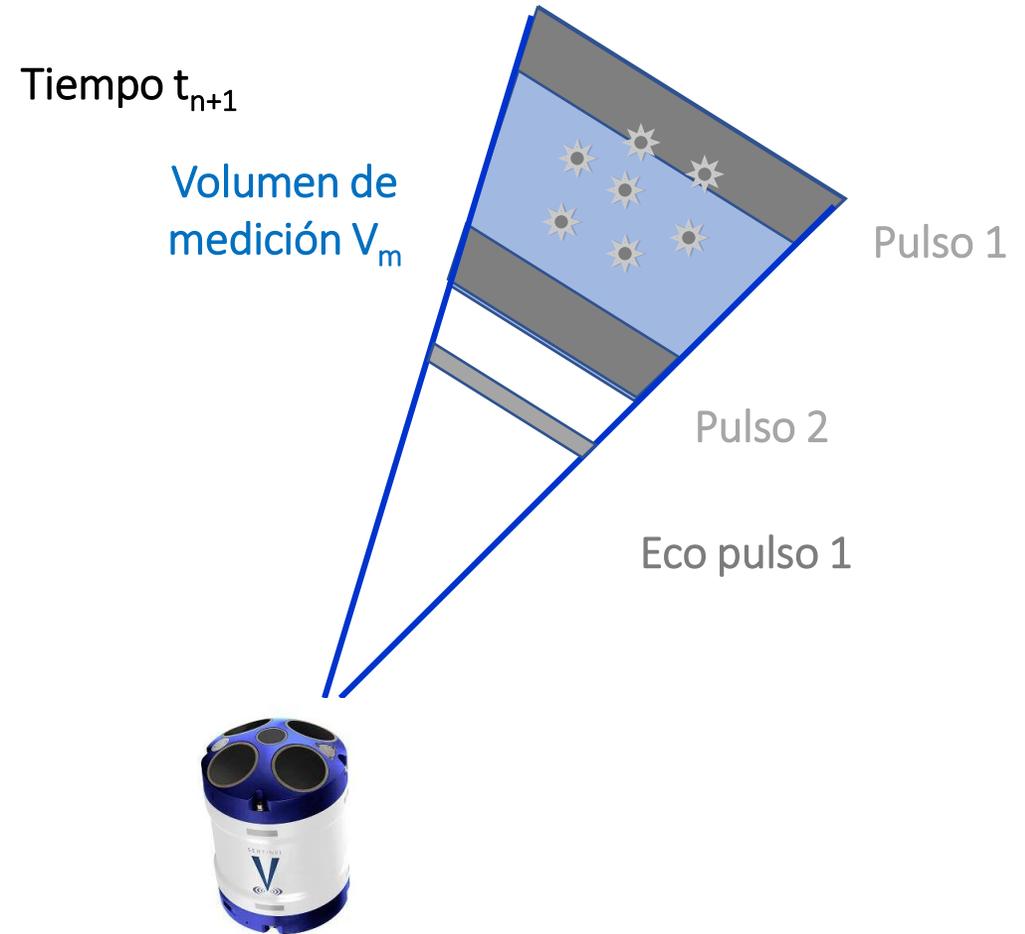
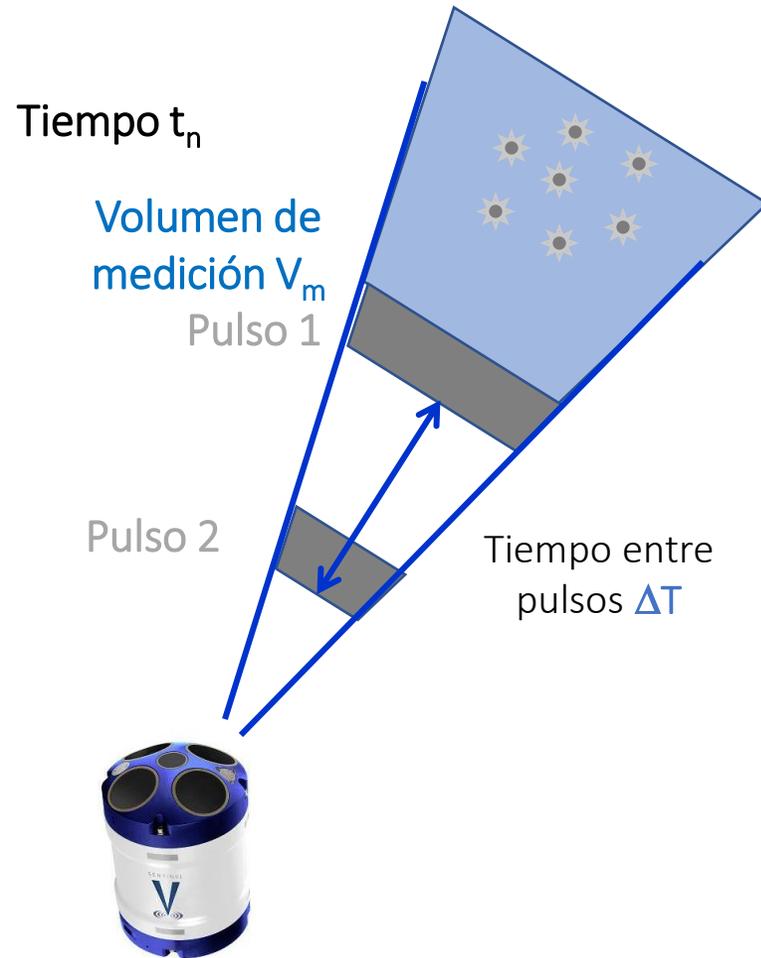
# Medición de velocidad (ADCP)



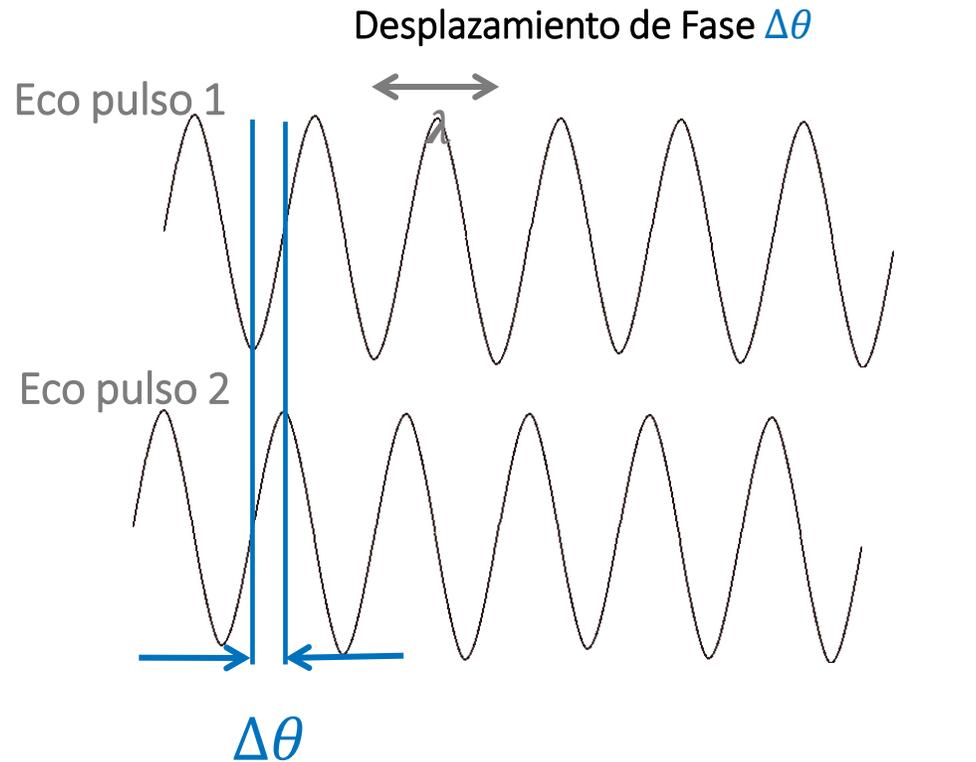
# Medición de velocidad (ADCP)



# Medición de velocidad (ADCP)



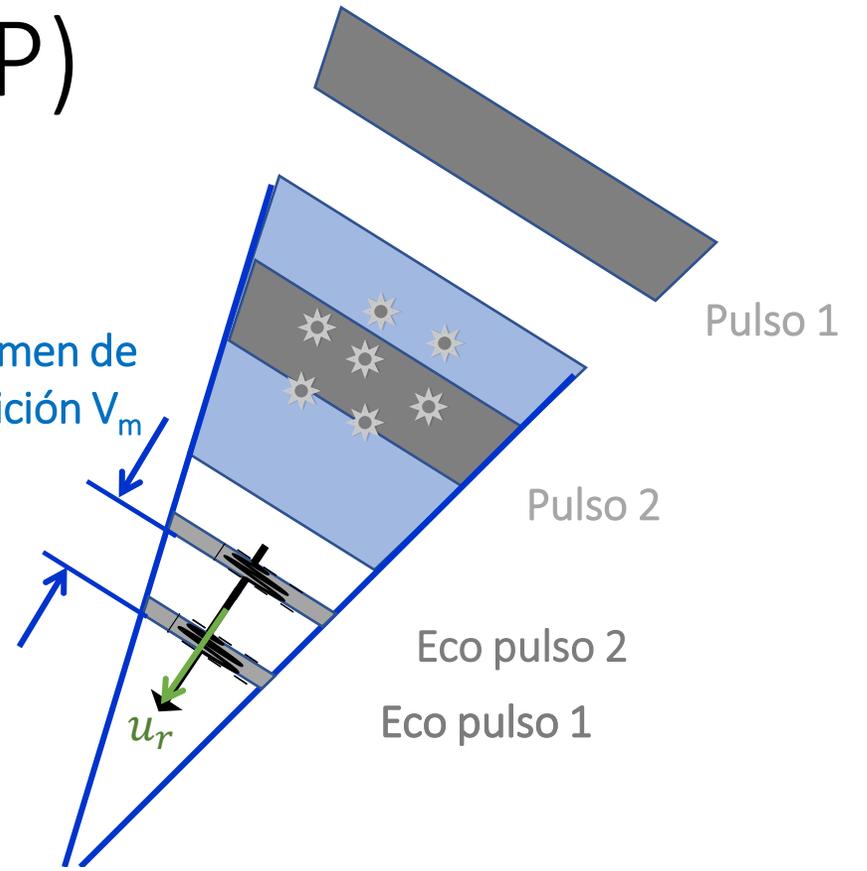
# Medición de velocidad (ADCP)



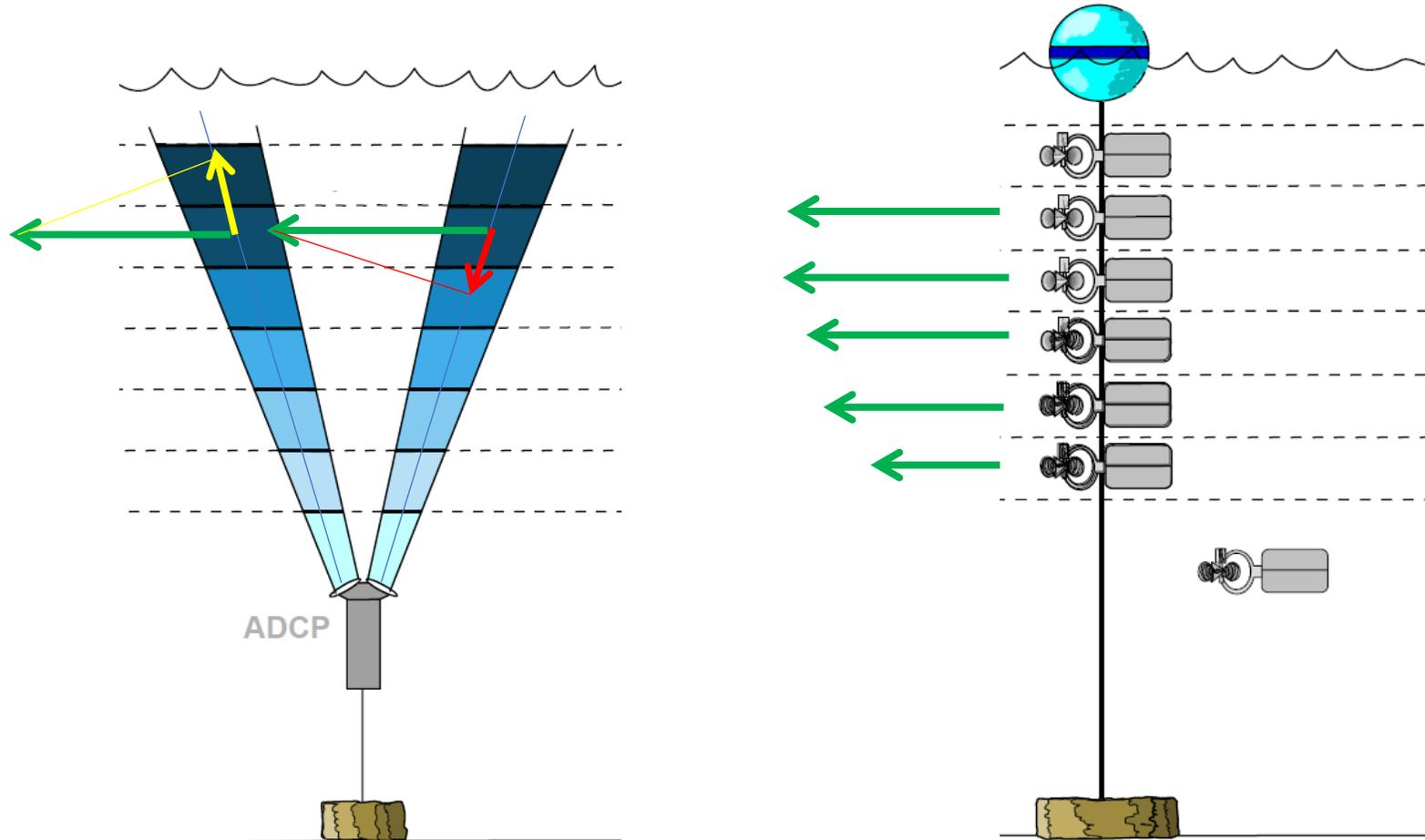
$$\frac{\Delta\theta}{\Delta T} \propto u_r$$

Tiempo  $t_{n+2}$

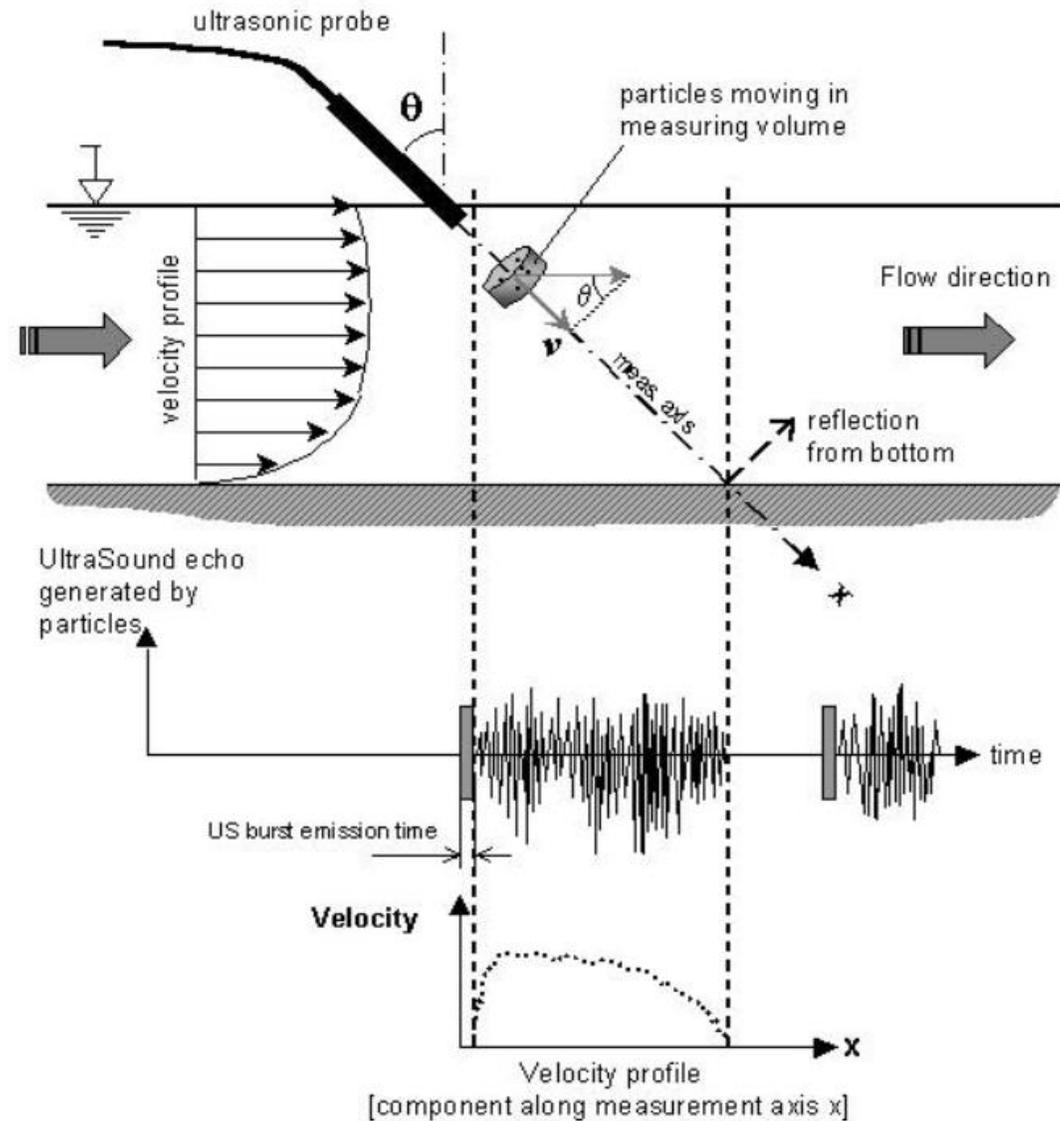
Volumen de medición  $V_m$



# Medición de velocidad (¿a qué se compara?)

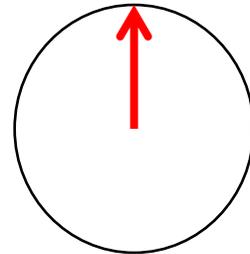
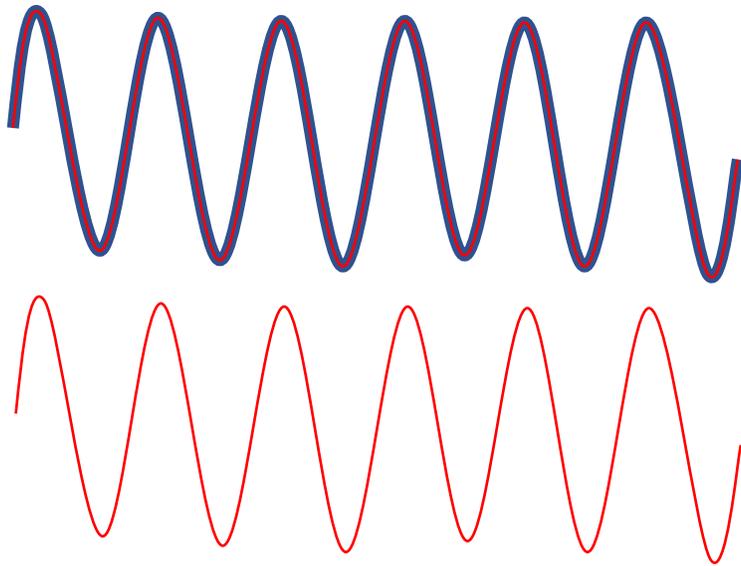
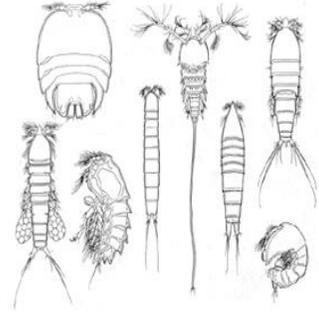
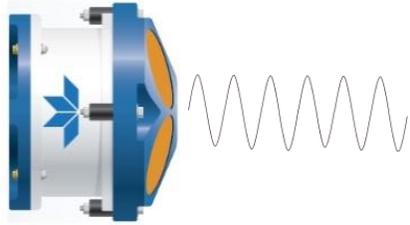


# Perfil de velocidades



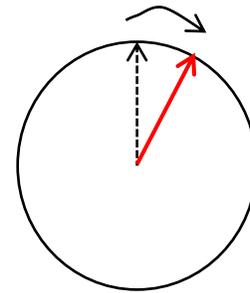
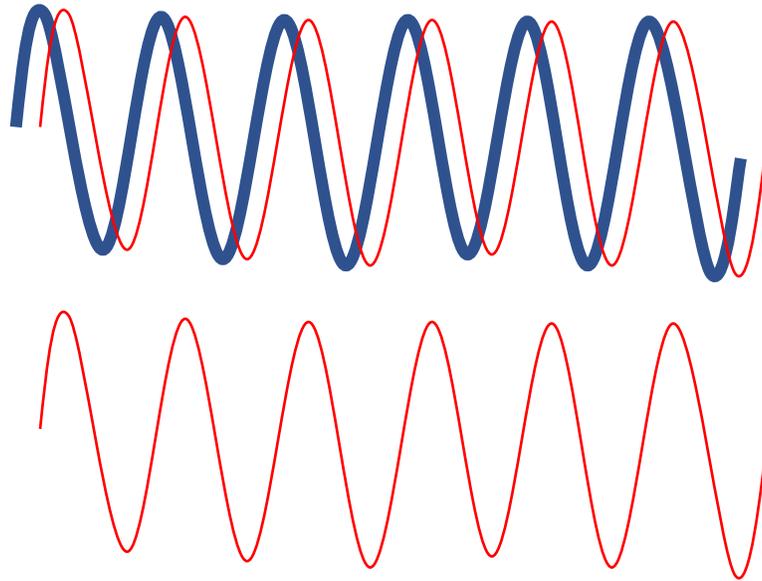
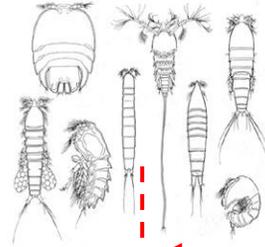
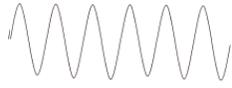
Fuente: UVP-DUO User's Guide R5

# Partículas en reposo



**0°**

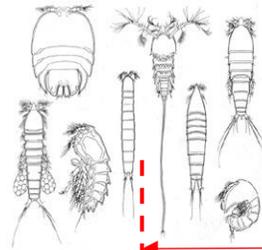
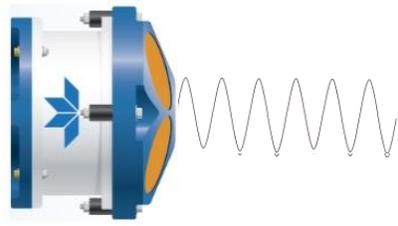
# Partículas alejándose



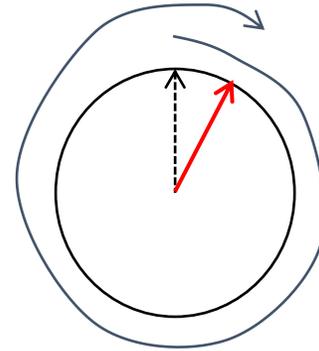
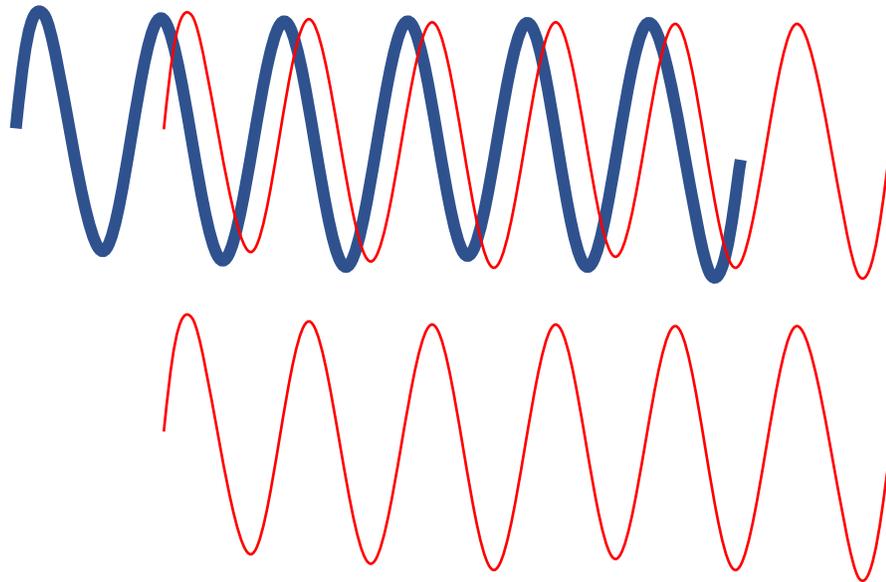
**30°**

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta T} \propto \frac{\Delta \text{dist}}{\Delta T} = u_r$$

# Partículas alejándose mucho

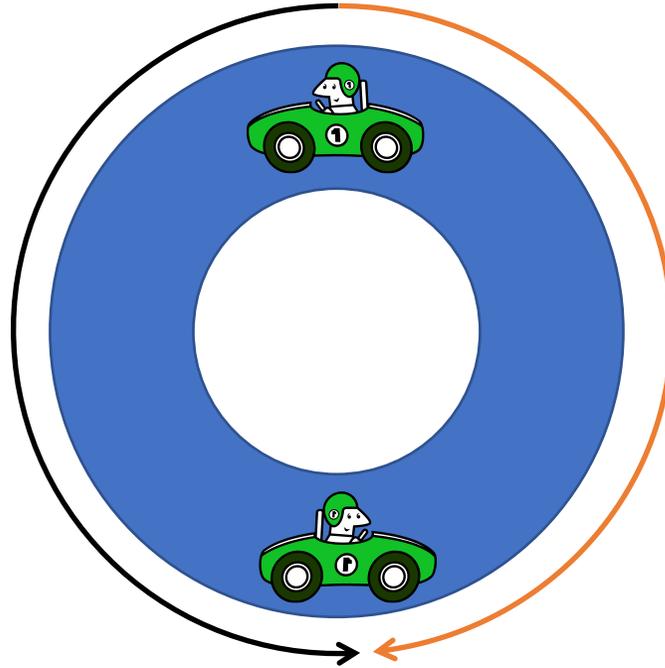


$\gg \Delta \text{distancia} / \Delta \text{tiempo}$



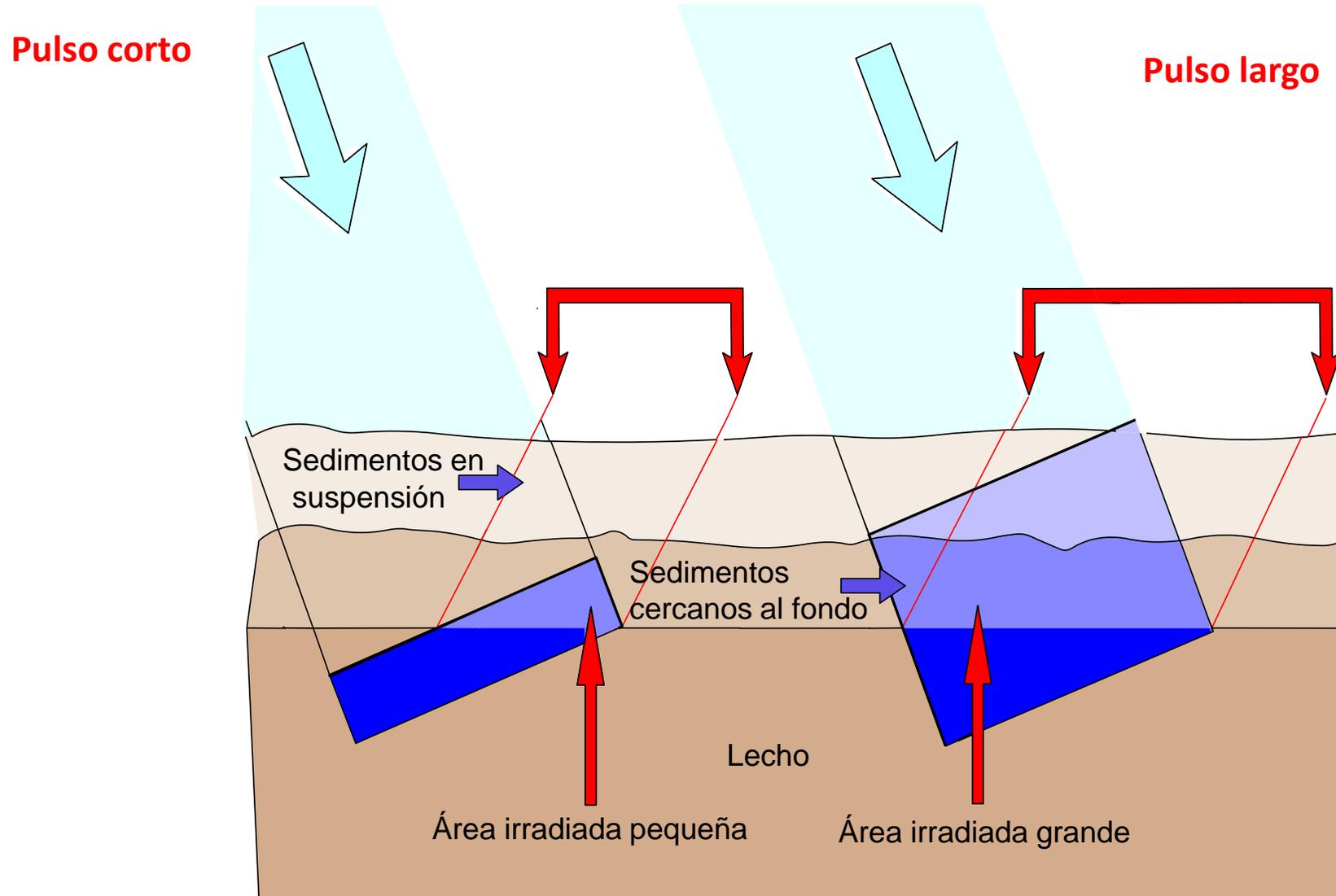
$$360^\circ - 30^\circ = 330^\circ$$

# Ambigüedad



Se resuelve midiendo en intervalos más cortos

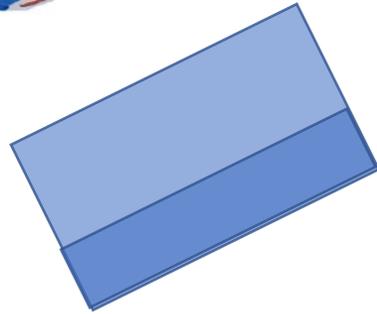
# Fondo (Bottom Tracking)



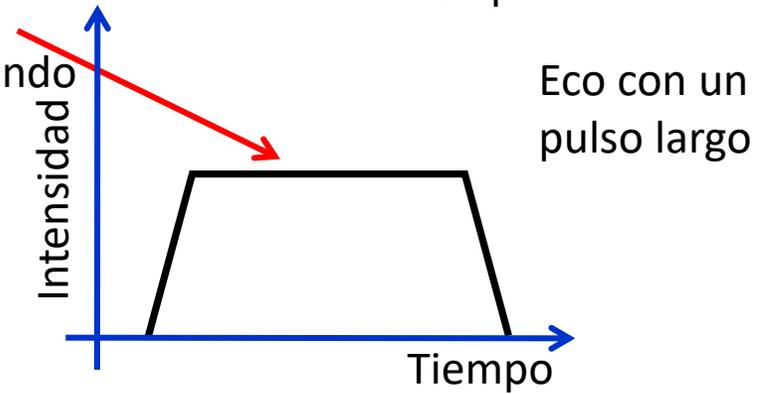
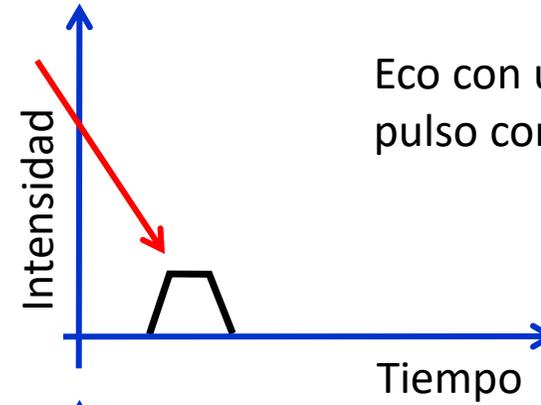
# Pulso para el fondo



Incertidumbre en la  
detección del fondo

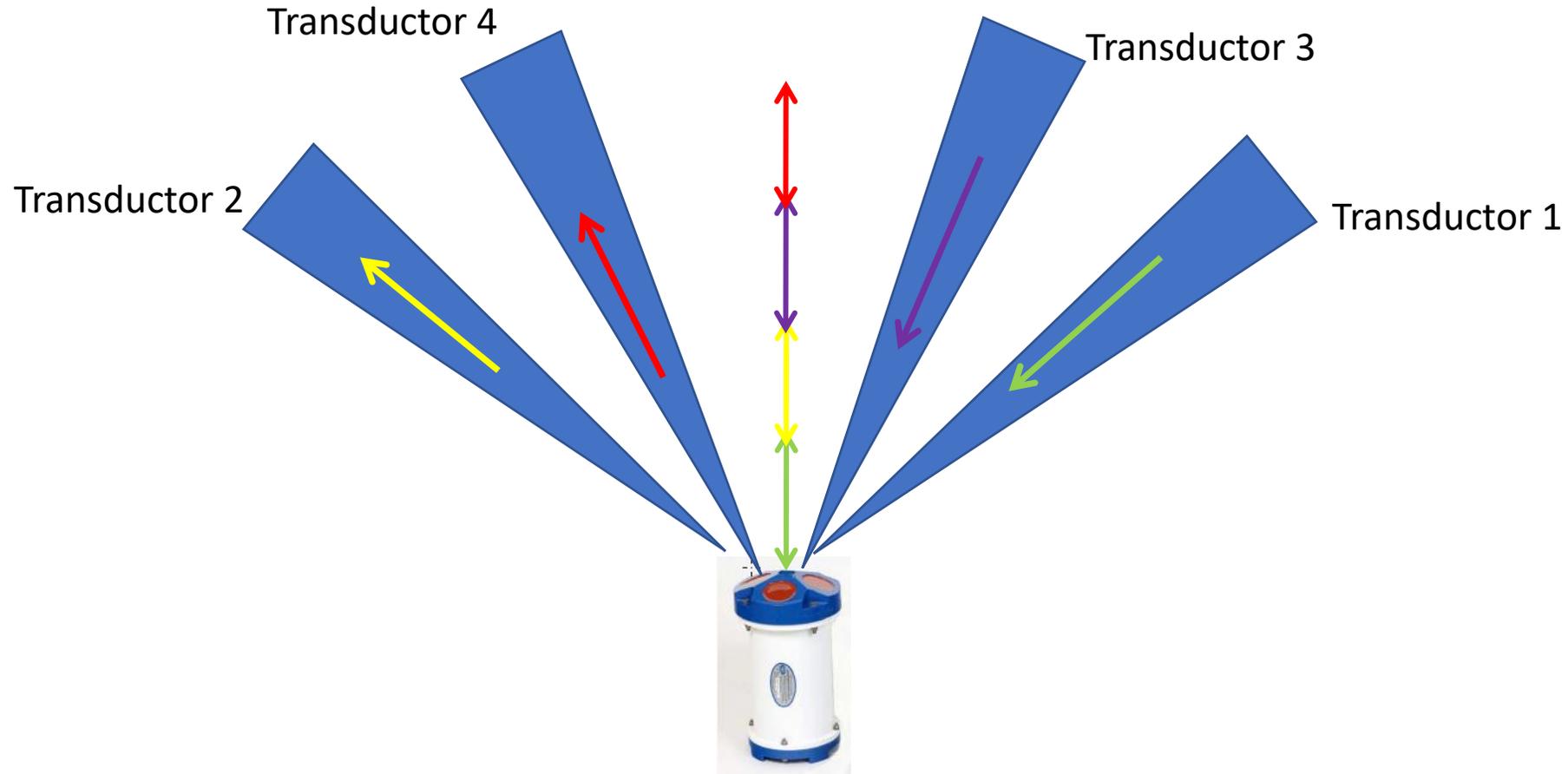


Mejora en la  
detección del fondo



Fondo

# Redundancia (Error Velocity)



Proyección vertical (Transductor 1-2) - Proyección vertical (Transductor 3-4)

Permite soluciones con tres transductores si uno falla

# Rechazo por peces (Fish Rejection)

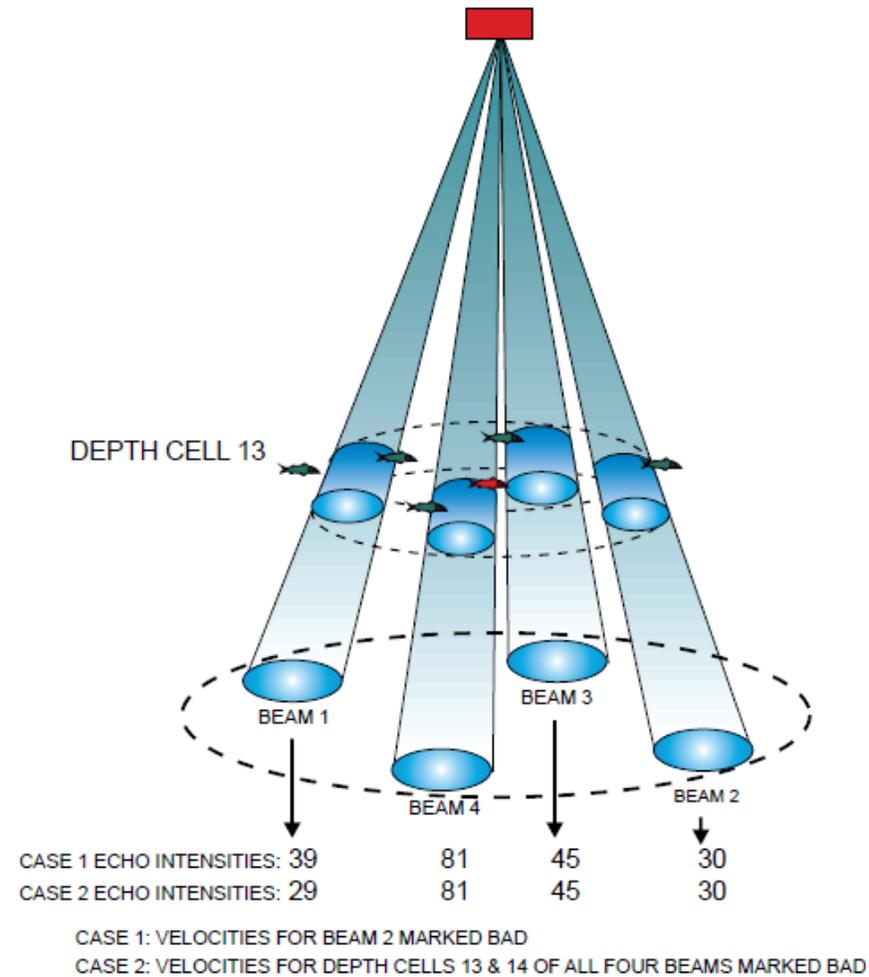
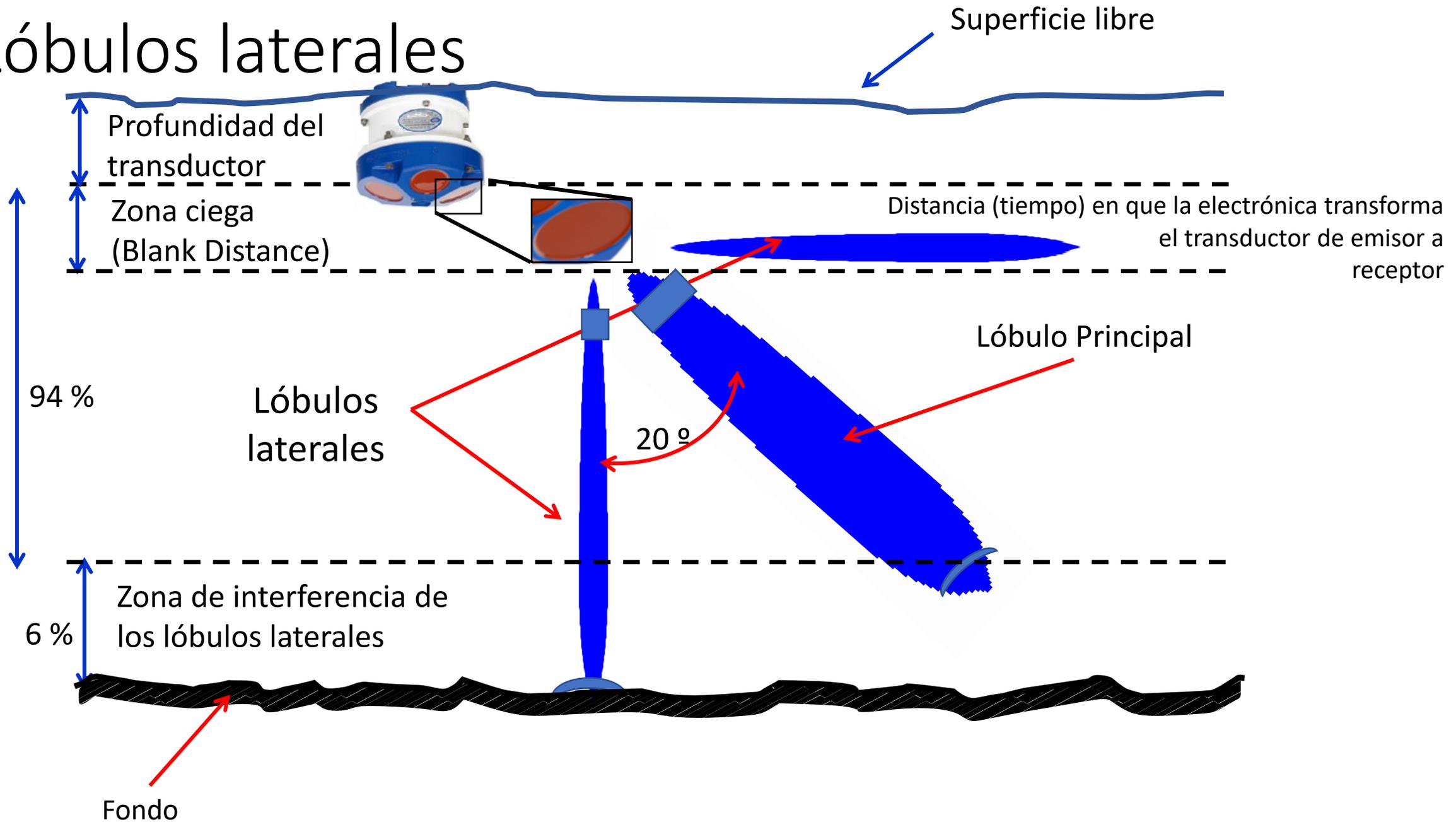


Figure 6. Example of Fish Rejection Algorithm

# Lóbulos laterales



# ...y márgenes

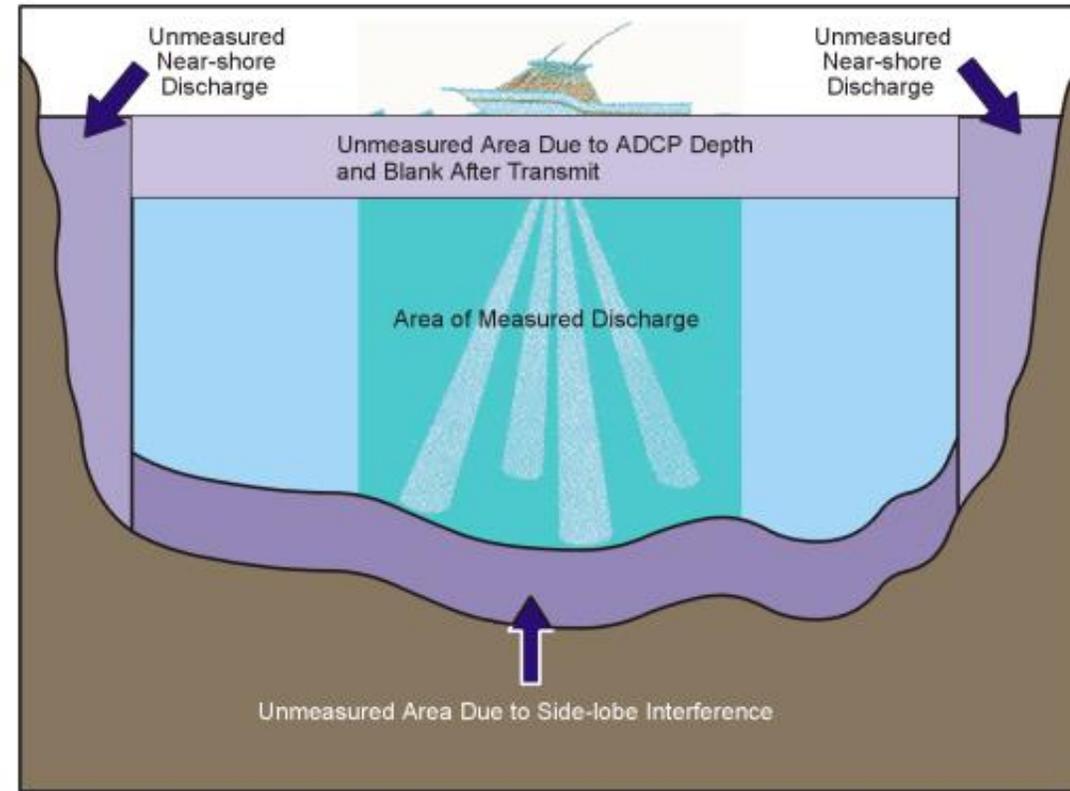
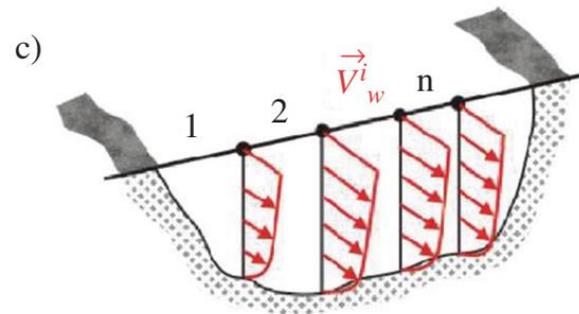
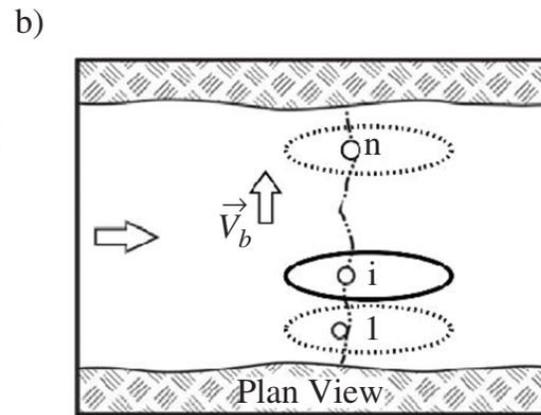
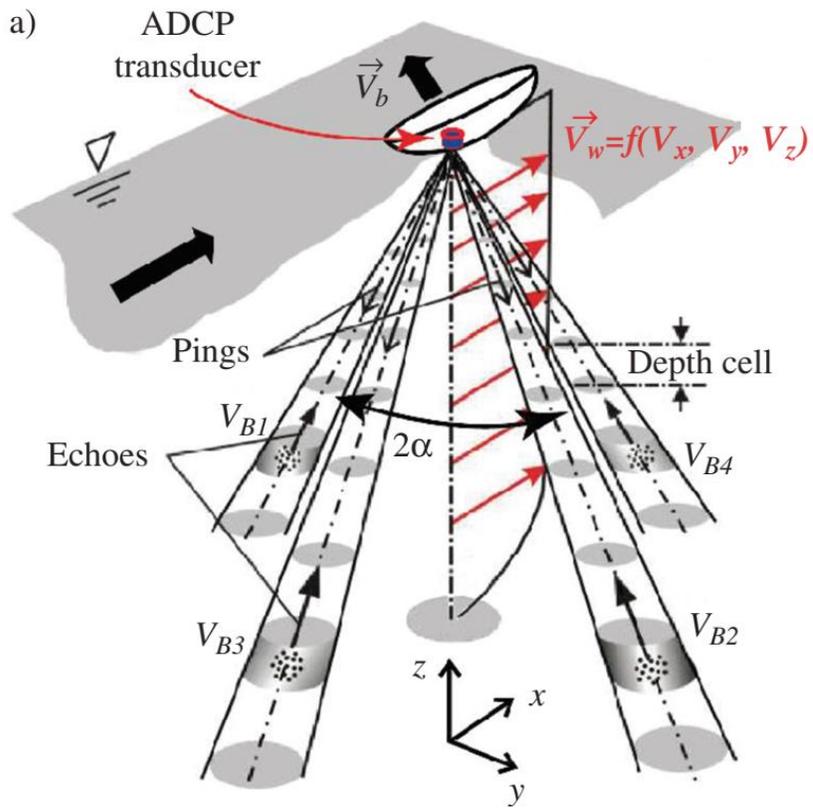


Figure 79. Unmeasured Regions in the Water Column

# Extrapolación

- Superficie y fondo

Methods are **Constant**, **Power**, and **3-pt Slope**. The **Bottom Discharge Methods** are **Power** and **No Slip**.

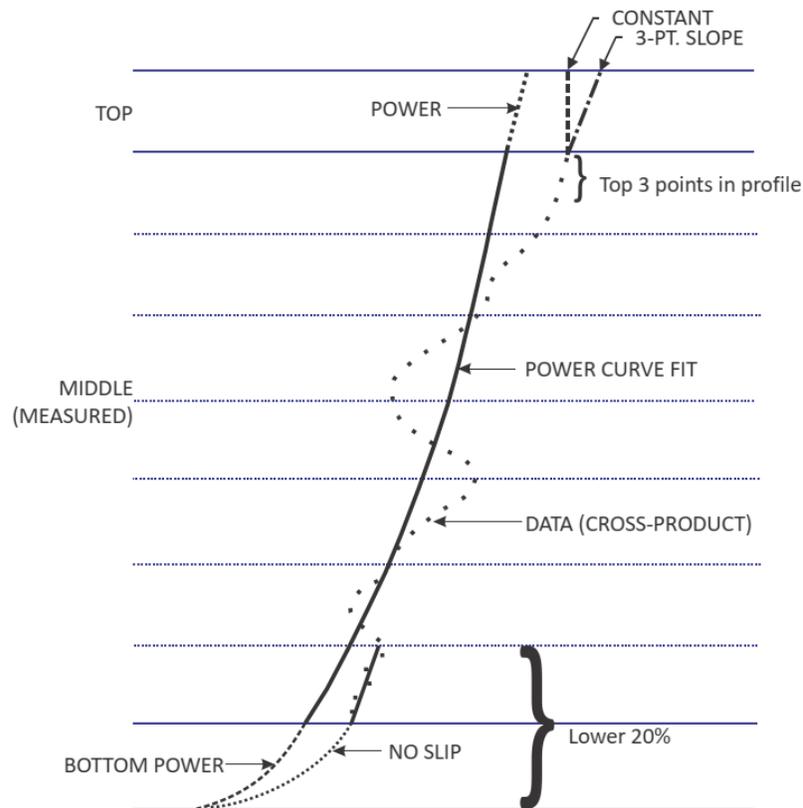
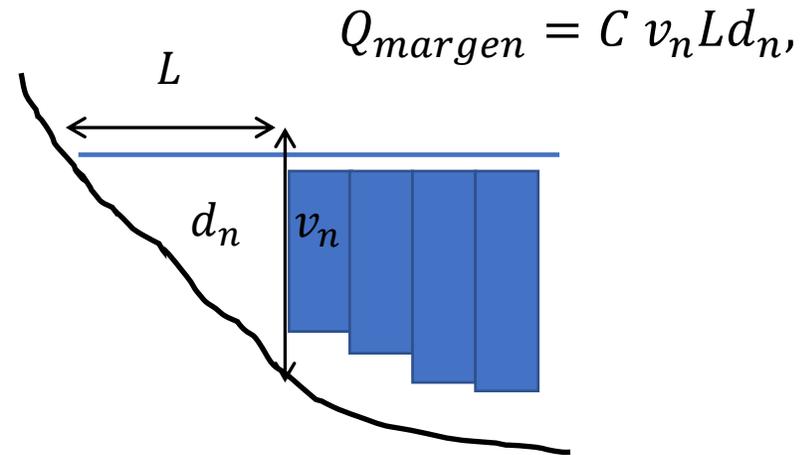


Figure 80. Discharge Extrapolation Method

- Márgenes

Se extrapola utilizando la última velocidad  $v_n$  y profundidad  $d_n$  medida y determinando la distancia a la margen  $L$ .

Sabiendo que la velocidad en la margen es cero, el área no medida se puede aproximar a un triángulo o rectángulo



El coeficiente  $C$  es 0,3535 para un área triangular y 0,91 para un área rectangular.

# Sistema de coordenadas

- Las mediciones están en el sistema de coordenadas de los transductores (Radial Beam Coordinates)
- Conociendo la geometría del equipo es posible llevarlo a un sistema de coordenadas del equipo (Instrument Coordinates)
- Usando los sensores de inclinación, brújula y GPS es posible proyectar las velocidades en el Este, Norte y Vertical (Earth Coordinates)  
Es necesario **calibrar la brújula**.

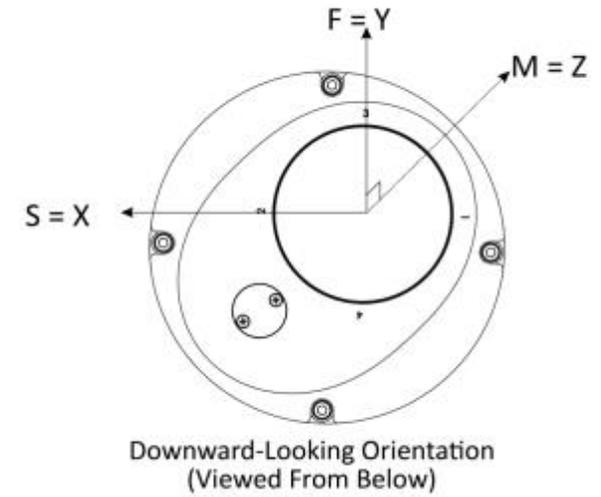


Figure 20. RiverRay Coordinate Transformation

The importance of the ship axis is that the attitude angles (pitch, roll, and heading) measure the orientation of the ship axes relative to the earth axes, regardless of up/down orientation. The sense of internal sensors Tilt 1 (pitch) and Tilt 2 (roll) is positive for counterclockwise tilts respectively about the S and F axes, using the right-hand rule (see Figure 21).

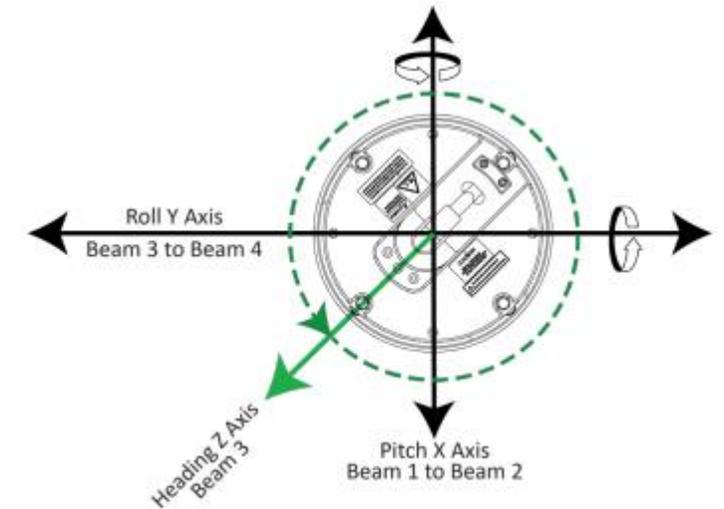


Figure 21. RiverRay Pitch and Roll Angles

Angle of the RiverRay	Sign
Beam 3 higher than Beam 4	Positive Pitch
Beam 1 higher than Beam 2	Positive Roll

# Conceptos

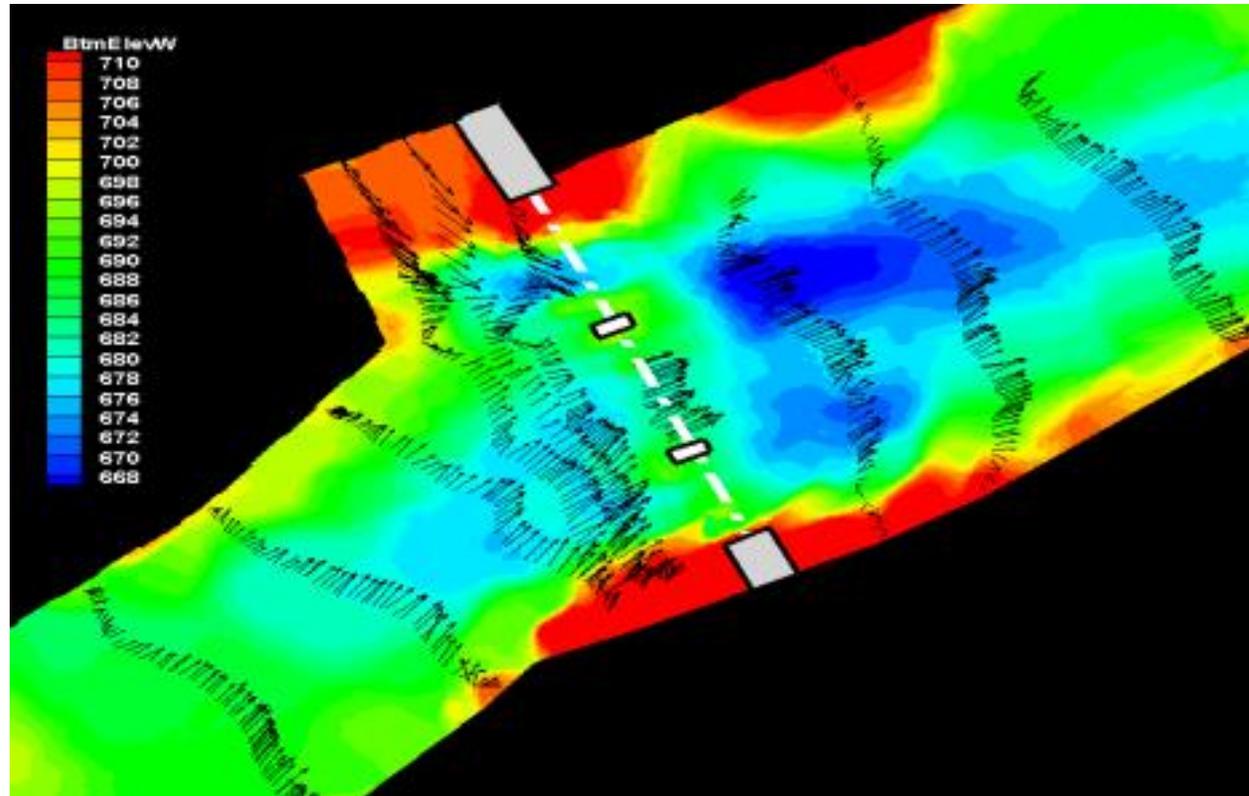
- Corrimiento Doppler
- Velocidad por rayo acústico
- Error de velocidad
- Promediado de muestras independientes
- Básicas de narrow y broadband
- Bottom Tracking
- Sistema de coordenadas

# Resumen

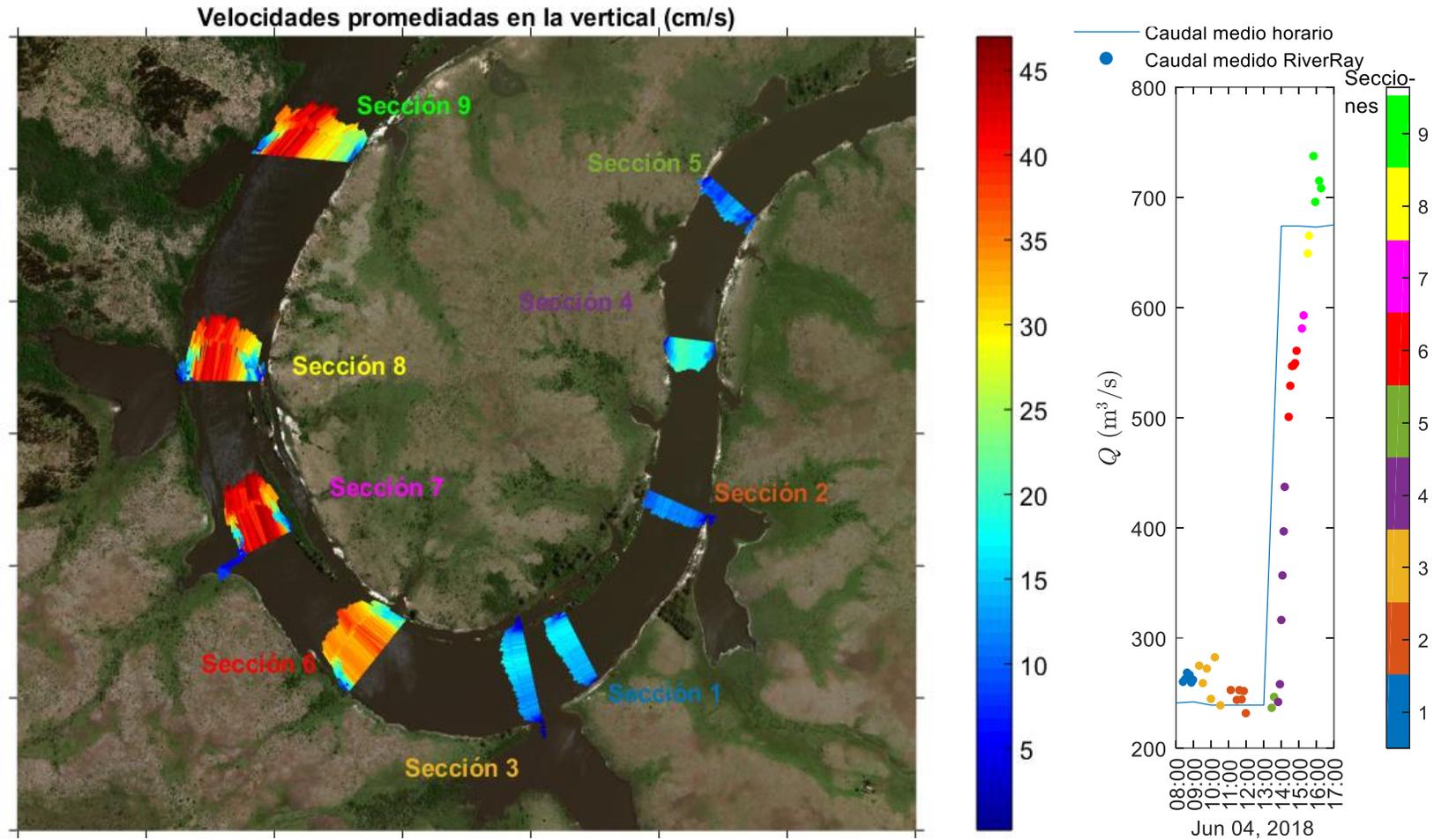
- Cálculo de caudal con medidor de corrientes
- Introducción a los métodos acústicos
- Áreas no medidas
- Cálculo de caudal en áreas medidas
- Estimación de caudal en áreas no medidas (arriba, abajo y márgenes)
- Tratamiento de datos perdidos o inválidos
- Caudal total en una sección

Algunas aplicaciones

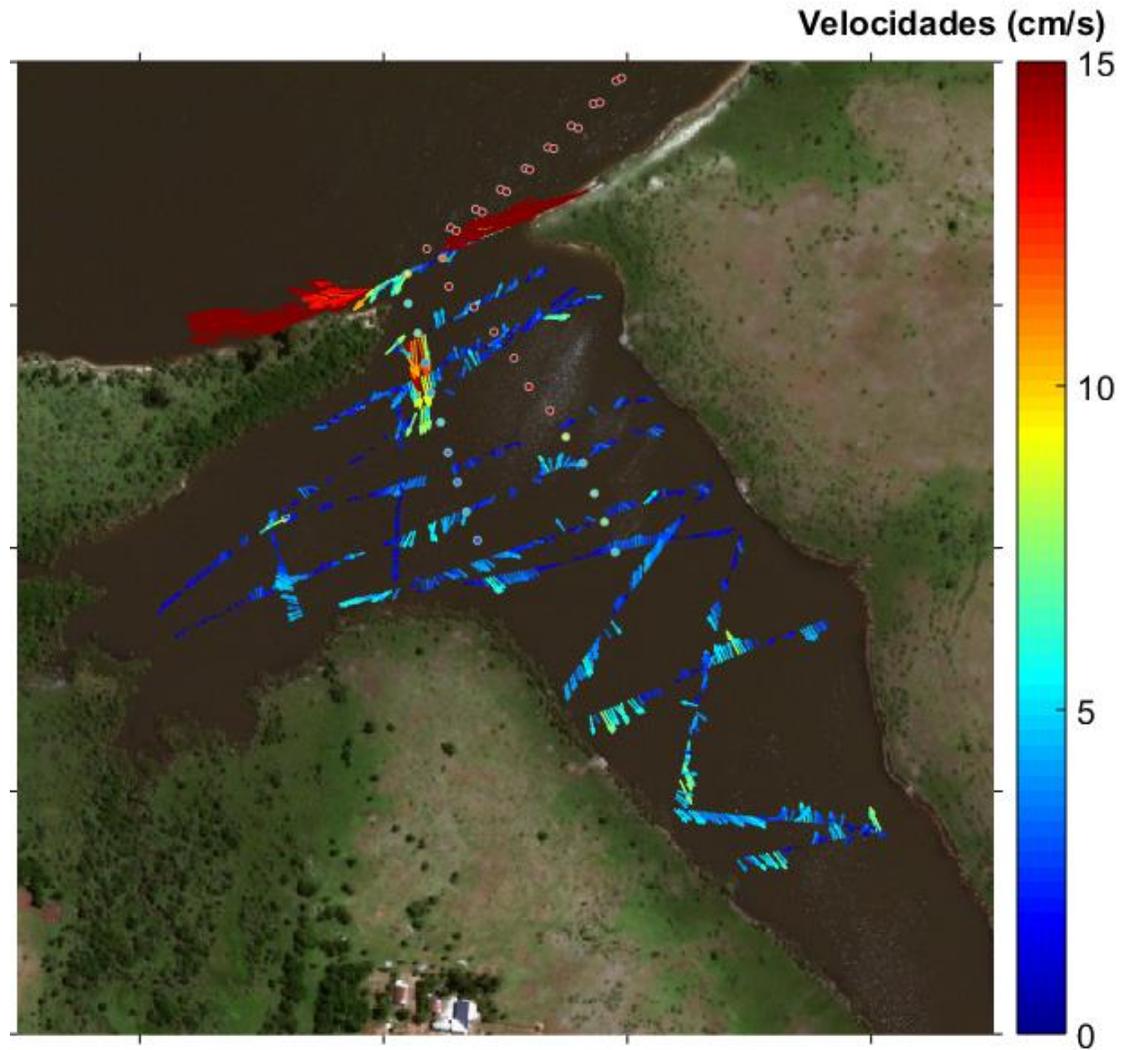
# Campo bidimensional de velocidades y profundidades de erosión en las inmediaciones de un puente



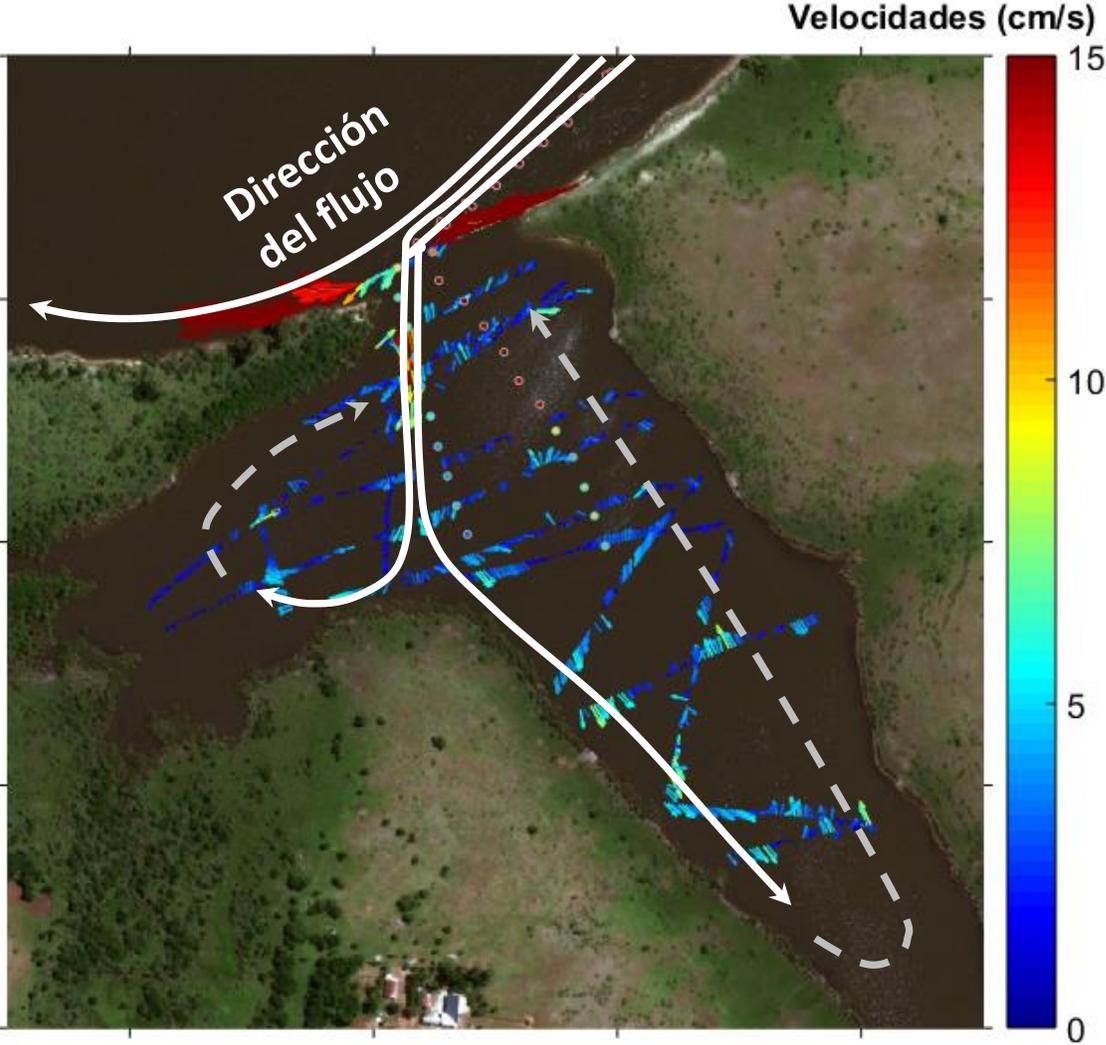
# Evolución del tránsito de una crecida



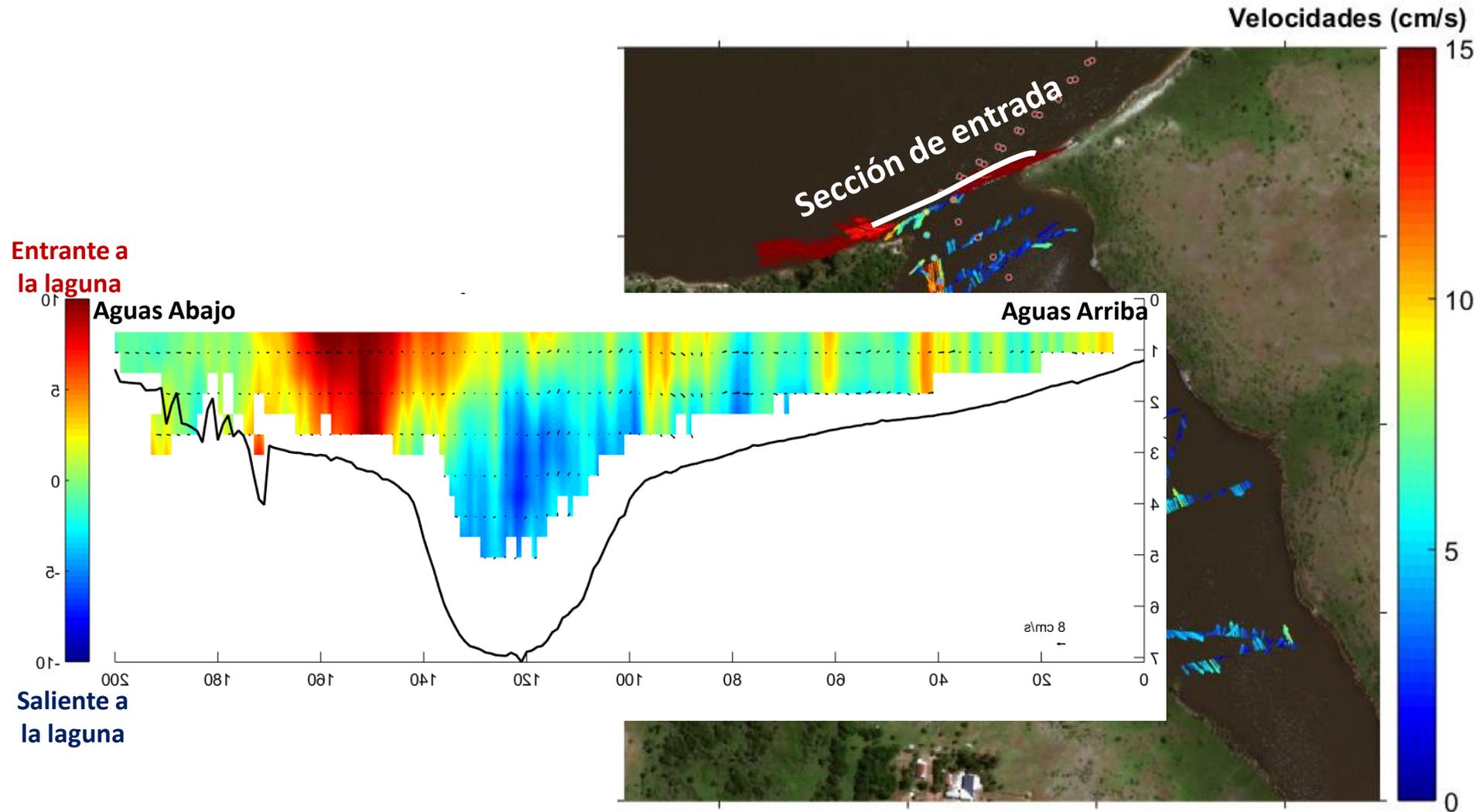
# Hidrodinámica en una laguna



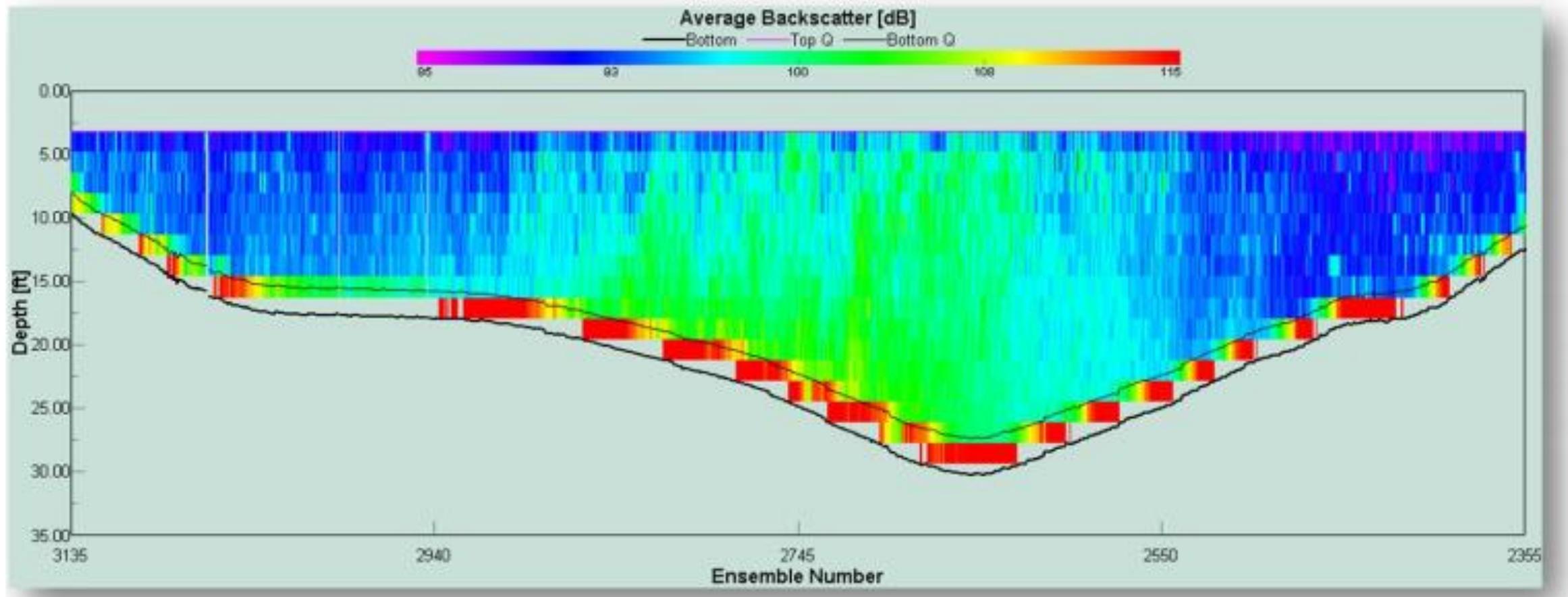
# Circulación en la laguna



# Sección de entrada a la laguna



Los datos que registra el ADCP pueden usarse para estimar transporte en suspensión de sedimentos



# Modelos perfiladores

RiverRay



StreamPro



RiverSurveyor



Channel Master Horizontal



Rio Grande



RiverPro



S5



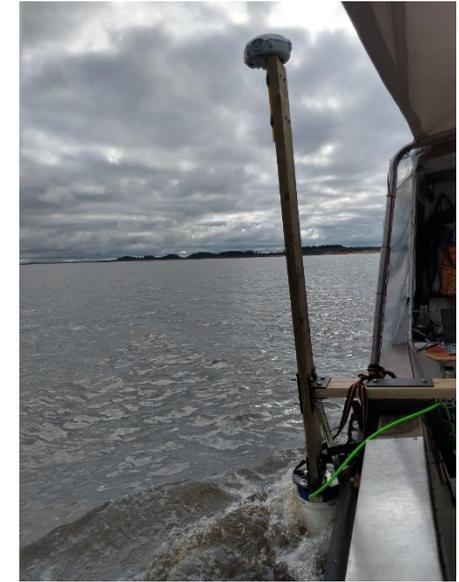
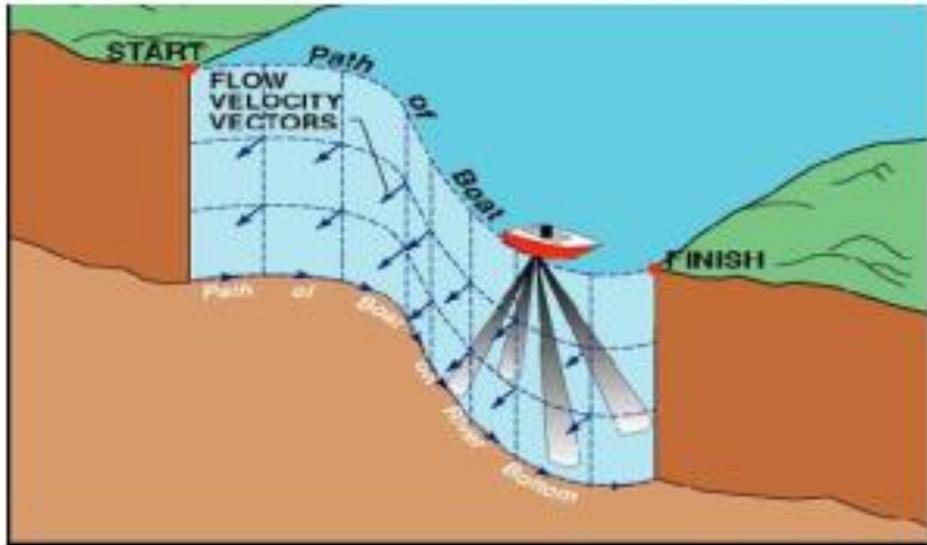
M9



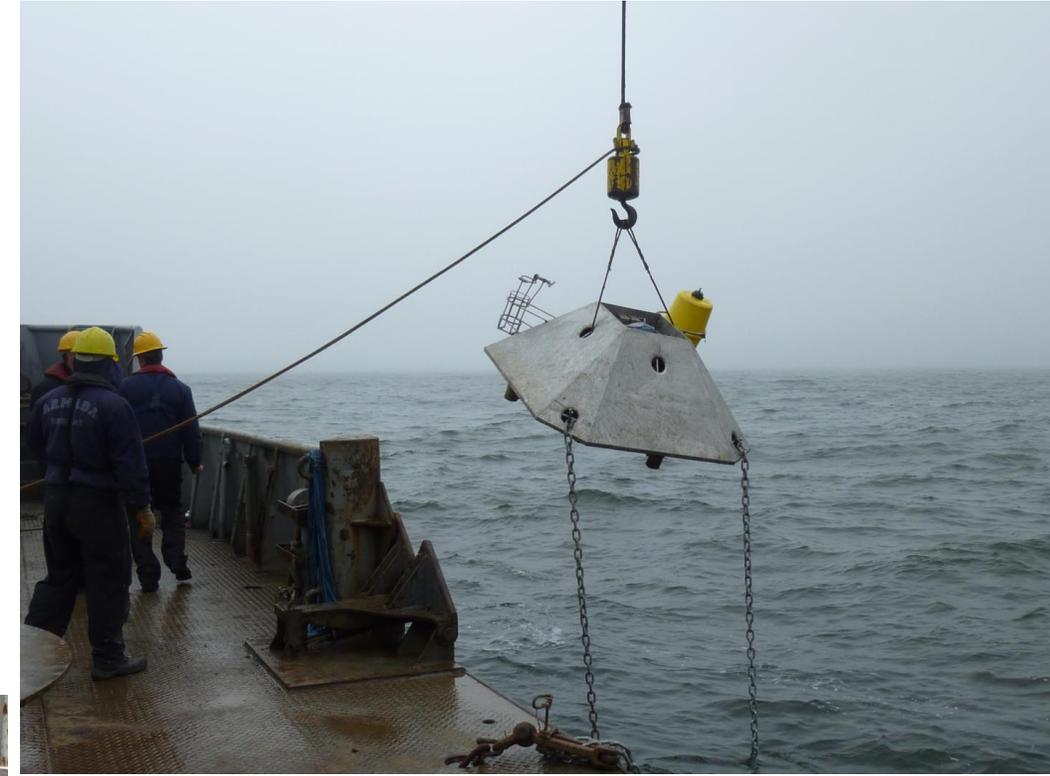
Sentinel V



# Medición desde plataformas móviles



# Medición desde el fondo, mirando hacia arriba



# Medición desde el fondo, mirando hacia arriba



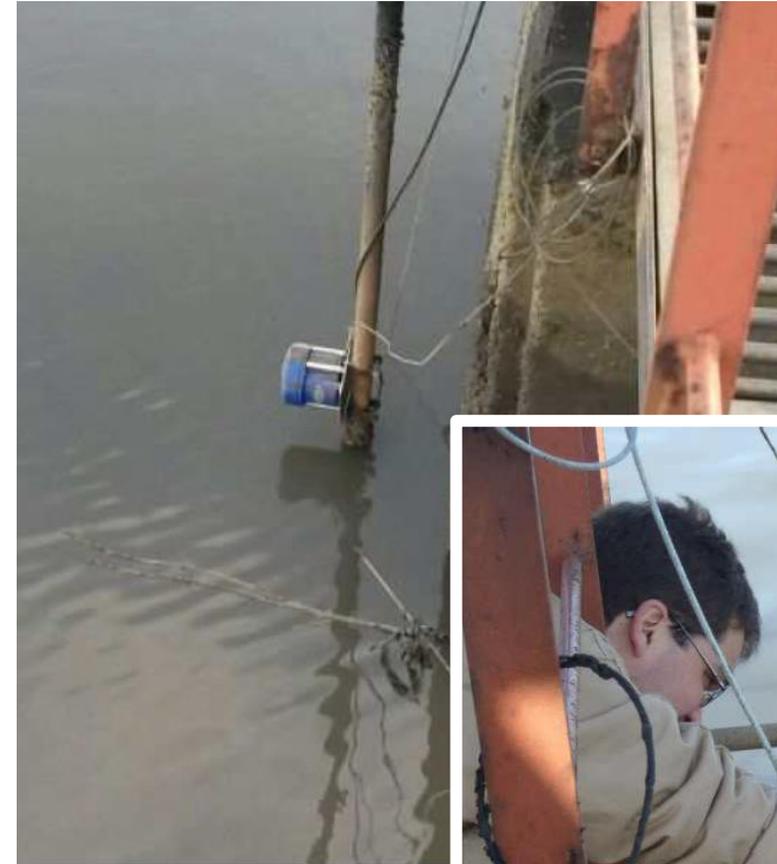
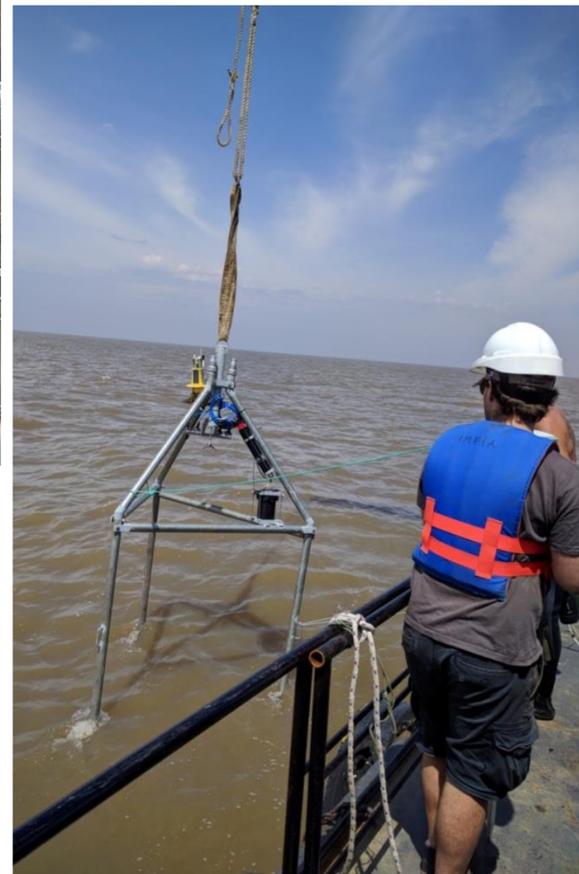
# Medición desde el fondo, mirando hacia arriba



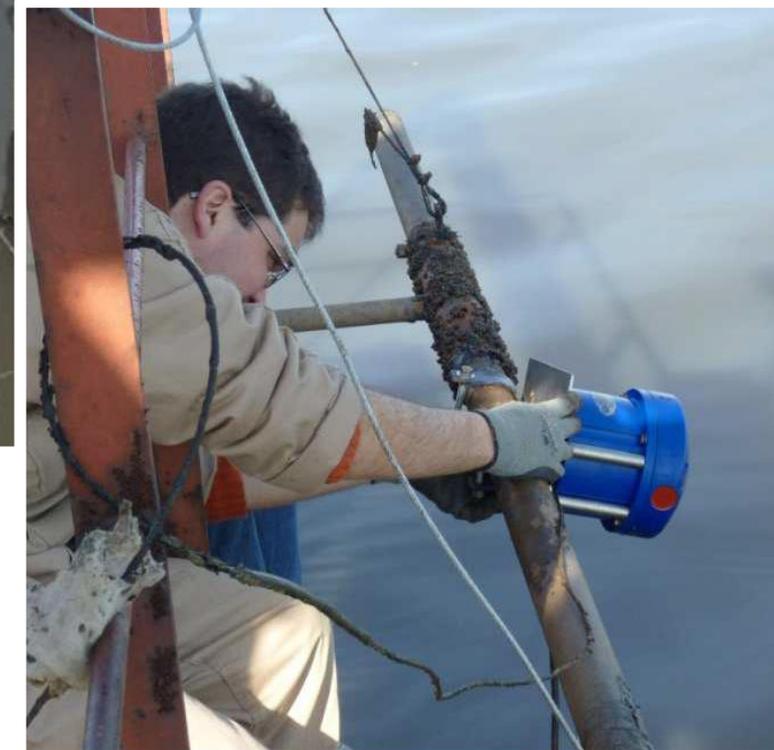
# Medición desde una estructura fija...



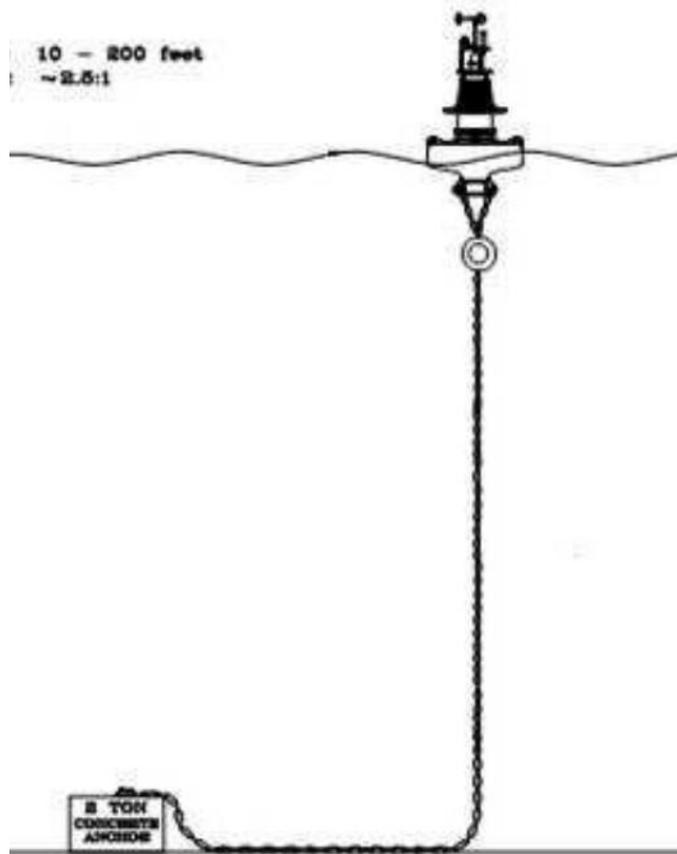
hacia abajo



hacia el  
costado



# Medición desde una boya



# Medición desde una boya



# Medición desde una boya



# Medición desde una boya



# Moving Bed Tests

- Stationary Test
- Loop Test

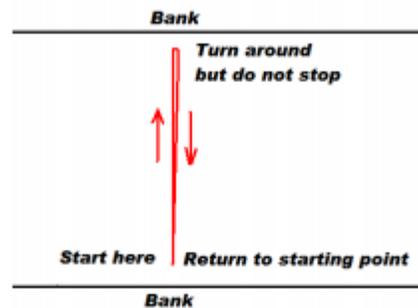
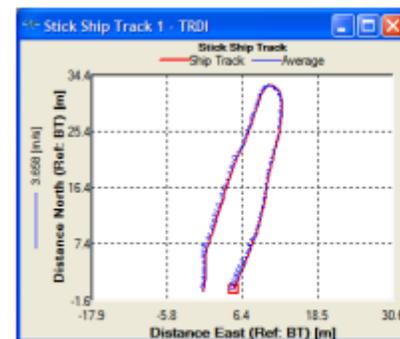
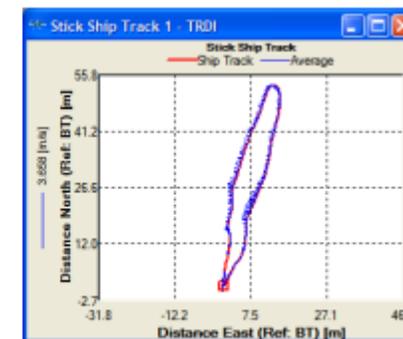


Figure 52. Loop Test



Moving bed



No moving bed

# Incertidumbres

## Monte Carlo Approach for Uncertainty Analysis of Acoustic Doppler Current Profiler Discharge Measurement by Moving Boat

Stephanie A. Moore<sup>1</sup>; Elizabeth C. Jamieson<sup>2</sup>; François Rainville<sup>3</sup>; Colin D. Rennie, M.ASCE<sup>4</sup>; and David S. Mueller<sup>5</sup>

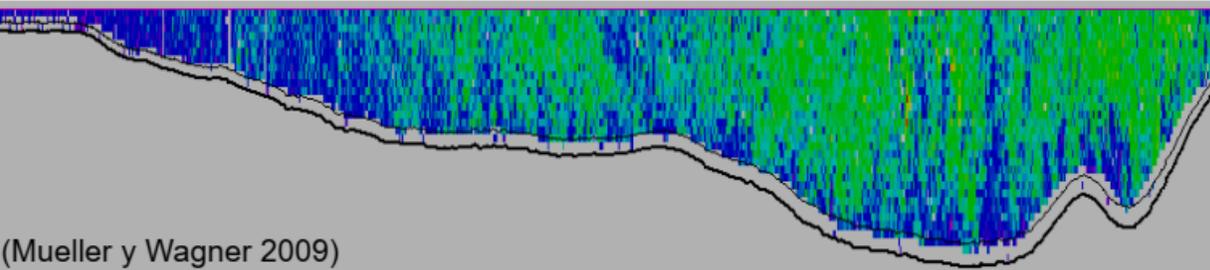
Metodología de medición para determinar el caudal desde plataformas móviles

Transecta 1: 590 m<sup>3</sup>/s

Transecta 2: 604 m<sup>3</sup>/s

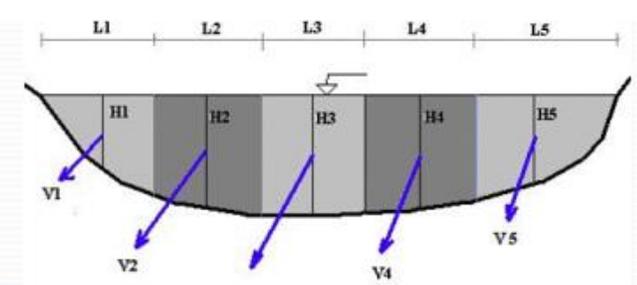
Transecta 3: 580 m<sup>3</sup>/s

Transecta 4: 601 m<sup>3</sup>/s



(Mueller y Wagner 2009)

Las mediciones de caudal con ADCP se pueden realizar desde embarcaciones fijas o atravesando el río en múltiples cruces (o transectas) utilizando plataformas móviles



El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) utiliza esta tecnología desde la década del 90 y ha desarrollado metodologías a los fines de estandarizar y optimizar el uso de los ADCP en la medición de los caudales

### Discussion

For the data sets analyzed in this work and the assumptions that were made about the various error sources, the single transect relative standard uncertainties ranged from 0.74 to 6.06%, the average RSU of the simulations (MCM RSU) ranged from 0.38 to 2.85%, and the total simulated uncertainty on each assemblage of four successive transects ranged from 1.35 to 6.03%. These relatively low values are credible given the fact that the flows at all sites were relatively steady and uniform, and Water Survey of Canada measurement procedures were followed. They are also consistent with the results of instrument and method intercomparison studies, which were presented in the Introduction. Based on the assumptions about the probability distributions of the error sources, the presented simulations show that roughly half a dozen error sources were substantial contributors to the total uncertainty in measurements made at the four gauging stations that were investigated. According to this analysis, one of the largest error sources is invalid

# Técnicas de medición mediante la utilización de trazadores.

Módulo de Flujo de Agua Superficial

Taller de Técnicas de Medición en Hidrología e Hidráulica

# Medición con trazadores

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

Ejemplos:

- Tintas
- Sustancias químicas (fertilizantes, sal, etc.)
- Radioisótopos
- Elementos flotantes
- Rugosidades de la superficie libre
- Secuencias de presión turbulenta generada por turbulencia

# Medición con trazadores

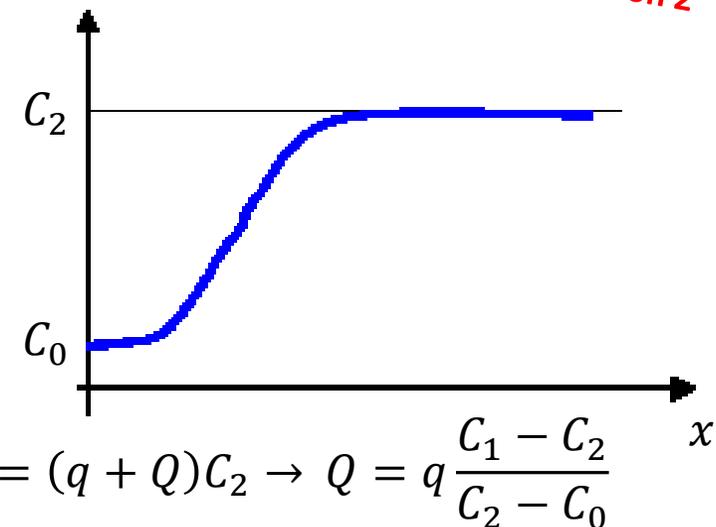
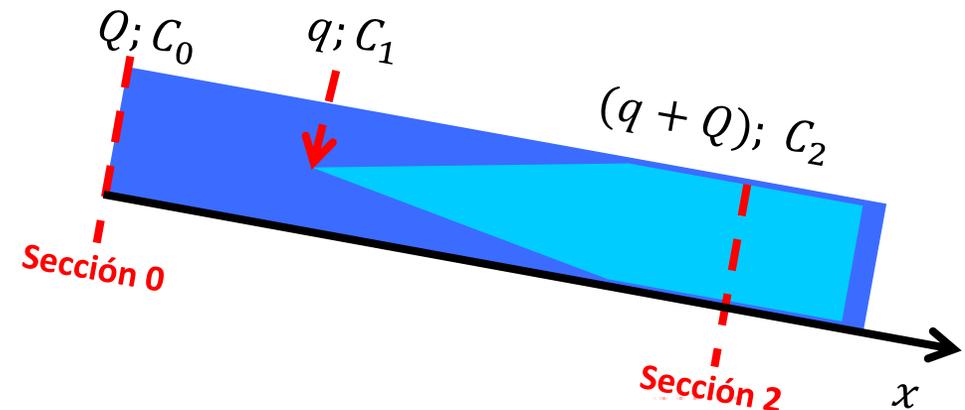
Para determinar el caudal usando trazadores se recurre a distintos métodos:  
1) dilución; 2) velocidad-área.

## 1) Dilución:

Se mide la concentración del trazador a lo largo del tiempo y luego se despeja el caudal del balance de masa.

Se basa en la que el trazador se mezcló completamente con el flujo.

Aplicable a flujos en canales o en tuberías.  
No suele resultar confiable en cauces naturales.



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

# Medición con trazadores

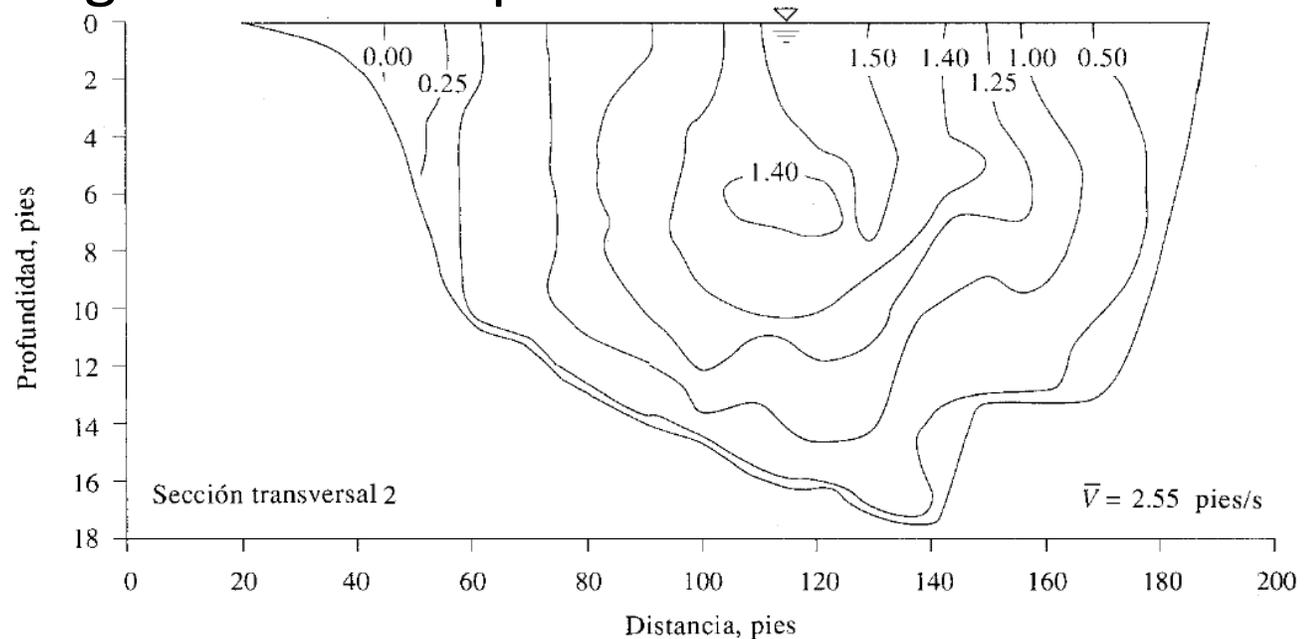
Para determinar el caudal usando trazadores se recurre a distintos métodos:  
1) dilución; 2) velocidad-área.

## 2) Velocidad-área:

Se mide la velocidad del flujo siguiendo el desplazamiento del trazador a lo largo del tiempo.

El caudal se obtiene luego, multiplicando velocidad por área del flujo.

Se basa en la hipótesis de que el trazador se mueve a la par del fluido.



# Medición con trazadores

## **2) Velocidad-área, trazadores superficiales**

Consisten en elementos flotantes que se desplazan sobre la superficie libre del flujo. Se mide su desplazamiento a lo largo del tiempo para determinar la velocidad superficial.

Se puede llevar a cabo de forma sencilla, usando incluso elementos ya presentes en el sitio (ramas, hojas de árbol, etc.) o con técnicas basadas en imágenes.

[VIDEO 1](#)

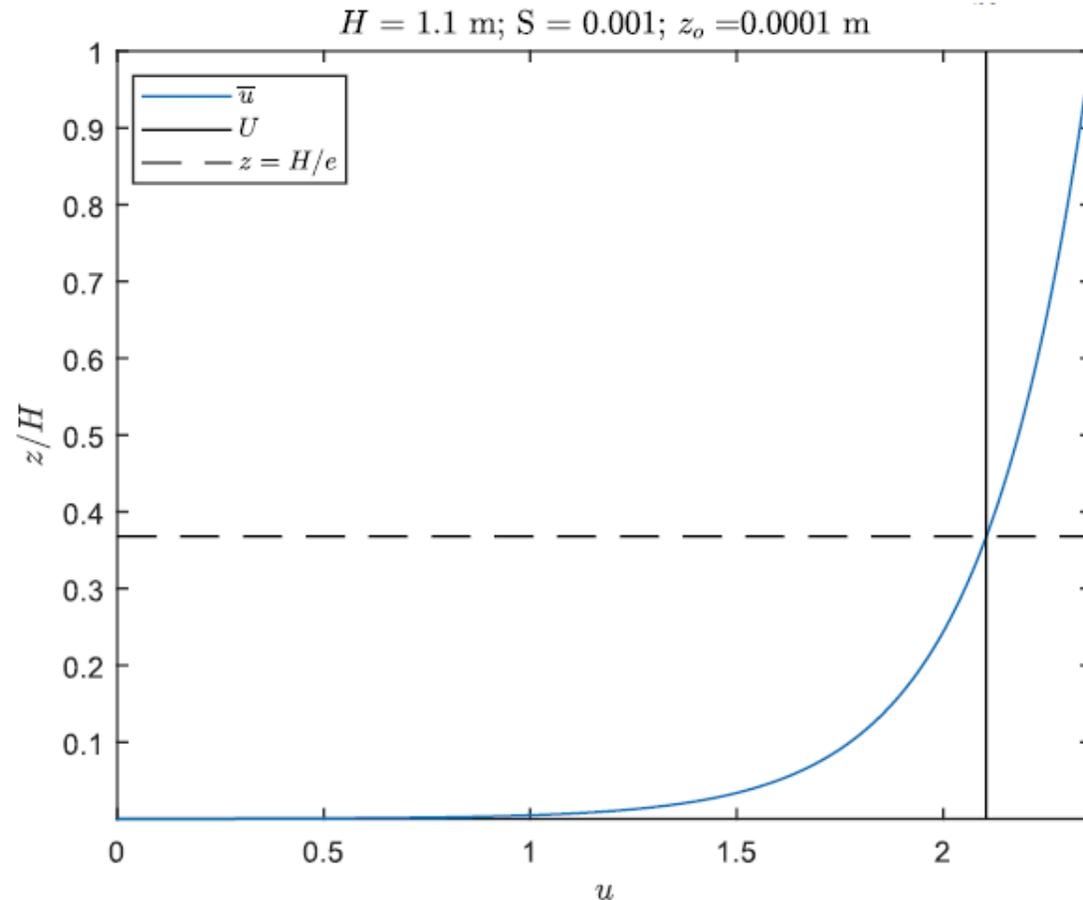
[VIDEO 2](#)

# Trazadores superficiales

$$\bar{u} = \frac{u_*}{\kappa} \log \frac{z}{z_o}$$

$$U = \alpha \left( \bar{u} \Big|_{z=H} \right)$$

- $U$  es la velocidad promedio en vertical
- $\bar{u}|_{z=H}$  es la velocidad superficial
- $\alpha$  es un coeficiente empírico, toma valores entre 0,6 y 0,9 (valor típico 0,85)  
Depende de características del cauce, condición del flujo.



# Trazadores superficiales

En resumen, el procedimiento de medición consiste en:

1. Determinar la velocidad superficial
2. Estimar velocidad media en la columna
3. Multiplicar velocidad media por el área del flujo para obtener el caudal.

En caso de que la velocidad superficial no sea uniforme, se deben tomar medidas a lo largo del cauce para capturar su variabilidad.

$$Q_s = \sum_{i=1}^n U_i d_i \Delta b_i = \sum_{i=1}^n \alpha \left( \bar{u}_i \Big|_{z=H_i} \right) d_i \Delta b_i$$

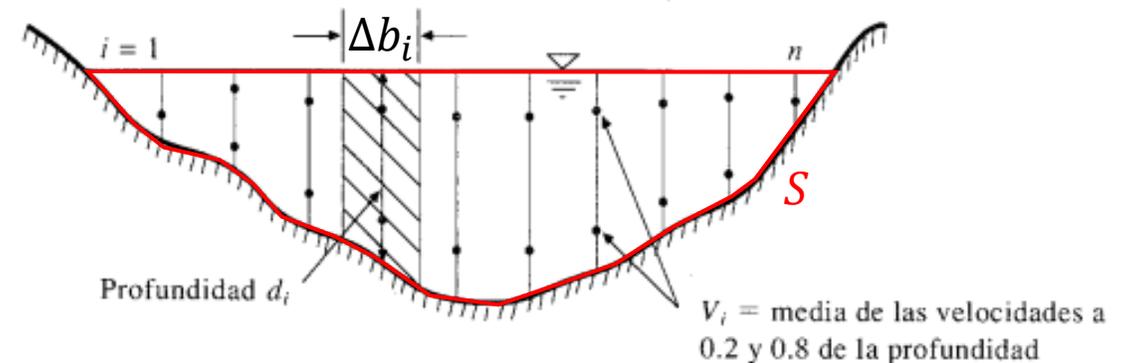


FIGURA 6.3.7

Cálculo del caudal utilizando la información de un aforo.

Fuente: Ven Te Chow, Hidrología Aplicada

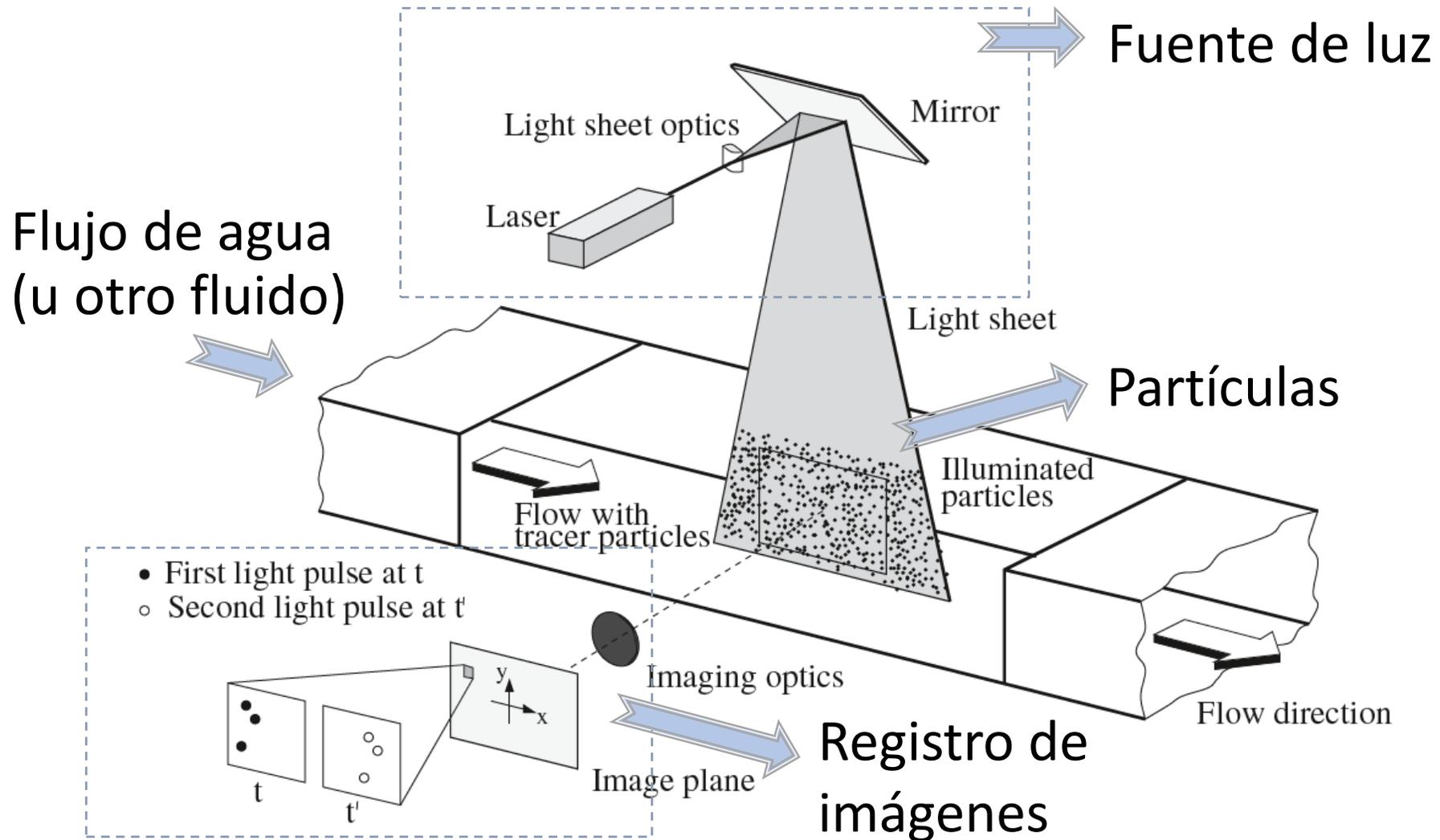
# Velocimetría basada en imágenes

Es un conjunto de técnicas que permiten determinar la velocidad del agua a partir del registro y procesamiento de imágenes tomadas de forma sucesivas (video).

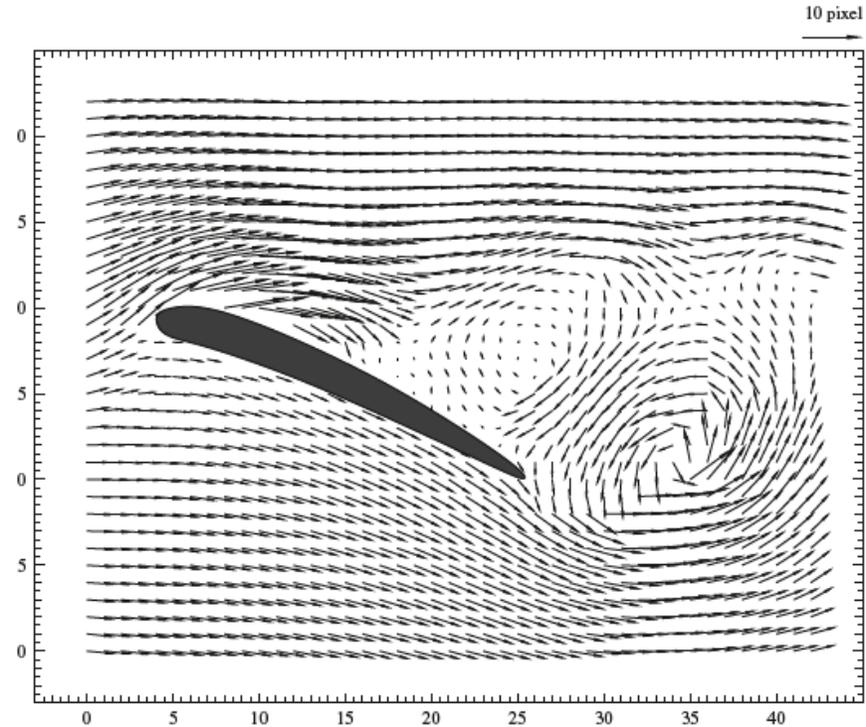
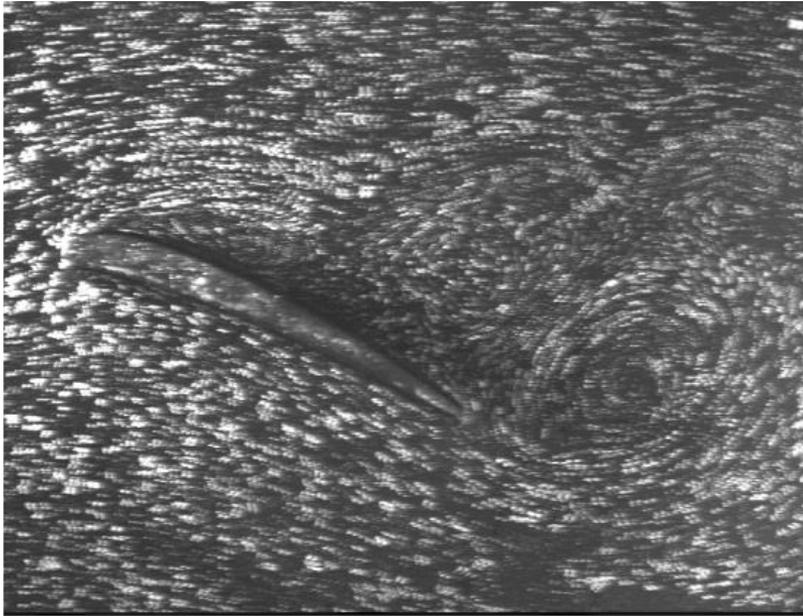
El procesamiento se basa en la detección y seguimiento de trazadores que pueden ser: elementos sembrados artificialmente; o elementos naturales arrastrados por el flujo.

Este método surge inicialmente como técnica de laboratorio para el estudio de campos de velocidad en flujos turbulentos. Luego con los avances y comercialización de las tecnologías fotográficas y el procesamiento computacional se extendió su aplicación al monitoreo de caudales.

# Aplicación en laboratorio (PIV)



# Aplicación en laboratorio (PIV)



[VIDEO 1](#)

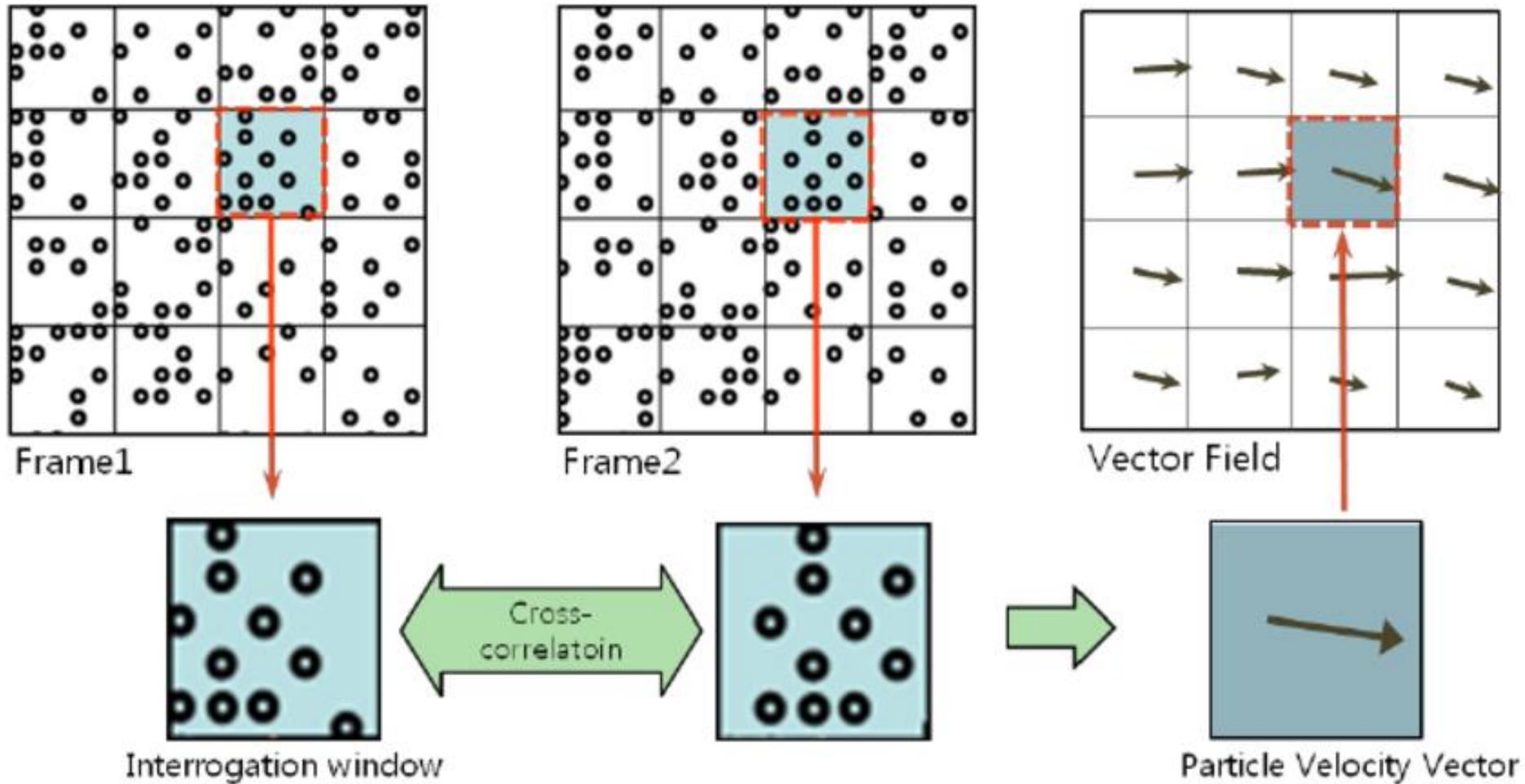
[VIDEO 2](#)

[VIDEO 3](#)

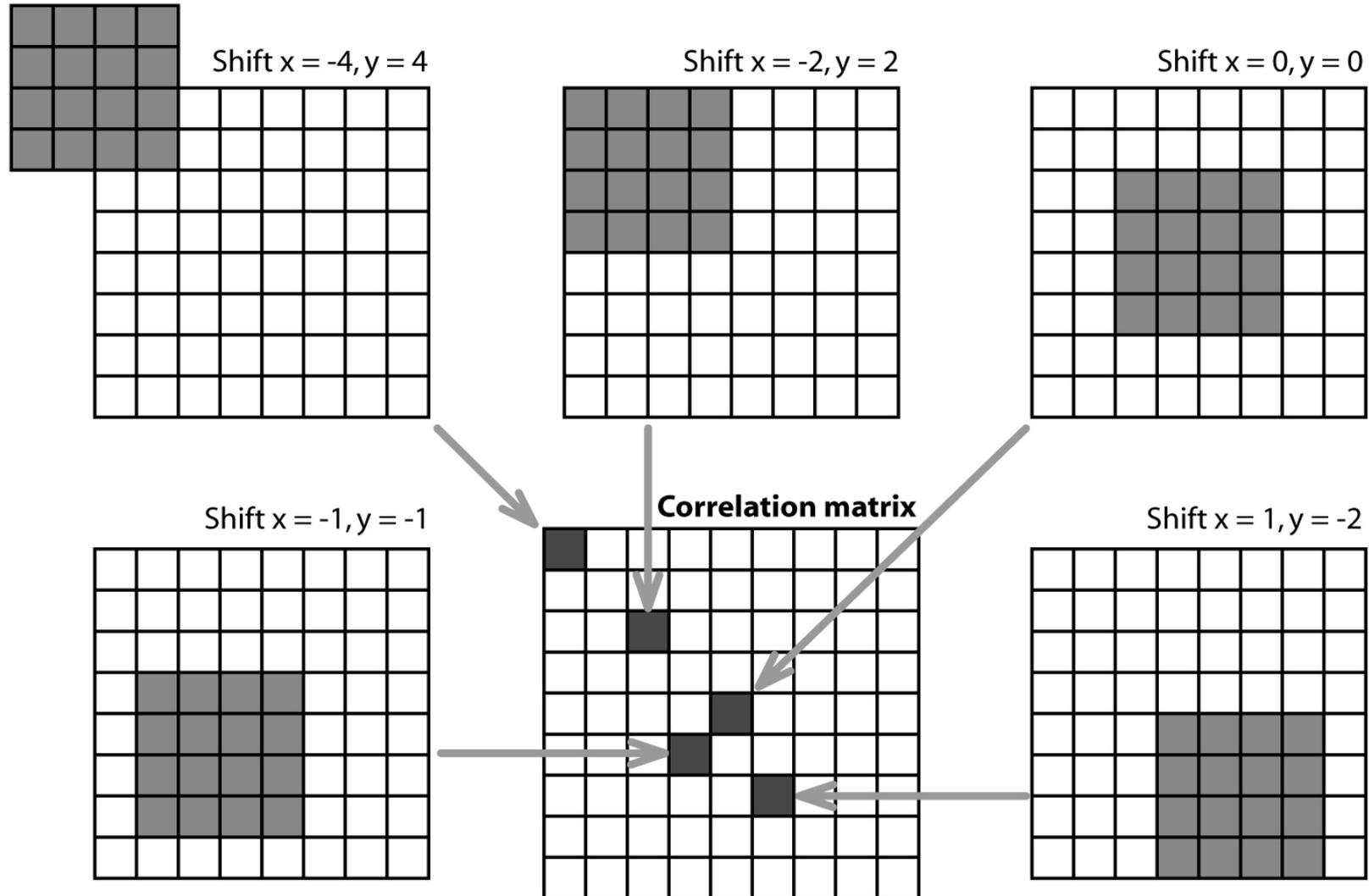
# Aplicación en laboratorio (PIV)

- Durante el procesamiento, las imágenes se subdividen en “ventanas de interrogación” que conforman una cuadrícula. Se asume que el patrón de trazadores que queda contenido en cada ventana no cambia significativamente entre dos imágenes, pero si se desplaza.
- El desplazamiento se determina mediante una búsqueda del patrón de la primera foto en la segunda, en la que se maximiza una función de correlación cruzada.
- Estimando el movimiento de estos patrones entre las imágenes se puede obtener un campo de velocidad instantáneo conociendo el intervalo de tiempo entre ellas.
- El campo de velocidad promedio del flujo se obtiene promediando los campos instantáneos.

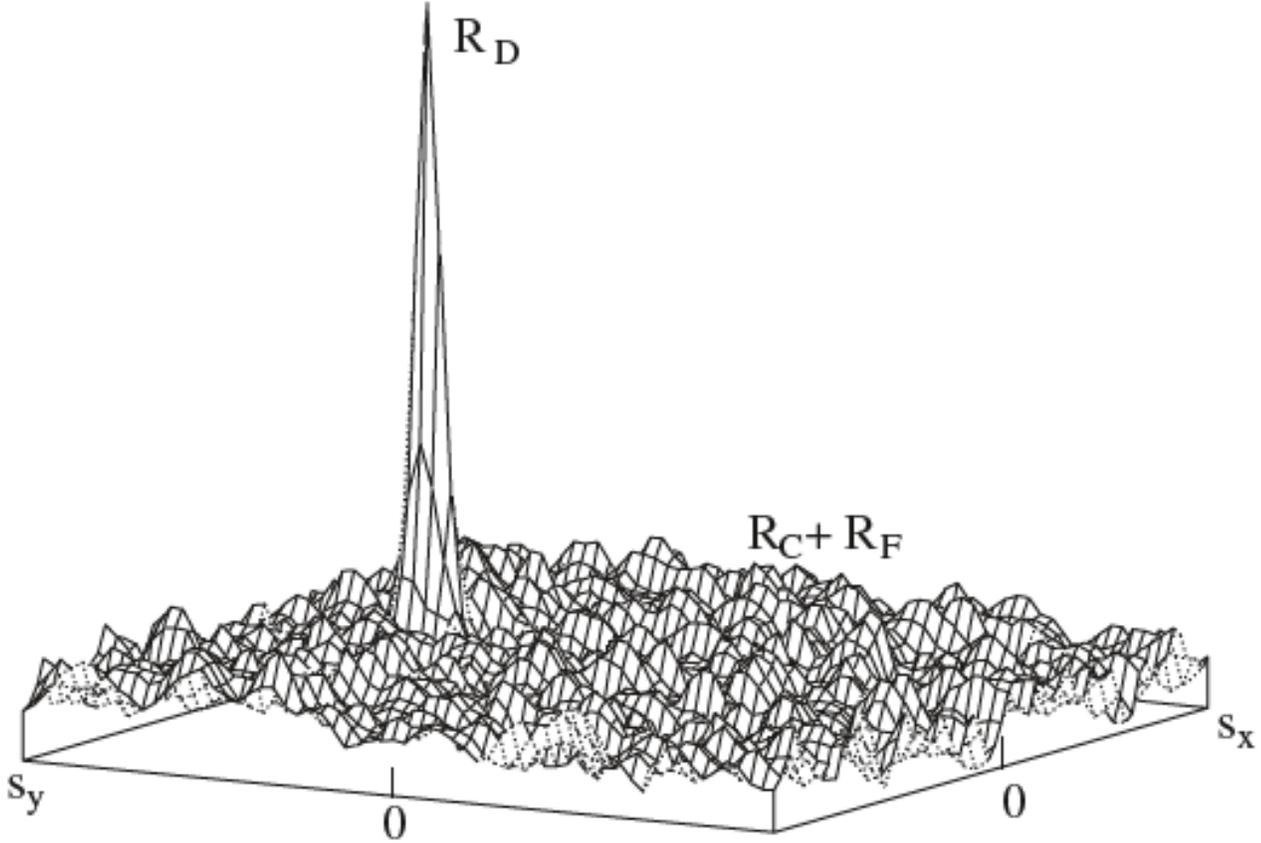
# Aplicación en laboratorio (PIV)



# Aplicación en laboratorio (PIV)



# Aplicación en laboratorio (PIV)



# Sembrado de trazadores

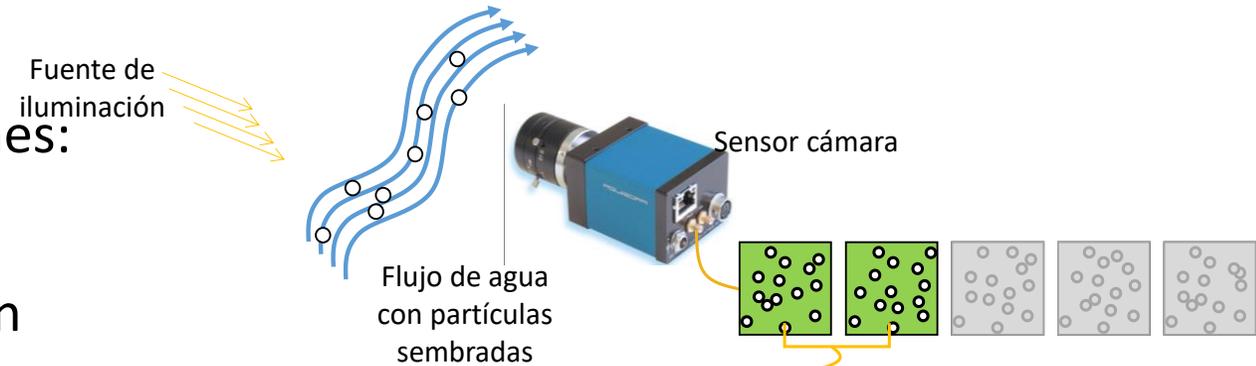
Hay variedad de posibilidades a la hora de elegir los trazadores a sembrar. Se deben cumplir las siguientes condiciones:

1. Flotación
2. Contraste con el fondo para ser detectados por el algoritmo
3. Peso suficiente para reducir lo más posible la afectación por viento
4. Ser biodegradables y afectar lo menos posible el ecosistema

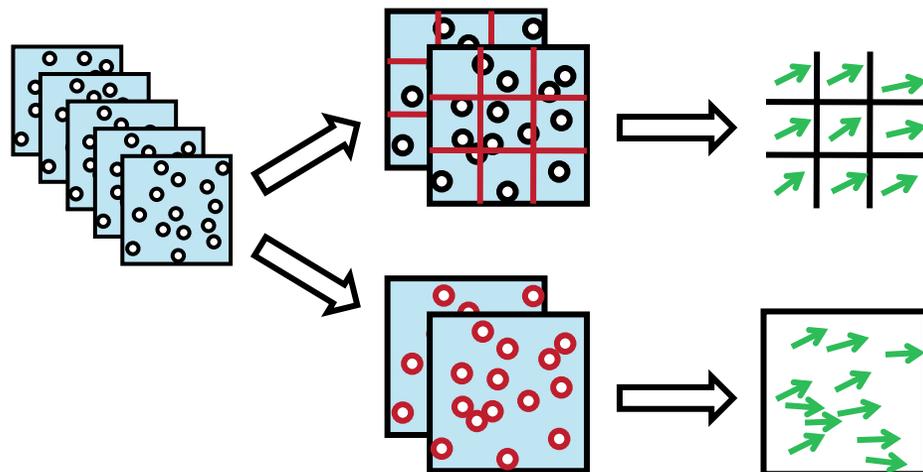
# Velocimetría basada en imágenes

El software que procesa las imágenes:

1. Identifica los trazadores
2. Determina cuanto se desplazan entre fotogramas consecutivos



Existen diferentes métodos de procesamiento, que difieren en la forma en que se reconocen los trazadores y se mide su desplazamiento.



## PIV (Particle Image Velocimetry)

Calcula el desplazamiento medio del patrón dentro de una ventana de interrogación.

## PTV (Particle Tracking Velocimetry)

Sigue cada partícula individualmente y calcula las trayectorias.

# Large Scale Particle Image Velocimetry



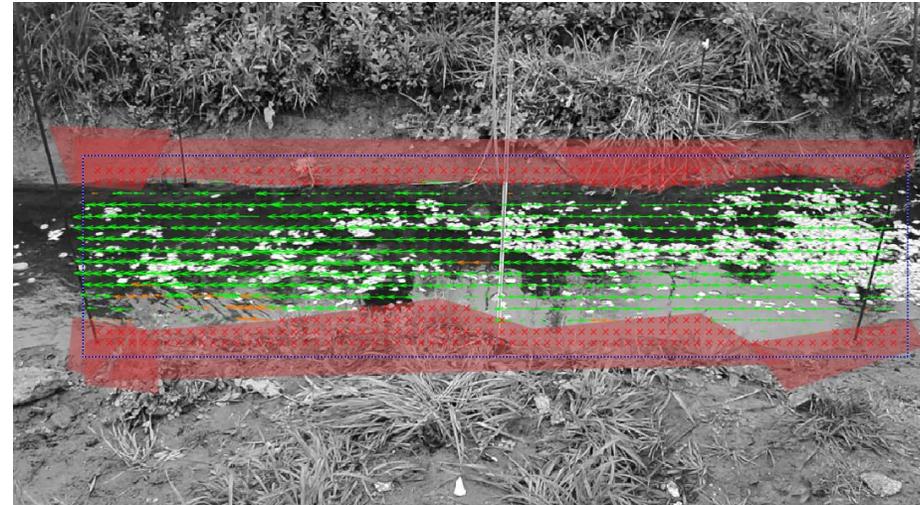
Chips de madera



Procesamiento de imágenes con LSPIV



Cañada Iyúí (Matilde Pacheco), Marzo 2022



Detección de patrones mediante PIV.

# Large Scale Particle Tracking Velocimetry



Naranjas



Procesamiento de  
imágenes con LSPTV



Arroyo Maldonado, Noviembre 2014

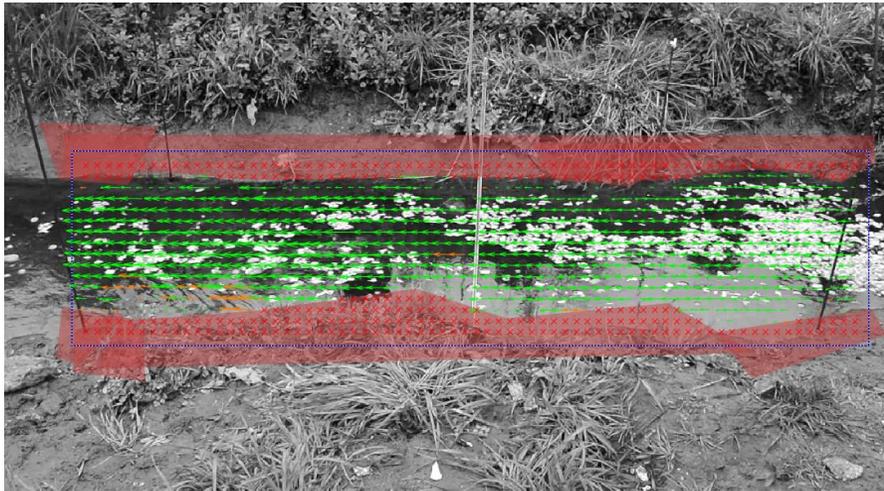


Detección de partículas mediante PTV.

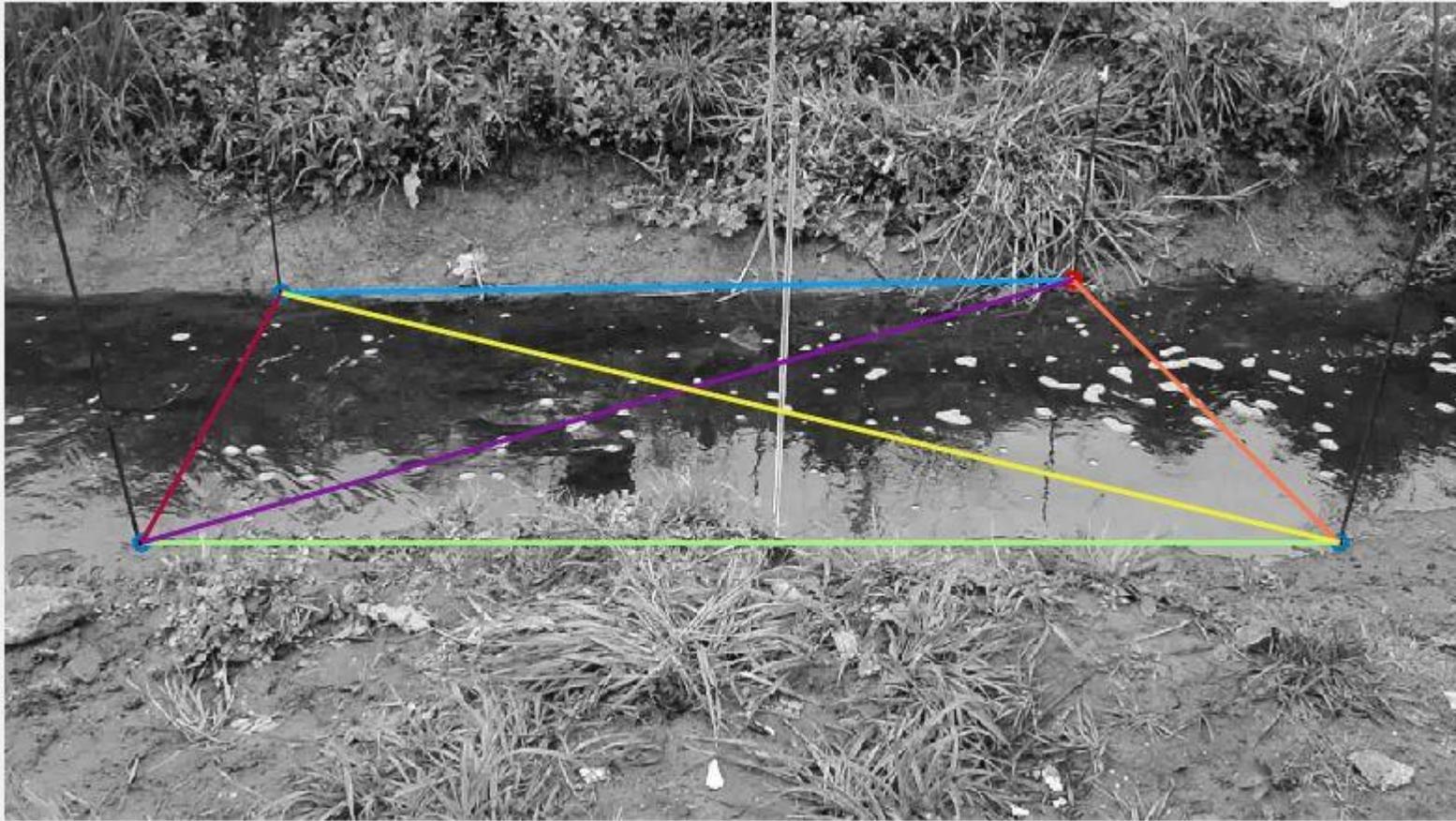
# Velocimetría basada en imágenes

Etapas del procesamiento:

1. Pre-procesamiento de imágenes (filtros, blanco y negro, extracción del fondo)
2. Determinación de campo de velocidad superficial medio en píxeles/segundo
3. Rectificación para pasar a metros/segundo y para compensar ángulo oblicuo de filmación



# Velocimetría basada en imágenes

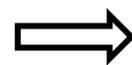


# Rectificación

Se requiere un procesamiento adicional para rectificar el campo de velocidades (pixeles/s) obtenido:

1. Para convertir las unidades de velocidad de pixel/s a m/s.
2. Para compensar el efecto generado por tomar el video de forma oblicua (no perpendicular) a la superficie libre.

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ 1 \end{pmatrix}$$

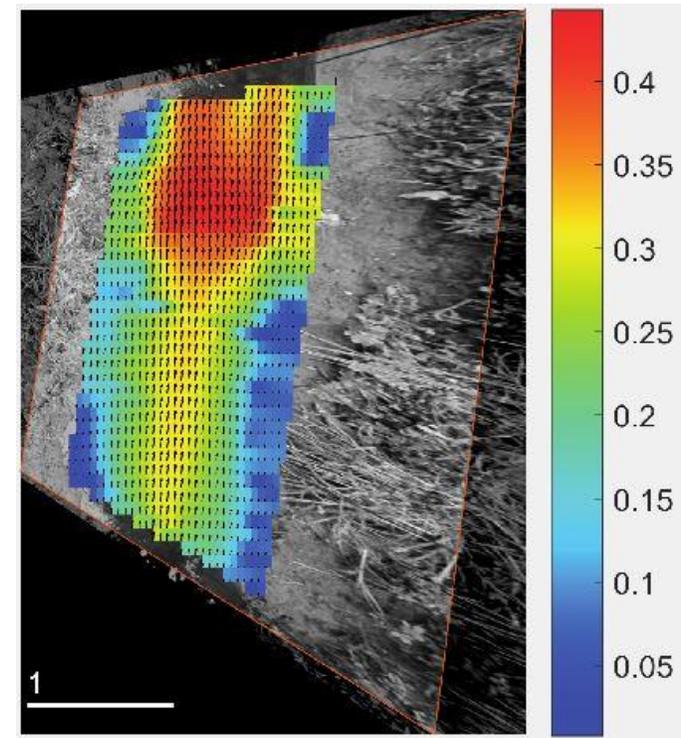
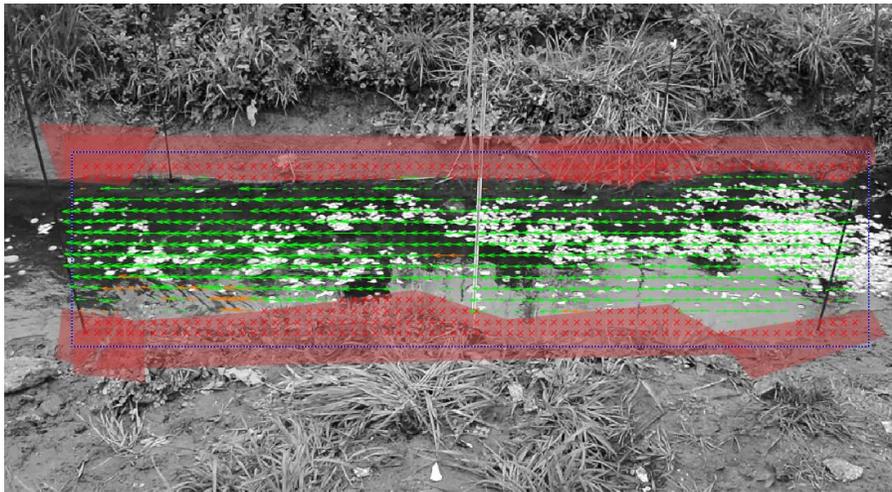


Puede resolverse si se conocen las coordenadas reales de al menos 4 puntos identificables en la imagen

# Velocimetría basada en imágenes

Etapas del procesamiento:

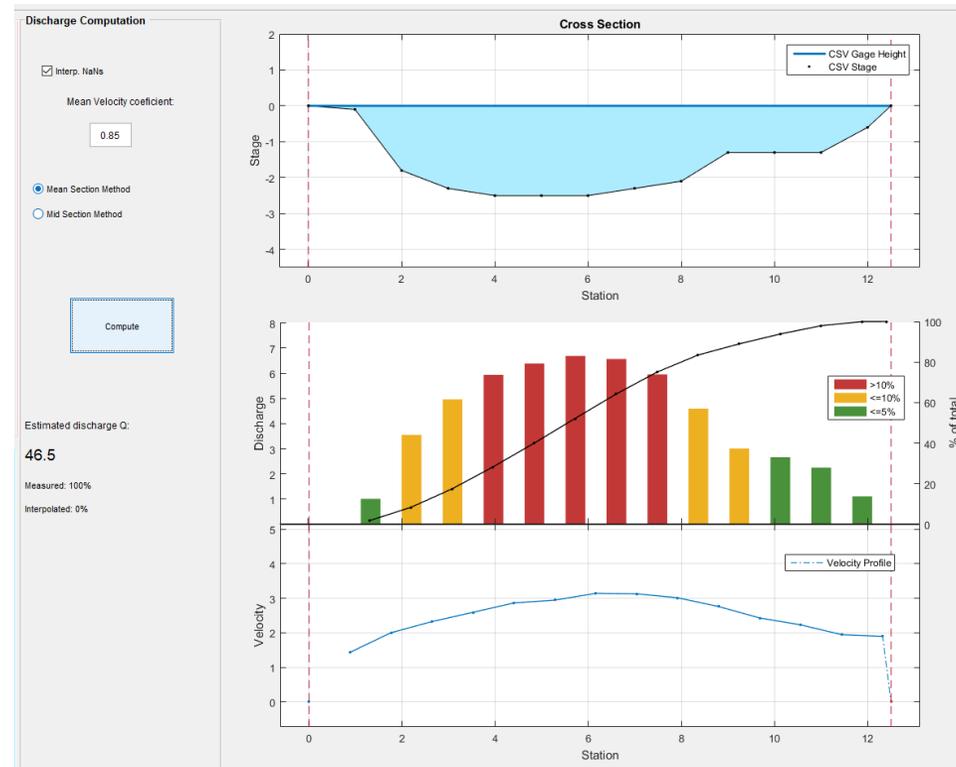
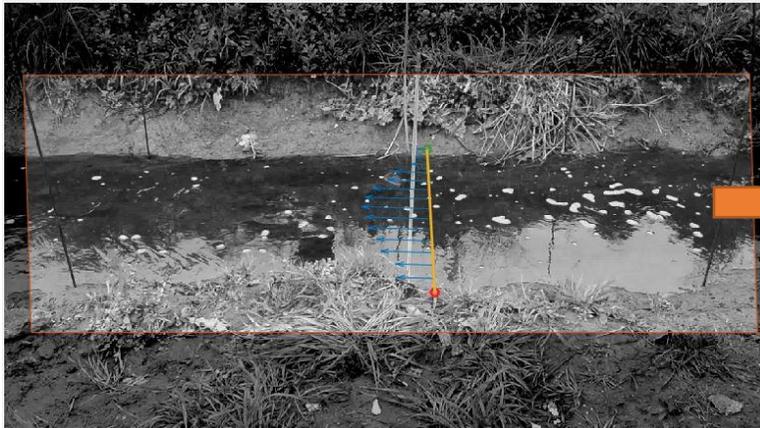
1. Pre-procesamiento de imágenes (filtros, blanco y negro, extracción del fondo)
2. Determinación de campo de velocidad superficial medio en píxeles/segundo
3. Rectificación para pasar a metros/segundo y para compensar ángulo oblicuo de filmación



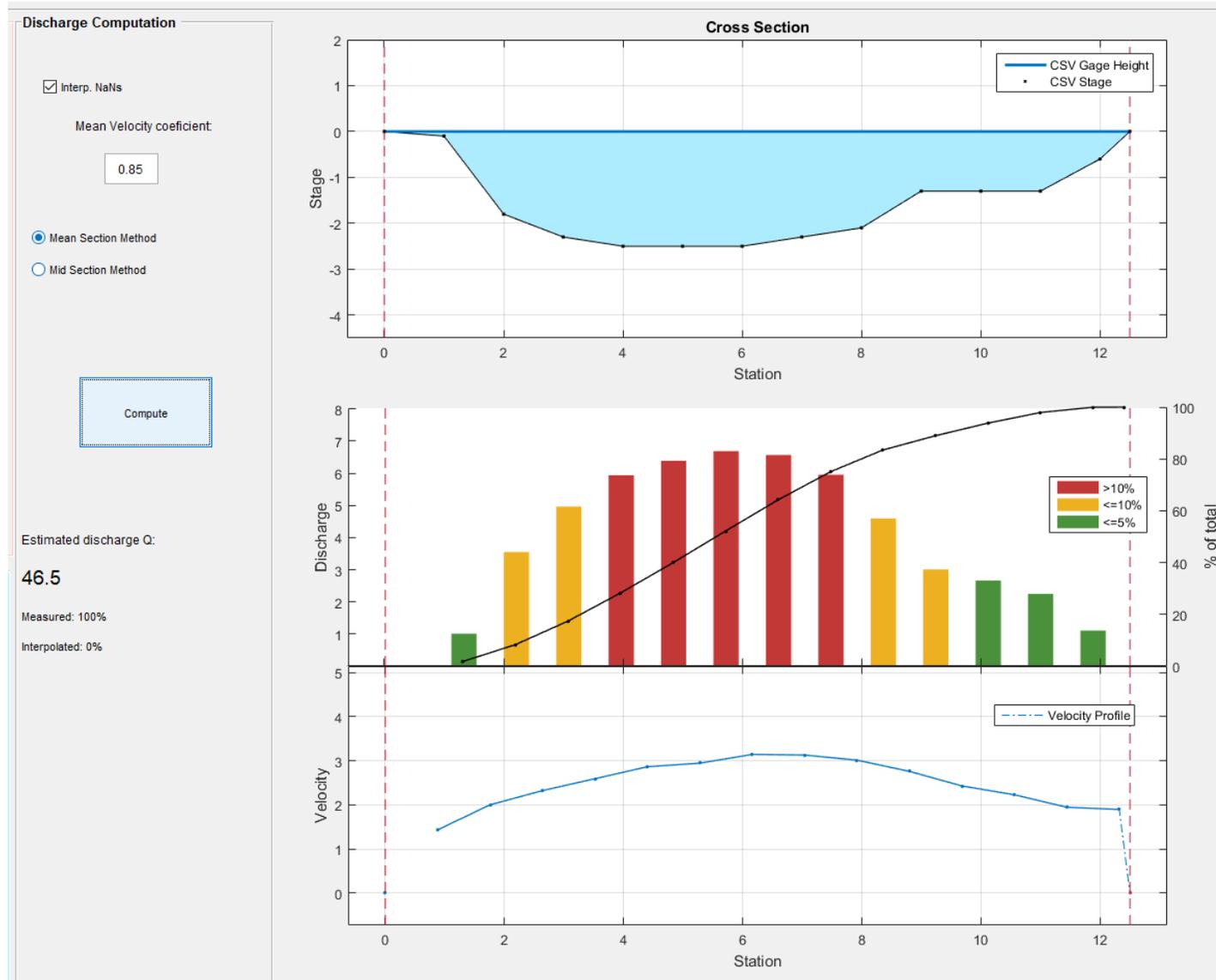
# Velocimetría basada en imágenes

Etapas del procesamiento:

4. Extracción de secciones horizontales de velocidad superficial
5. Transformación a velocidad media con factor  $\alpha$
6. Cálculo del caudal



# Velocimetría basada en imágenes



# Procedimiento de campo



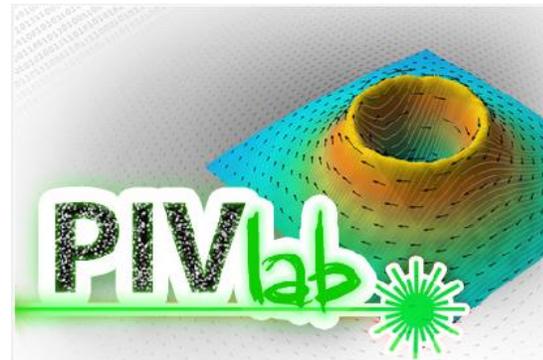
# Procedimiento de campo



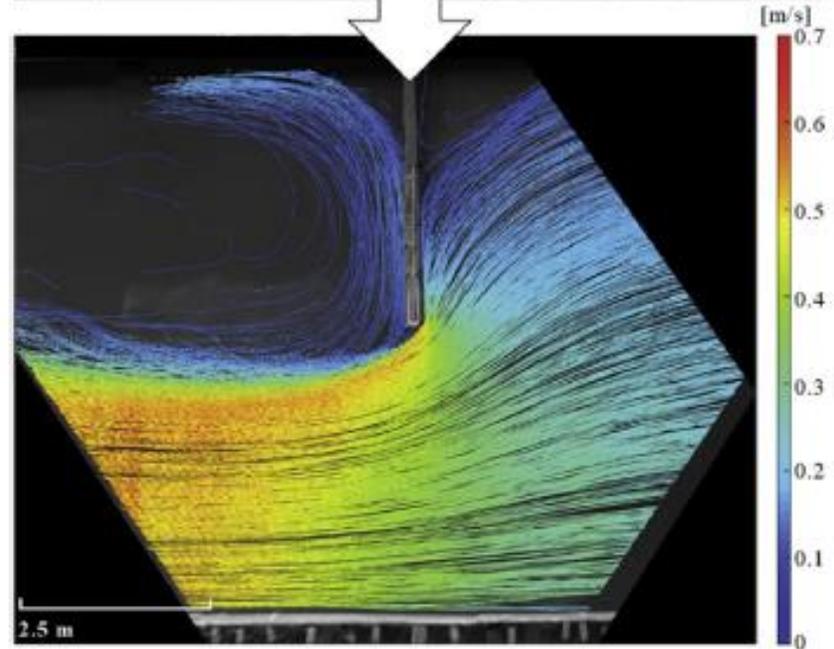
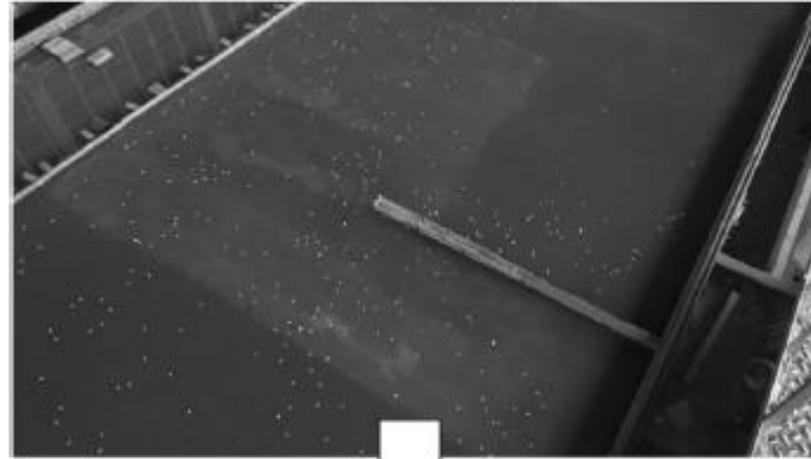
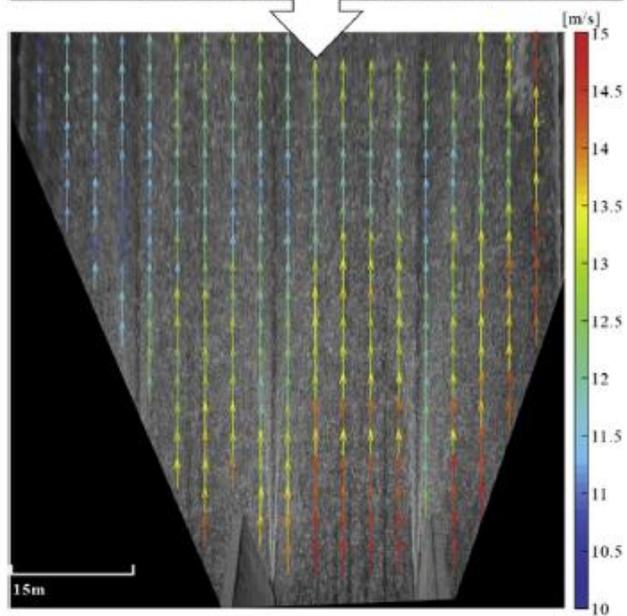
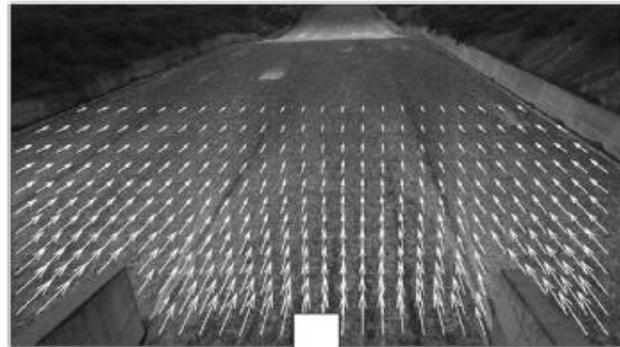
# Programas utilizados

- Para procesamiento PIVLab (<https://pivlab.blogspot.com/>)
- Para procesamiento PTVLab (<http://ptvlab.blogspot.com/>)

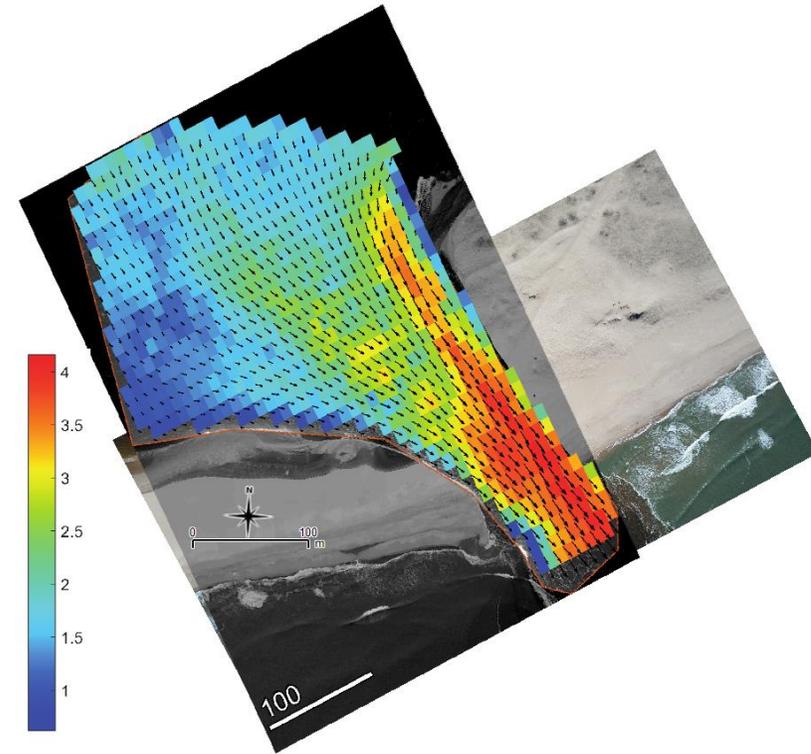
Para rectificación del campo de velocidad RIVeR (<https://riverdischarge.blogspot.com/>) incluye el código y la interfaz de procesamiento, por lo que alcanza con descargar este.



# Otras aplicaciones



# Otras aplicaciones



**Teixeira, M. (2019)**, *Modelos morfodinámicos aplicados a la gestión de las lagunas litorales : el caso de la Laguna de Rocha*. Tesis de maestría. Montevideo : UR.FI.IMFIA.

(<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/20935>)

# Aplicación a proyectos de investigación

- Proyecto CSIC I+D 2014: “Avances para la medición de caudales de estiaje en Uruguay utilizando técnicas de velocimetría por imágenes” – IMFIA + CETA, UNC.
- Proyecto “Cazadores de Crecidas” – CETA, UNC



[VIDEO](#)

- Proyecto I+D 2021 Intendencia de Montevideo: “Monitoreo de caudales mediante velocimetría por imágenes en cursos de agua de Montevideo”