

Taller de Técnicas de Medición en Hidrología e Hidráulica

Módulo: Hidráulica de ambientes costeros

Rodrigo Alonso: ralonso@fing.edu.uy



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY





		Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	
	Semana 1	31-Jul	1-Aug	2-Aug	3-Aug	4-Aug	Flujo de agua superficial
	Semana 2	7-Aug	8-Aug	9-Aug	10-Aug	11-Aug	
Salida de campo	Semana 3	14-Aug	15-Aug	16-Aug	17-Aug	18-Aug	
Consulta	Semana 4	21-Aug	22-Aug	23-Aug	24-Aug	25-Aug	
Defensa	Semana 5	28-Aug	29-Aug	30-Aug	31-Aug	1-Sep	
	Semana 6	4-Sep	5-Sep	6-Sep	7-Sep	8-Sep	Hidráulica de ambientes costeros
	Semana 7	11-Sep	12-Sep	13-Sep	14-Sep	15-Sep	
	Semana 8	18-Sep	19-Sep	20-Sep	21-Sep	22-Sep	
	Semana 9	25-Sep	26-Sep	27-Sep	28-Sep	29-Sep	
Salida de campo	Semana 10	2-Oct	3-Oct	4-Oct	5-Oct	6-Oct	
Consulta	Semana 11	9-Oct	10-Oct	11-Oct	12-Oct	13-Oct	Agua en la atmósfera y en el suelo
Defensa	Semana 12	16-Oct	17-Oct	18-Oct	19-Oct	20-Oct	
	Semana 13	23-Oct	24-Oct	25-Oct	26-Oct	27-Oct	
	Semana 14	30-Oct	31-Oct	1-Nov	2-Nov	3-Nov	Agua en la atmósfera y en el suelo
Salida de campo	Semana 15	6-Nov	7-Nov	8-Nov	9-Nov	10-Nov	
Consulta	Semana 16	13-Nov	14-Nov	15-Nov	16-Nov	17-Nov	
Defensa	Semana 17	20-Nov	21-Nov	22-Nov	23-Nov	24-Nov	
	Semana 18	27-Nov	28-Nov	29-Nov	30-Nov	1-Dec	

Parciales

Feridos

La costa (y el mar) como ambiente de actuación de la Ingeniería Civil

Planificación, diseño, evaluación de impactos y ejecución de obras marítimas.

Puertos y vías de navegación



Control de erosión



Control de inundaciones



Reclamación de tierras



Emisarios y obras de toma



Cables submarinos



Energías *offshore*



Explotación del subsuelo marino



etc.

Es necesario comprender la hidrodinámica de la costa para cuantificar:

- Solicitaciones sobre estructuras
- Caudales de sobrepasamiento
- Movimiento de elementos flotantes
- Cambios morfológicos

A los efectos de:

- Realizar diseños fiables y funcionales

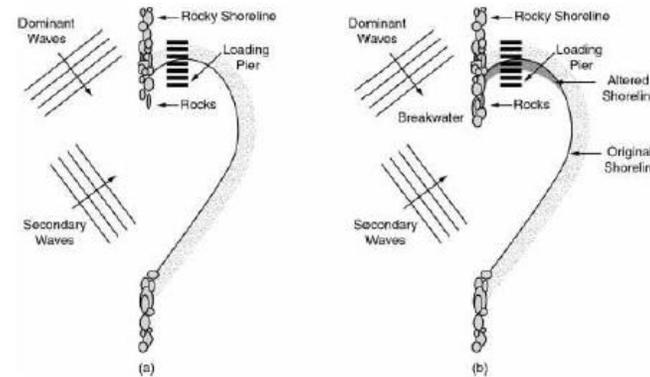
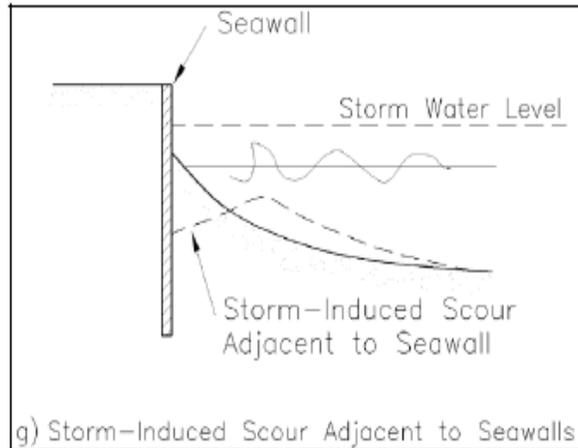


Figure 1.7 General characteristics at Port Orford, Oregon. (a) Original situation, and (b) modified situation (after Giles and Chatham 1974).

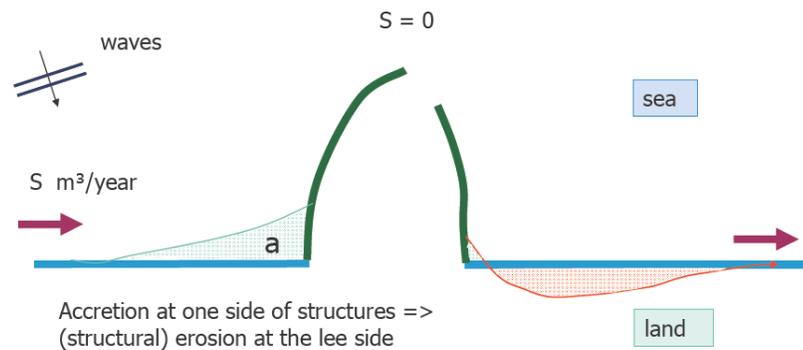


Es necesario comprender la hidrodinámica de la costa para cuantificar:

- Solicitaciones sobre estructuras
- Caudales de sobrepasamiento
- Movimiento de elementos flotantes
- Cambios morfológicos

A los efectos de:

- Mitigar impactos en el entorno

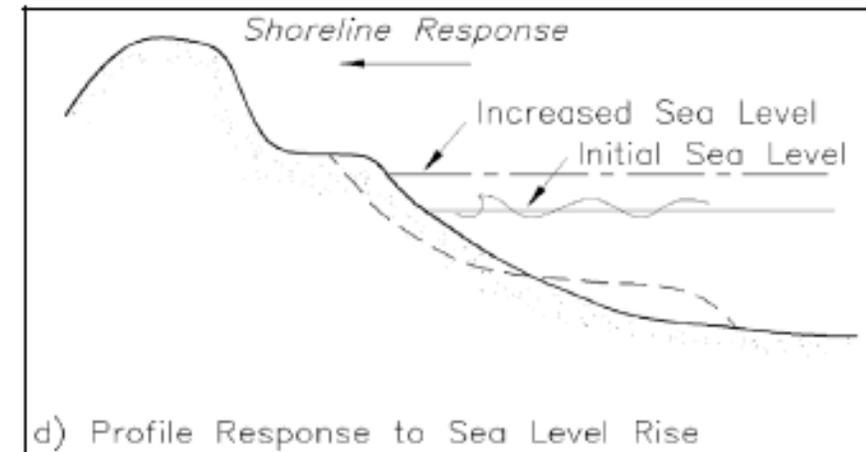
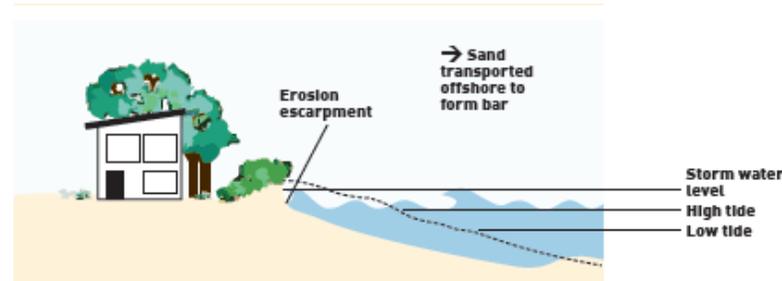
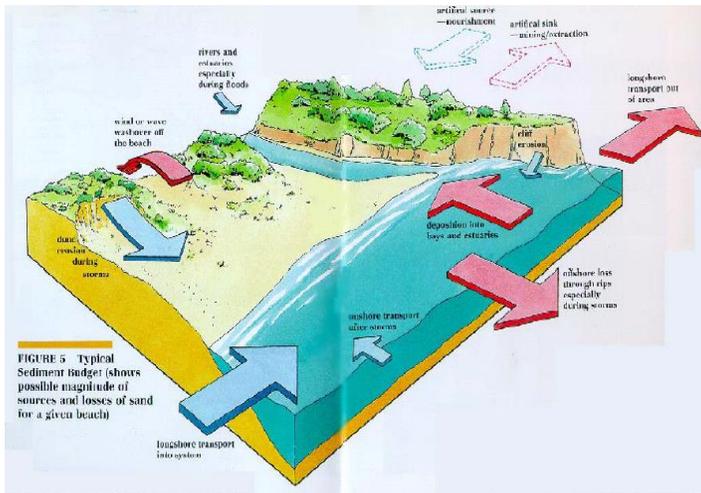


Es necesario comprender la hidrodinámica de la costa para cuantificar:

- Solicitaciones sobre estructuras
- Caudales de sobrepasamiento
- Movimiento de elementos flotantes
- Cambios morfológicos

A los efectos de:

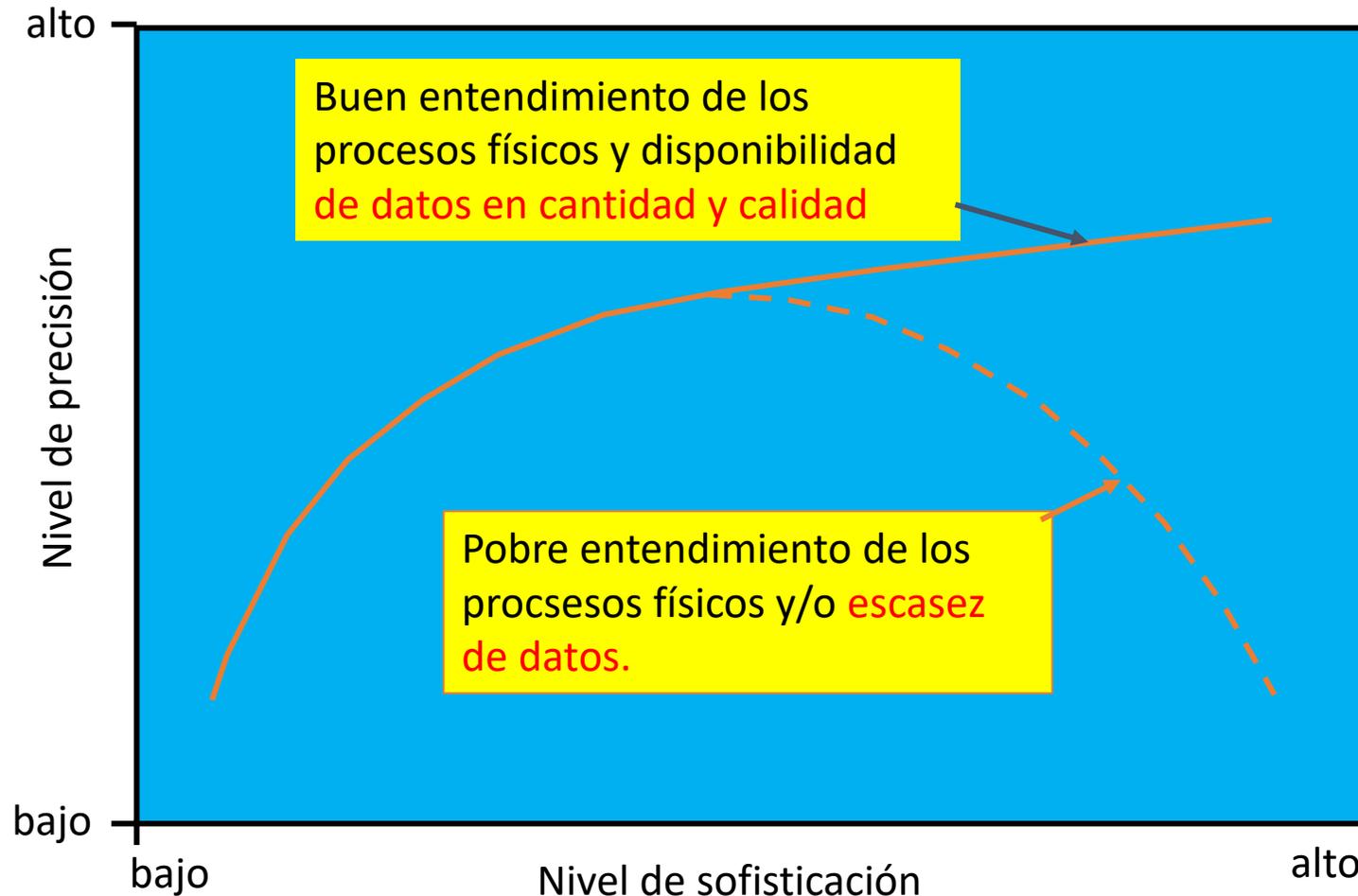
- Generar información y conocimiento como insumo para la gestión



Es necesario comprender la hidrodinámica de la costa

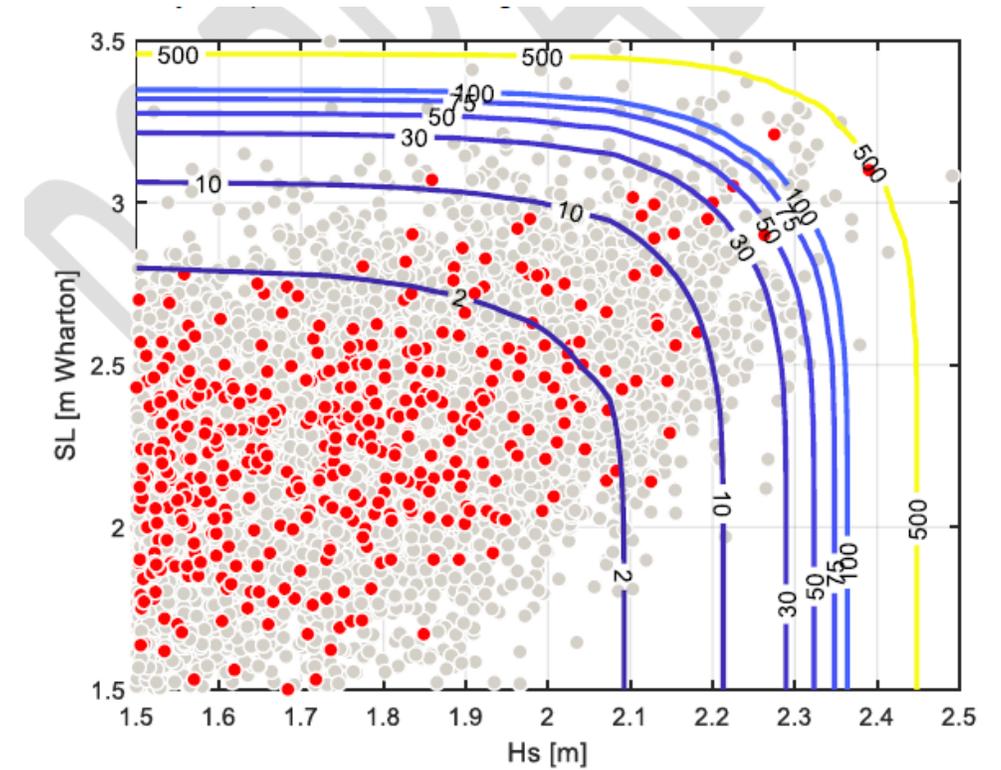
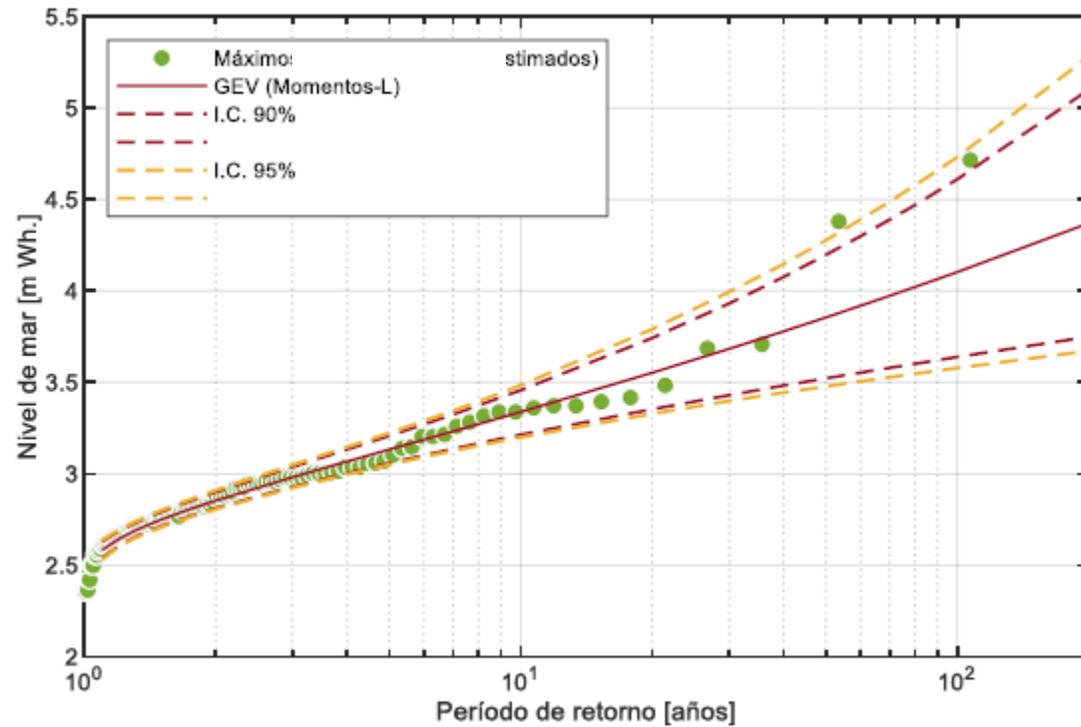
¡Para ello es necesario medir !

Esquema de
comportamiento de un
modelo de base física



Es necesario comprender la hidrodinámica de la costa

¡Para ello es necesario medir !



Es necesario comprender la hidrodinámica de la costa. ¡Para ello es necesario medir !

¿Qué medir?

Variables hidrodinámicas:

- Oleaje
- Nivel de mar
- Corrientes

Variables morfológicas:

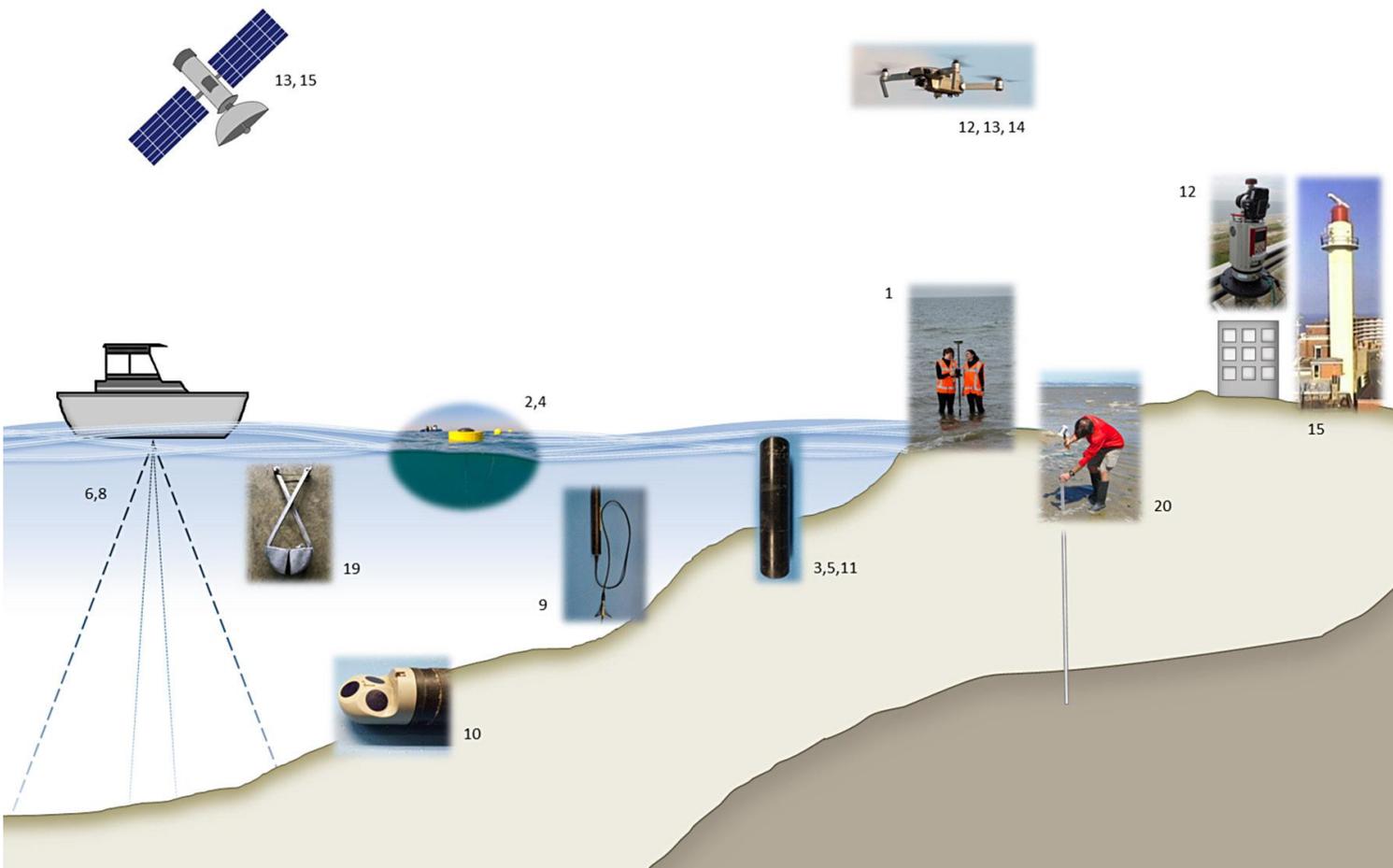
- Topo-batimetría
- Posición de línea de costa, pie de duna, etc.

Variables sedimentológicas:

- Propiedades del sedimento
- Concentraciones

Variables meteorológicas:

- Viento
- Presión



Es necesario comprender la hidrodinámica de la costa. ¡Para ello es necesario medir !

¿Qué medir?

Variables hidrodinámicas:

- Oleaje
- Nivel de mar
- Corrientes

Variables morfológicas:

- Topo-batimetría
- Posición de línea de costa, pie de duna, etc.

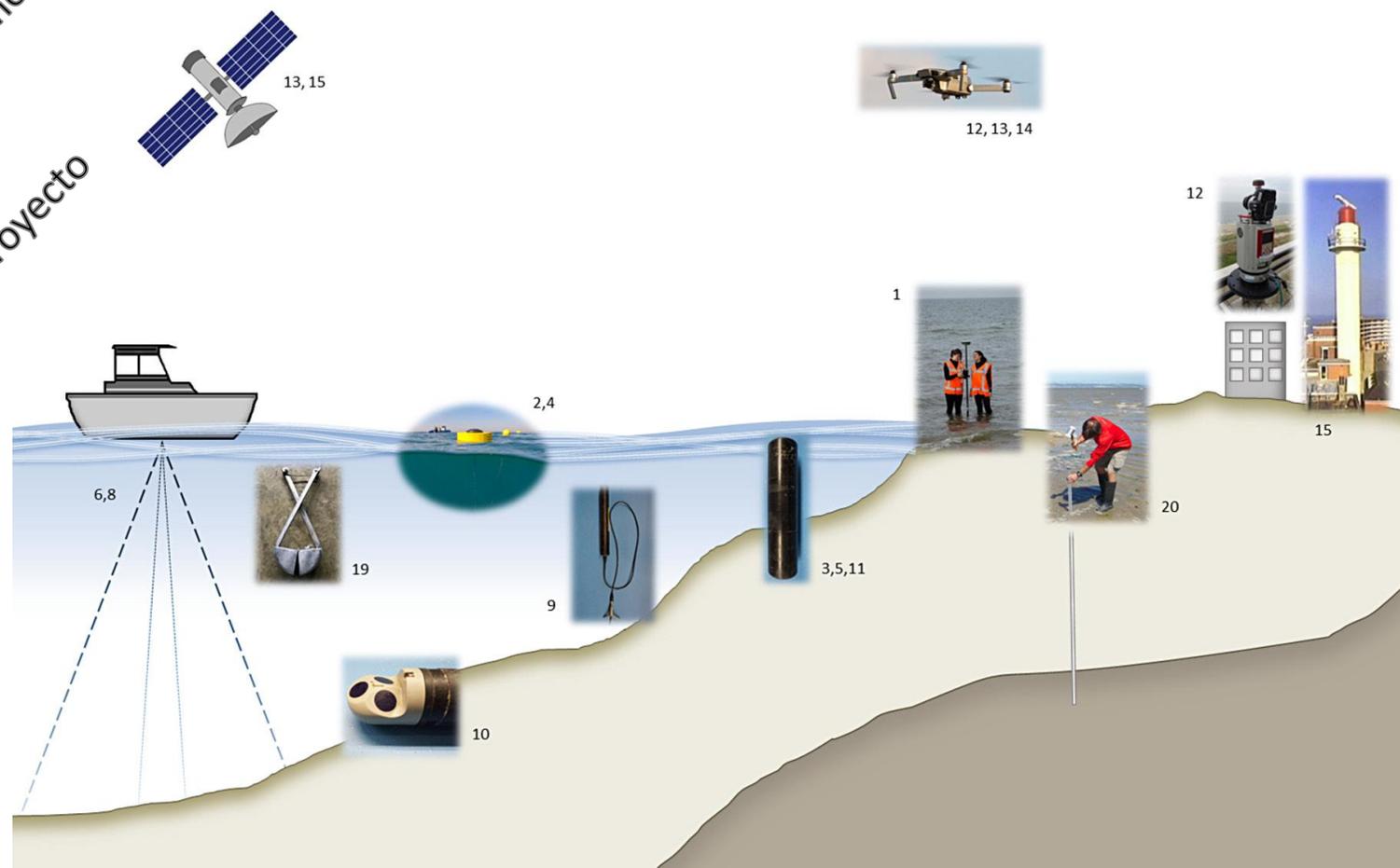
Variables sedimentológicas:

- Propiedades del sedimento
- Concentraciones

Variables meteorológicas:

- Viento
- Presión

Objeto principal del módulo
Se comentará sobre proyecto
en marcha



Es necesario comprender la hidrodinámica de la costa. ¡Para ello es necesario medir !

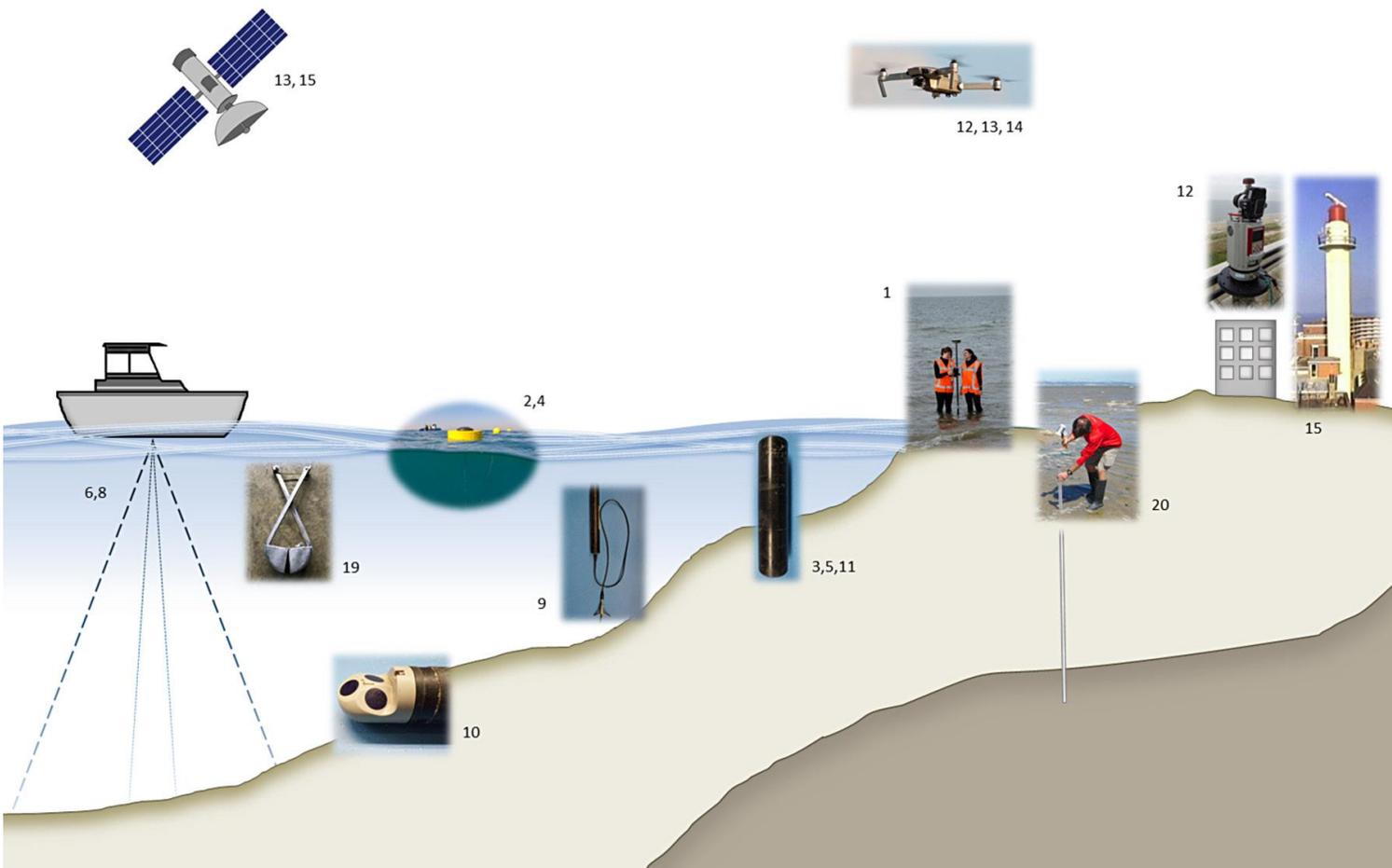
¿Qué medir y cómo?

*En el marco de un proyecto:

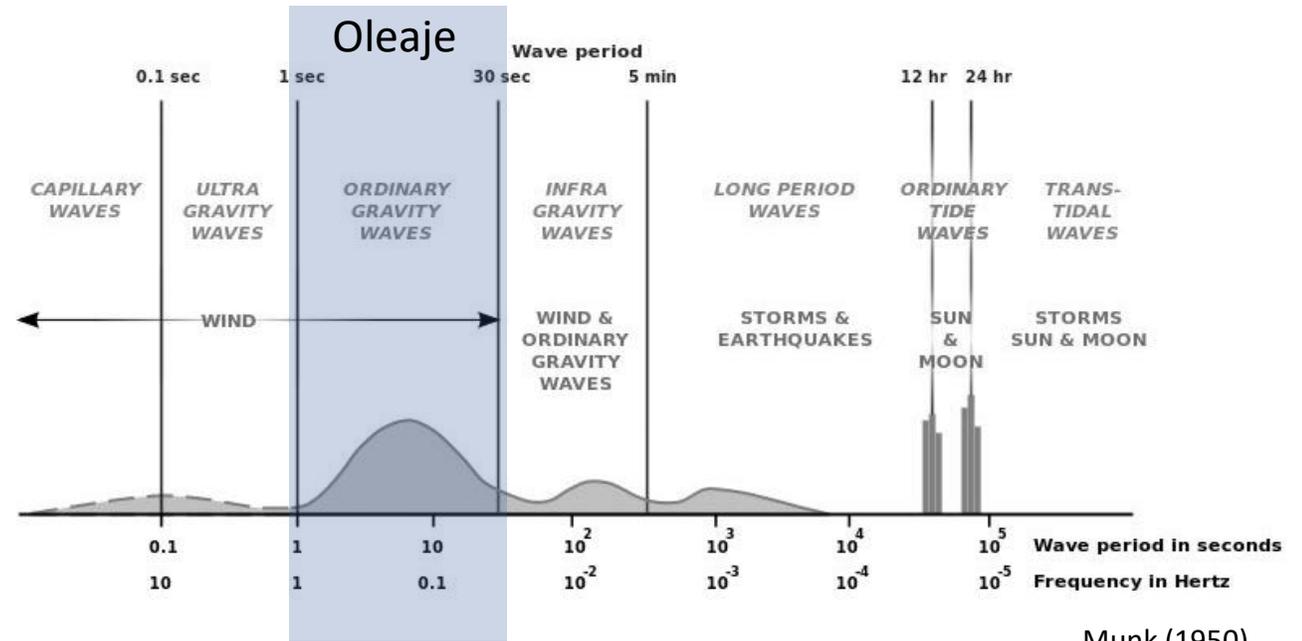
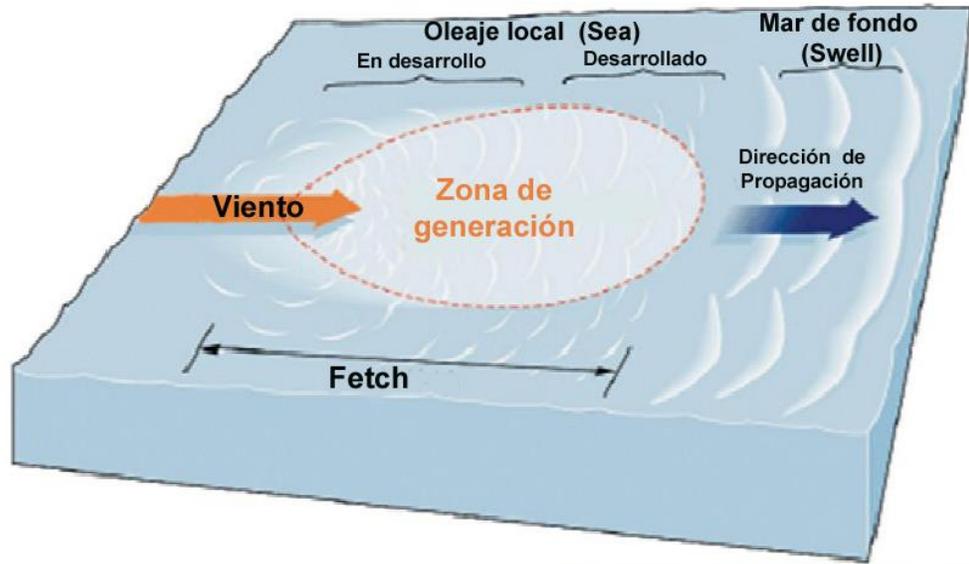
Orientado en los objetivos del proyecto y condicionado por su escala.

*En el marco de un sistema de monitoreo:

Priorizar darle sostenibilidad en el tiempo, así como la inclusión de las mediciones remotas satelitales disponibles.



Oleaje



Munk (1950)

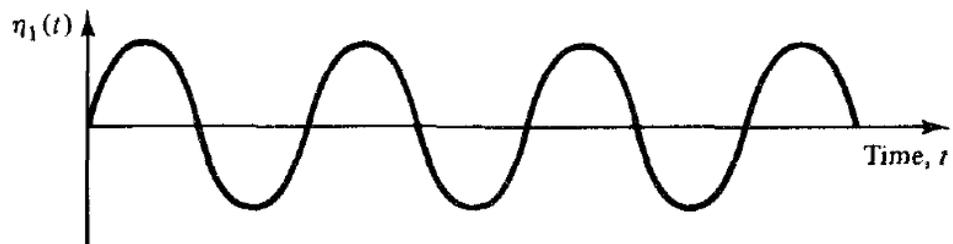
Forzante: Viento

Fuerza restauradora: Gravedad

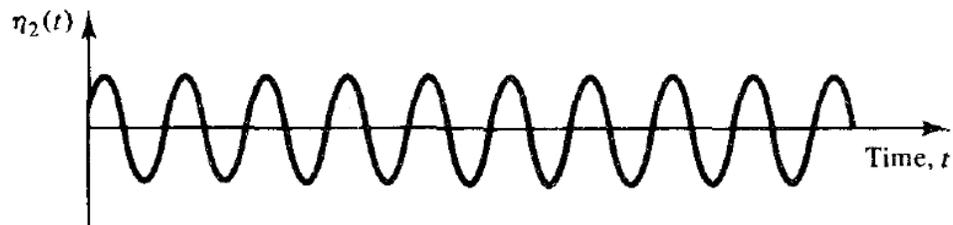
Períodos típicos: ~2s – 30s

Oleaje. Fundamento de la teoría lineal

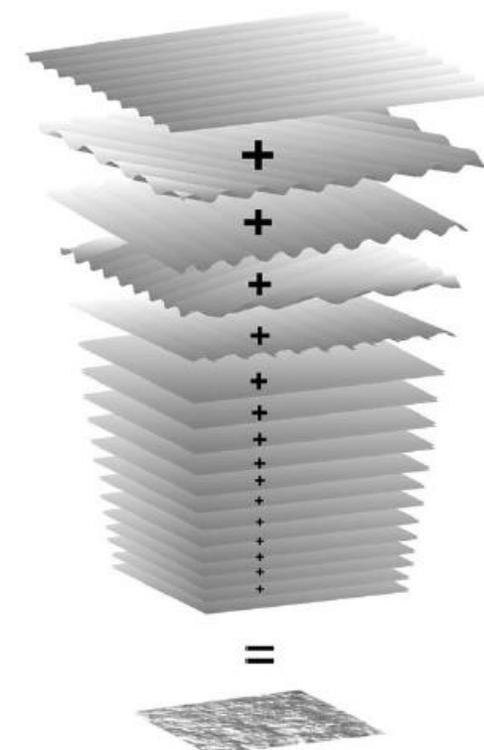
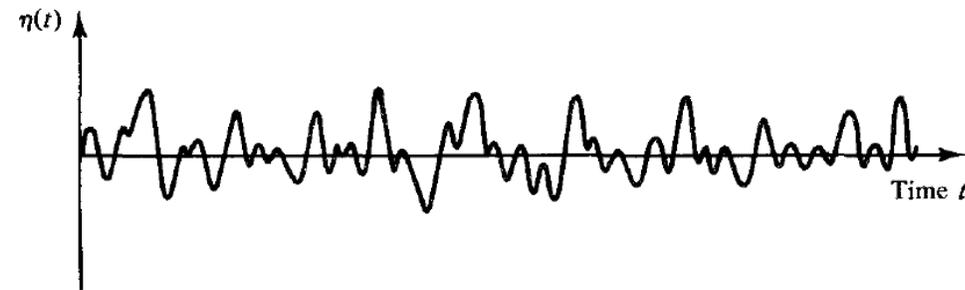
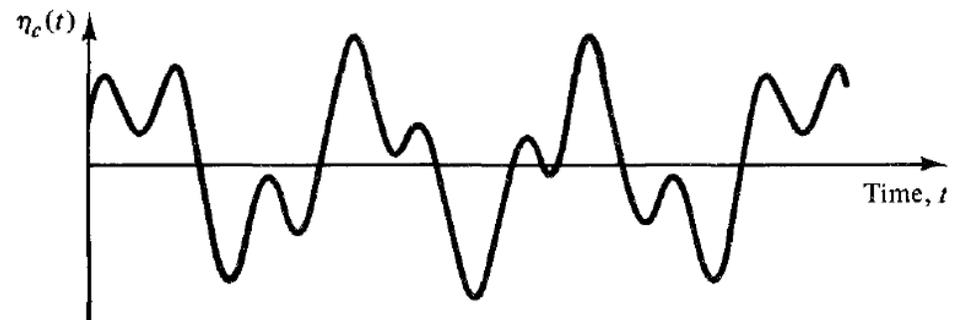
La linealidad permite a partir de la superposición de armónicos una buena representación del oleaje real.



+



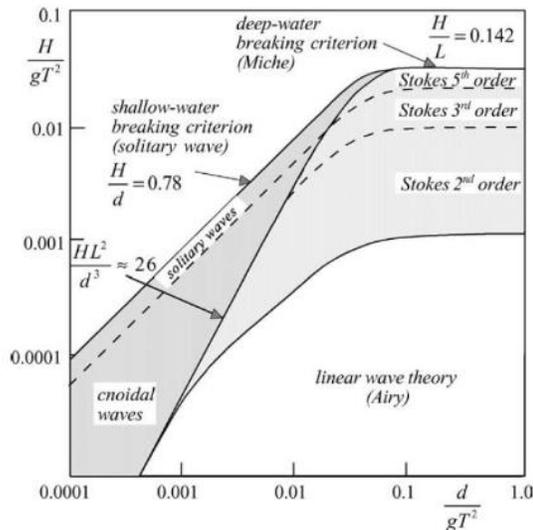
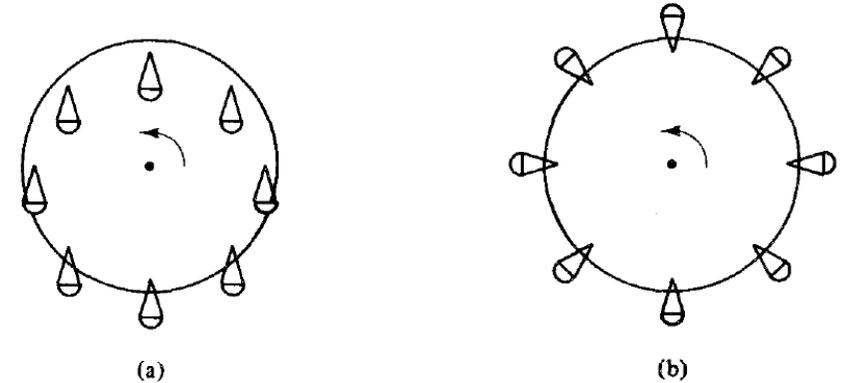
=



Oleaje. Fundamento de la teoría lineal

Hipótesis:

- Fluido incompresible de densidad constante (ρ).
- Se desprecian esfuerzos viscosos
- Movimiento irrotacional
- Pequeña amplitud : $\frac{a}{h} \ll 1$ & $\frac{a}{L} \ll 1$



Fig

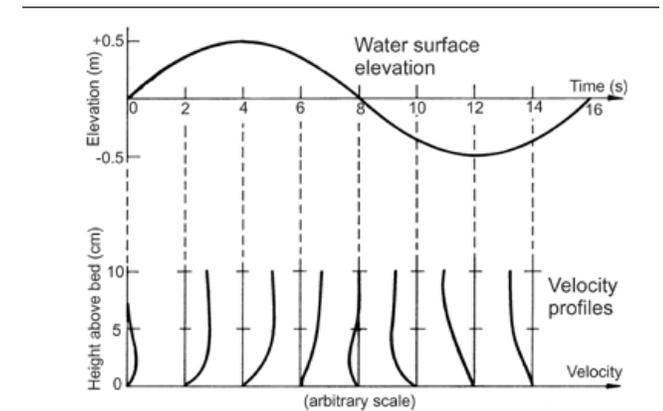
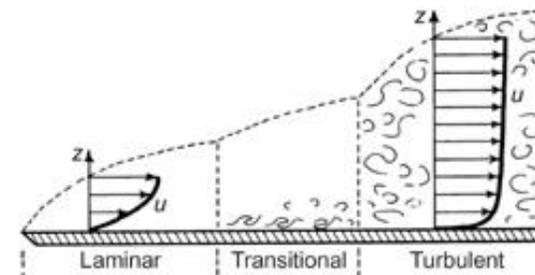
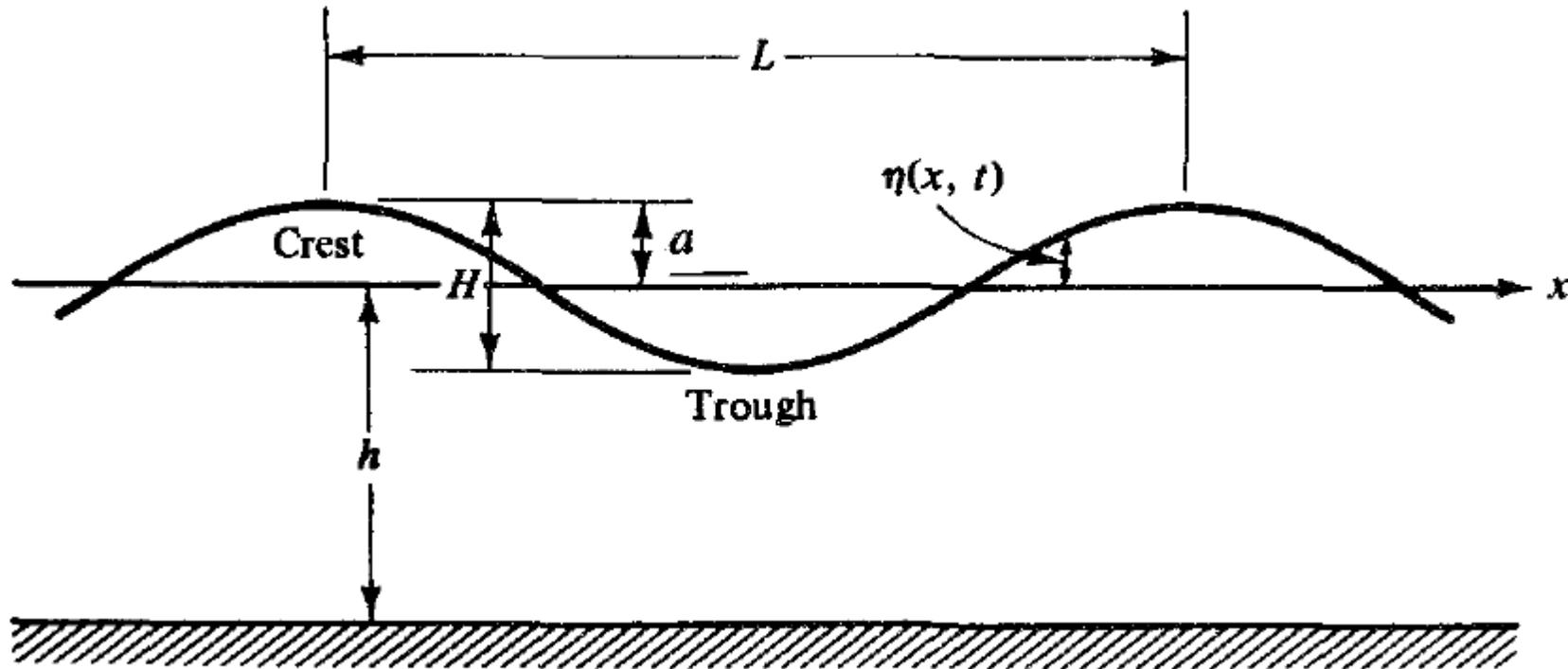


Figure 5.12 The ranges of applicability of the various wave theories (after LeMéhauté, 1976, Kamphuis, 2000, and SPM, 1973; see also Note 5C).

Oleaje. Descripción de un armónico.



Oleaje. Teoría lineal: planteamiento como problema de condición de borde

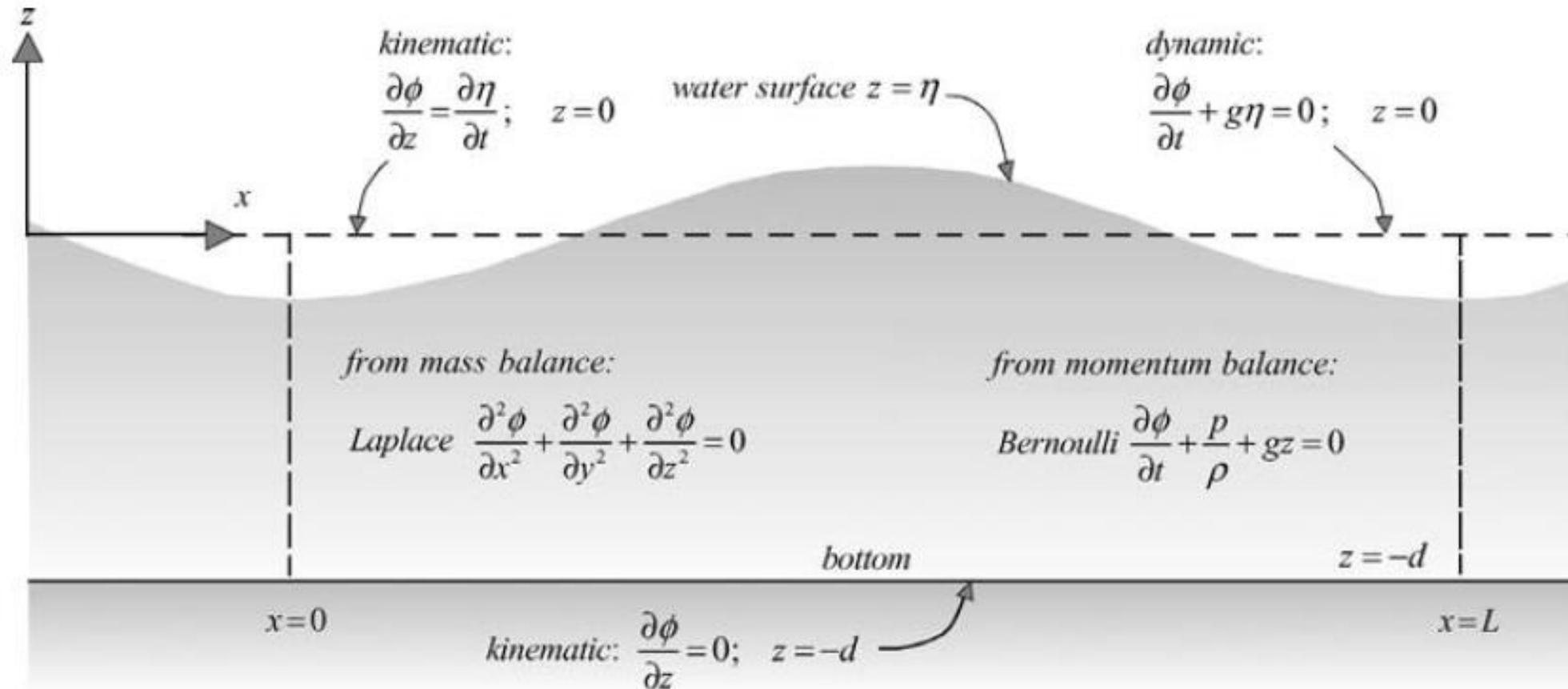


Figure 5.3 The (linearised) basic equations and boundary conditions for the linear wave theory, in terms of the velocity potential.

Oleaje. Teoría lineal. Resultados para una onda progresiva

Potencial de la velocidad

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{H g \cosh k(h+z)}{2 \sigma \cosh kh} (\cos kx \sin \sigma t - \sin kx \cos \sigma t) \\ &= -\frac{H g \cosh k(h+z)}{2 \sigma \cosh kh} \sin (kx - \sigma t)\end{aligned}$$

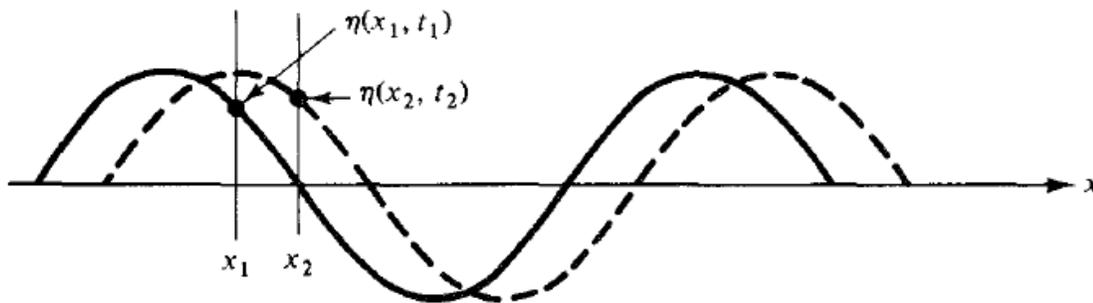
Ecuación de dispersión: σ (T) y k (L) están relacionados mediante la profundidad

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh)$$

Nivel de la superficie libre

$$\eta(x, t) = \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=0} = \frac{H}{2} \cos (kx - \sigma t)$$

$$c = \frac{L}{T} = \frac{\sigma}{k} = \frac{g \tanh(kh)}{\sigma} = \frac{g \tanh(kh) T}{2\pi}$$



Oleaje. Teoría lineal. Resultados para una onda progresiva

Campo de velocidades

$$u = -\frac{\partial\phi}{\partial x} = \frac{H}{2}\sigma \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \cos(kx - \sigma t)$$

$$w = -\frac{\partial\phi}{\partial z} = \frac{H}{2}\sigma \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \sin(kx - \sigma t)$$

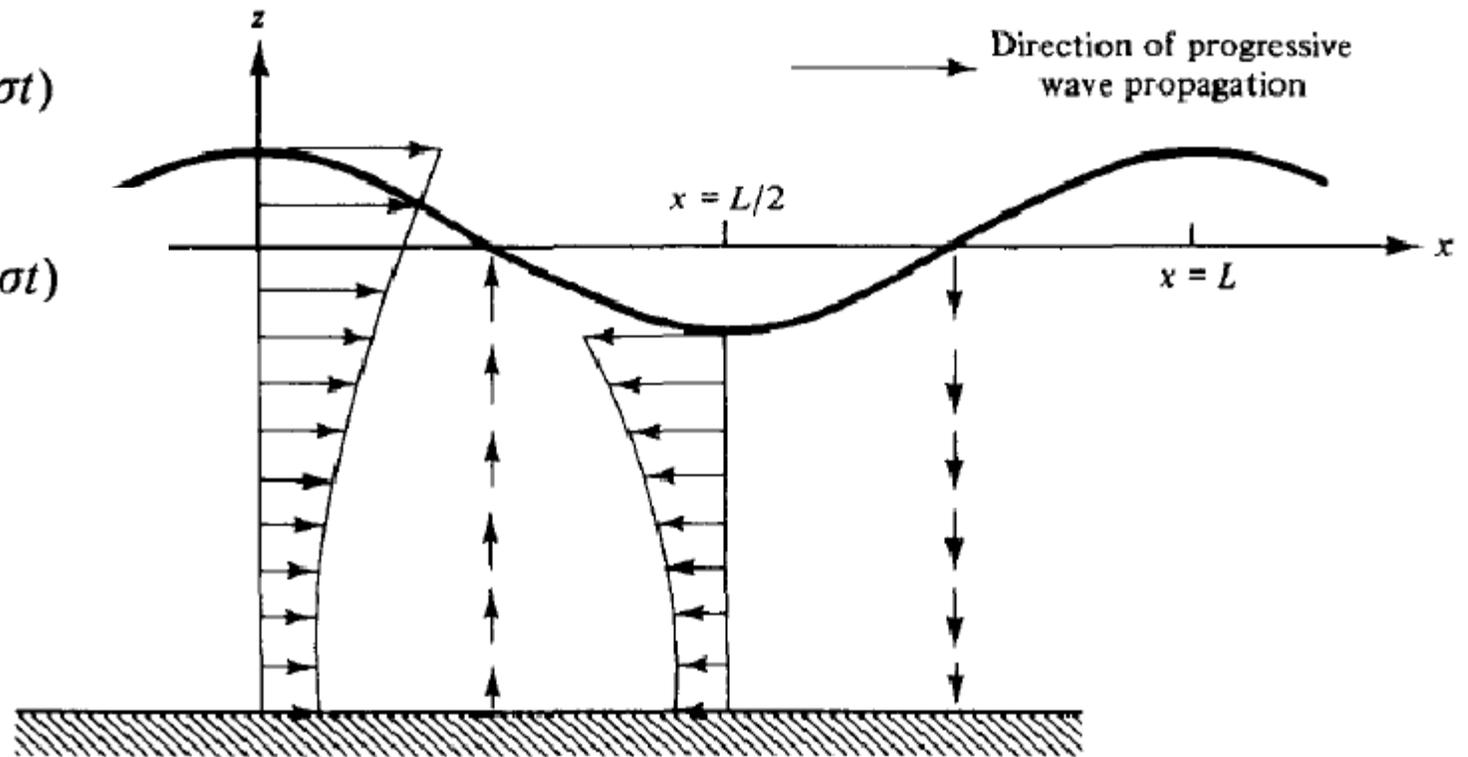


Figure 4.1 Water particle velocities in a progressive wave.

Oleaje. Teoría lineal. Resultados para una onda progresiva

Trayectorias

$$\zeta = -\frac{H \cosh k(h + z_1)}{2 \sinh kh} \sin(kx_1 - \sigma t)$$

$$\xi = \frac{H \sinh k(h + z_1)}{2 \sinh kh} \cos(kx_1 - \sigma t)$$

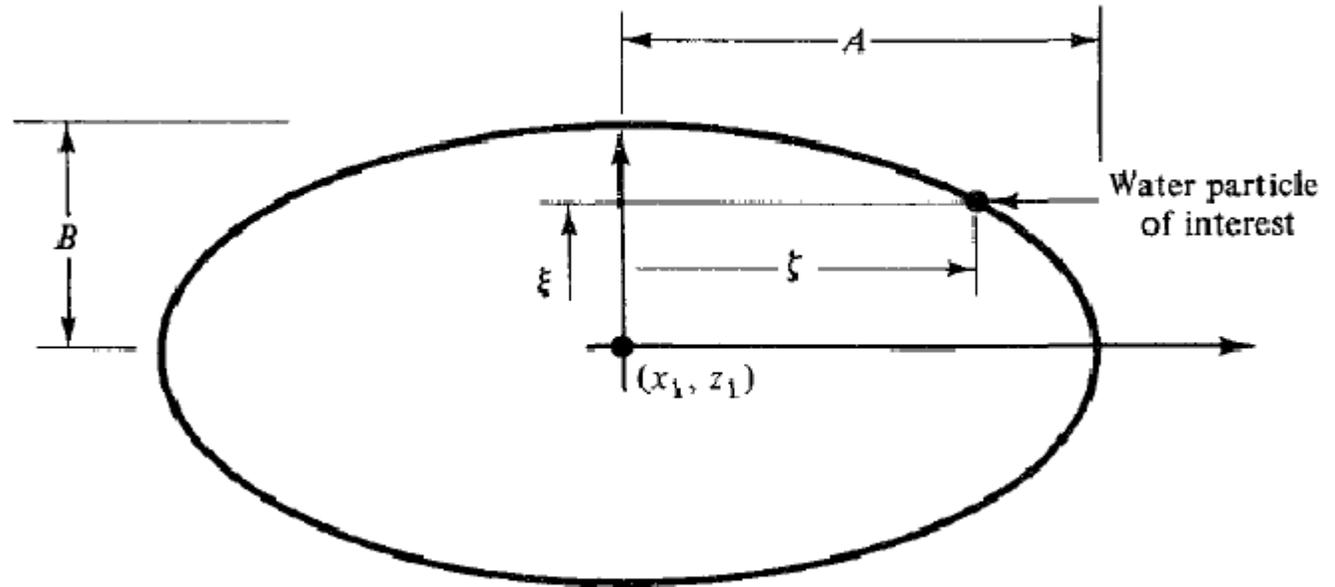


Figure 4.2 Elliptical form of water particle trajectory.

Oleaje. Teoría lineal. Resultados para una onda progresiva

Campo de presiones

$$p = -\rho g z + \rho g \frac{H \cosh k(h+z)}{2 \cosh kh} \cos(kx - \sigma t)$$

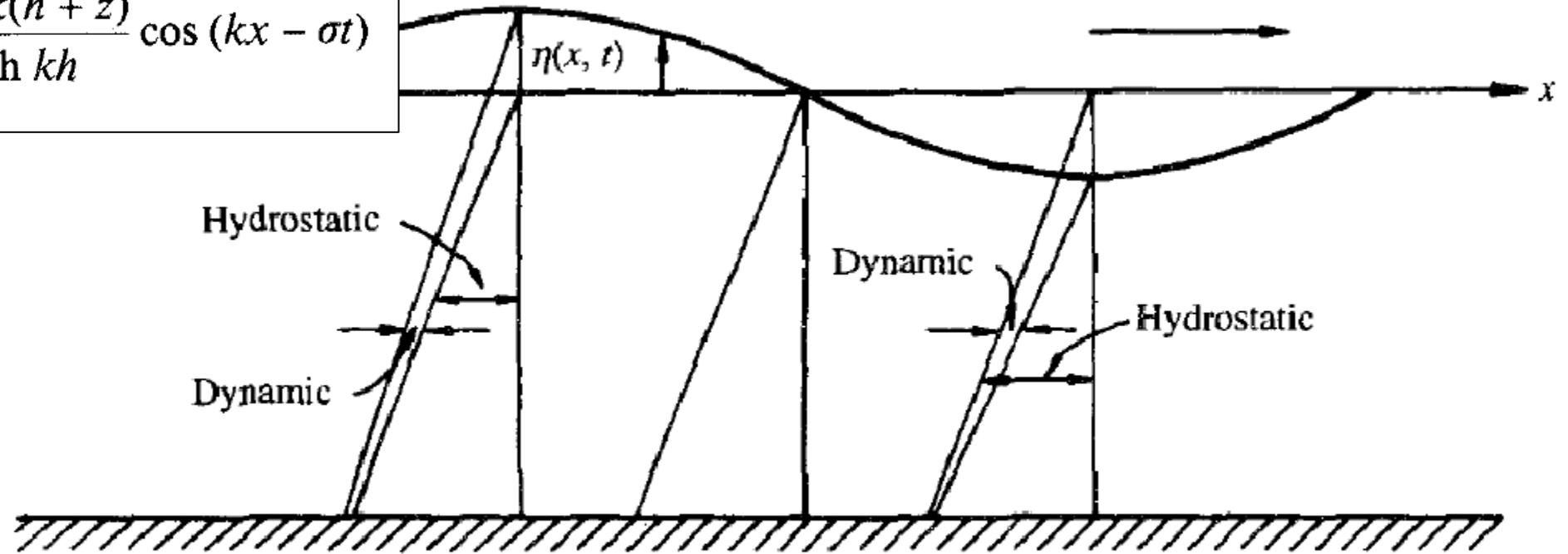
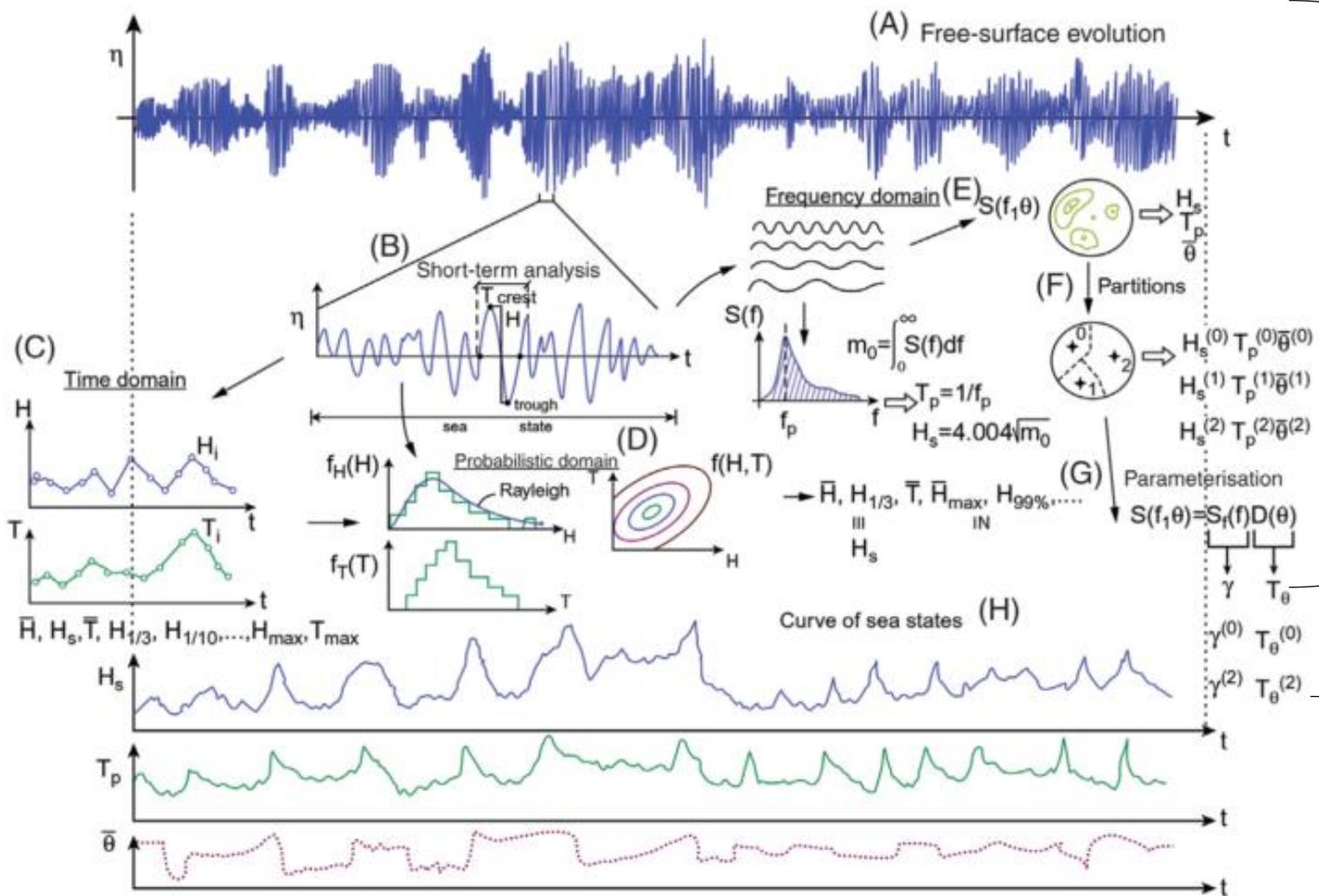


Figure 4.4 Hydrostatic and dynamic pressure components at various phase positions in a progressive water wave.

Oleaje real.



Estado de mar
(Estadística de corto plazo)

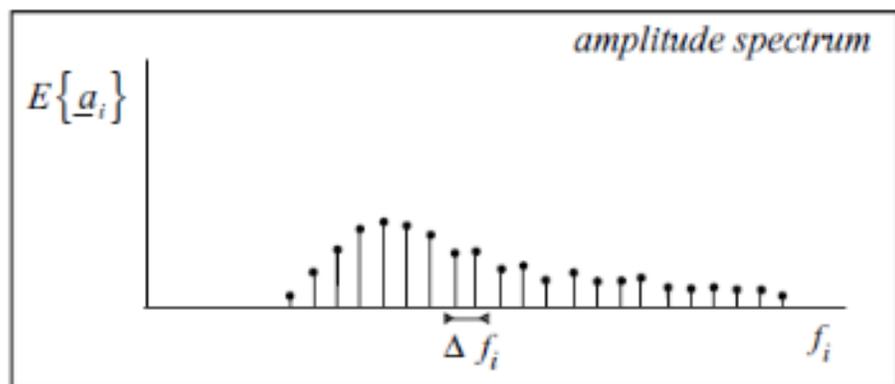
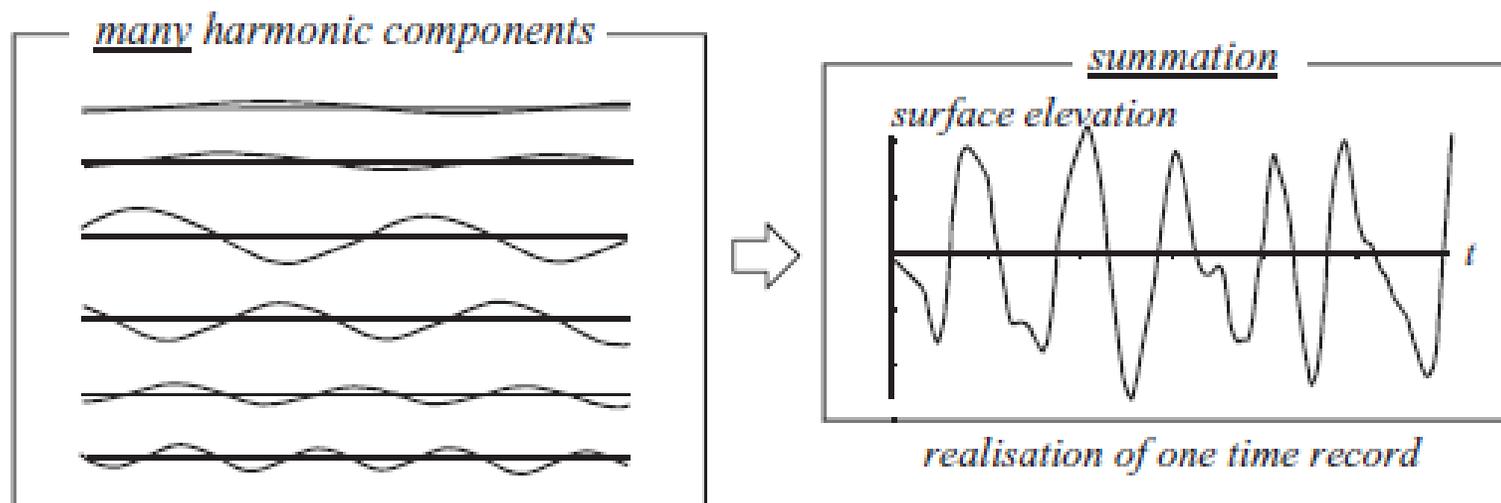
Clima de olas
(Estadística de largo plazo)

Oleaje real. Análisis en el dominio de las frecuencias de un estado de mar (Análisis espectral)

Fourier:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f_i t + \alpha_i)$$

$$(f_i = \frac{\sigma_i}{2\pi} = \frac{1}{T_i})$$

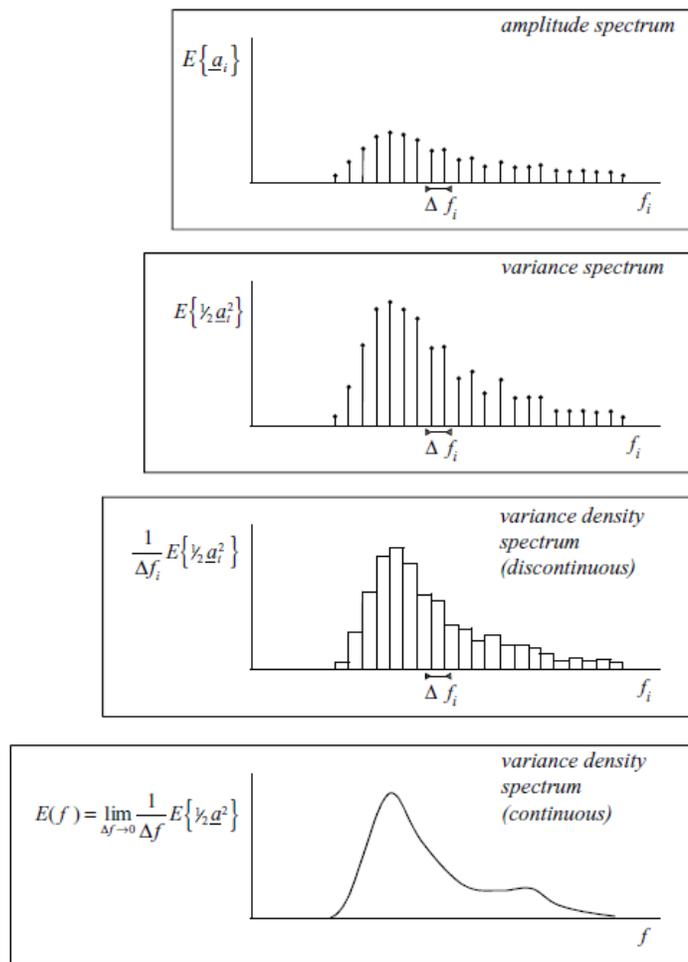


Se trabaja con varianza de la superficie libre por su vínculo con la energía:

$$Var(\eta) = E((\eta - \bar{\eta})^2) = \frac{1}{T} \int_0^T a^2 \cos^2(\sigma t - kx) = \frac{1}{2} a^2$$

$$E = \frac{1}{2} \rho g a^2 = \rho g Var(\eta)$$

Oleaje real. Análisis en el dominio de las frecuencias de un estado de mar (Análisis espectral)



Un espectro de densidad de varianza constituye una descripción estadística completa de un estado de mar.

$$\text{total variance} = \boxed{\overline{\eta^2} = \int_0^{\infty} E(f)df} = m_0 \quad \boxed{E_{\text{energy}}(f) = \rho g E_{\text{variance}}(f)} = \rho g m_0$$

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n E(f)df \quad \text{for } n = \dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots$$

Figure 3.7 The transformation of the discrete amplitude spectrum of the random-phase/amplitude model to the continuous variance density spectrum.

Oleaje real. Análisis en el dominio de las frecuencias de un estado de mar (Análisis espectral)

Espectro direccional

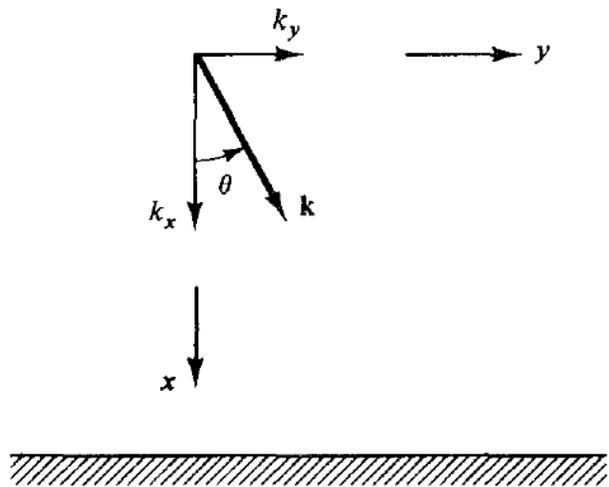
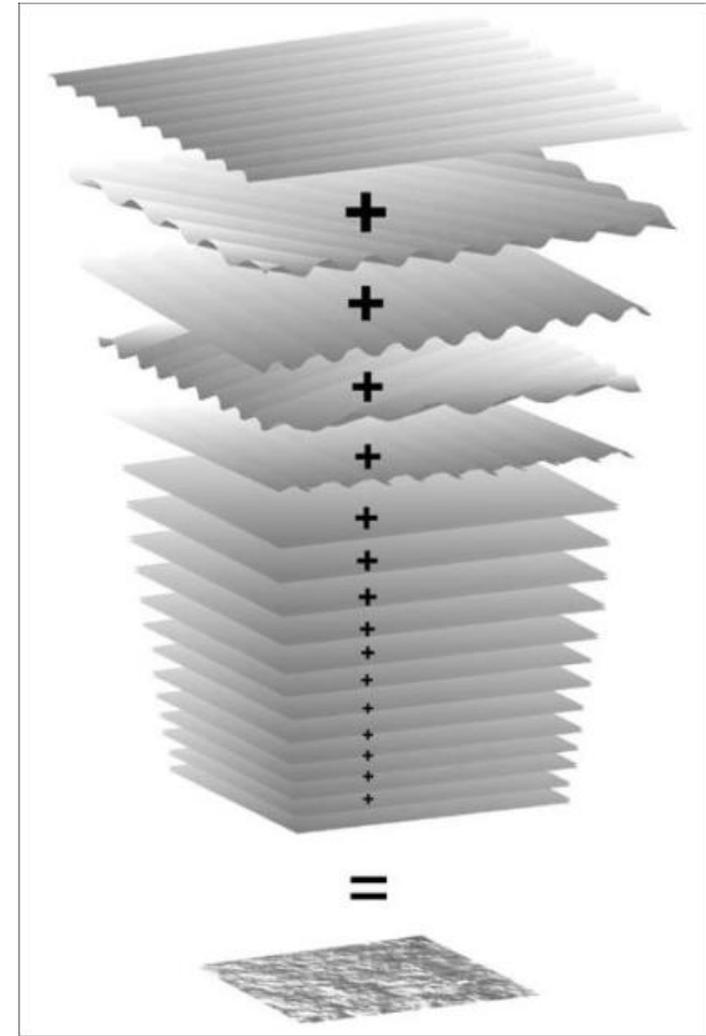


Figure 4.14 Resolution of wave number \mathbf{k} into orthogonal components.

$$\eta(x, y, t) = a \cos(\omega t - kx \cos \theta - ky \sin \theta + \alpha)$$

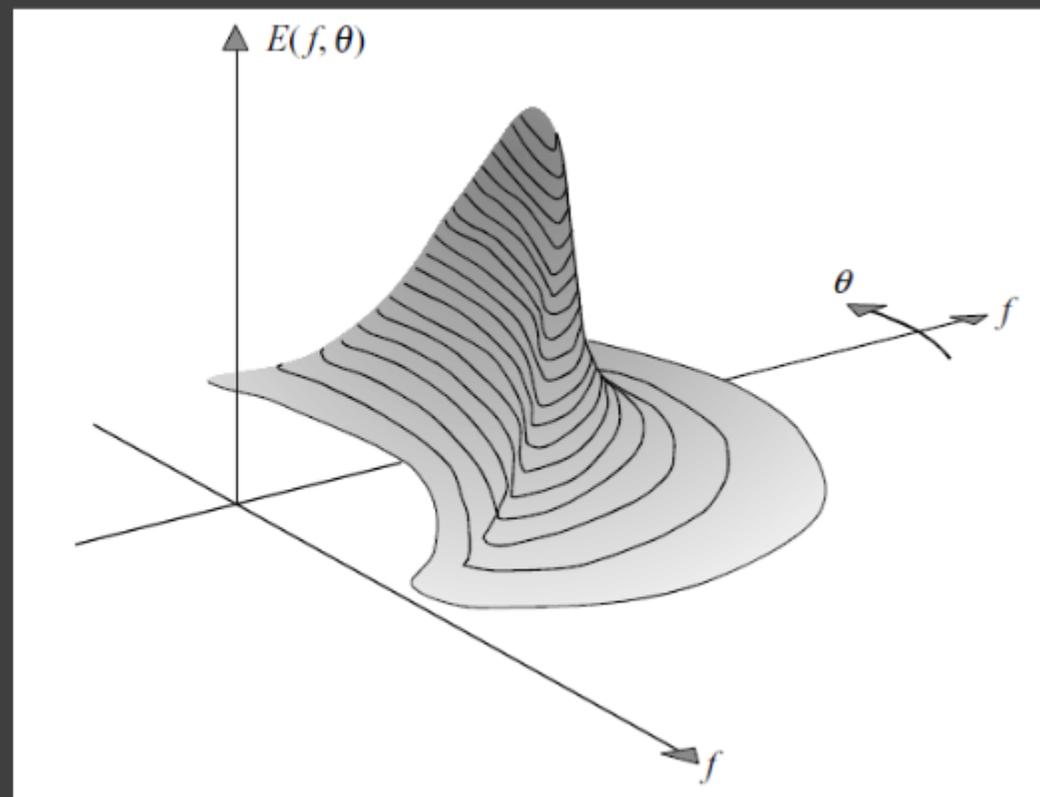


Oleaje real. Análisis en el dominio de las frecuencias de un estado de mar (Análisis espectral)

Espectro direccional

$$\underline{\eta}(x, y, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \underline{a}_{i,j} \cos(\omega_i t - k_i x \cos \theta_j - k_i y \sin \theta_j + \alpha_{i,j})$$

$$E(f, \theta) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{\Delta \theta \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f \Delta \theta} E\left\{\frac{1}{2}a^2\right\}$$



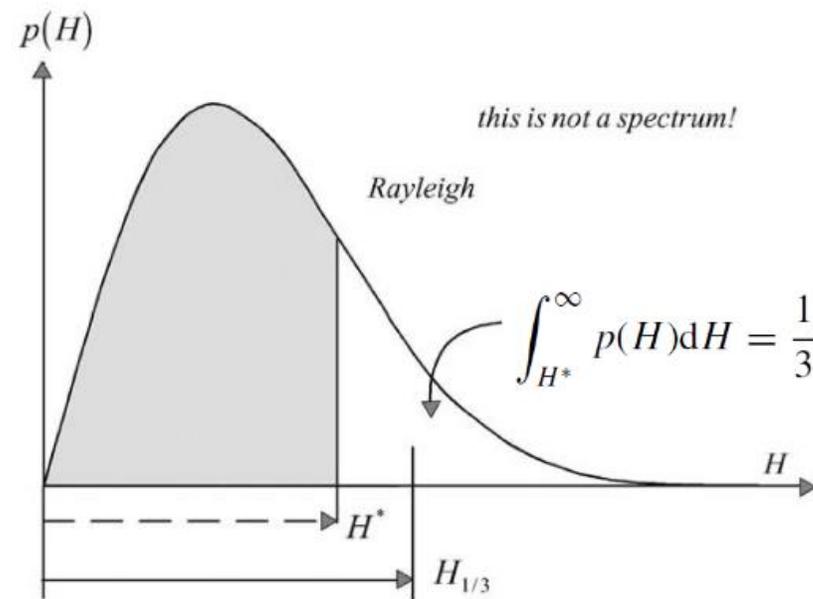
Oleaje real. Vinculación entre análisis en el dominio de las frecuencias – tiempo - probabilidad

Hipótesis: Proceso Gaussiano y espectro estrecho →

Las alturas de ola (H_i) se distribuyen según Rayleigh la cual queda definida por un único parámetro que se lo vincula a m_0

$$p(H) = \frac{H}{4m_0} \exp\left(-\frac{H^2}{8m_0}\right)$$

$$\Pr\{\underline{H} \leq H\} = 1 - \exp\left(-\frac{H^2}{8m_0}\right)$$



$$T_{m02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} = \bar{T} \quad (\text{Período medio})$$

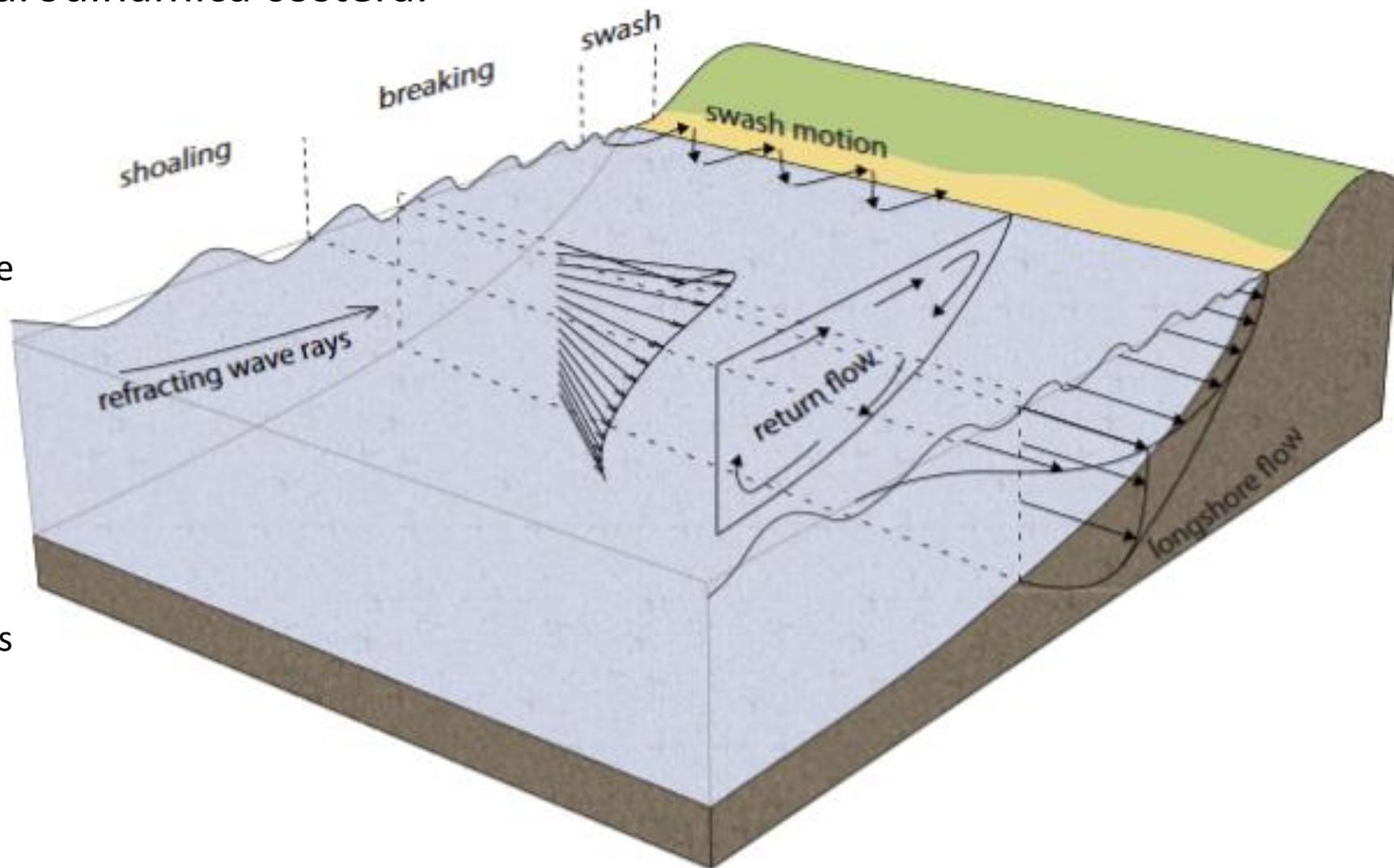
$$H^* = H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad (\text{Altura significativa espectral})$$

$$H_{max} \approx 2H_{m0}$$

Oleaje. Relevancia en la hidrodinámica costera.

En su aproximación a la costa el oleaje se transforma (asomeramiento, refracción, difracción, disipación por fricción de fondo, rotura, reflexión, ...) induciendo corrientes y variaciones de nivel a frecuencias más bajas

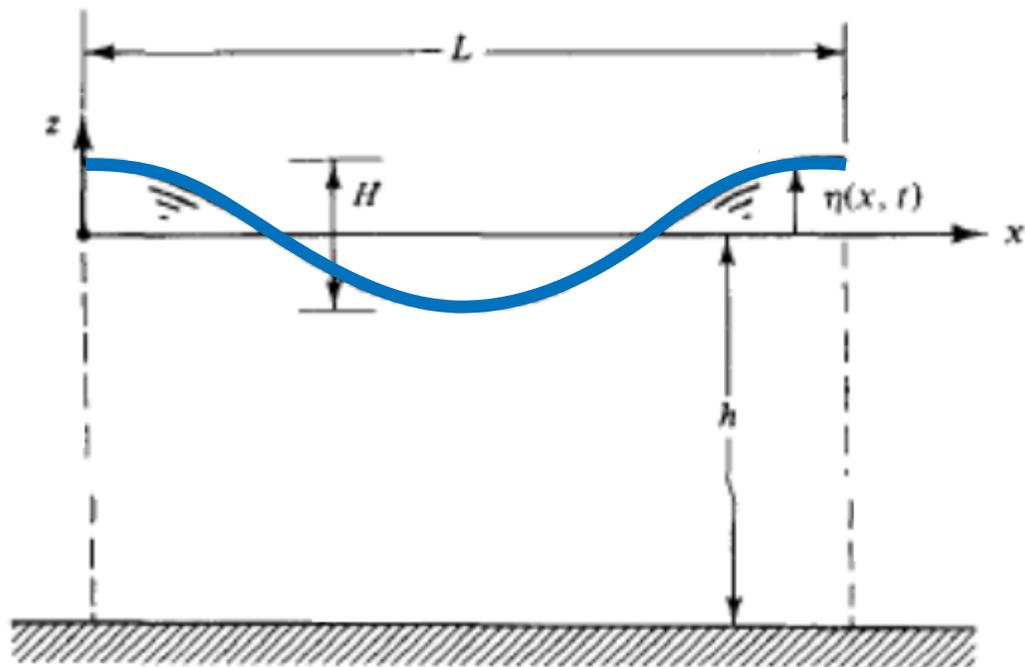
Medir oleaje fuera de la zona de rompiente es imprescindible, complementándose con mediciones de nivel, velocidad dentro de la rompiente, a definir de acuerdo al objetivo de la campaña.



Oleaje. Mediciones in-situ

¿Qué medir?

- Nivel (η)



Vamos a medir a corto plazo, 15-30 minutos. Estadísticos representativos del **estado de mar** que permitan caracterizar el oleaje. Con estos datos es que luego se puede caracterizar la **climatología**.

Oleaje. Mediciones in-situ

Instrumento

Nivel



Wave gauge



Waverider



Boya GPS

Wave gauges, dos electrodos parcialmente sumergidos en agua. Mediante la imposición de una corriente eléctrica se pueden medir cambios en la resistencia eléctrica del circuito y vincularlos con la posición de la superficie libre. Uso habitual en laboratorio.

Waverider, se mide la aceleración de la boya utilizando acelerómetros, para luego integrar la señal en el tiempo y determinar la variación de la posición de la boya.

GPS, mediante el traqueo con (muchos) satélites (algunas necesitan de 24), es posible inferir las velocidades en vertical y horizontal de la boya determinando el cambio de la frecuencia de la señal de GPS (efecto Doppler). Con esto se determinan los desplazamientos.

Hay que tener ciertos cuidados con las boyas, ya que no son puntos fijos en el espacio (coordenadas de Euler) y tampoco sigue las partículas de agua (coordenadas de Lagrange). Muchas veces hay una función de transferencia que permite determinar para cierta frecuencia del movimiento de la boya, cuál sería la relación entre lo que se movió la boya y lo que se hubiese movido la superficie libre. Por eso veremos más adelante que el anclaje de este tipo de boyas no es trivial.

Oleaje. Mediciones in-situ

¿Qué medir?

- Nivel (η)
- Presión (p)

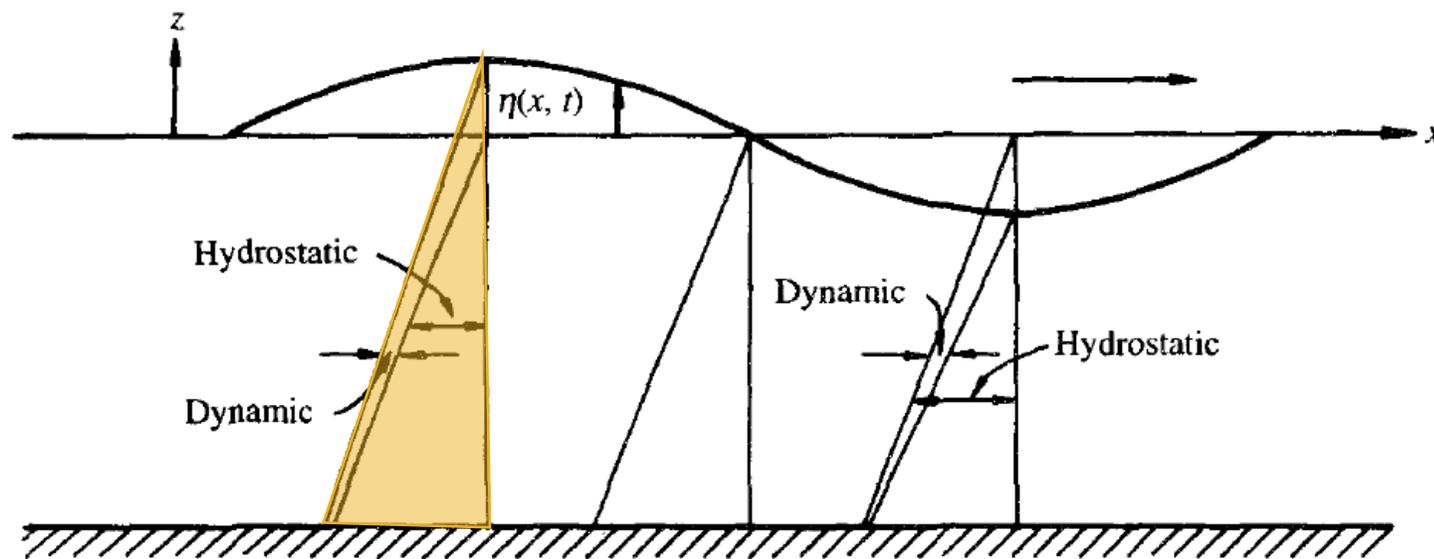


Figure 4.4 Hydrostatic and dynamic pressure components at various phase positions in a progressive water wave.

Oleaje. Mediciones in-situ

Instrumento

Nivel



Wave gauge

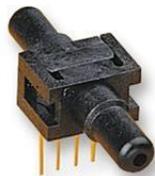


Waveric



Boya GPS

Presión



Pressure gauge



Pressure gauge, generalmente constan de piezo-resistores montados en una membrana o diafragma. Aplicando una determinada presión, la membrana se deforma y modifica su resistencia eléctrica que es medida por un circuito eléctrico.

Oleaje. Mediciones in-situ

¿Qué medir?

- Nivel (η)
- Presión (p)
- Velocidad (u, v, w)

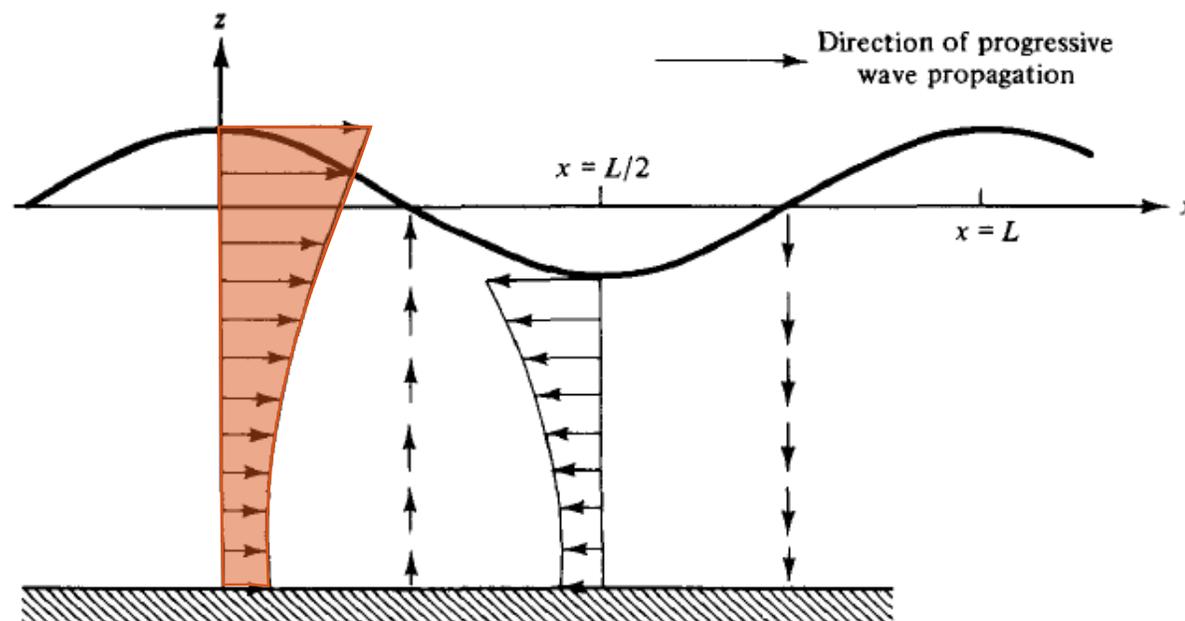


Figure 4.1 Water particle velocities in a progressive wave.

Oleaje. Mediciones in-situ

Instrumento

Nivel



Wave gauge

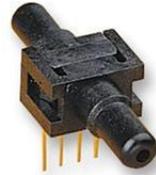


Waveric



Boya GPS

Presión



Pressure gauge



Velocidad



Ultrasound Velocity Profiling

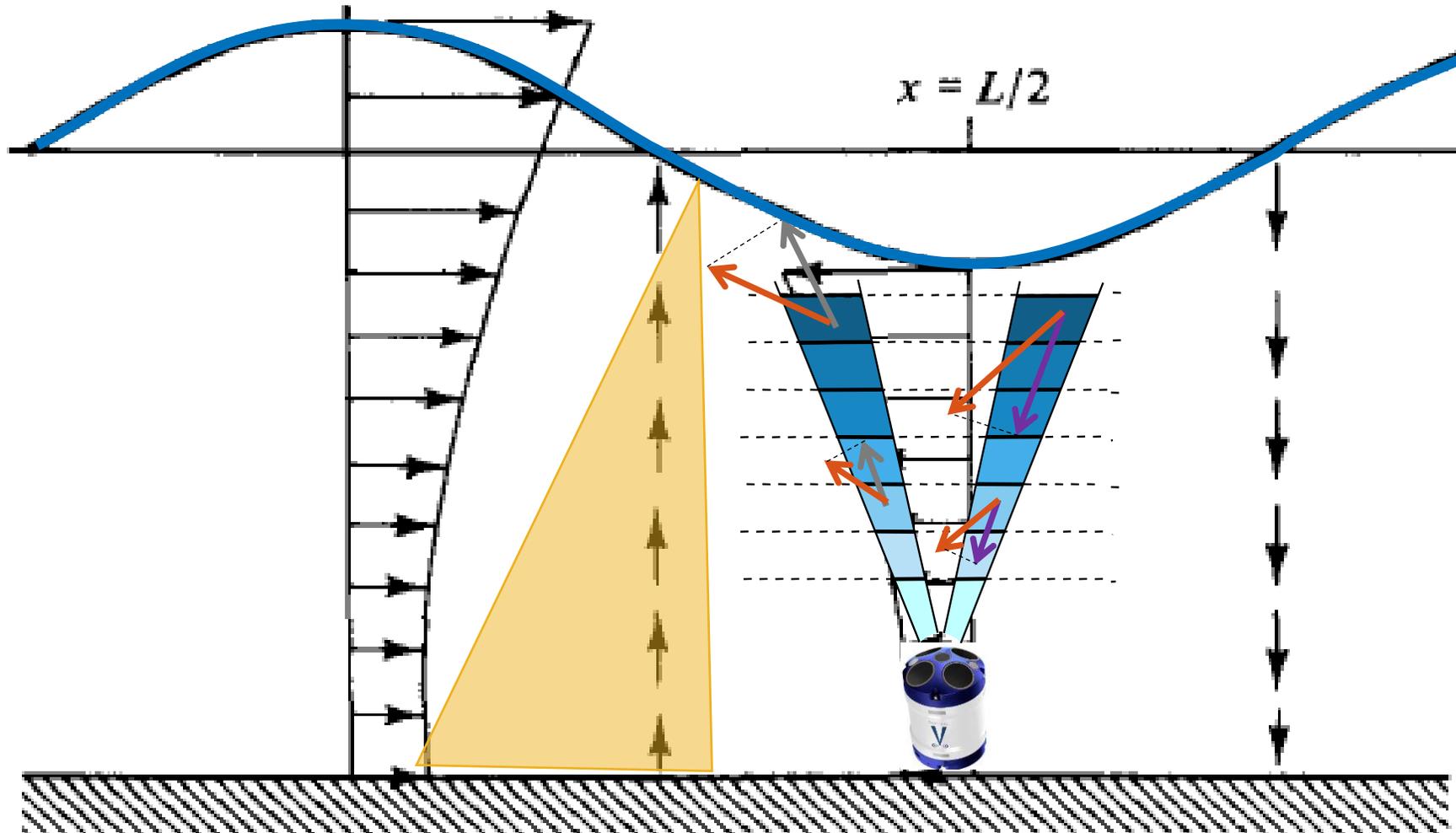


Acoustic Doppler Velocimeter



Acoustic Doppler
Current Profiler
(ADCP)

ADCP: Medición de velocidad (u , v , w)... pero también de nivel (η) y de presión (p)



Teoría lineal del oleaje

- Nivel (η)
- Presión (p)
- Velocidad (u, v, w)

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t)$$

$$p = \rho g \frac{H \cosh(k(h+z))}{2 \cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t)$$

$$u = \frac{H}{2} \sigma \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t)$$

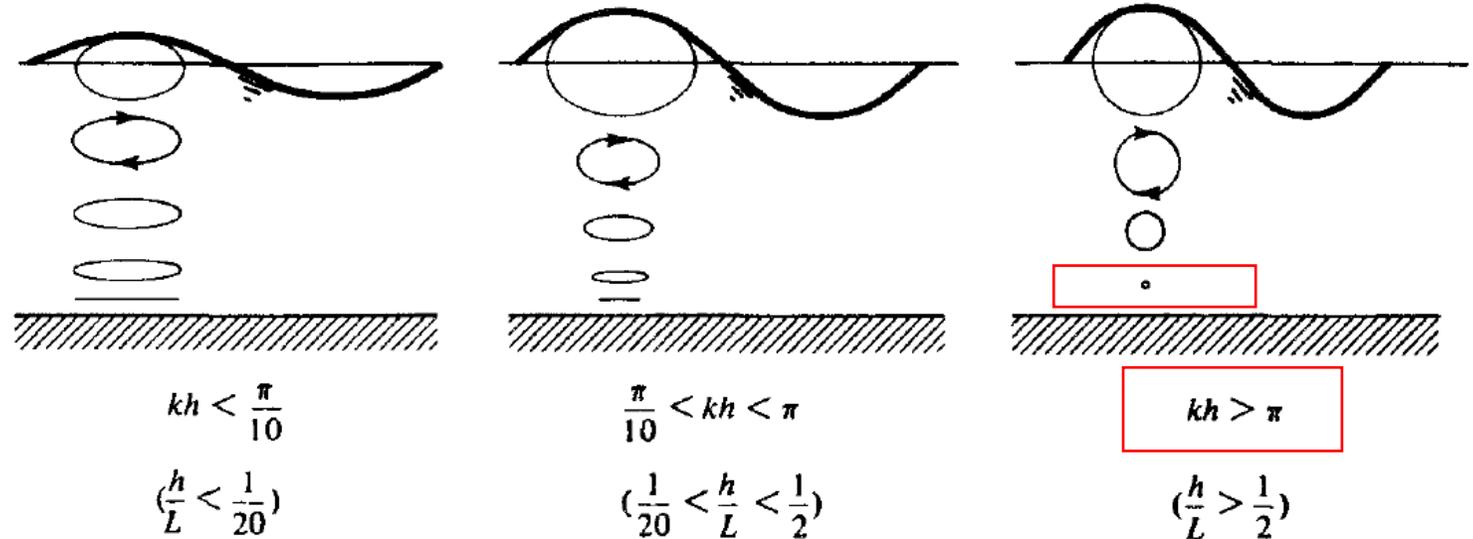


Figure 4.3 Water particle trajectories in progressive water waves of different relative depths.

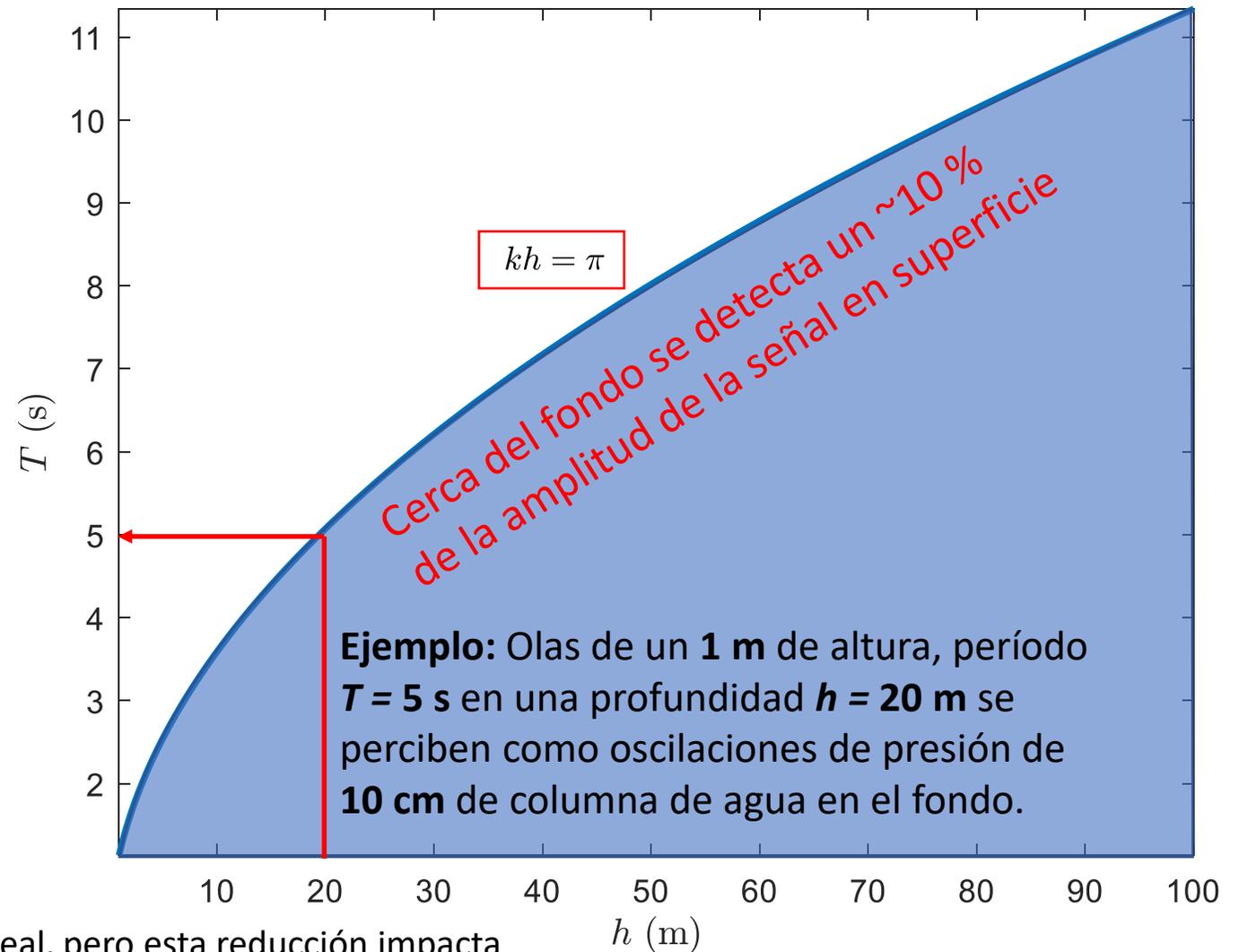
Teoría lineal del oleaje

- Nivel (η)
- Presión (p)
- Velocidad (u, v, w)

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t)$$

$$p = \rho g \frac{H \cosh(k(h+z))}{2 \cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t)$$

$$u = \frac{H}{2} \sigma \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t)$$



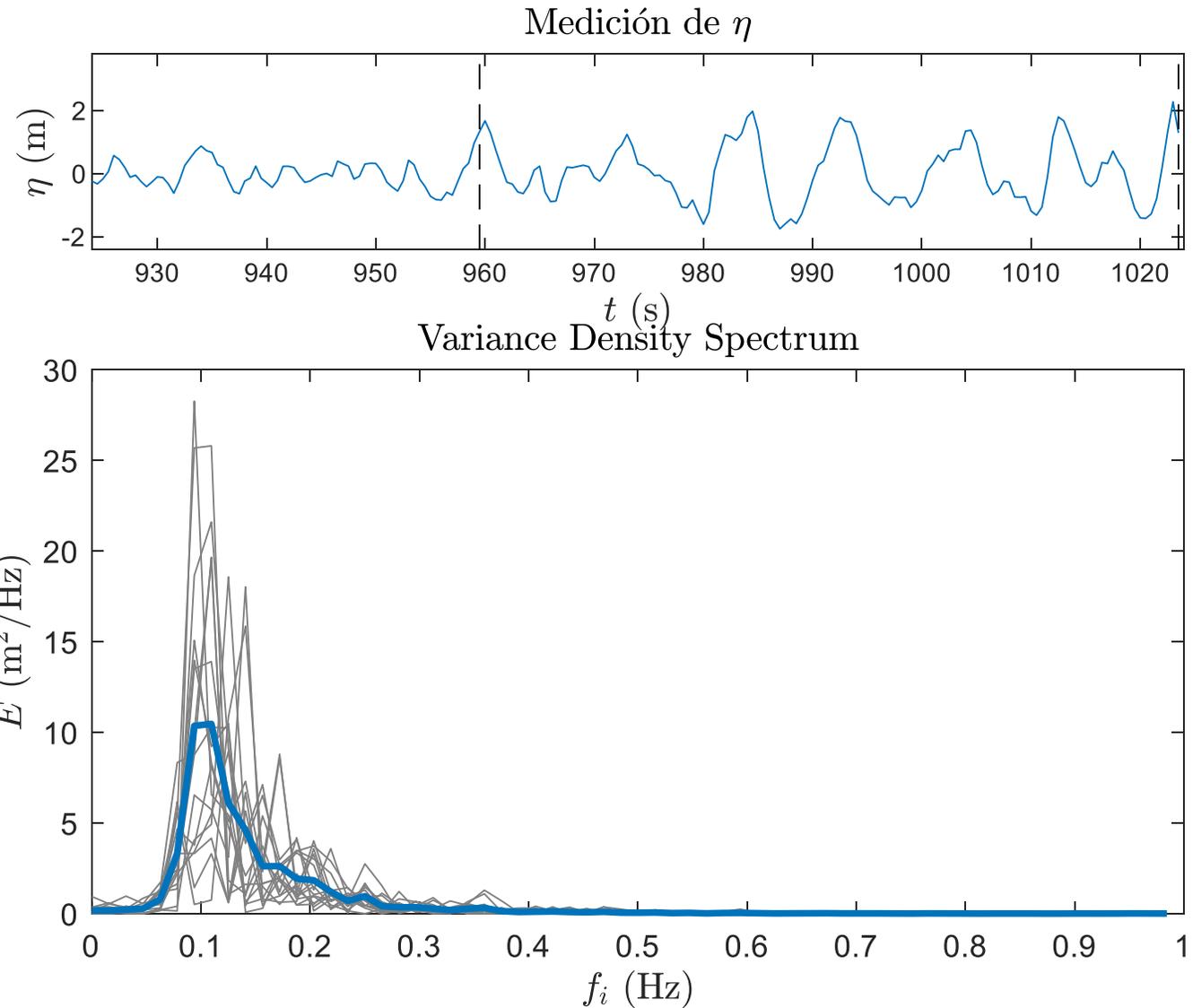
Por supuesto que se puede corregir esto utilizando teoría lineal, pero esta reducción impacta directamente en la señal registrada debido a la precisión de nuestros instrumentos.

Determinación del espectro

Datos extraídos a 20 m de profundidad mediante un ADCP cerca de La Paloma, Rocha

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N \frac{H_i}{2} \cos(2\pi f_i t - \alpha_i)$$

Teniendo que $f_i = \frac{\sigma_i}{2\pi} = \frac{1}{T_i}$

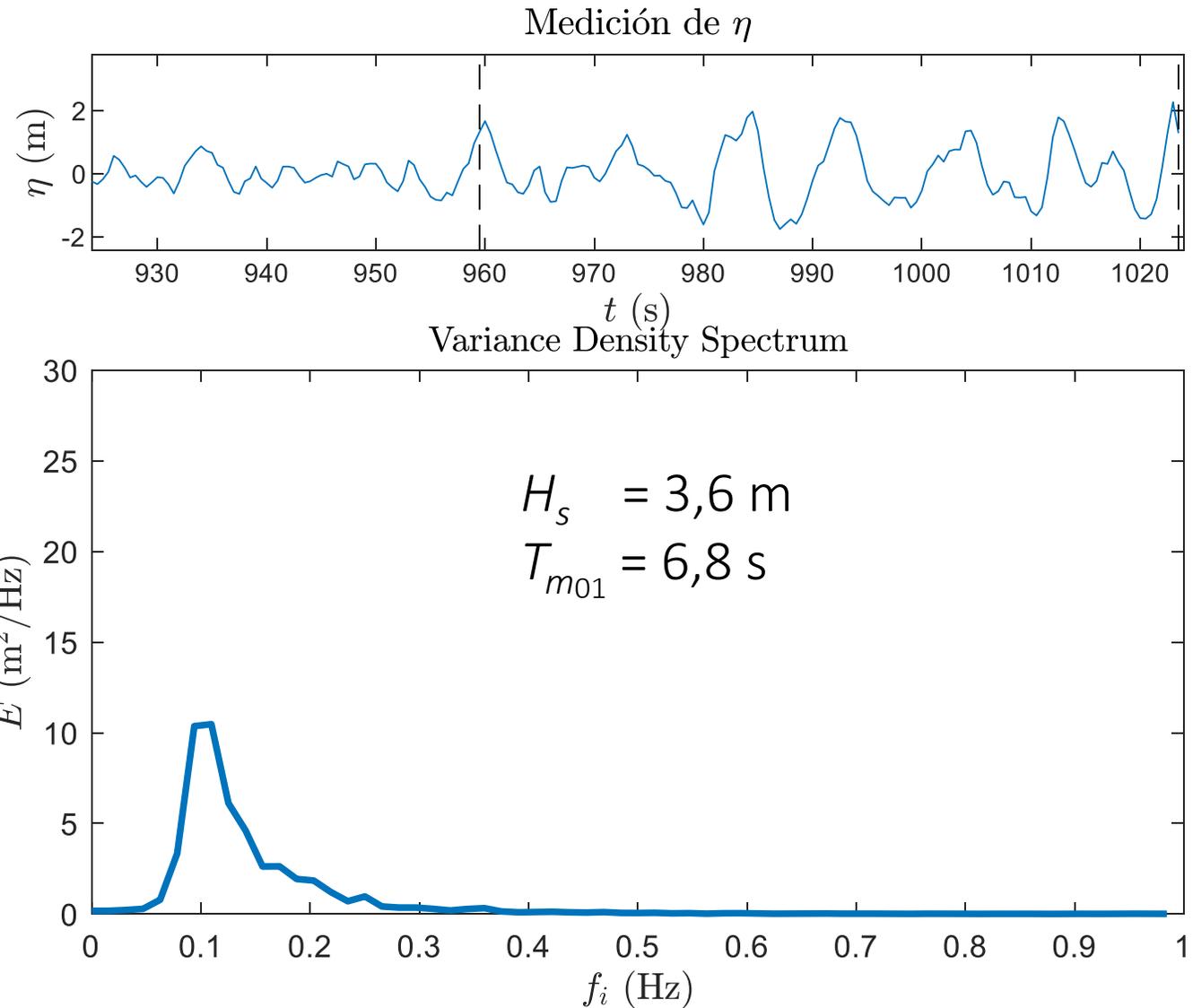


Determinación del espectro

Datos extraídos a 20 m de profundidad mediante un ADCP cerca de La Paloma, Rocha

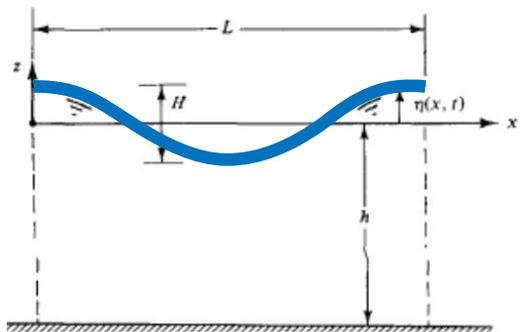
$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N \frac{H_i}{2} \cos(2\pi f_i t - \alpha_i)$$

Teniendo que $f_i = \frac{\sigma_i}{2\pi} = \frac{1}{T_i}$

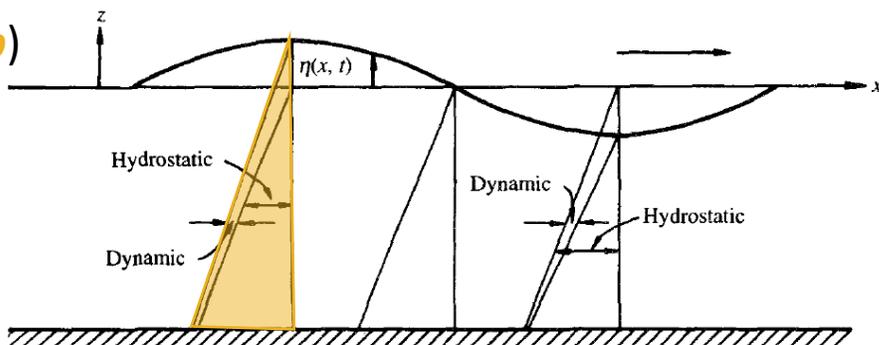


Determinación de espectros

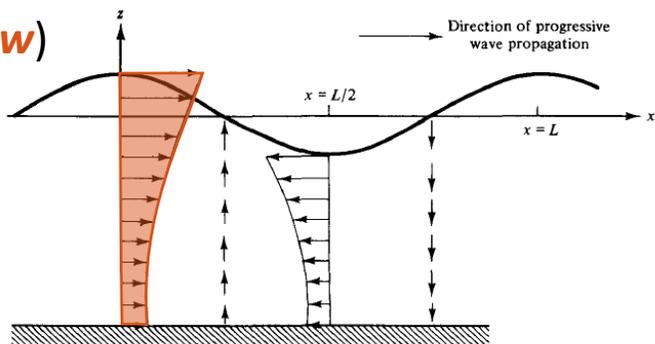
Nivel (η)



Presión (p)



Velocidad (u, v, w)



Variance Density Spectrum

