

# Técnicas de Medición con instrumental hidro-acústico

Módulo de Flujo de Agua Superficial

Taller de Técnicas de Medición en Hidrología e Hidráulica

# Medición de flujo de agua superficial

Temas a tratar en el módulo:

- Técnicas de medición con instrumental hidro-acústico.
- Técnicas de medición mediante la utilización de trazadores.
- Estructuras de aforo, vertederos, canales de aforo y alcantarillas.

¿Para qué aforar?

# Bibliografía

- Bos, M.G. (1989). Discharge measurement structures. Holanda.
- French, Richard (1988). Hidráulica de canales abiertos. Singapur. McGraw-Hill
- Guaraglia, D.O. (2014). Introduction to Modern Instrumentation for Hydraulics and Environmental Sciences. Berlin. De Gruyter Open Ltd.
- Muste, Marian (2017). Experimental Hydraulics: Methods, Instrumentation, Data Processing and Management. Volume 1 y 2. Inglaterra. Taylor & Francis Group.
- Patalano, A. (2017). Desarrollo e implementación en gran Escala de técnicas de velocimetría por imágenes para caracterizar flujos de agua con superficie libre. Argentina. Universidad Nacional de Córdoba.

# Bibliografía

- U.S.B.R. (2001), Water Measurement Manual.  
(<https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/wmm/>)
- Notas HHA, Capítulos 2.2 (Energía Específica) y 2.6 (Flujo Rápidamente Variado)
- Bodhaine (1968), Measurement of peak discharge at culverts by indirect methods. ([https://pubs.usgs.gov/twri/twri3-a3/pdf/TWRI\\_3-A3.pdf](https://pubs.usgs.gov/twri/twri3-a3/pdf/TWRI_3-A3.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>)

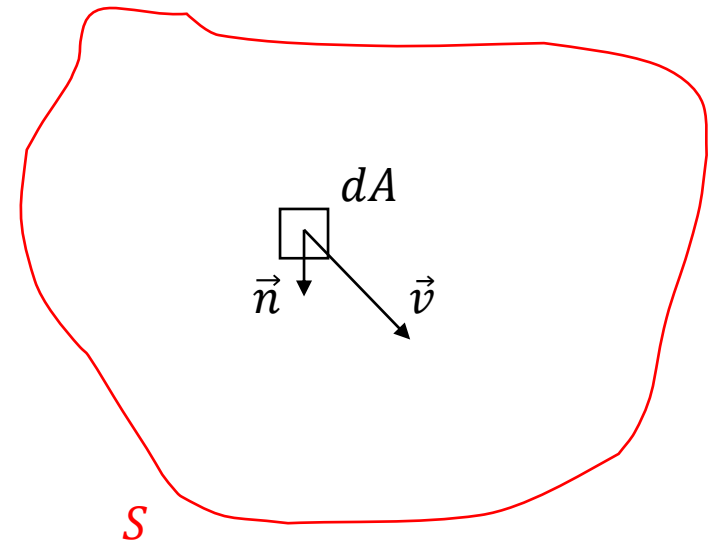
# Balance de masa

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

con  $M = \int_D \rho dV.$

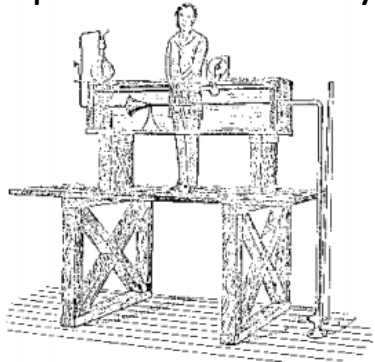
## Caudal

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

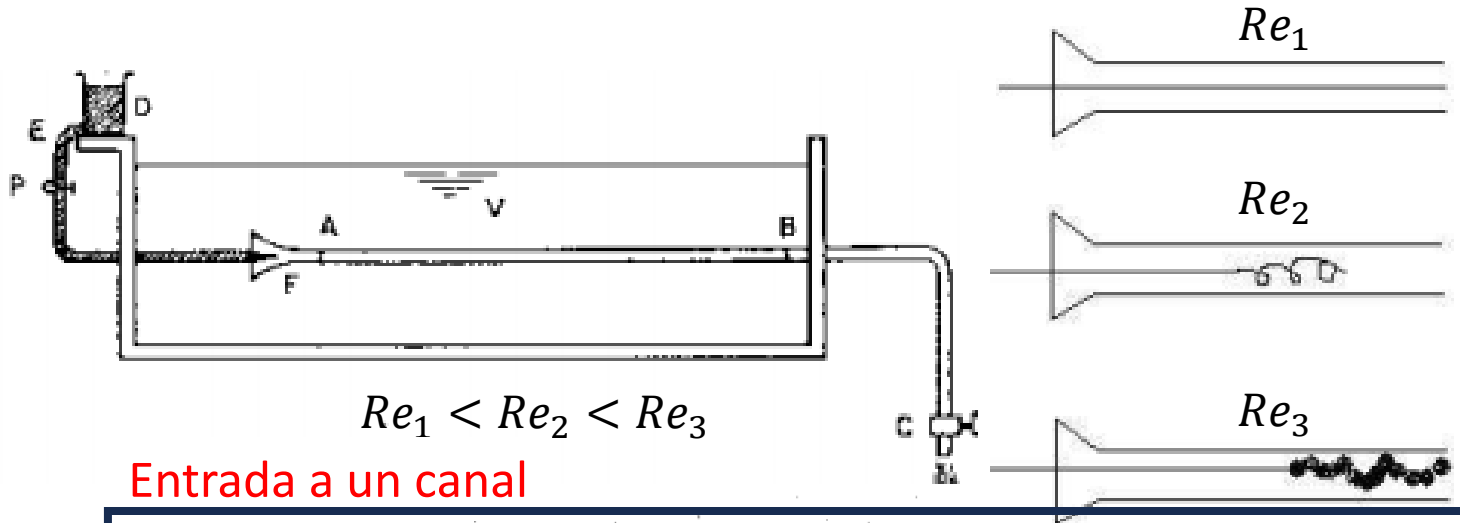


# Flujo turbulento

Experimento de Reynolds



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



$$Re_1 < Re_2 < Re_3$$

Entrada a un canal

• La turbulencia se origina a partir de la inestabilidad de flujos laminares. Es una propiedad del flujo, 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

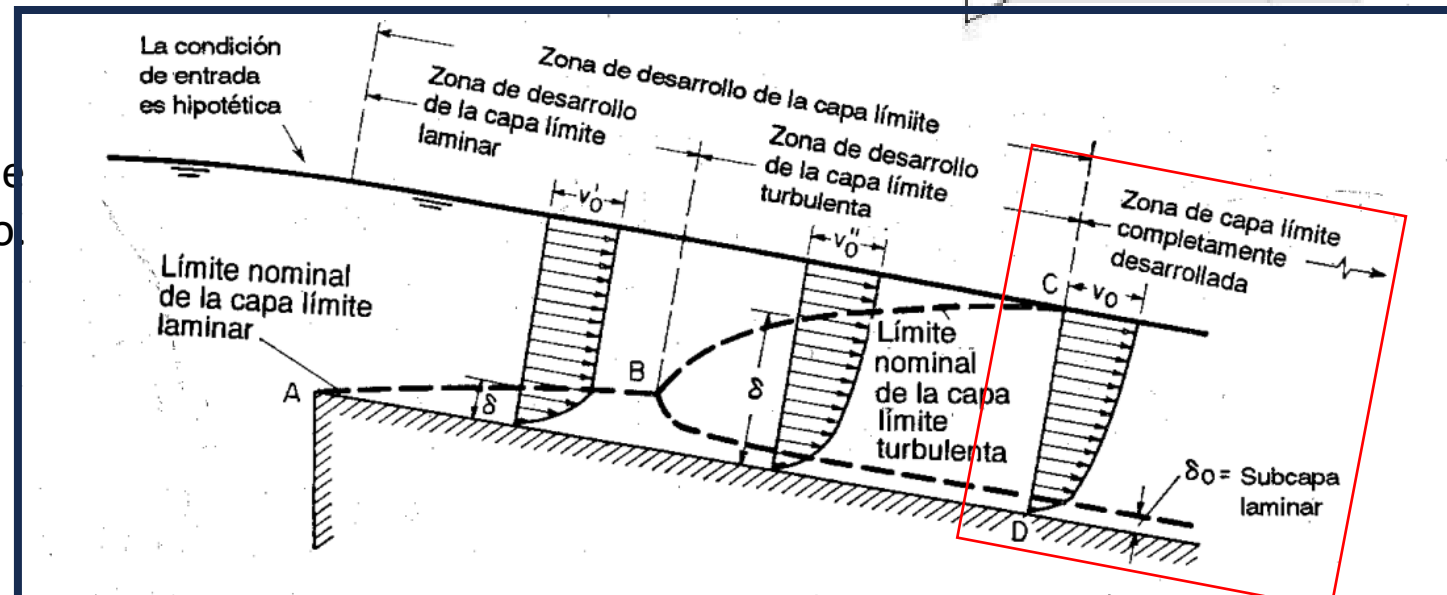


Figura 8-1. Desarrollo de la capa límite en un canal abierto con una condición de entrada ideal.

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:

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

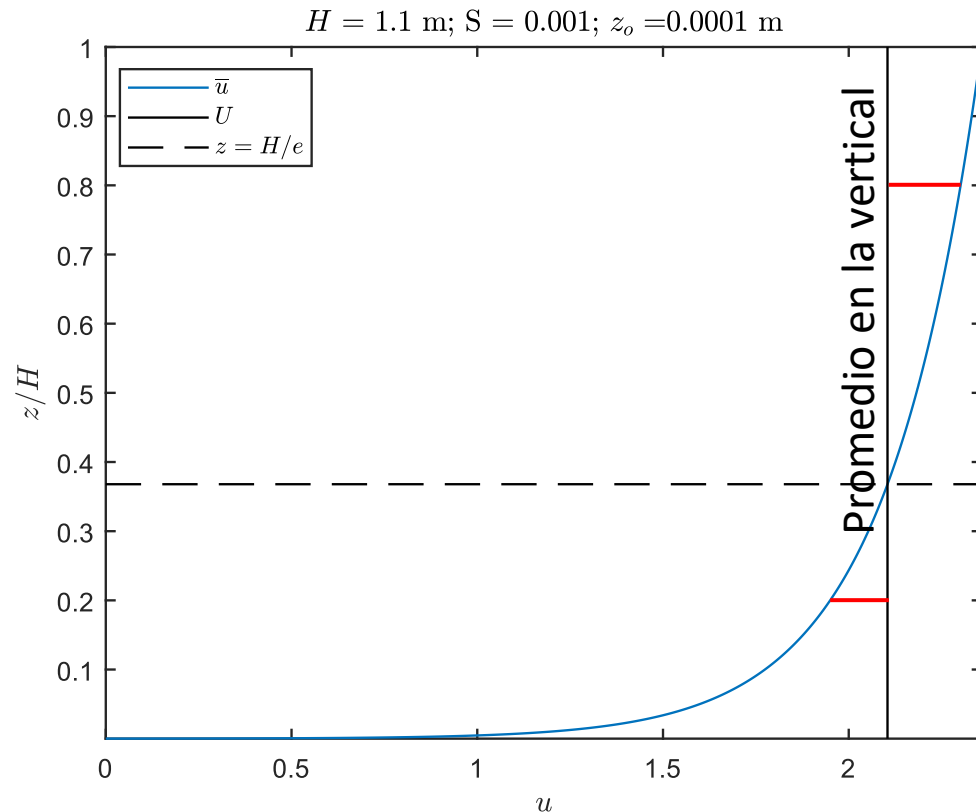
Para determinar la velocidad media de la sección vertical  $U$  se realizan mediciones en:

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

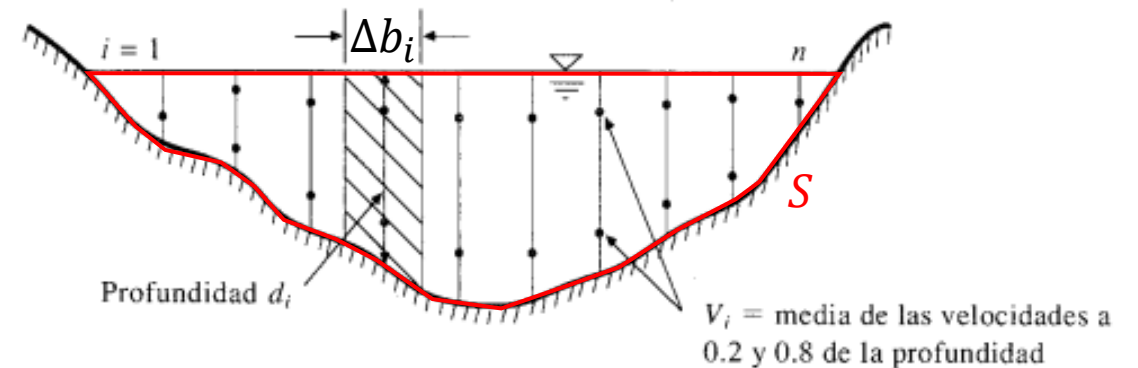
$$U_i = \bar{u}(z = 0,4d_i) \quad [1 \text{ punto}],$$

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

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



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

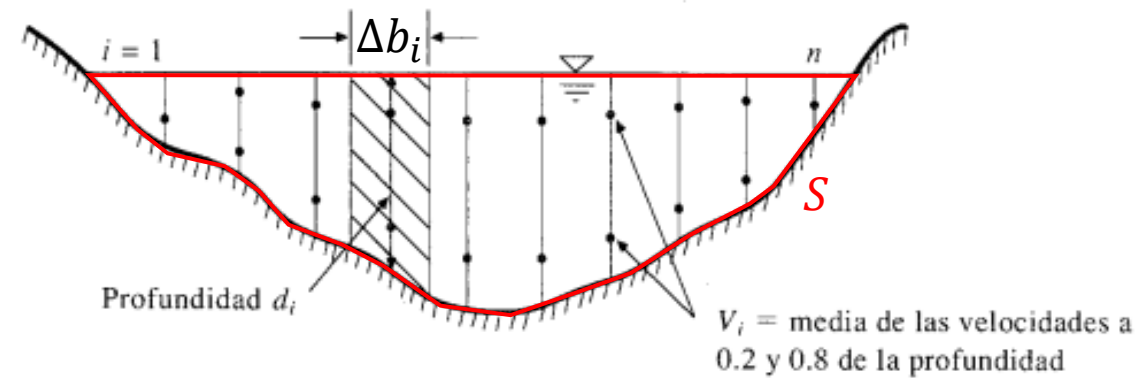


**FIGURA 6.3.7**

Cálculo del caudal utilizando la información de un aforo.

Fuente: Ven Te Chow, Hidrología Aplicada

# Ejemplo de planilla



Punto	$\Delta b_i$ (m)	$d_i$ (m)	$U_{i-1}$ (m/s)	$U_{i-2}$ (m/s)	$U_i$ (Vel. Media) (m/s)	Caudal parcial (m <sup>3</sup> /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							



¿menor a 60 cm?

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

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

Información de un aforo.  
en Te Chow, Hidrología Aplicada



# 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

# 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  $\bar{u} = \frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} u dt$ .

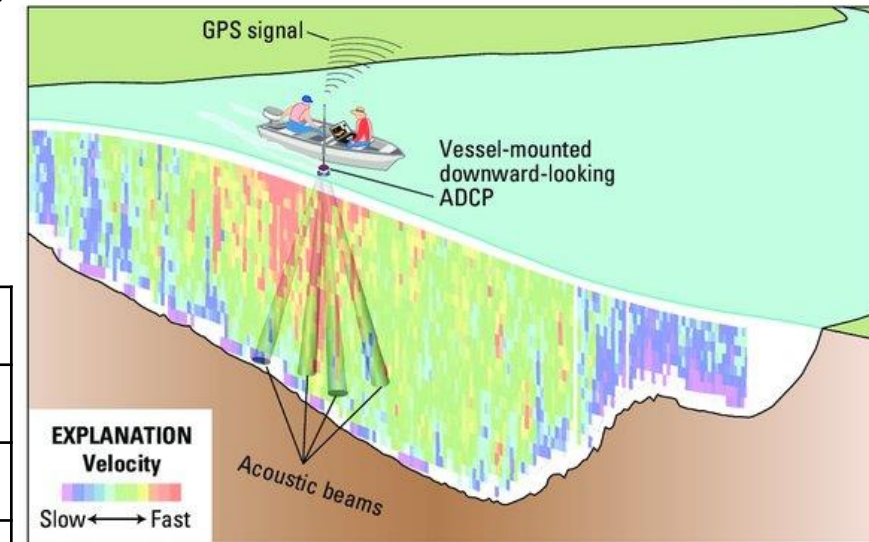
Definiendo un período característico del flujo como de  $T = H/U$  (tirante dividido velocidad media), es recomendable:

- 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?

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



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  $\rho$  (ecuación constitutiva) tal que:

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

donde  $p_{eq}$  y  $\rho_{eq}$  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,  $\omega$  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  $\rho$  como  $c_s = \sqrt{K/\rho}$ .

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

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

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

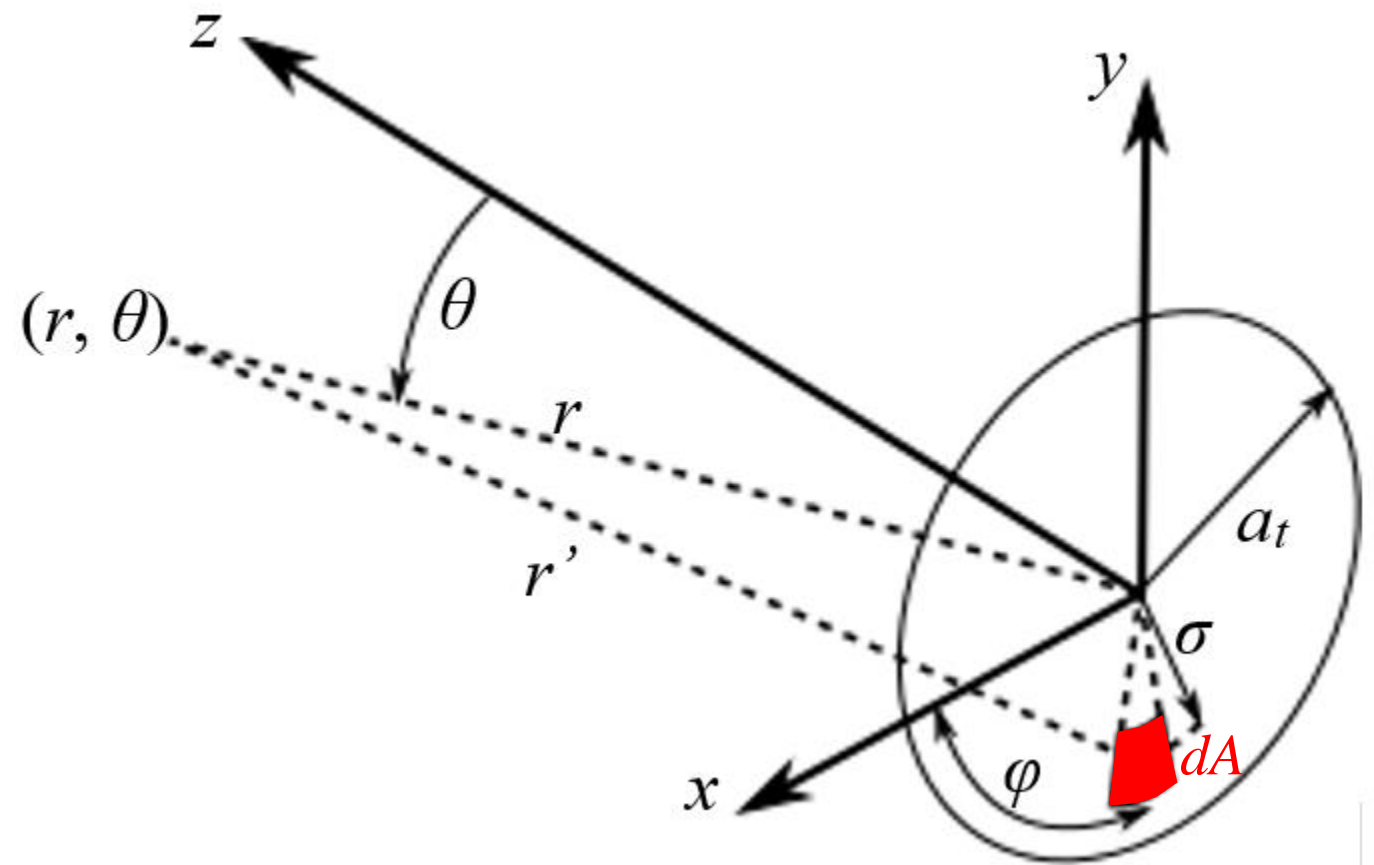
Esto permite que se pueda entender a alguien que habla desde lejos.

# Transductor de ultrasonido

- El transductor transforma una señal eléctrica en vibraciones ultrasónicas (ondas de presión).
- 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.



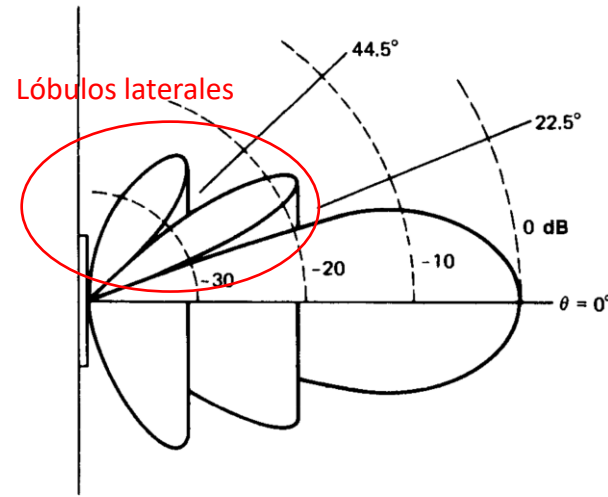
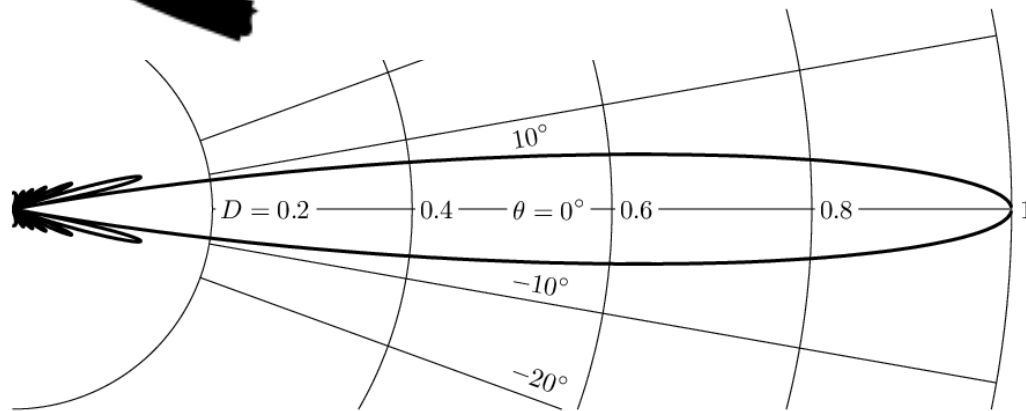
Fuente: Pedocchi, Perfiladores Acústicos: Fundamentos y Aplicaciones

# Transductor de ultrasonido

Amplitud de la presión



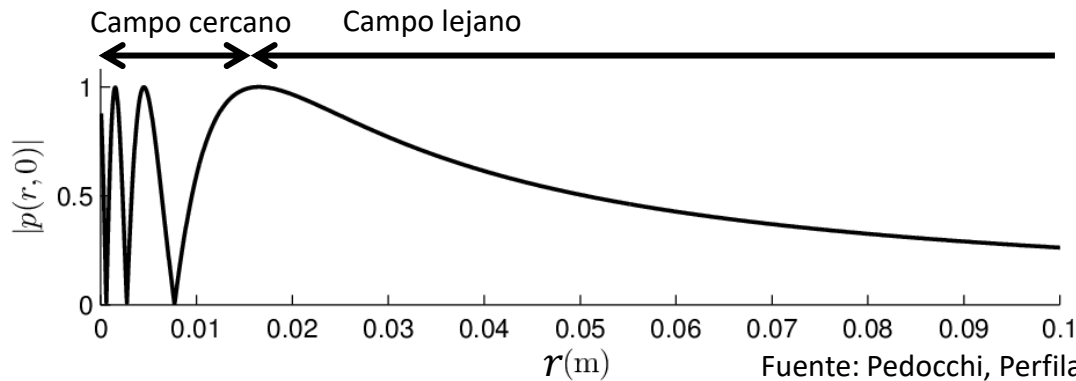
Relación entre longitud de onda  $\lambda$  y el radio del transductor  $a_t$



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

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

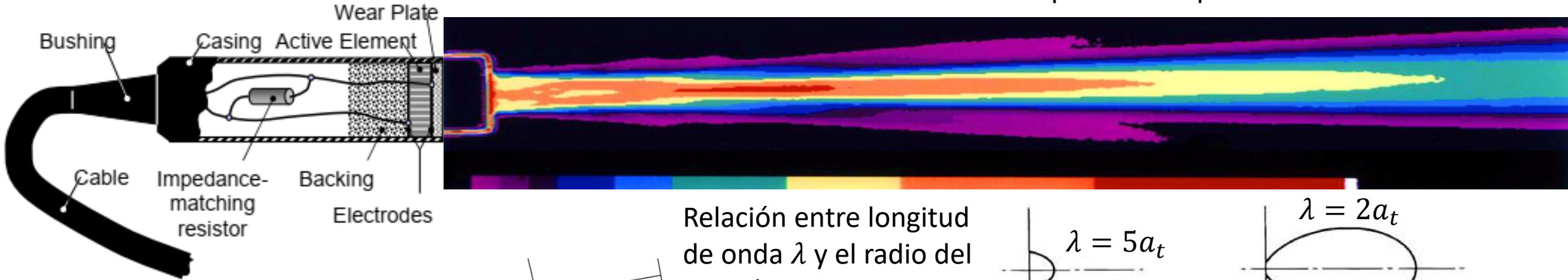


Fuente: Pedocchi, Perfiladores Acústicos: Fundamentos y Aplicaciones

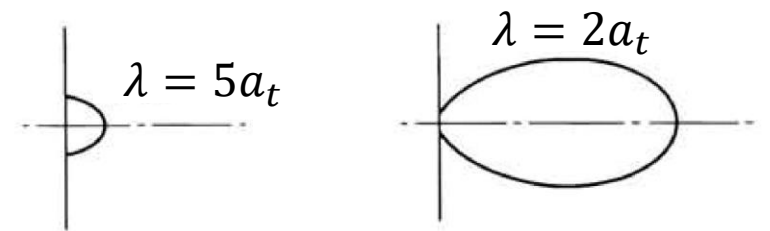


# Transductor de ultrasonido

Amplitud de la presión



Relación entre longitud de onda  $\lambda$  y el radio del transductor  $a_t$



Lóbulos laterales

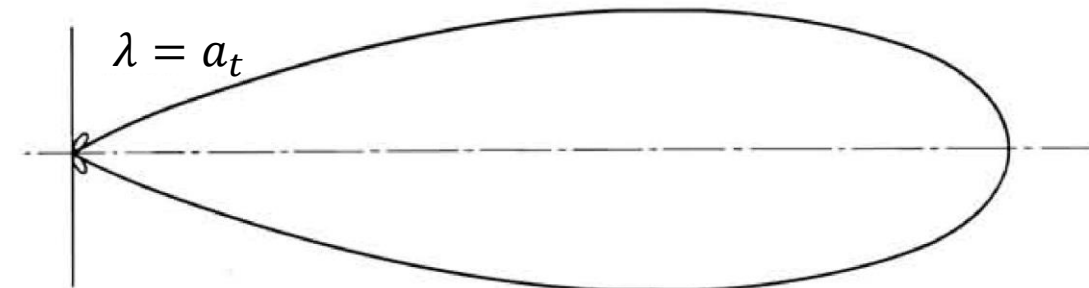
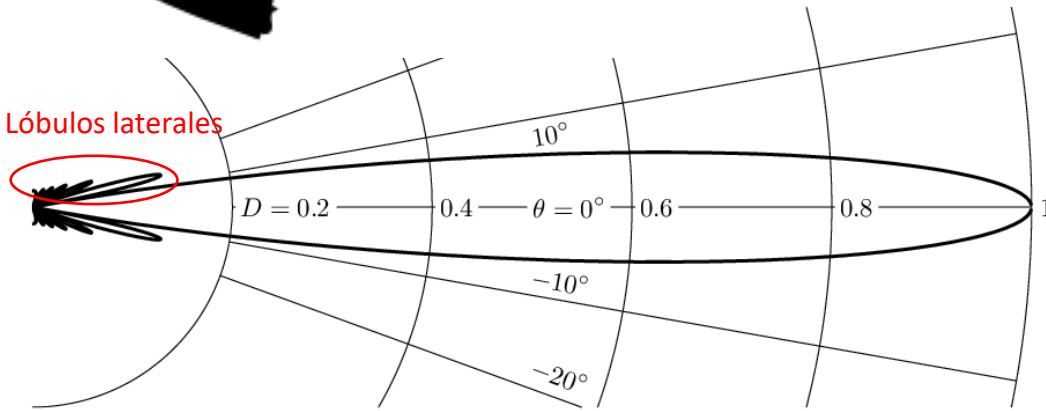
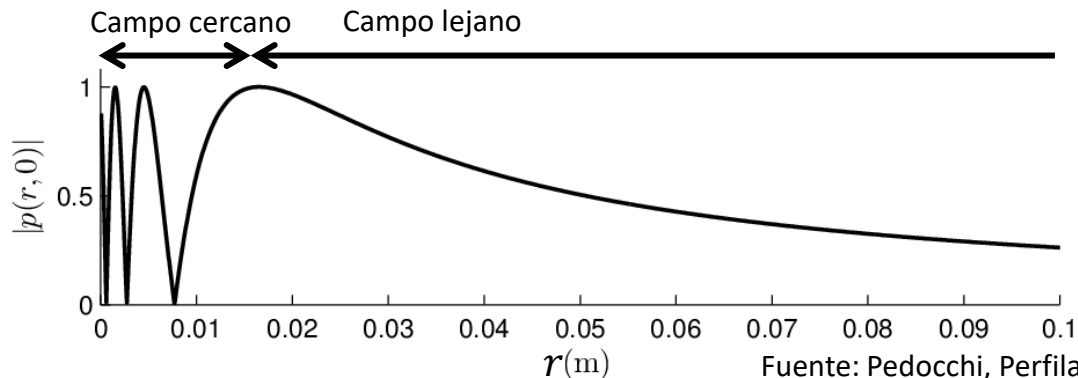
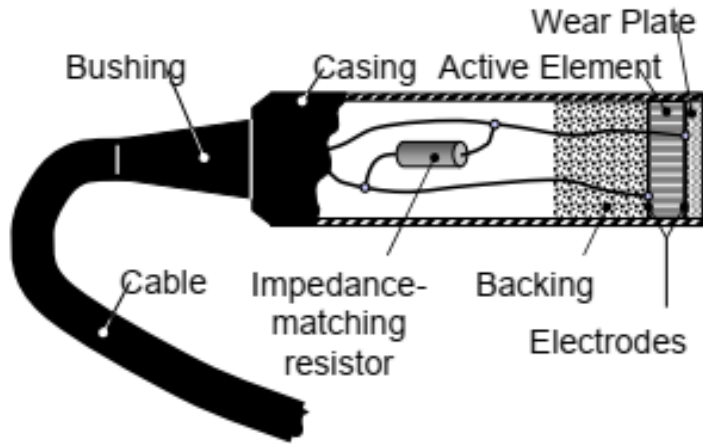


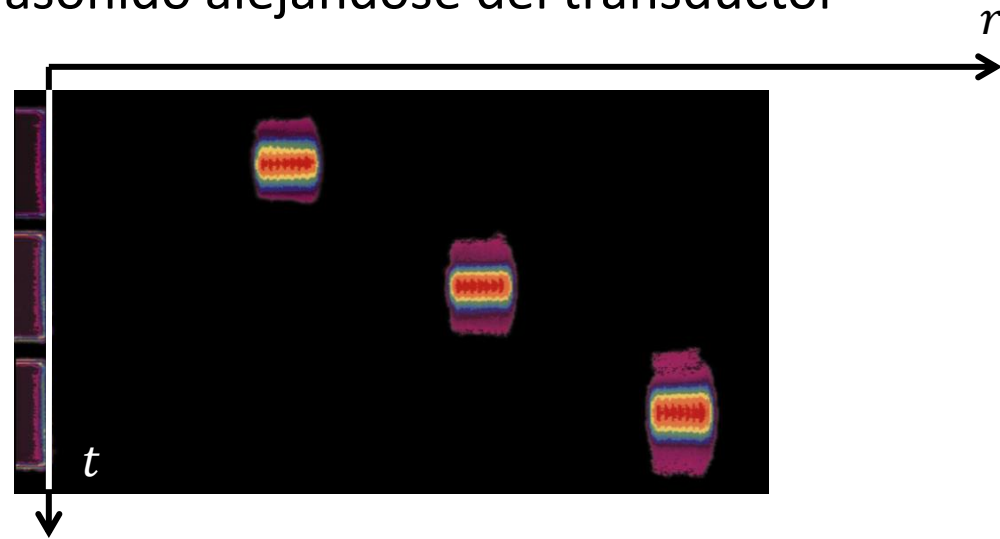
FIGURE 7.8 Polar diagrams of distribution-in-angle of radiated intensity from a piston set in a plane wall, for different ratios between the wavelength  $\lambda$  and the radius of the piston  $a$ . In the curve for  $\lambda = a$ , the small loops at the side are diffraction rings.



# Transductor



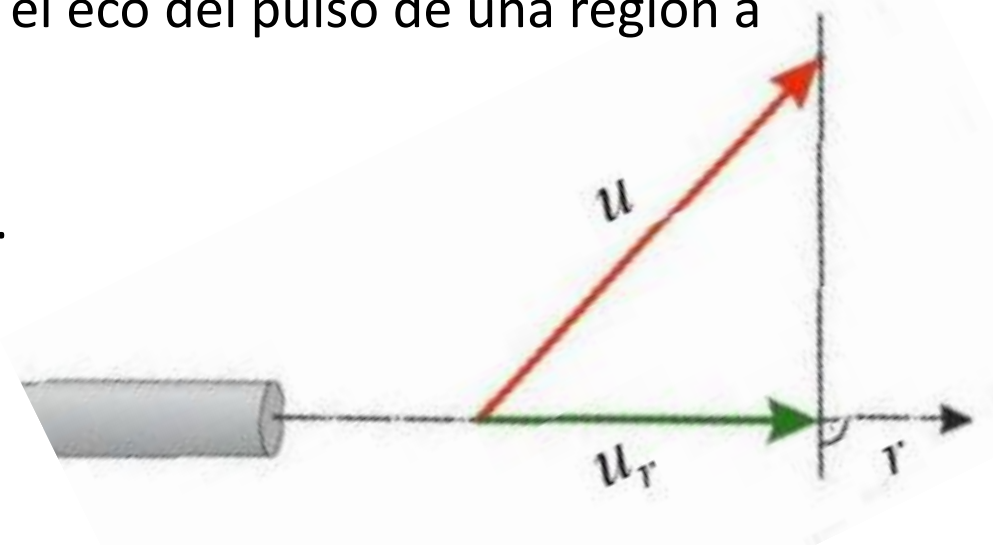
Pulso de ultrasonido alejándose del transductor



El tiempo  $\delta t$  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  $u_r$



# Resumen

- Definición del caudal

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

- Velocidades en flujo turbulento completamente desarrollado

- 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

- Campo de presiones generado por un transductor de ultrasonido

