

Técnicas de Medición con instrumental hidro-acústico

Módulo de Flujo de Agua Superficial

Taller de Técnicas de Medición en Hidrología e Hidráulica

Aviso

- Entre el 23 al 25 de noviembre irían a visitar a Salto Grande estudiantes de la carrera de Ingeniería Hidráulica de la Universidad de la Plata, Argentina.
- Hay interés desde la Comisión Técnica Mixta de que vayan también estudiantes uruguayos para realizar una visita técnica a la central, del área hidrológica.

¿Caudal?

- ¿Qué es el caudal?
- ¿Cómo lo determino?
- ¿Alguna propiedad particular?

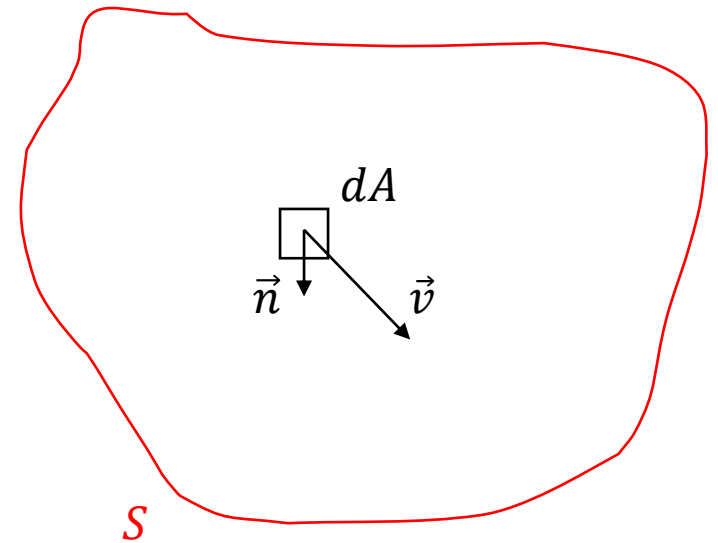
Balance de masa

$$\frac{dM}{dt} = 0,$$

con $M = \int_D \rho dV.$

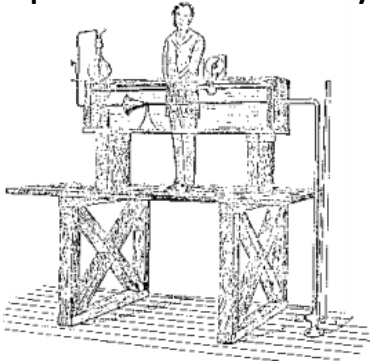
Caudal

$$Q_s = \int_S (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA$$



Flujo turbulento

Experimento de Reynolds



$$Re = \frac{UD}{\nu}$$

- La turbulencia se origina a partir de la inestabilidad de flujos laminares. Es una propiedad del flujo y no del fluido.
- El parámetro adimensional que juega el rol más importante en este proceso es el número de Reynolds.

Algunas características de los flujos turbulentos son:

- Tridimensional
- Amplio rango de escalas de tiempo y espacio
- Fuertemente no lineal
- Gran difusividad y gran disipación
- Anisotropía en las escalas más grandes

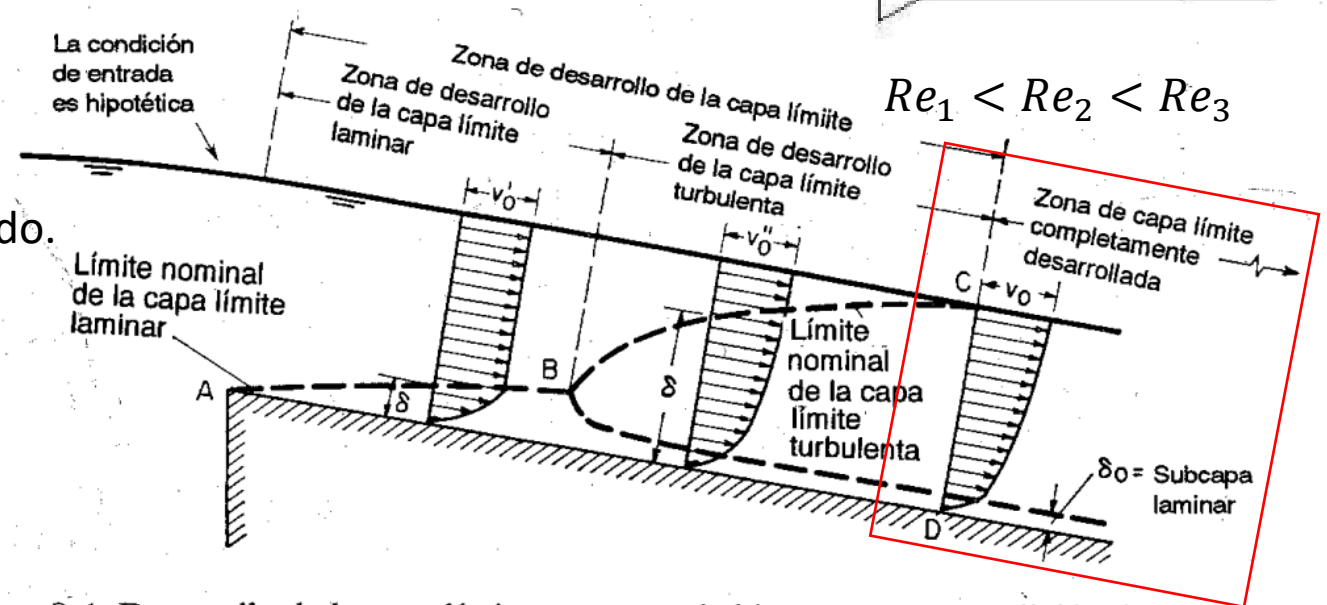
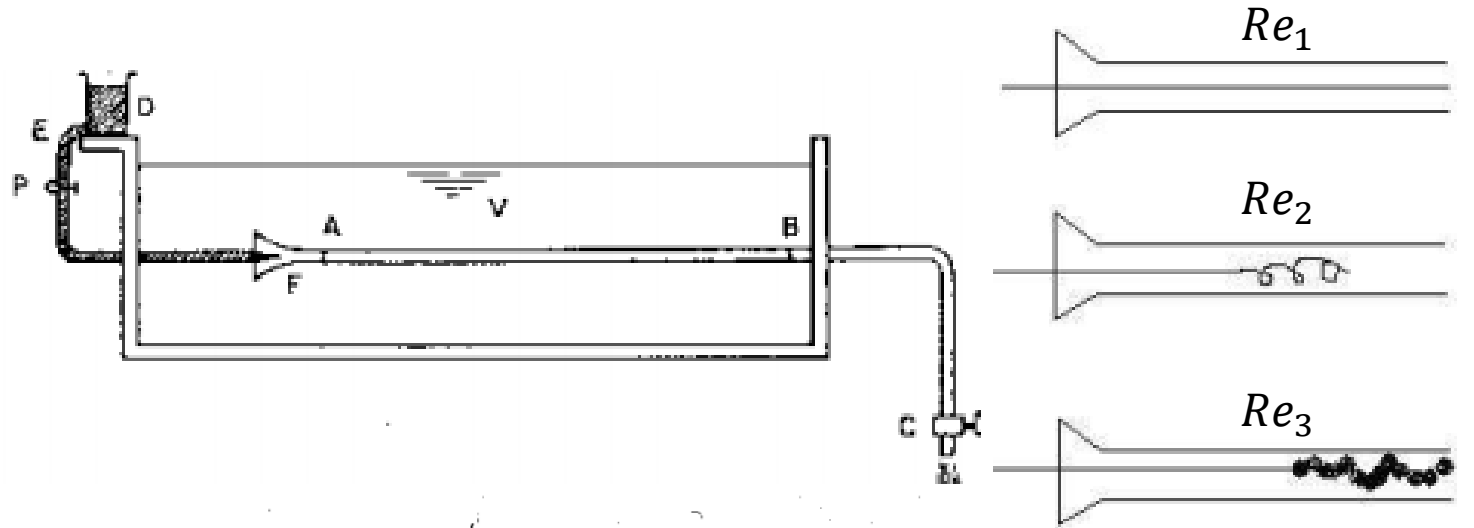


Figura 8-1. Desarrollo de la capa límite en un canal abierto con una condición de entrada ideal.

Fuente: Ven Te Chow, Hidráulica de canales abiertos

Vamos a asumir que estamos en la zona donde la capa límite turbulenta se encuentra completamente desarrollada.

Perfil de velocidades

Partiendo de $\vec{v} = u\vec{e}_1 + w\vec{e}_2 = (\bar{u} + u')\vec{e}_1 + (\bar{w} + w')\vec{e}_2$, y haciendo el promedio de Reynolds de N-S (ejemplo $\bar{u} = \frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} u dt$) se llega a:

$$\bar{u} = \frac{u_*}{\kappa} \log \frac{z}{z_0}$$

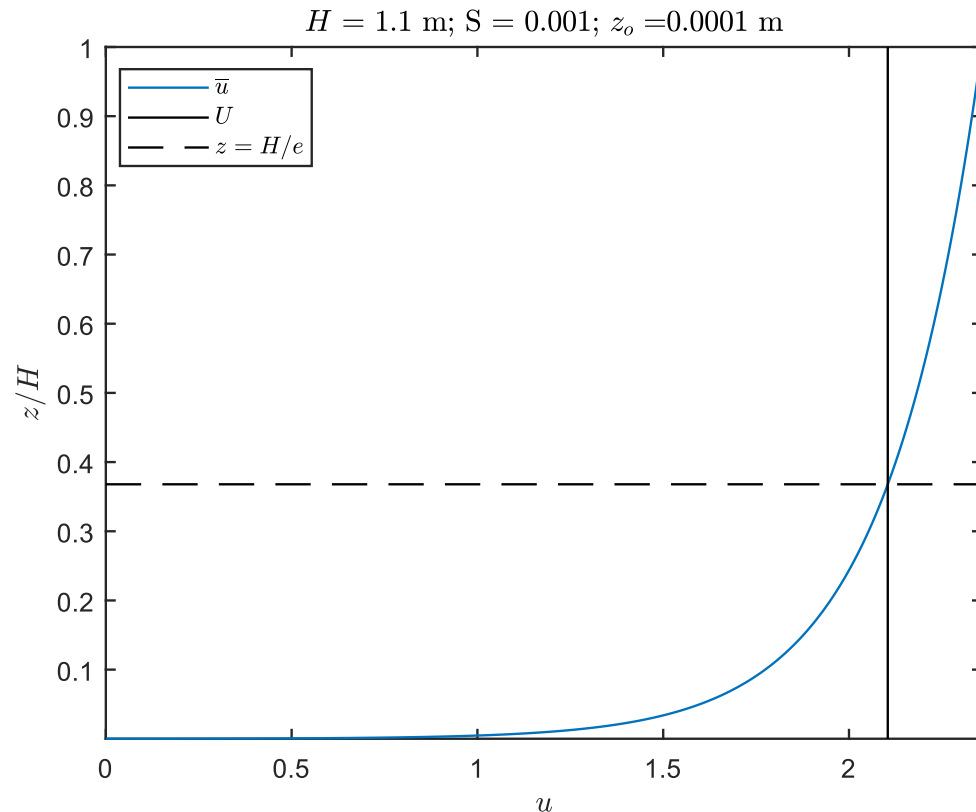
Para determinar la velocidad media de la sección vertical U se realizan mediciones en:

- para $d_i < 0,6 m$,
- para $d_i > 0,6 m$,

$$U_i = \bar{u}(z = 0,4d_i) \quad [1 \text{ punto}],$$

$$U_i = \frac{\bar{u}(z=0,2d_i) + \bar{u}(z=0,8d_i)}{2} \quad [2 \text{ puntos}] \text{ o,}$$

$$U_i = \frac{\bar{u}(z=0,2d_i) + 2\bar{u}(z=0,4d_i) + \bar{u}(z=0,8d_i)}{4} \quad [3 \text{ puntos}].$$



$$Q_s = \sum_{i=1}^n U_i d_i \Delta b_i$$

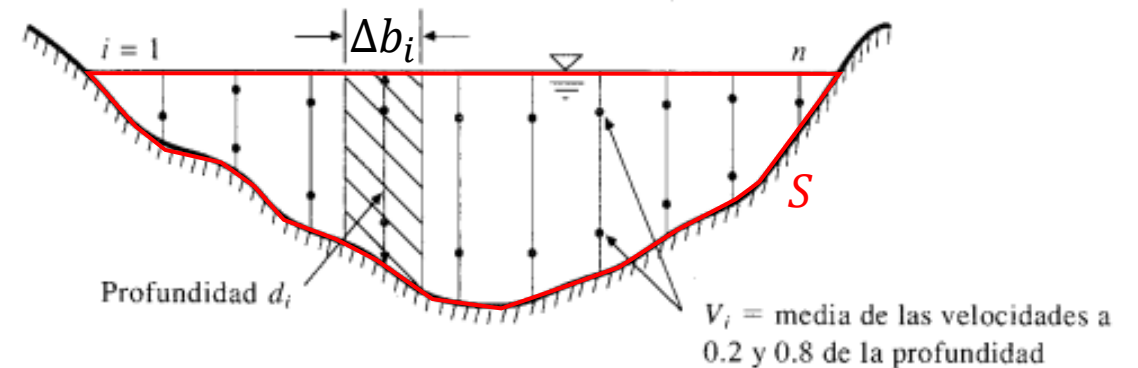
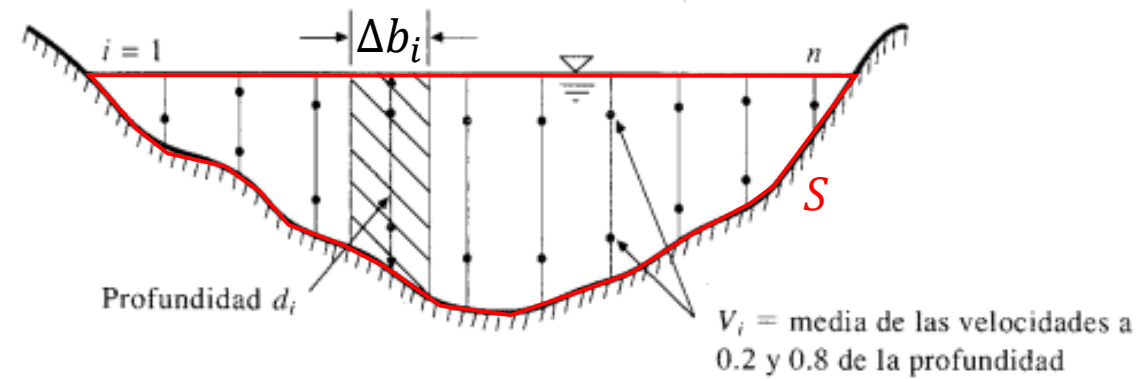


FIGURA 6.3.7

Cálculo del caudal utilizando la información de un aforo.

Fuente: Ven Te Chow, Hidrología Aplicada

Ejemplo de planilla



Punto	Δb_i (m)	d_i (m)	U_{i-1} (m/s)	U_{i-2} (m/s)	U_i (Vel. Media) (m/s)	Caudal parcial (m ³ /s)	Caudal parcial (l/s)
1	1	0,23	0,04	-	0,04	0,009	9
2	1	0,74	0,17	0,09	0,13	0,096	96
3							
4							
5							

Información de un aforo.
en Te Chow, Hidrología Aplicada

¿menor a 60 cm?

Caudal total		
--------------	--	--

$$Q_s = \sum_{i=1}^n U_i d_i \Delta b_i$$

Medición de la velocidad

- Pendiente del pelo de agua (S)
- Sensores electromagnéticos
- Molinete o correntómetro
- Flotadores (relación con la velocidad media en el entorno de [0,80; 0,93]) o trazadores
- Sensores de ultrasonido

¿Por cuánto tiempo medir? Recordar que $\bar{u} = \frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} u dt$.

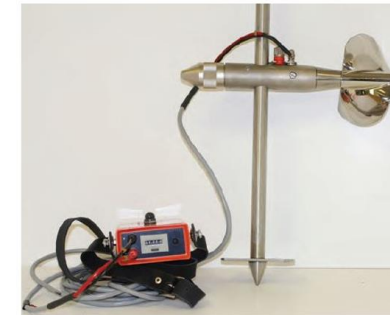
Definiendo un período característico del flujo como de $T = H/U$ (tirante dividido velocidad media), es recomendable:

- Para estimar valores medios, tiempo de medición $T_m > 20 T$ (error < 10 %)
- Para estimar varianza, $T_m > 100 T$ (error < 10 %)
- Para estimar el espectro de potencia, $T_m > 400 T$ (error < 5 %)

Medición de la velocidad

- Pendiente del pelo de agua (S)
- Sensores electromagnéticos
- Molinete o correntómetro
- Flotadores (relación con la velocidad media en el entorno de [0,80; 0,93]) o trazadores
- Sensores de ultrasonido

Correntómetro de hélice



* Figuras extraídas del manual 3-A8 del USGS "Discharge Measurement at Gaging Stations"

Fuente: Diapositivas Diseño Hidrológico - Aforos

¿Por cuánto tiempo medir? Recordar que $\bar{u} = \frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} u dt$.

Definiendo un período característico del flujo como de $T = H/U$ (tirante dividido velocidad media), es recomendable:

- Para estimar valores medios, tiempo de medición $T_m > 20 T$ (error < 10 %)
- Para estimar varianza, $T_m > 100 T$ (error < 10 %)
- Para estimar el espectro de potencia, $T_m > 400 T$ (error < 5 %)

Medición de la velocidad

- Pendiente del pelo de agua (S)
- Sensores electromagnéticos
- Molinete o correntómetro
- Flotadores (relación con la velocidad media en el entorno de [0,80; 0,93]) o trazadores
- Sensores de ultrasonido

¿Por cuánto tiempo medir? Recordar que $\bar{u} = \frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} u dt$.

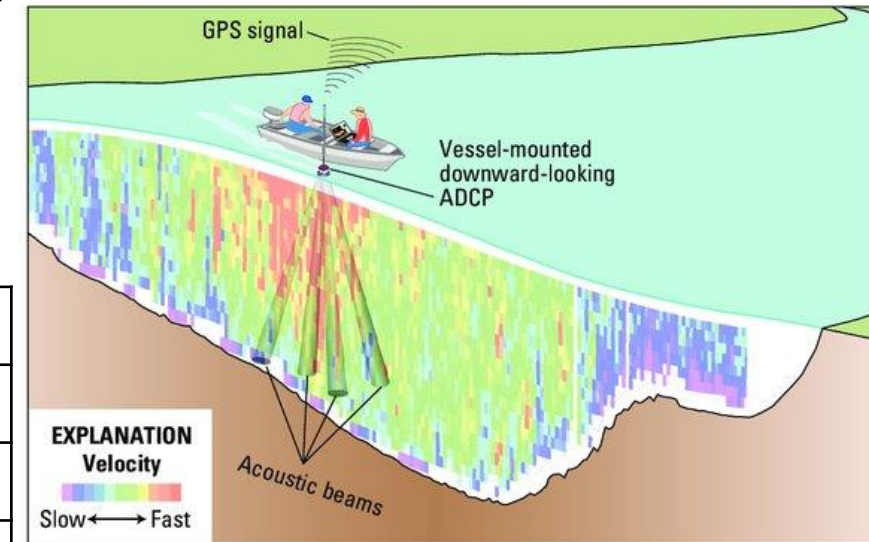
Definiendo un período característico del flujo como de $T = H/U$ (tirante dividido velocidad media), es recomendable:

- Para estimar valores medios, tiempo de medición $T_m > 20 T$ (error < 10 %)
- Para estimar varianza, $T_m > 100 T$ (error < 10 %)
- Para estimar el espectro de potencia, $T_m > 400 T$ (error < 5 %)

Técnicas de Medición con instrumental hidro-acústico

- Hidro-acústica es la aplicación de técnicas o instrumentos acústicos para mediciones e investigaciones hidro-sedimentológicas
- La técnica que prevalece al día de hoy es **ADCP**
- ¿Qué es un ADCP?

Acoustic	Se utilizan pulsos acústicos
Doppler	Se analizan los cambios en frecuencia fase (Doppler)
Current	Se determinan las corrientes...
Profiler	variando a lo largo de la columna de agua (perfil)



Fuente: Muller y Wagner (2013), Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat

Ultrasonido (frecuencias > 20 kHz)

Se asumirá que el agua se comporta como un fluido compresible barotrópico y que existe una función que relaciona presión p y densidad ρ (ecuación constitutiva) tal que:

$$p - p_{eq} = c_s^2(\rho - \rho_{eq}),$$

donde p_{eq} y ρ_{eq} son la presión y densidad de equilibrio y c_s un parámetro del medio elástico.

Utilizando las ecuaciones de balance de masa y de balance mecánico vistas en Elementos de Mecánica de los Fluidos.

Se puede hacer un desarrollo de primer orden del movimiento asumiendo que

$$p = p_0 + p_1, \rho = \rho_0 + \rho_1, \vec{v} = \vec{0} + \vec{v}_1.$$

Linealizando las tres ecuaciones (constitutiva, y balances de masa y mecánico) es posible determinar la solución de primer orden para ondas radiales como:

$$p_1 = \frac{P_1}{r} e^{i(\omega t - kr)},$$

$$\rho_1 = \frac{P_1}{c_s^2 r} e^{i(\omega t - kr)},$$

$$\vec{v}_1 = \frac{P_1}{\rho_0 c_s r} e^{i(\omega t - kr)} \mathbf{e}_r.$$

donde r es la distancia al emisor, ω la frecuencia angular, k el número de onda, \mathbf{e}_r es el versor radial.

Ultrasonido

La velocidad del sonido c_s se relaciona con el Módulo de compresibilidad K (parámetro visto en Elasticidad) y la densidad ρ como $c_s = \sqrt{K/\rho}$.

Puede ser útil recordar que $K = E/3(1 - 2\nu)$ con E y ν el Módulo de elasticidad y de Poisson.

a 20 °C	ρ (kg/m ³)	K (kg/ms ²)	c_s (m/s)
Aire	1,2	142x10 ³	350
Agua dulce	1000	2,15x10 ⁹	1470
Agua salada	1020	2,34x10 ⁹	1510

Como la relación entre la frecuencia angular ω , y el número de onda k es de la forma $\omega = c_s k$, todas las ondas se propagan a la misma velocidad.

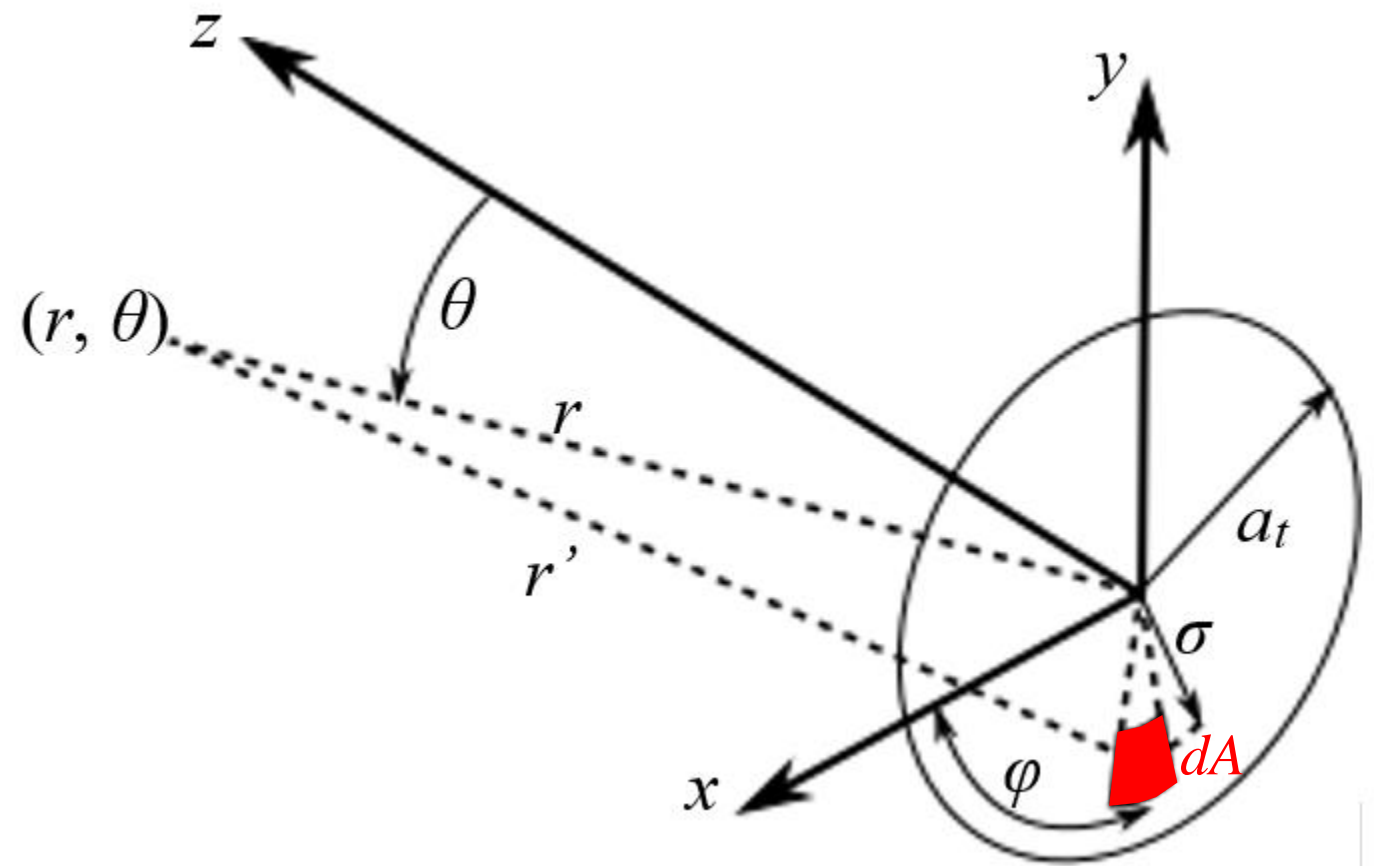
Esto permite que se pueda entender a alguien que habla desde lejos.

Transductor de ultrasonido

- El transductor transforma una señal eléctrica en vibraciones ultrasónicas (ondas de presión).
- Las emite en el medio que lo rodea a través de su cara activa (piezoeléctrico).
- También puede funcionar como un receptor, convirtiendo las vibraciones en señales eléctricas.

Elemento vibratorio de ultrasonido (circular plano)

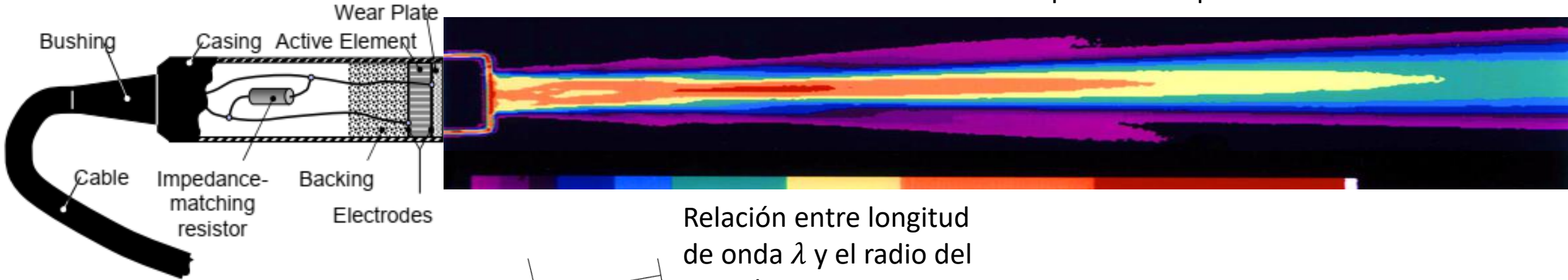
Integrando el movimiento que genera un elemento vibratorio dA genérico, es posible estimar la fluctuación del campo de presiones de todo el disco.



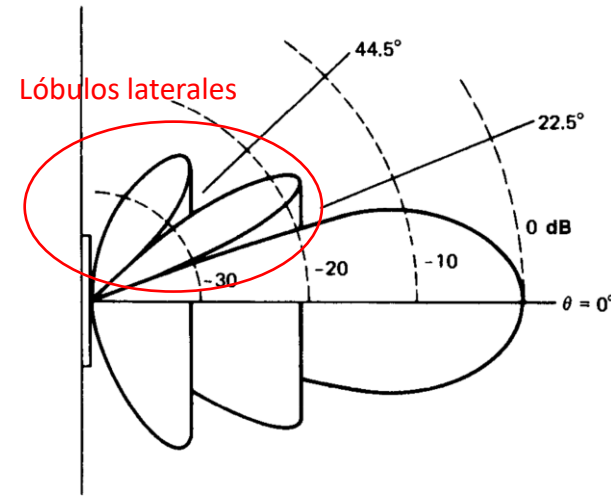
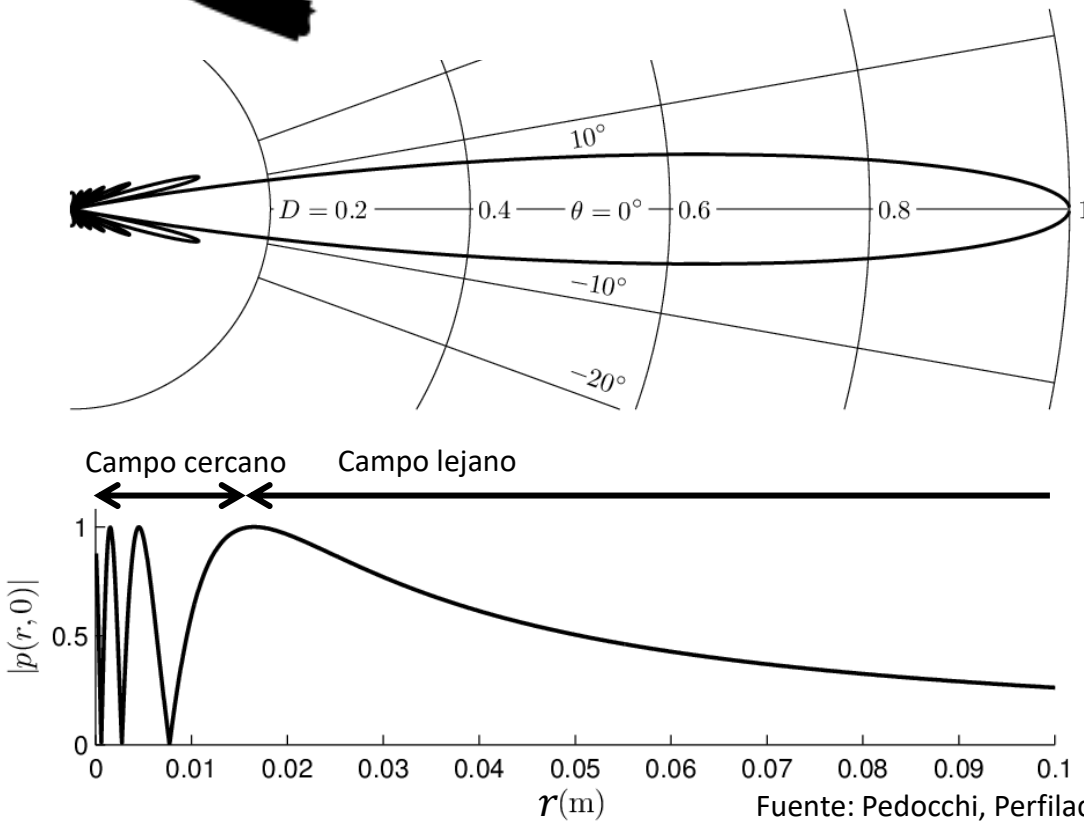
Fuente: Pedocchi, Perfiladores Acústicos: Fundamentos y Aplicaciones

Transductor de ultrasonido

Amplitud de la presión



Relación entre longitud de onda λ y el radio del transductor a_t



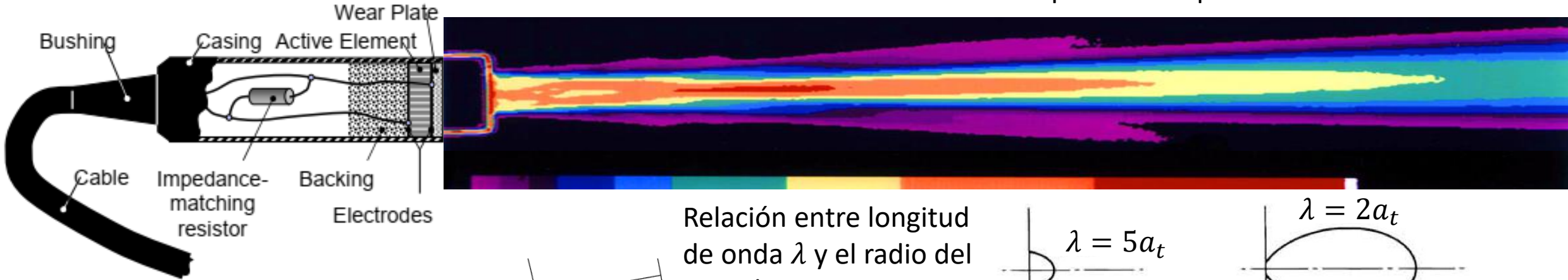
$$\lambda = \frac{\pi}{5} a_t$$

Figure 7.4.5 Beam pattern $b(\theta)$ for a circular plane piston of radius a radiating sound with $ka = 10$.

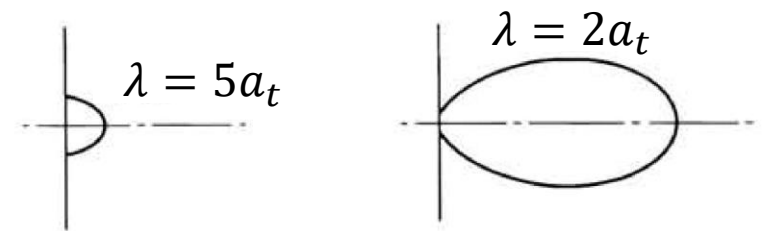
Fuente: Kinsler, Fundamentals of Acoustics

Transductor de ultrasonido

Amplitud de la presión



Relación entre longitud de onda λ y el radio del transductor a_t



Lóbulos laterales

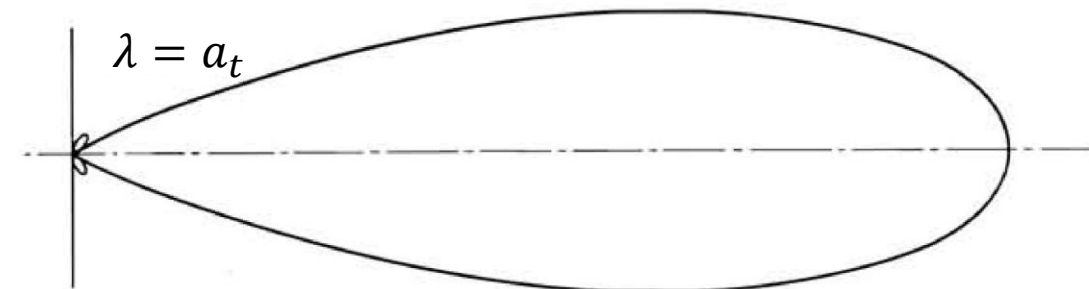
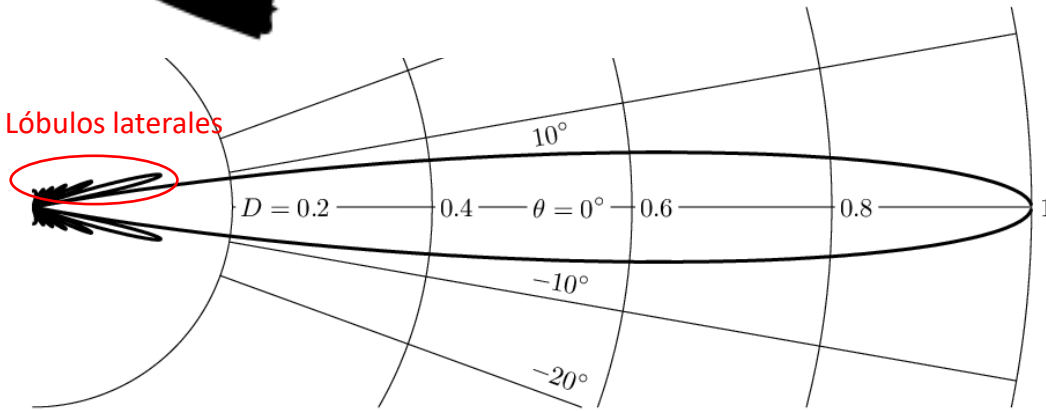
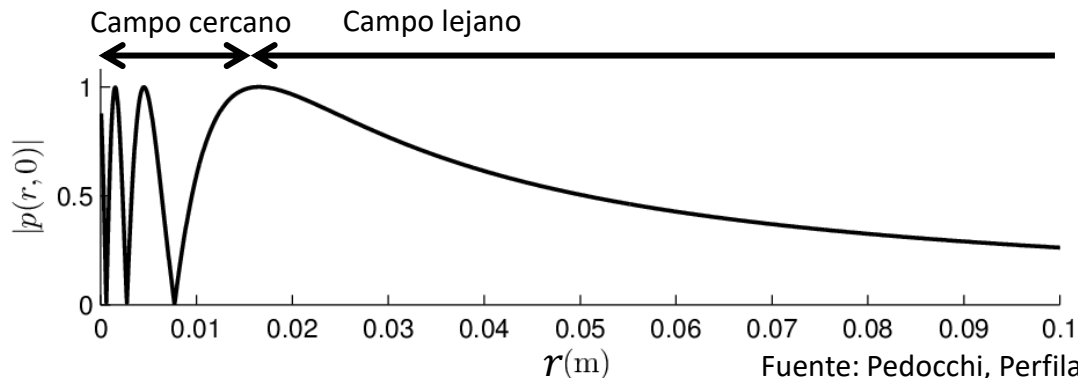
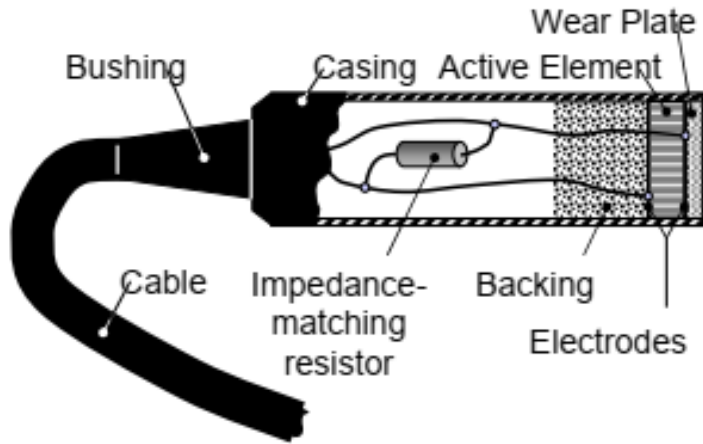


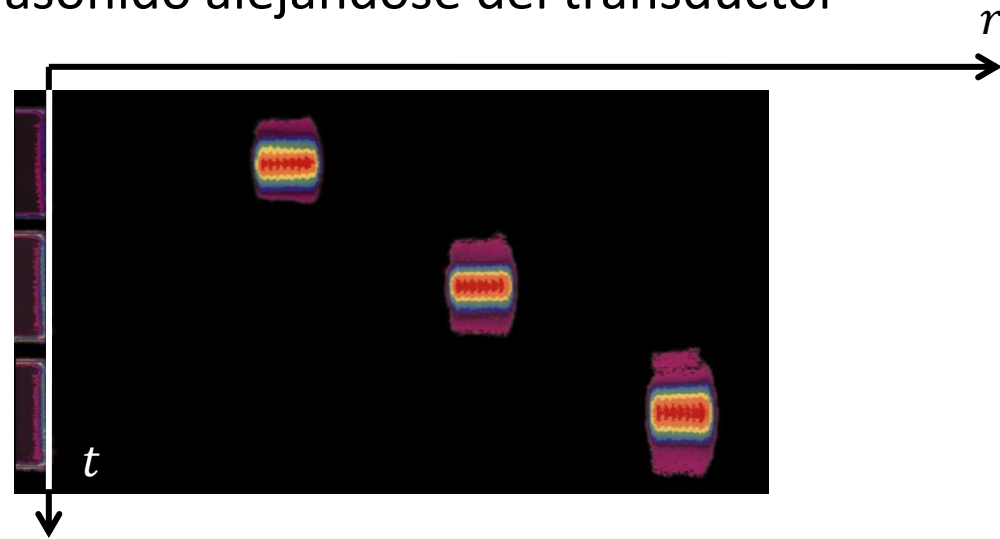
FIGURE 7.8 Polar diagrams of distribution-in-angle of radiated intensity from a piston set in a plane wall, for different ratios between the wavelength λ and the radius of the piston a . In the curve for $\lambda = a$, the small loops at the side are diffraction rings.



Transductor



Pulso de ultrasonido alejándose del transductor



El tiempo δt que transcurre entre que se emite y se recibe el eco del pulso de una región a una distancia r es $\delta t = 2r/c_s$

El sonido es reflejado por las partículas que hay en el agua.

Si se mueven con la velocidad del agua u , el sonido reflejado va a tener información de la velocidad proyectada en el eje del transductor u_r

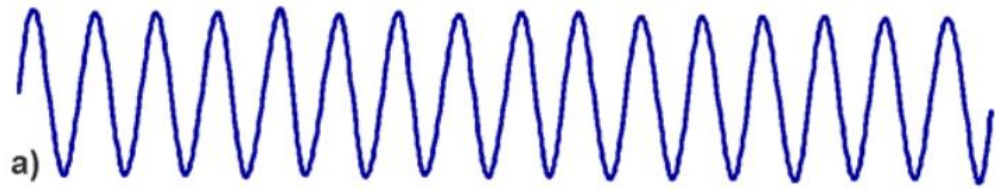


¿Cómo estimar el perfil de velocidades con ultrasonido?

Generación de pulsos

- Banda estrecha (Narrowband)

Pulso monocromático

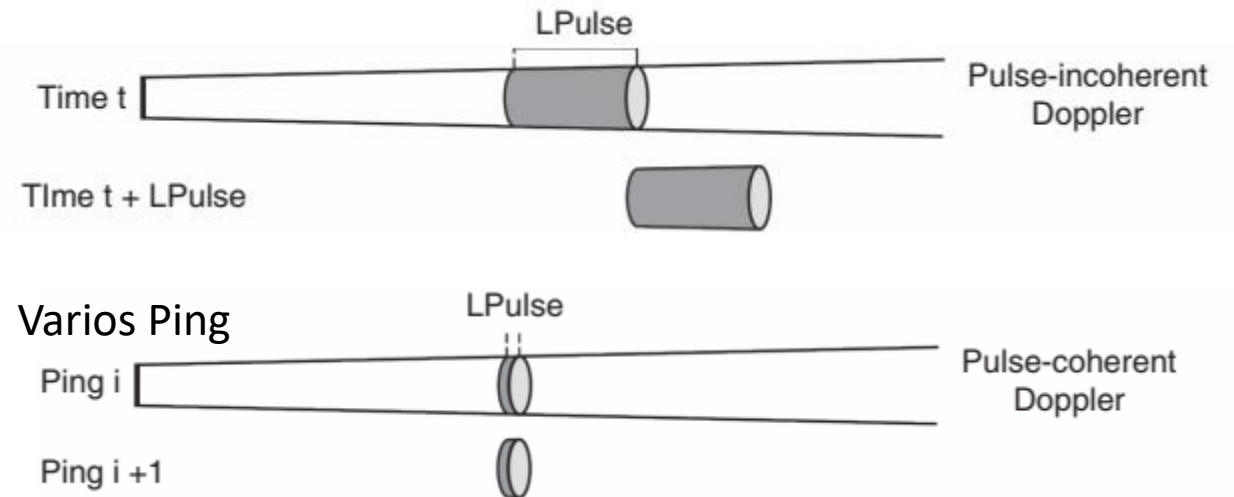


- Un solo pulso en el agua a la vez

- Hay dos tipos

1. Un pulso largo (Incoherent)

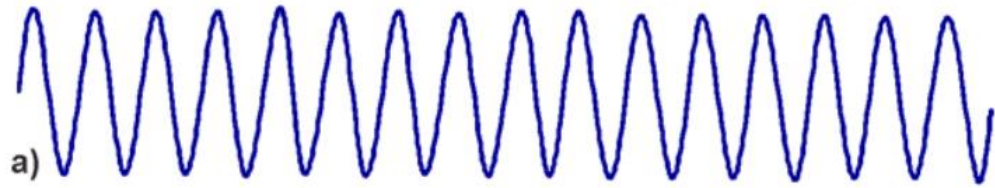
2. Varios pulsos cortos (Coherent)



Generación de pulsos

- Banda estrecha (Narrowband)

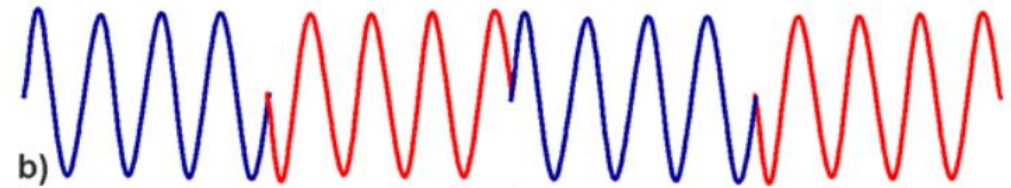
Pulso monocromático



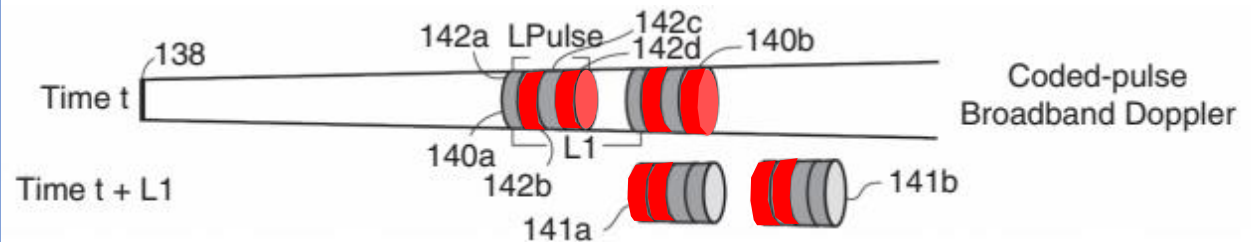
- Un solo pulso en el agua a la vez
- Hay dos tipos
 1. Un pulso largo (Incoherent)
 2. Varios pulsos cortos (Coherent)

- Banda ancha (Broadband)

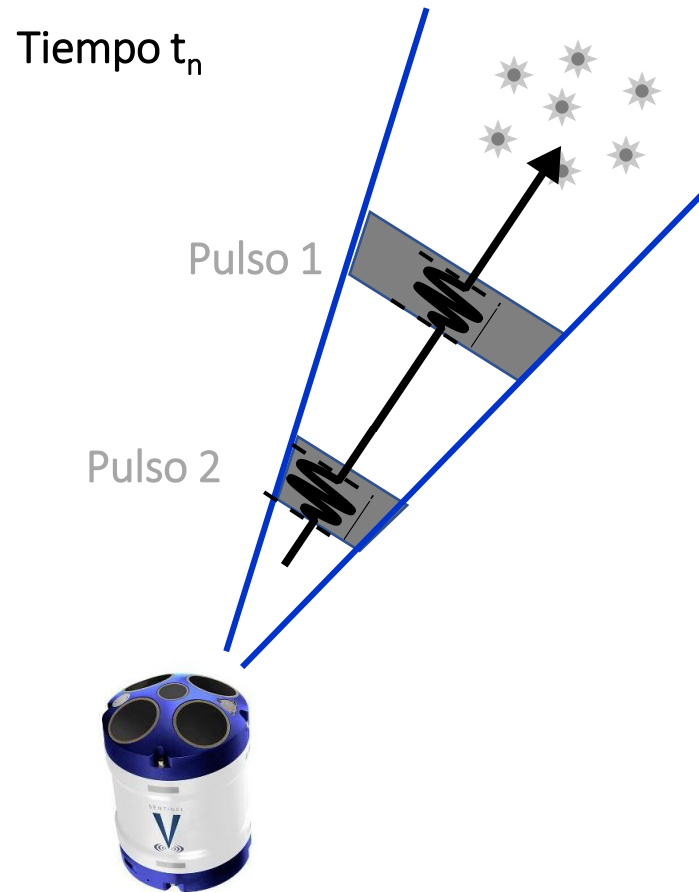
Pulso codificado



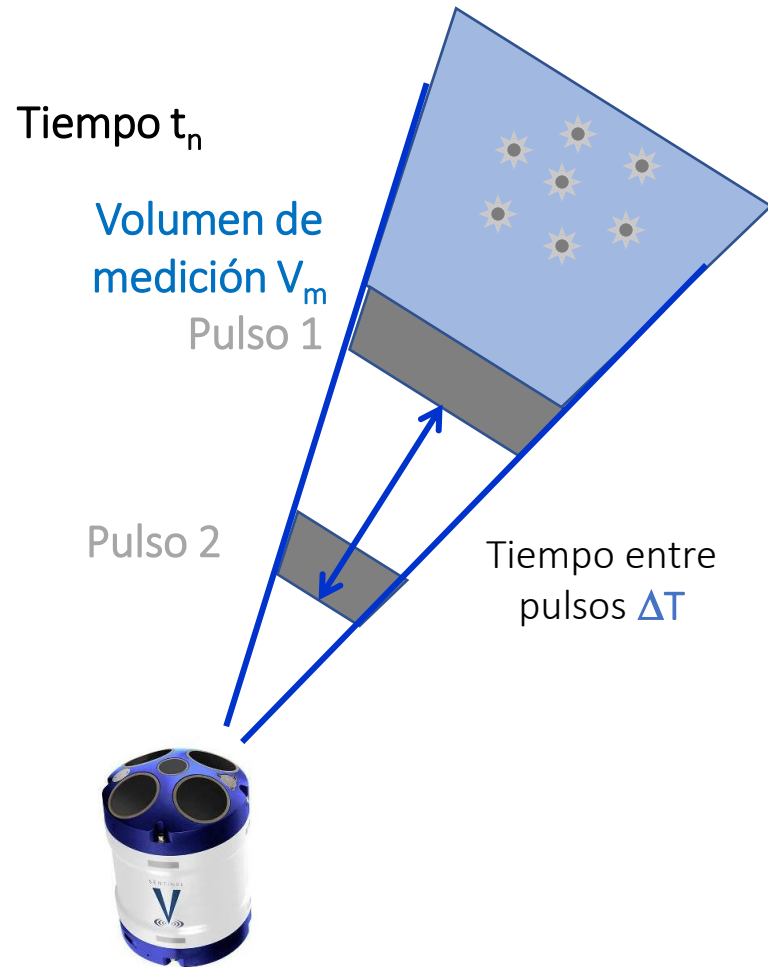
Elemento codificado



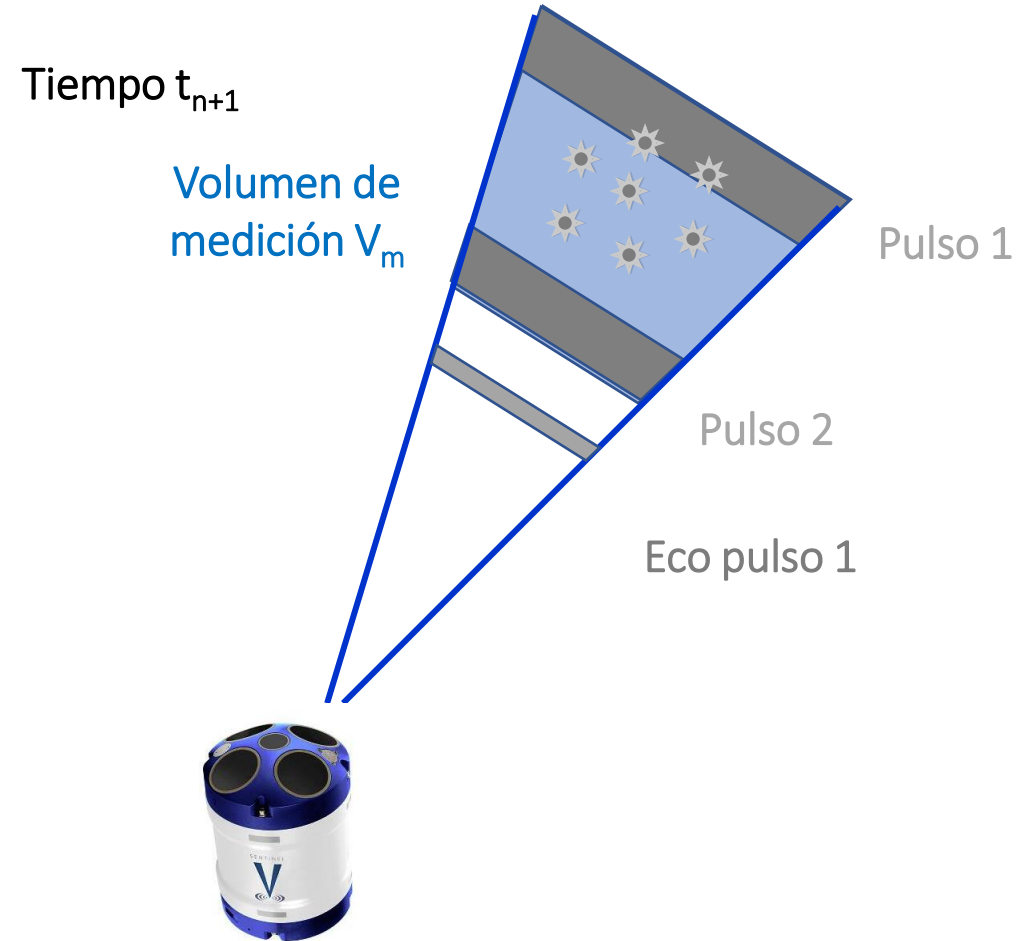
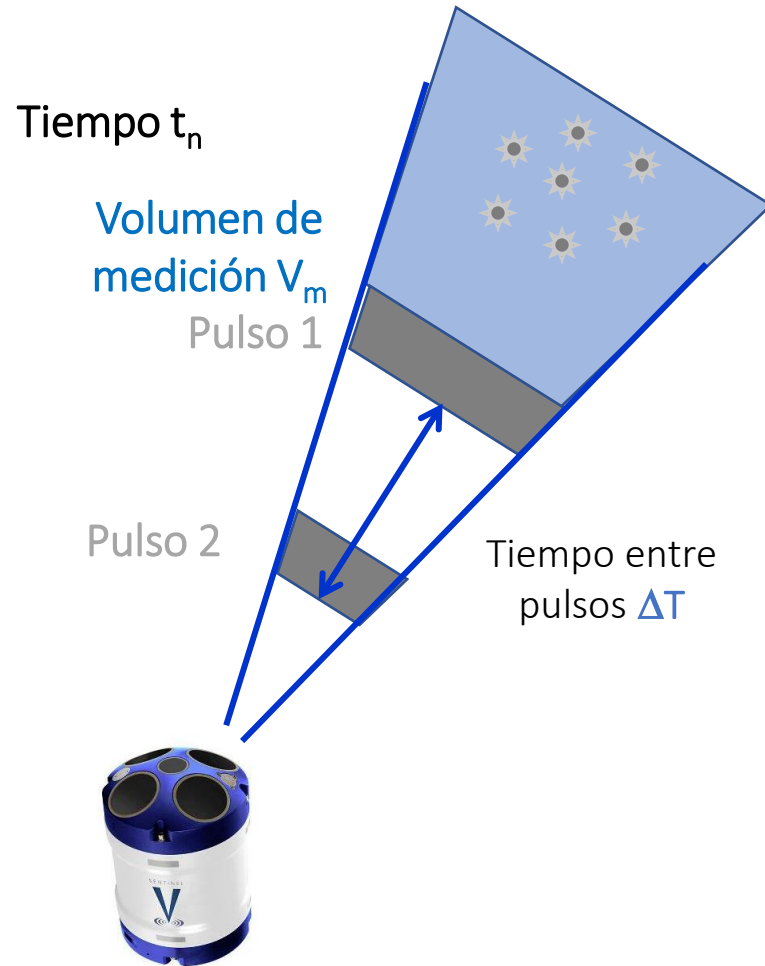
Medición de velocidad (ADCP)



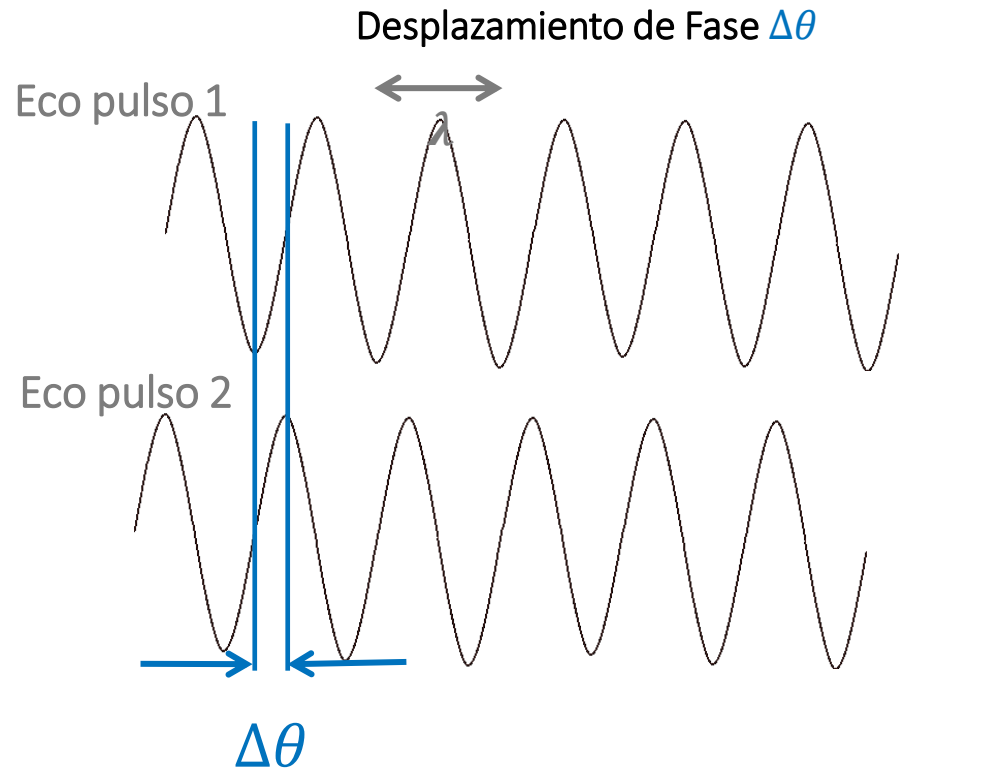
Medición de velocidad (ADCP)



Medición de velocidad (ADCP)



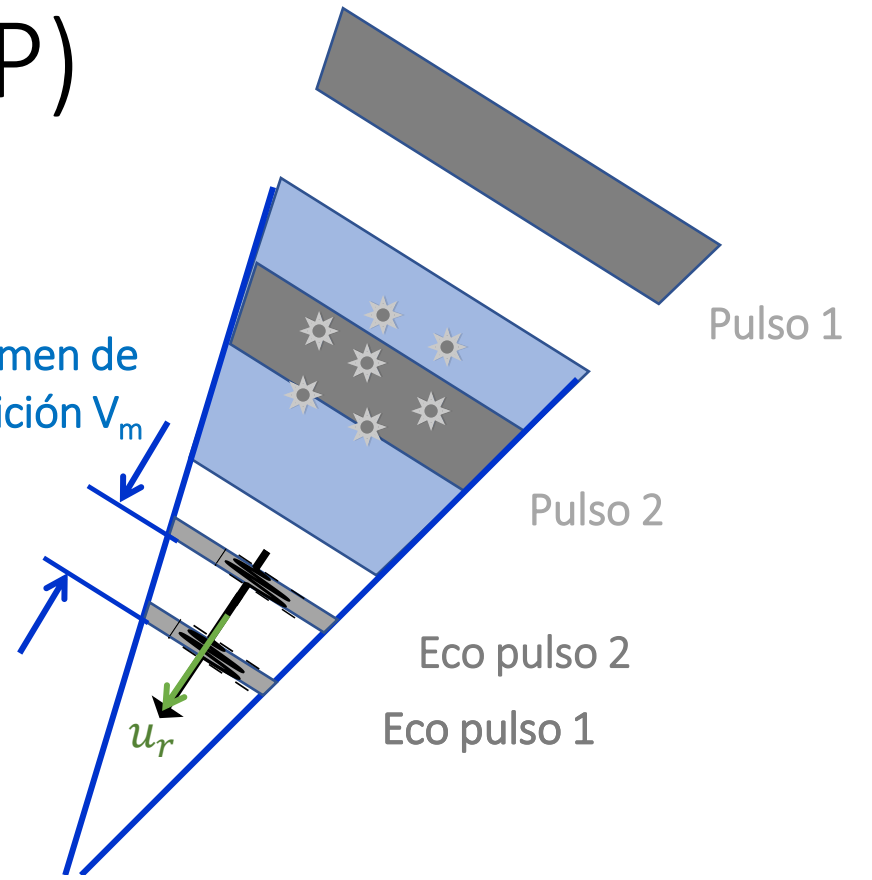
Medición de velocidad (ADCP)



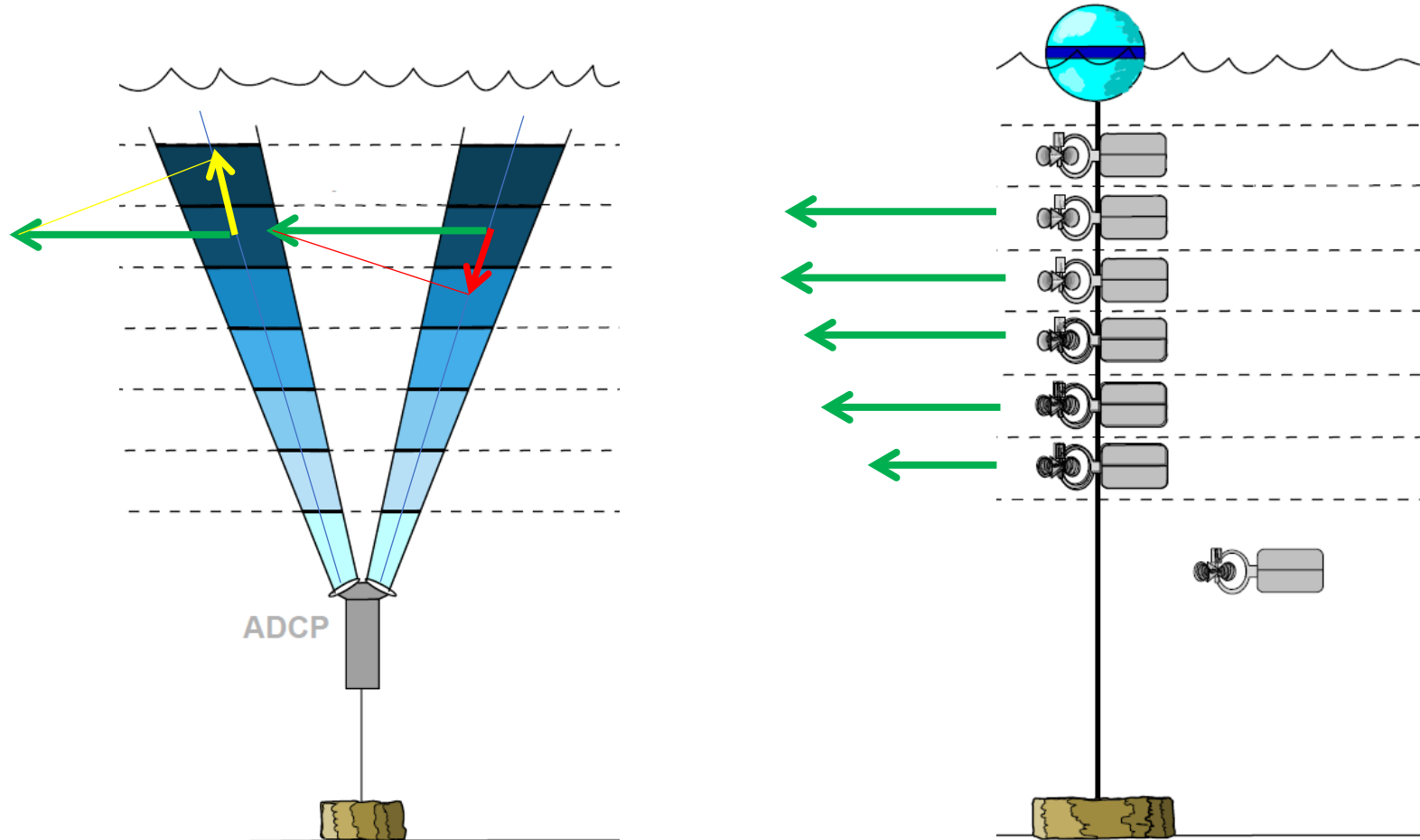
$$\frac{\Delta\theta}{\Delta T} \propto u_r$$

Tiempo t_{n+2}

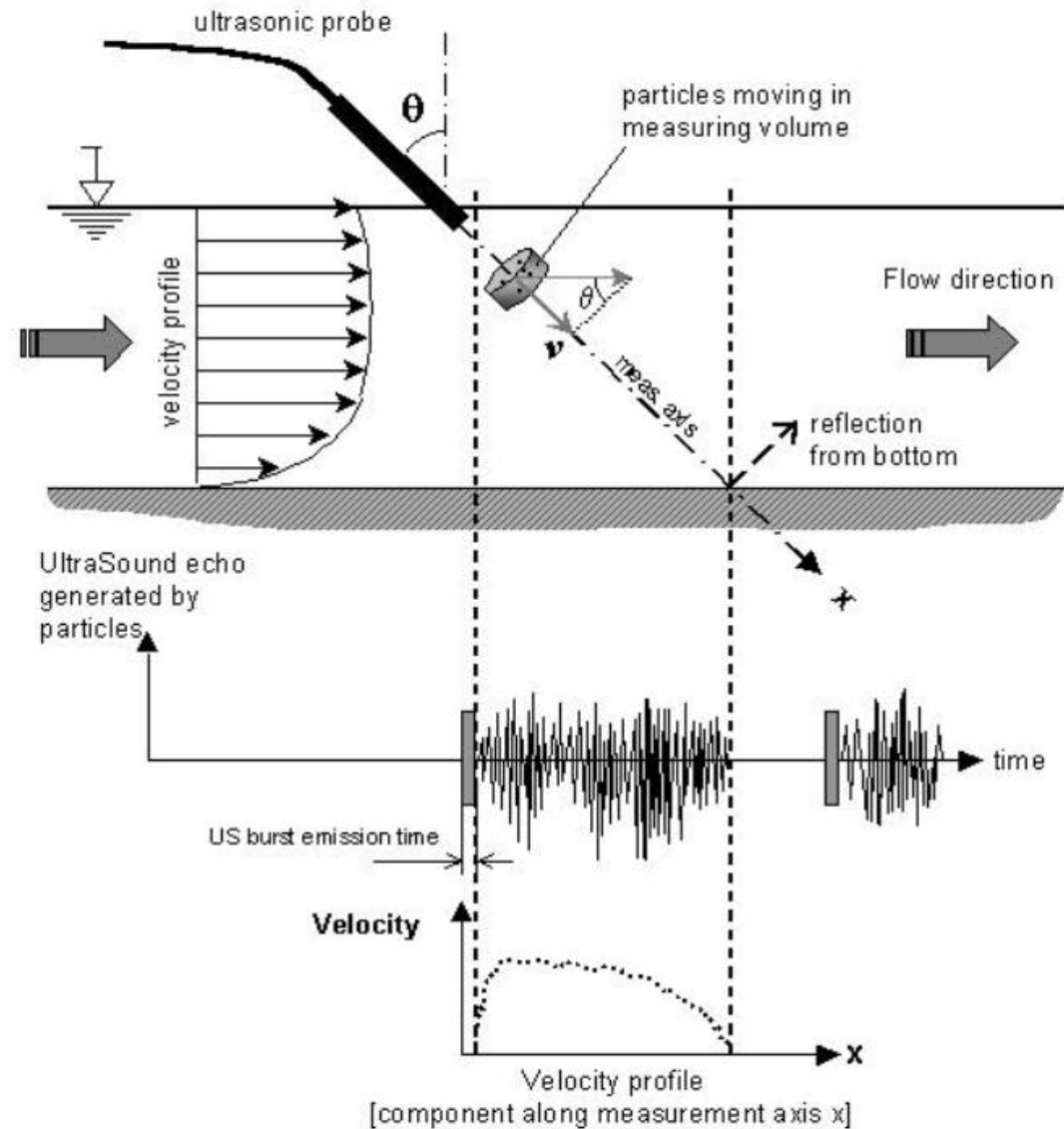
Volumen de medición V_m



Medición de velocidad (¿a qué se compara?)

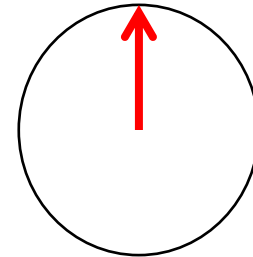
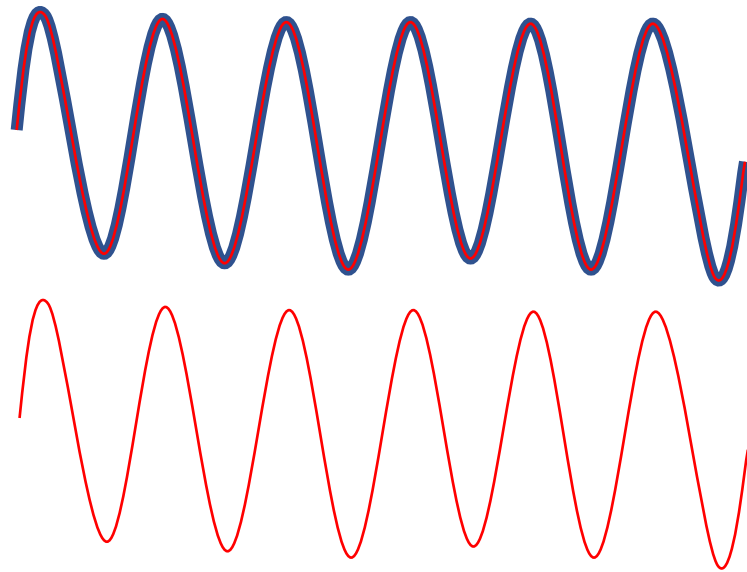
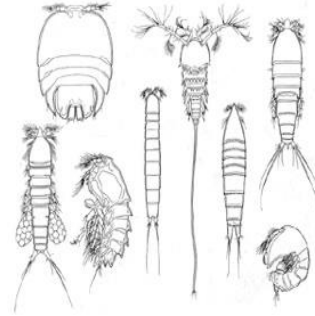
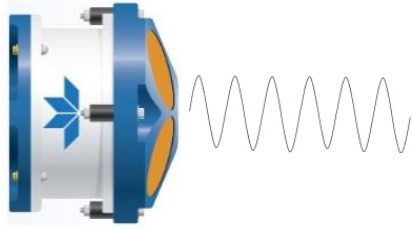


Perfil de velocidades



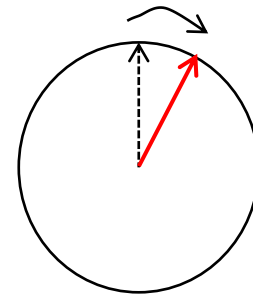
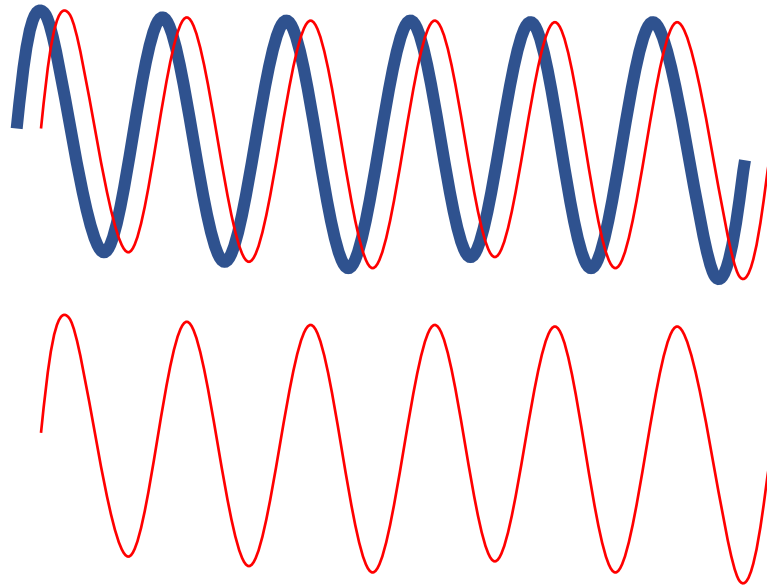
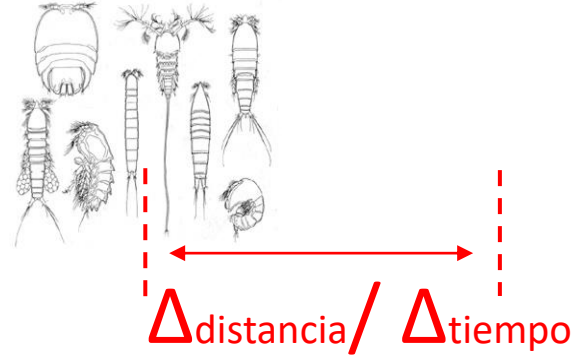
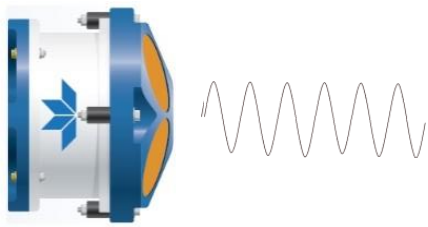
Fuente: UVP-DUO User's Guide R5

Partículas en reposo



0°

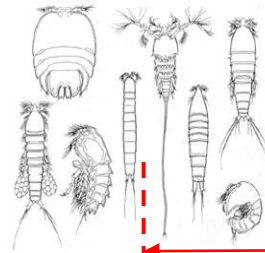
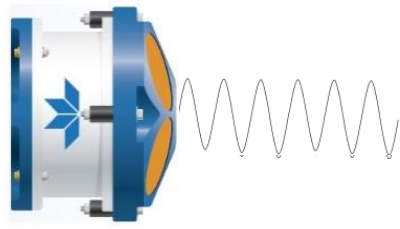
Partículas alejándose



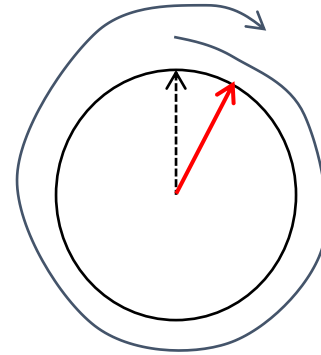
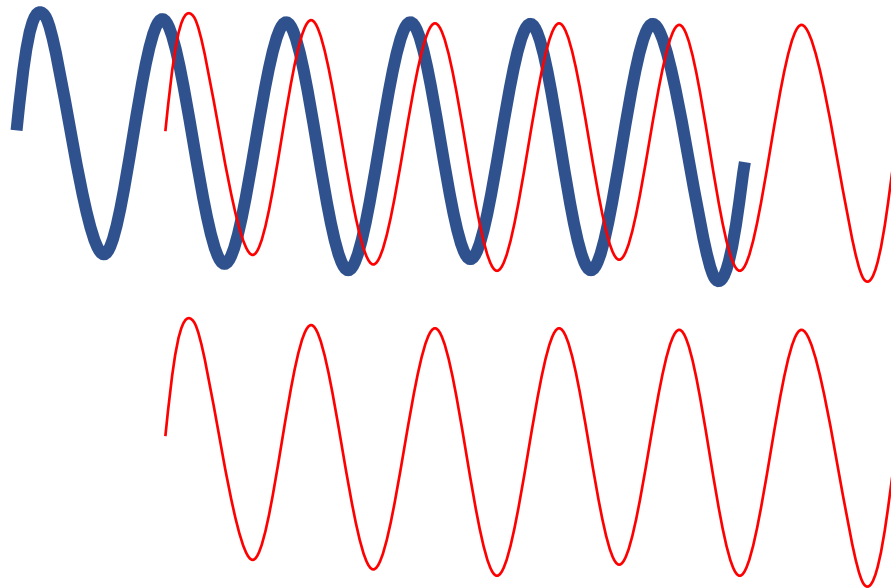
40°

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

Partículas alejándose mucho

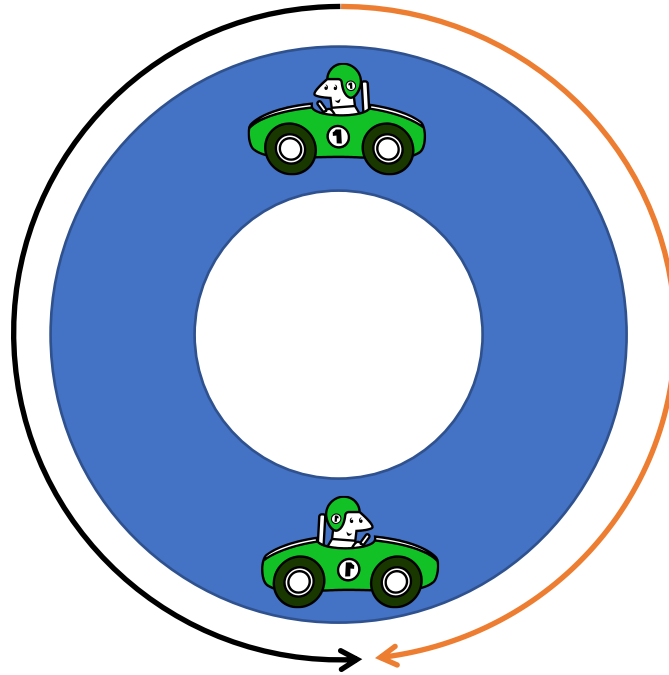


$\gg \Delta \text{distancia} / \Delta \text{tiempo}$



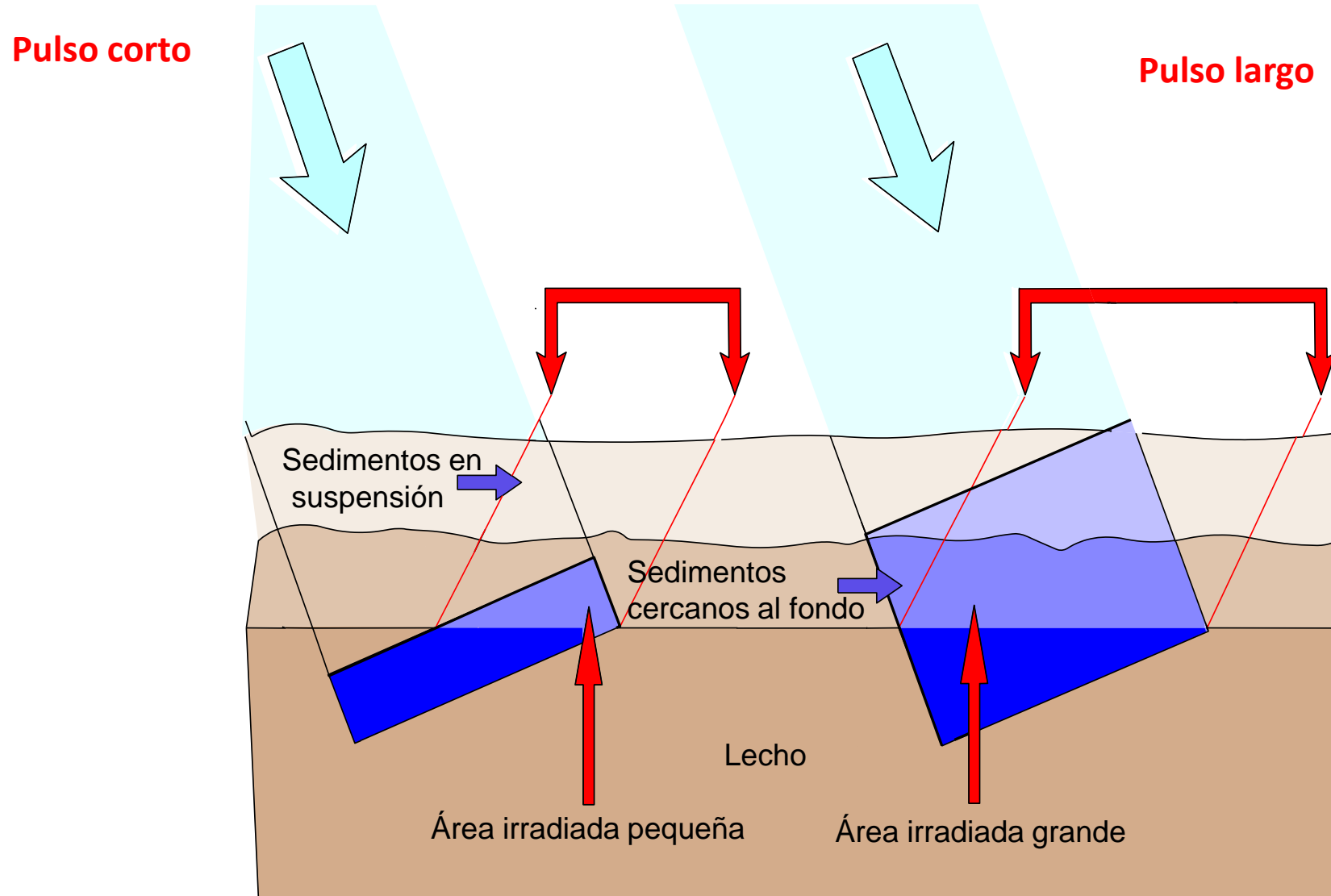
$360^\circ - 40^\circ = 400^\circ$

Ambigüedad



Se resuelve midiendo en intervalos más cortos

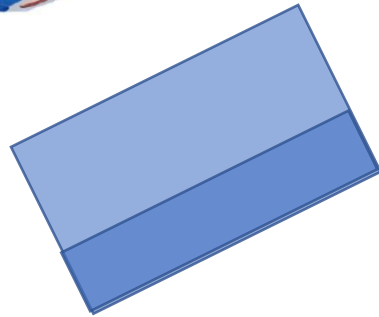
Fondo (Bottom Tracking)



Pulso para el fondo

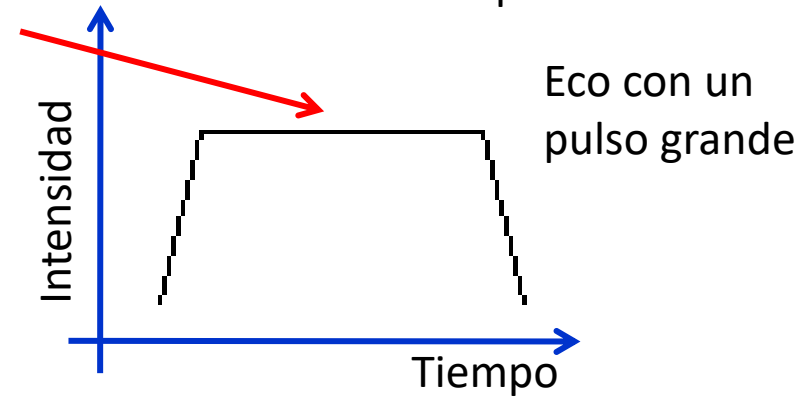
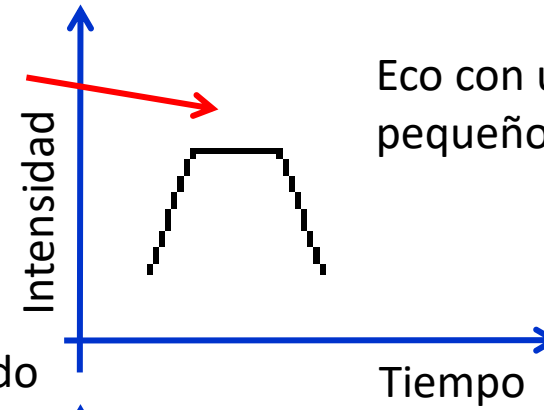


Incertidumbre en la
detección del fondo

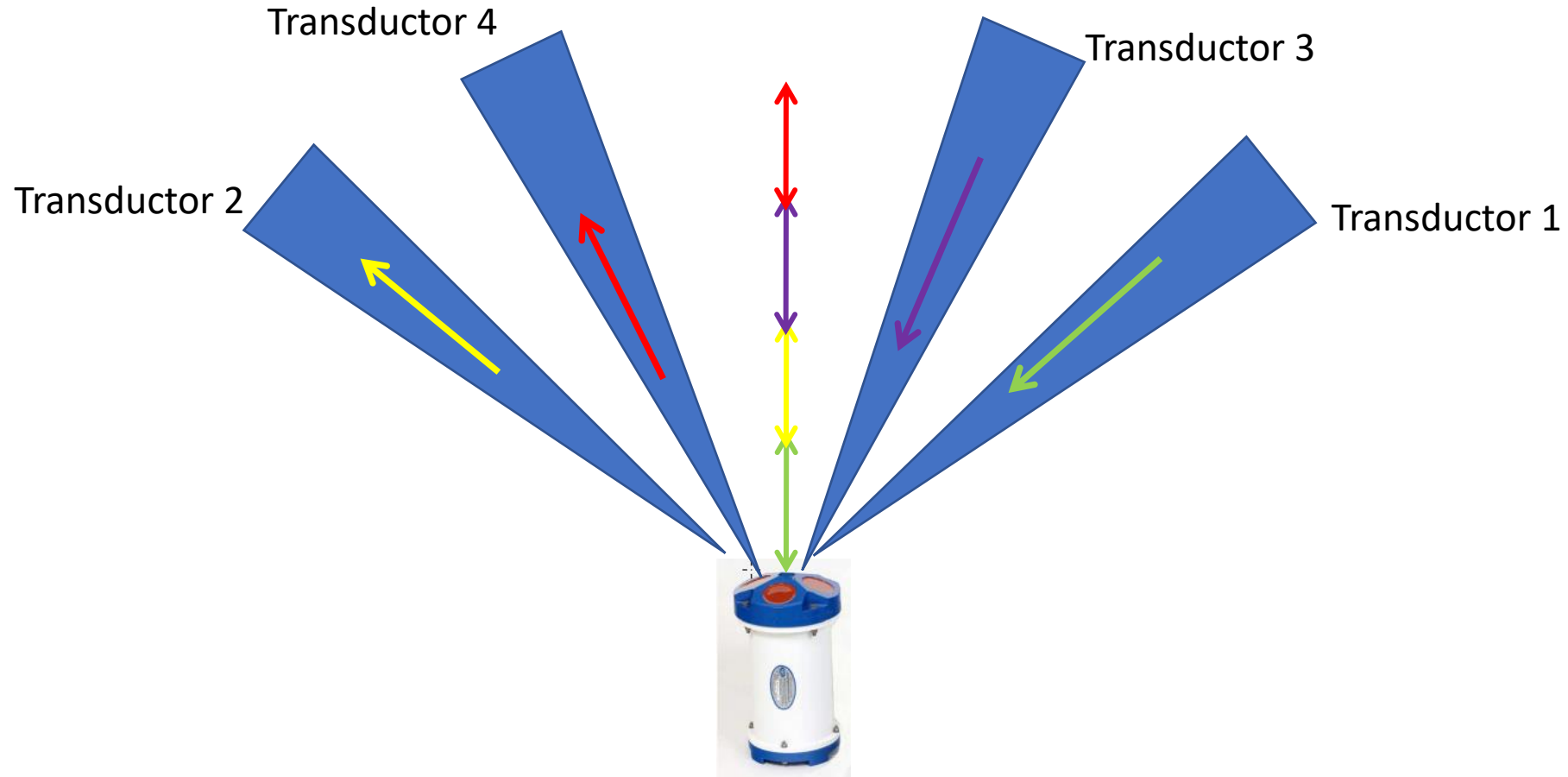


Detección del fondo

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)

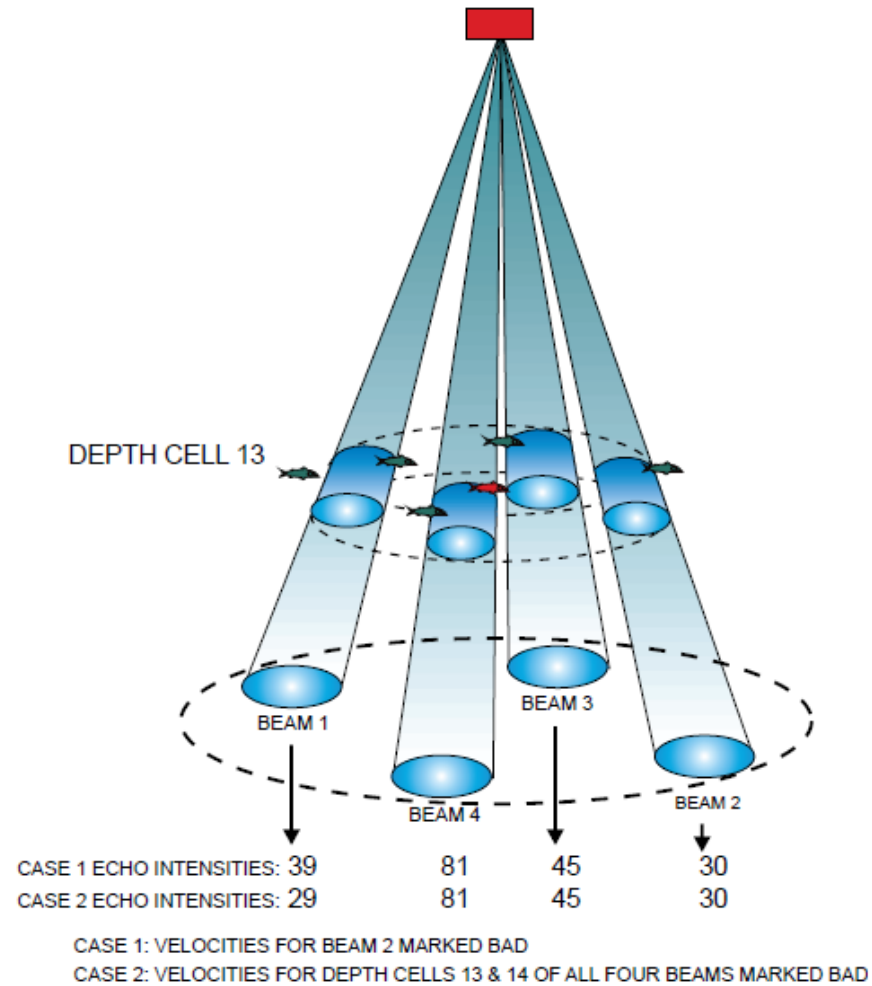
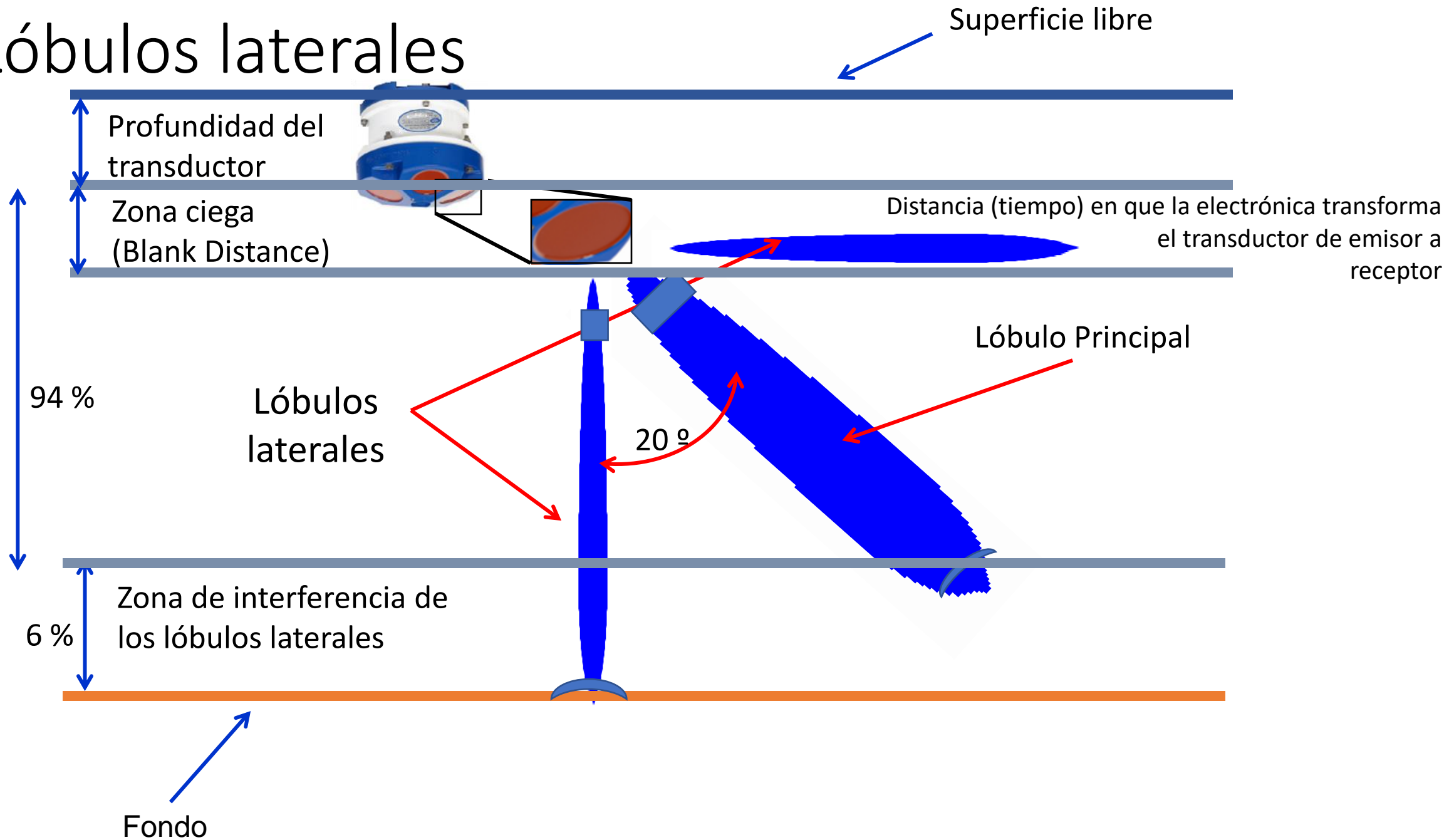


Figure 6. Example of Fish Rejection Algorithm

Lóbulos laterales



...y márgenes

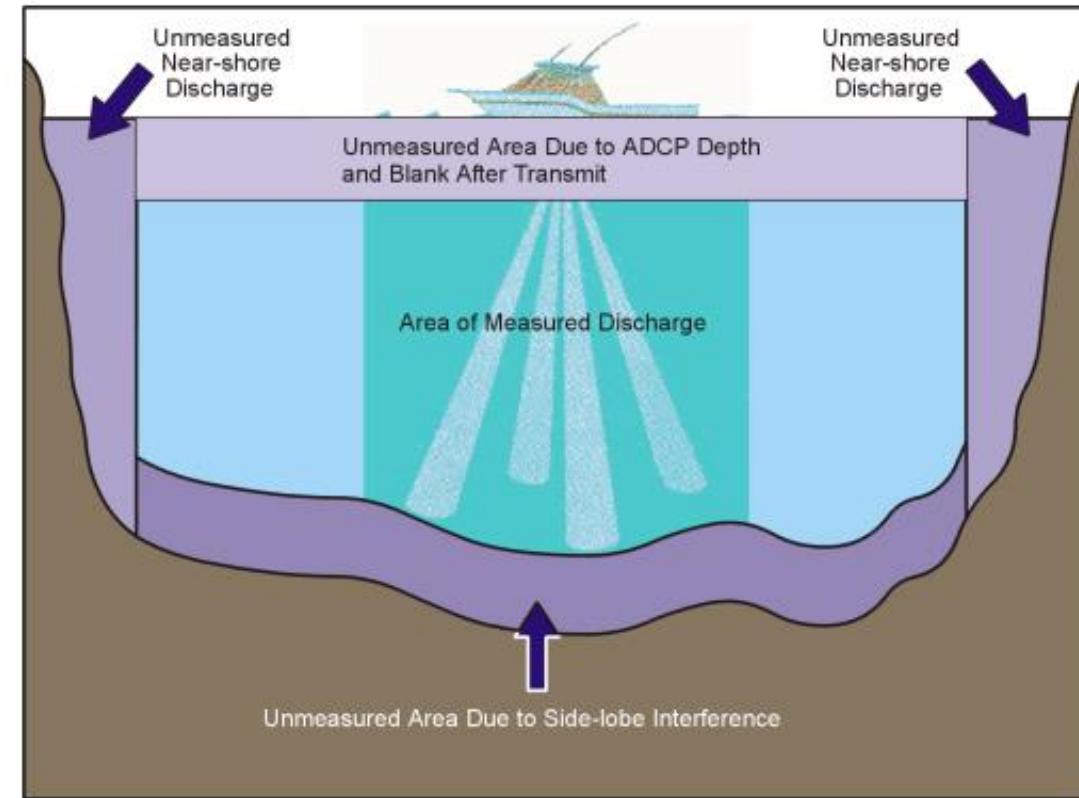
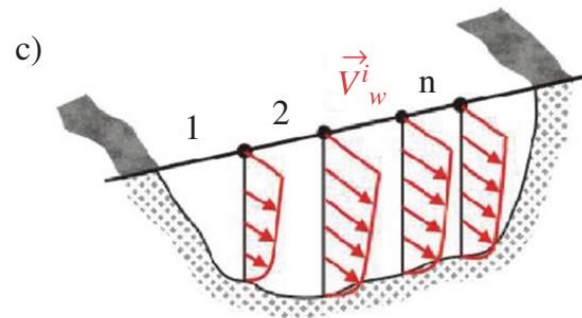
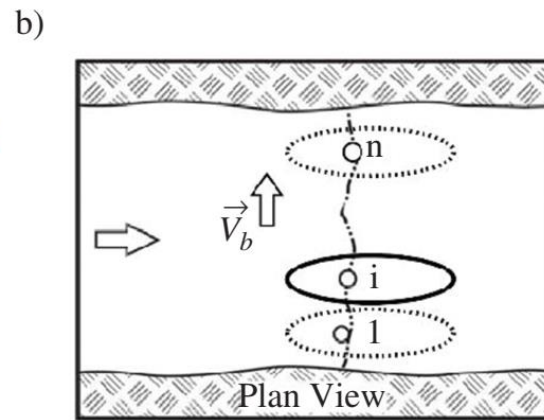
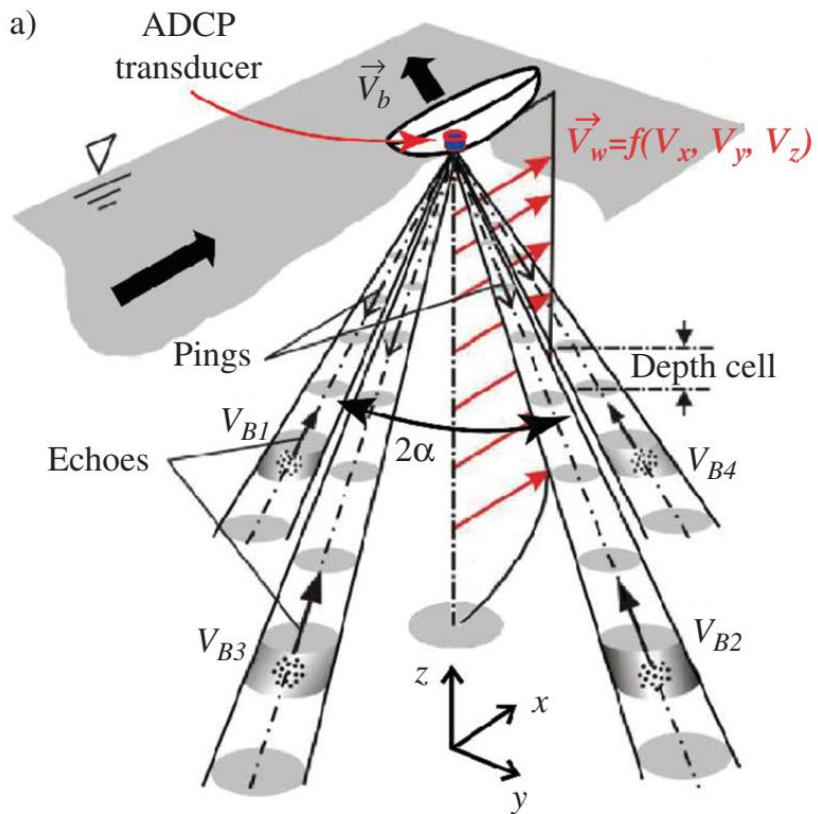


Figure 79. Unmeasured Regions in the Water Column

Extrapolación

- Superficie y fondo

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

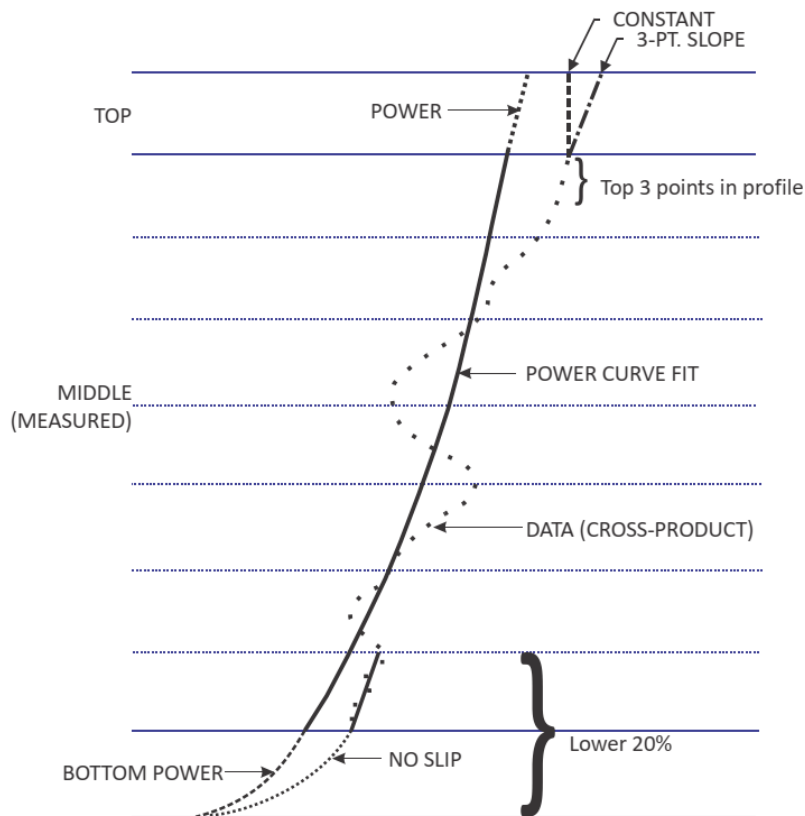
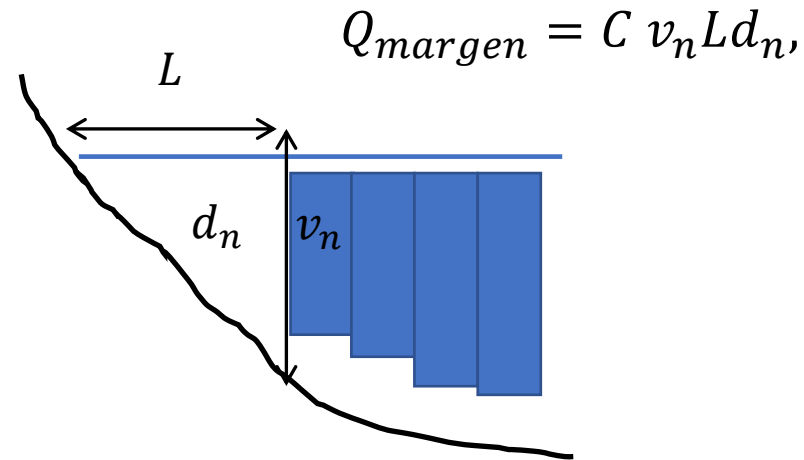


Figure 80. Discharge Extrapolation Method

- 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)

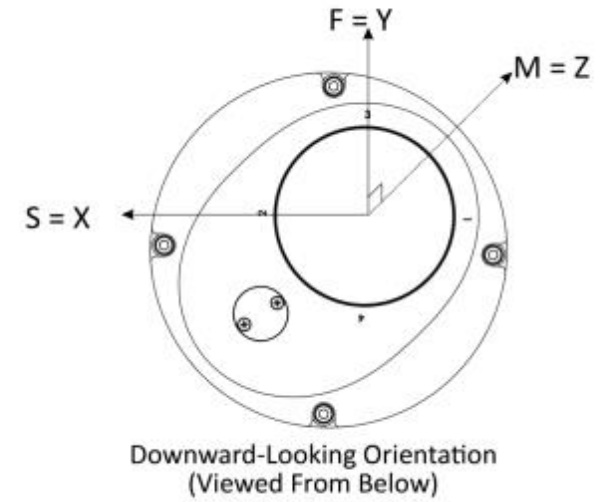


Figure 20. RiverRay Coordinate Transformation

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).

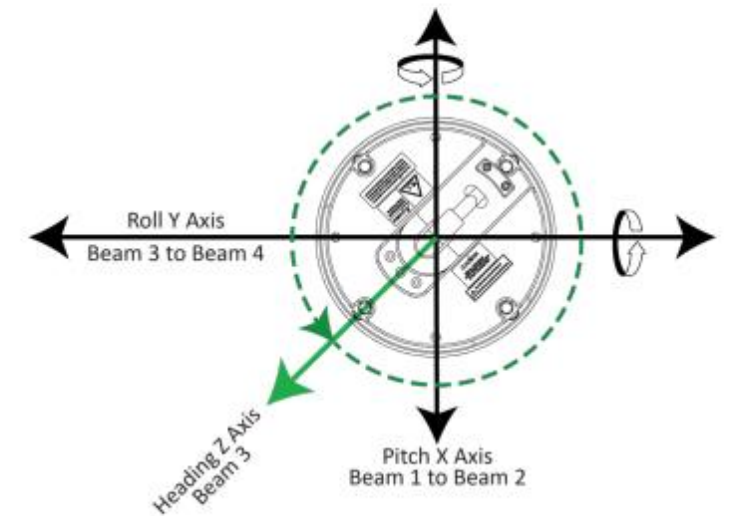
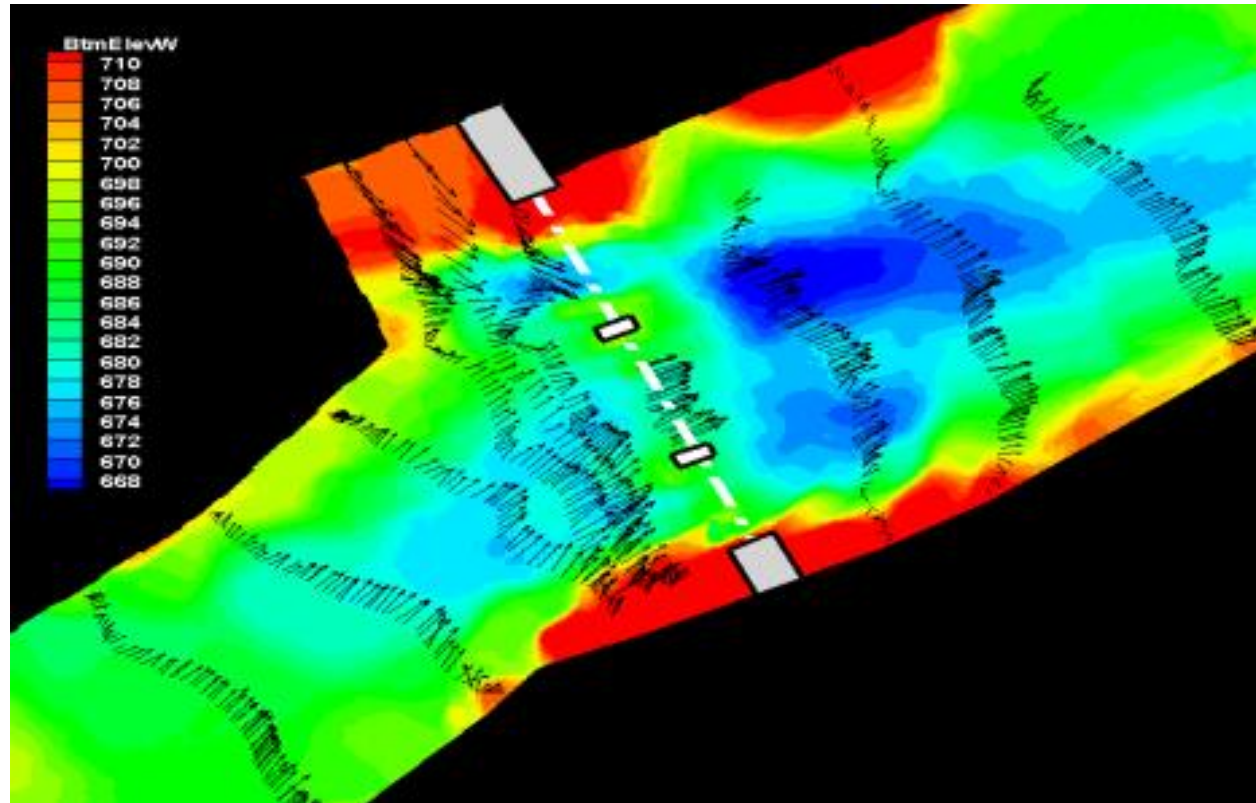


Figure 21. RiverRay Pitch and Roll Angles

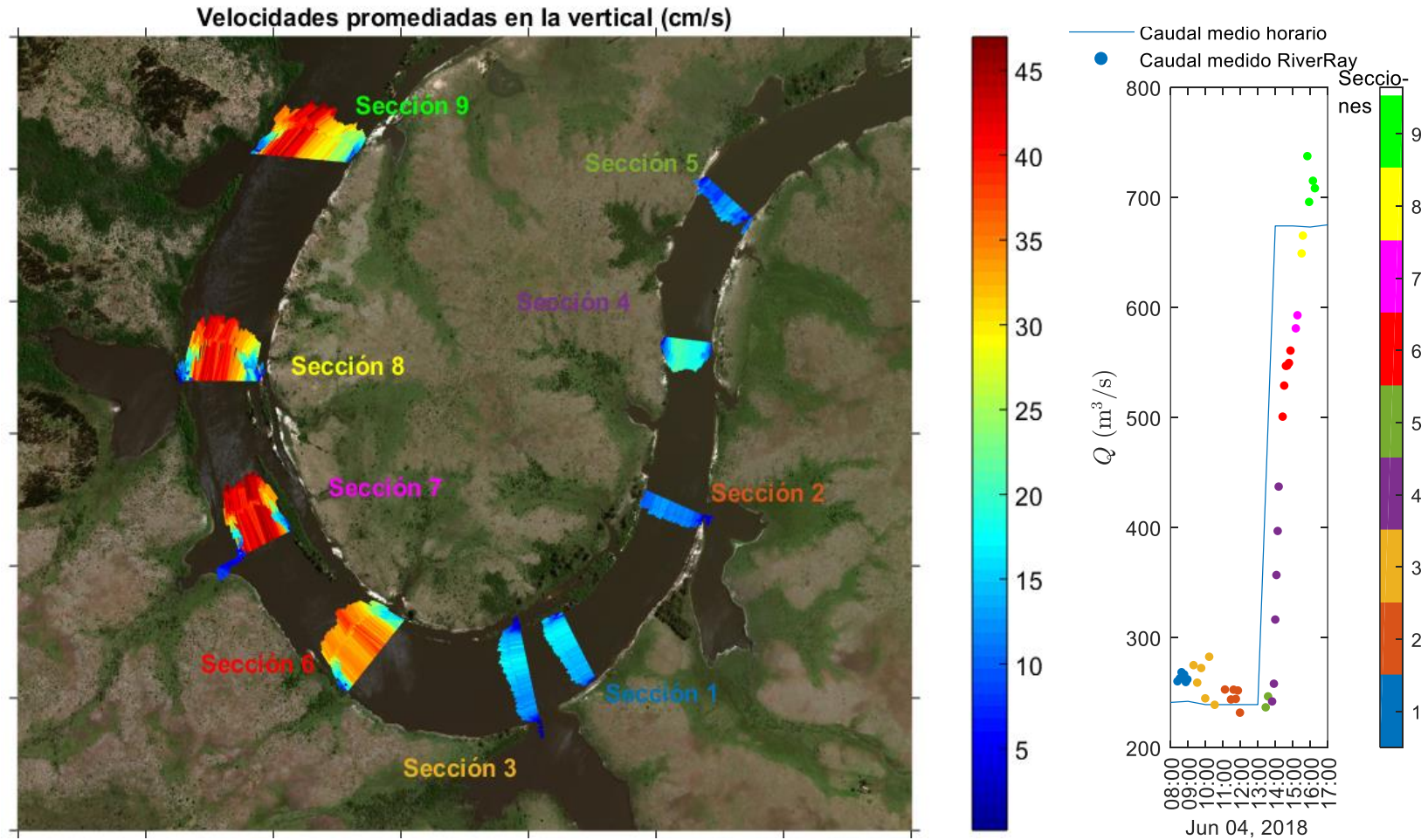
Angle of the RiverRay	Sign
Beam 3 higher than Beam 4	Positive Pitch
Beam 1 higher than Beam 2	Positive Roll

Algunas aplicaciones

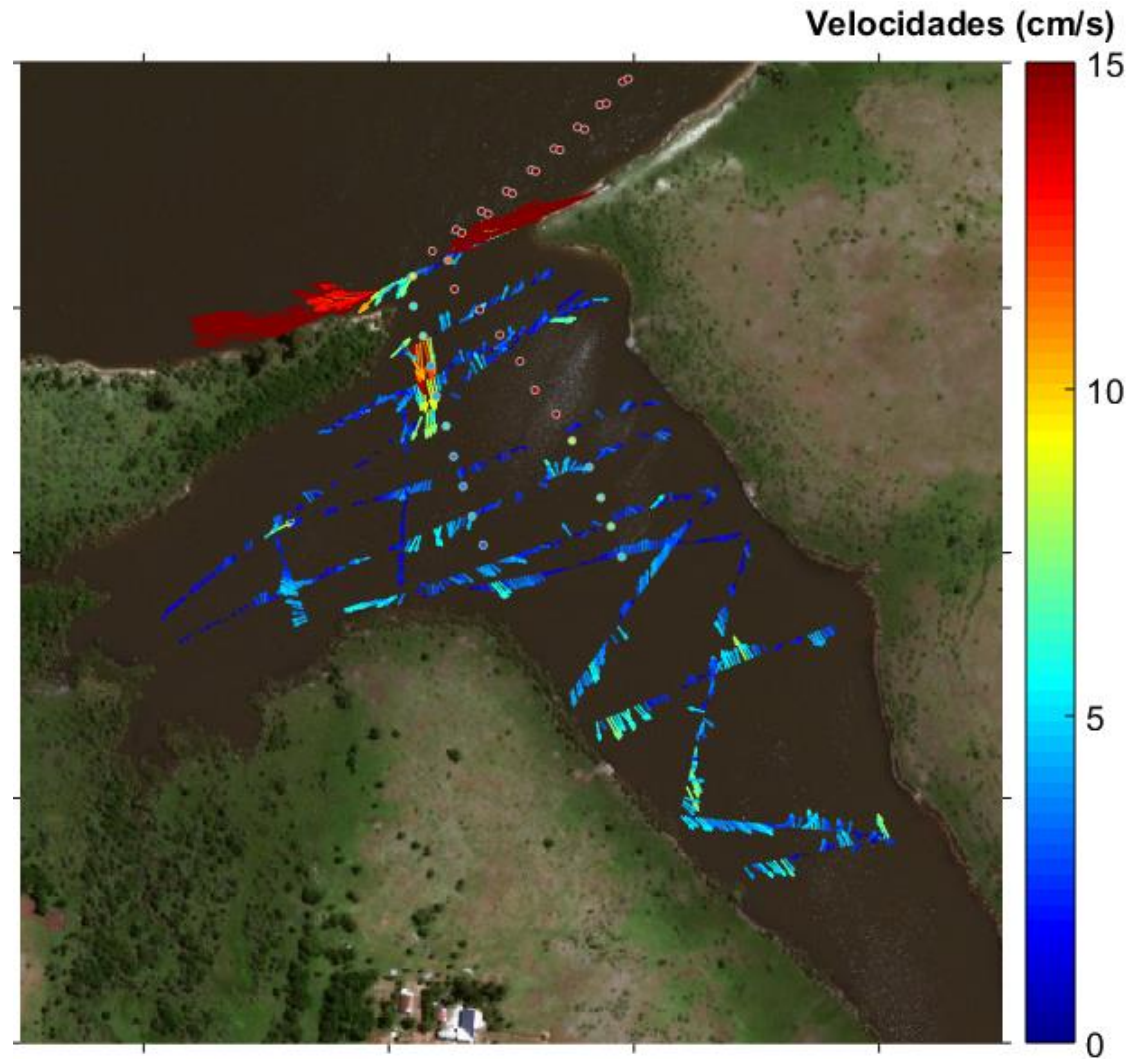
Campo bidimensional de velocidades y profundidades de erosión en las inmediaciones de un puente



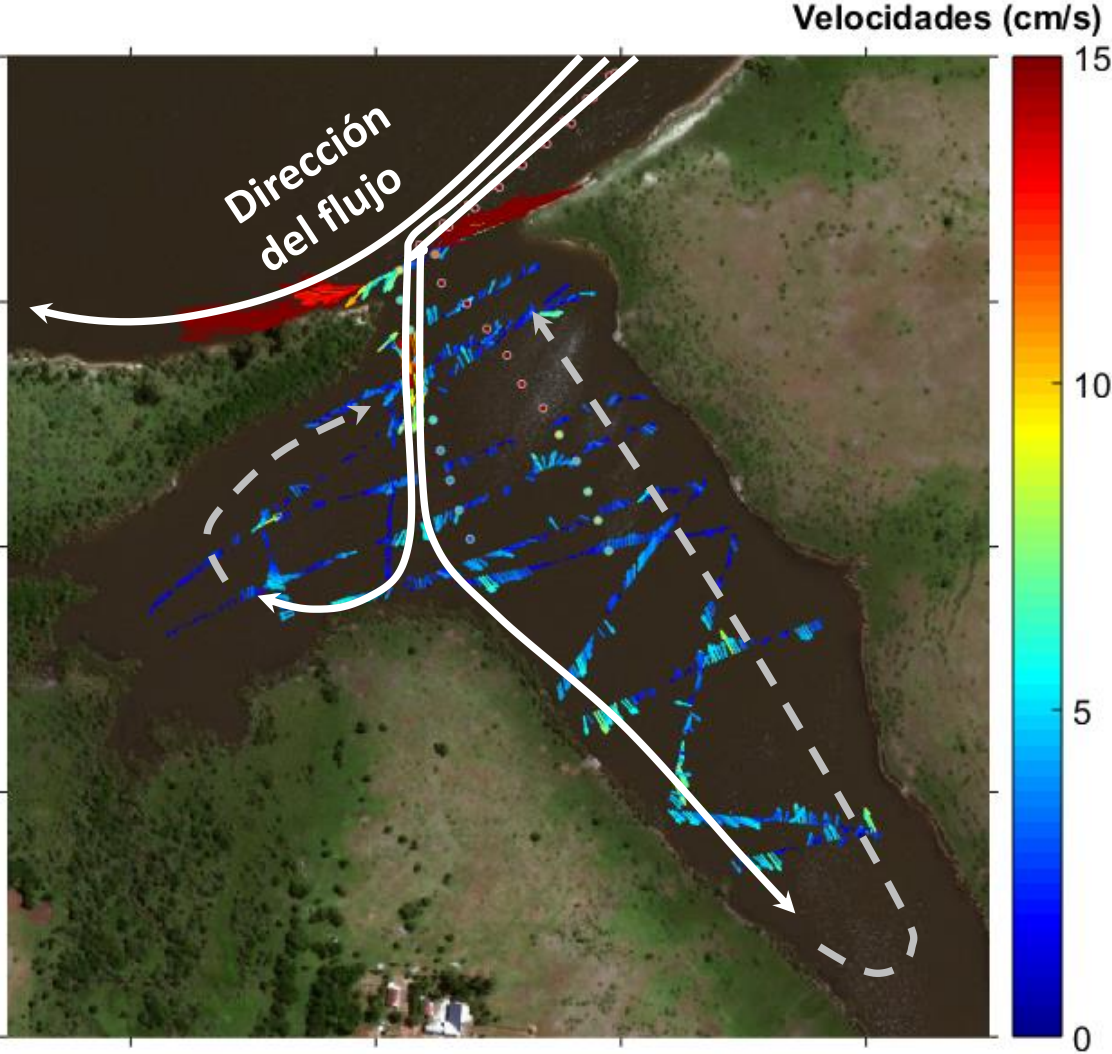
Evolución del tránsito de una crecida



Hidrodinámica en una laguna



Circulación en la laguna



Sección de entrada a la laguna

