Universidad de La Laguna

El fenómeno de las mareas, efectos en el territorio y su gestión

El oleaje: parámetros del oleaje

Manuel García Román

Ing. Téc. Obras Públicas – Dr. Matemáticas ULL

Universidad de La Laguna

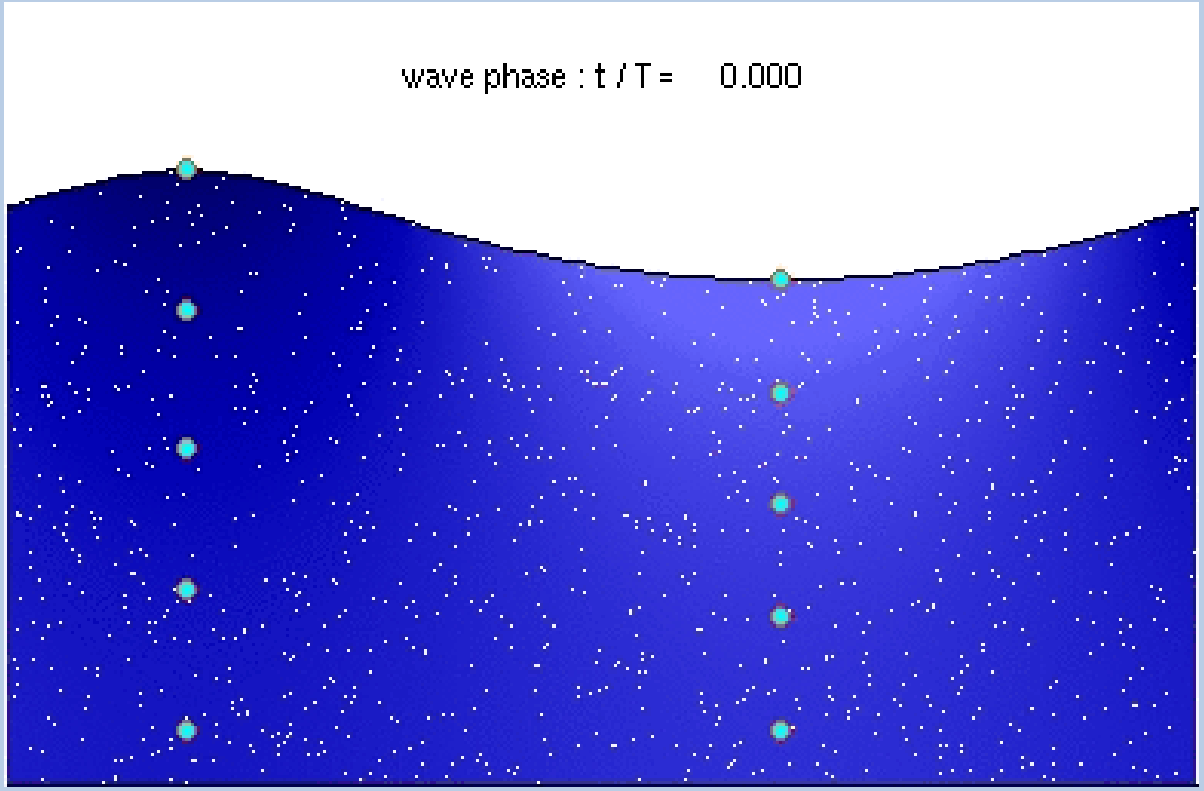
El oleaje: parámetros del oleaje

- ¿qué es el oleaje?
- parámetros de la ola
- teorías del oleaje
- oleaje irregular
- medida del oleaje
- generación del oleaje

Universidad de La Laguna

¿qué es el oleaje?

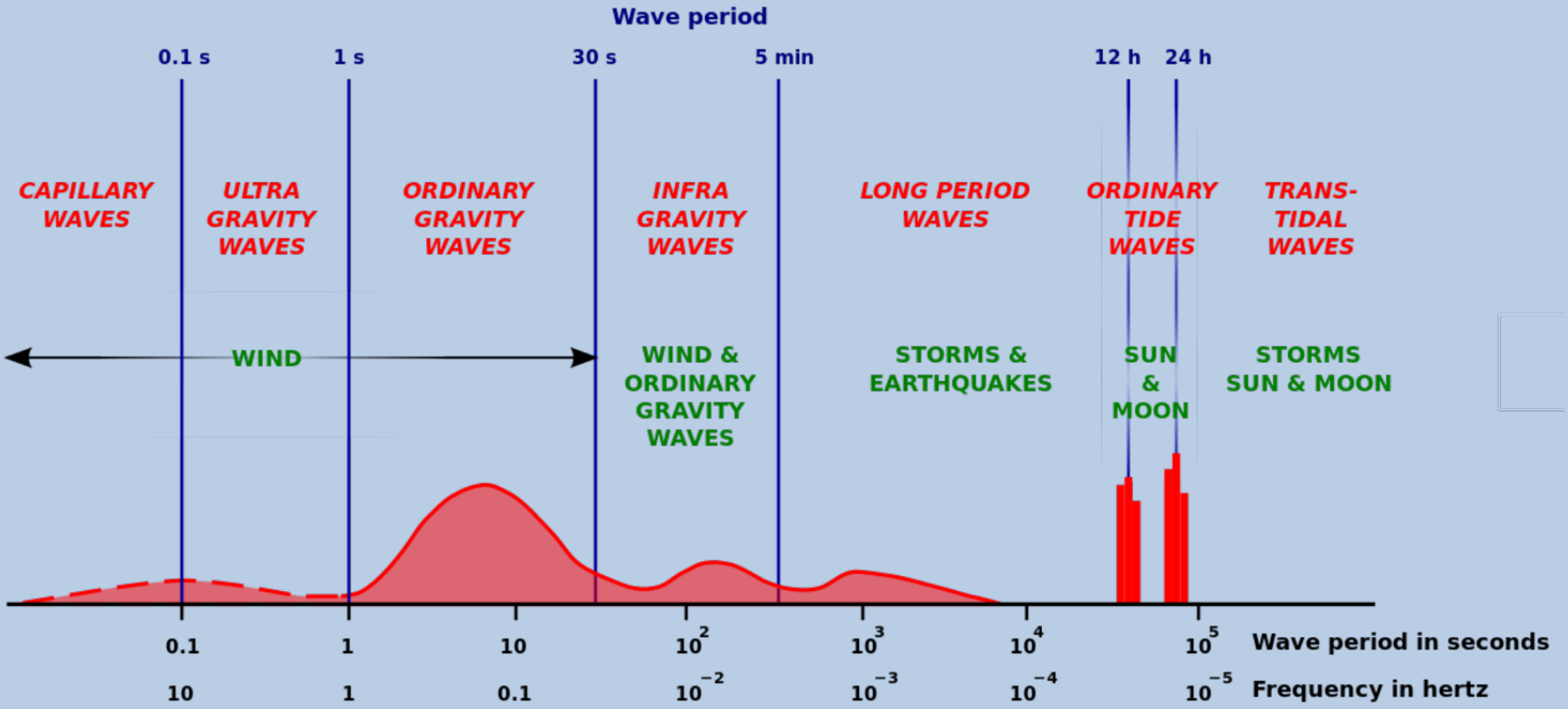
Movimiento ondulatorio producido por **efecto del viento** sobre la superficie del agua, y propagado por la **acción de la fuerza gravitatoria**



Universidad de La Laguna

¿qué es el oleaje?

Otros movimientos ondulatorios de la superficie (no producidos por el viento, o no propagados por la gravedad) no se consideran oleaje



Universidad de La Laguna

¿qué es el oleaje?

Se considera oleaje aquella perturbación ondulatoria de la superficie del agua con periodo comprendido entre 1 s y 30 s.

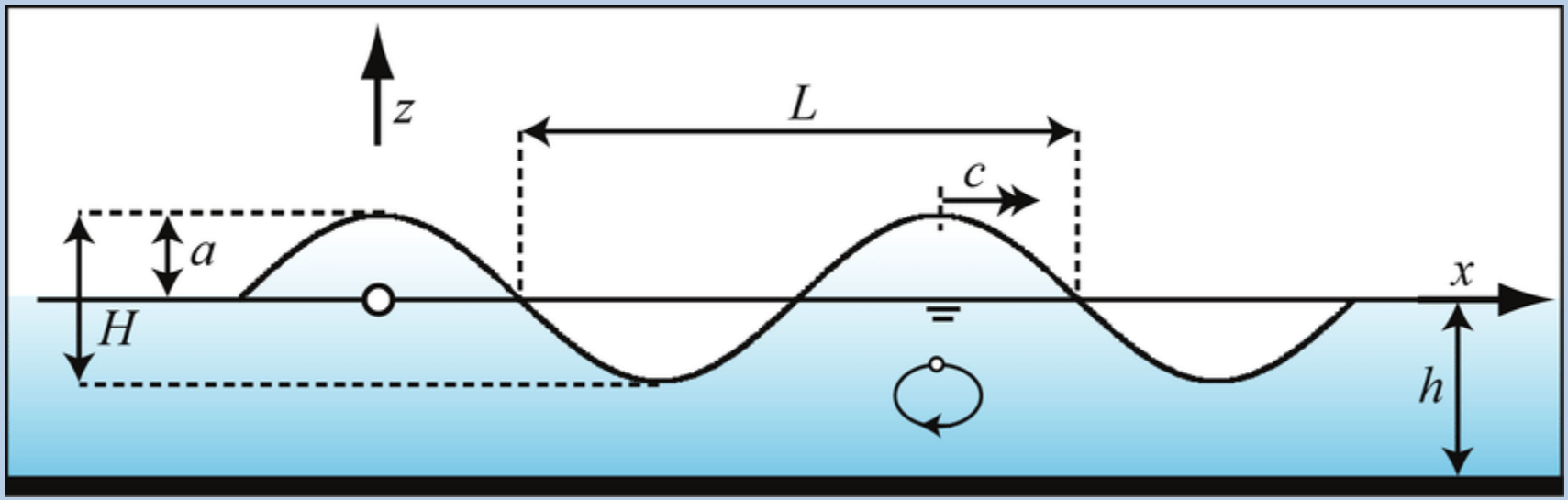
Universidad de La Laguna

parámetros de la ola

- *H* altura de la ola
- *L* longitud de la ola
- *T* periodo de la ola

- *a* amplitud $a = H/2$
- *c* celeridad de la ola $c = L/T$
- *s* peralte de la ola $s = H/L$

La longitud *L* está relacionada con el periodo *T*
La altura *H* está limitada por la longitud (peralte máximo 1/7)

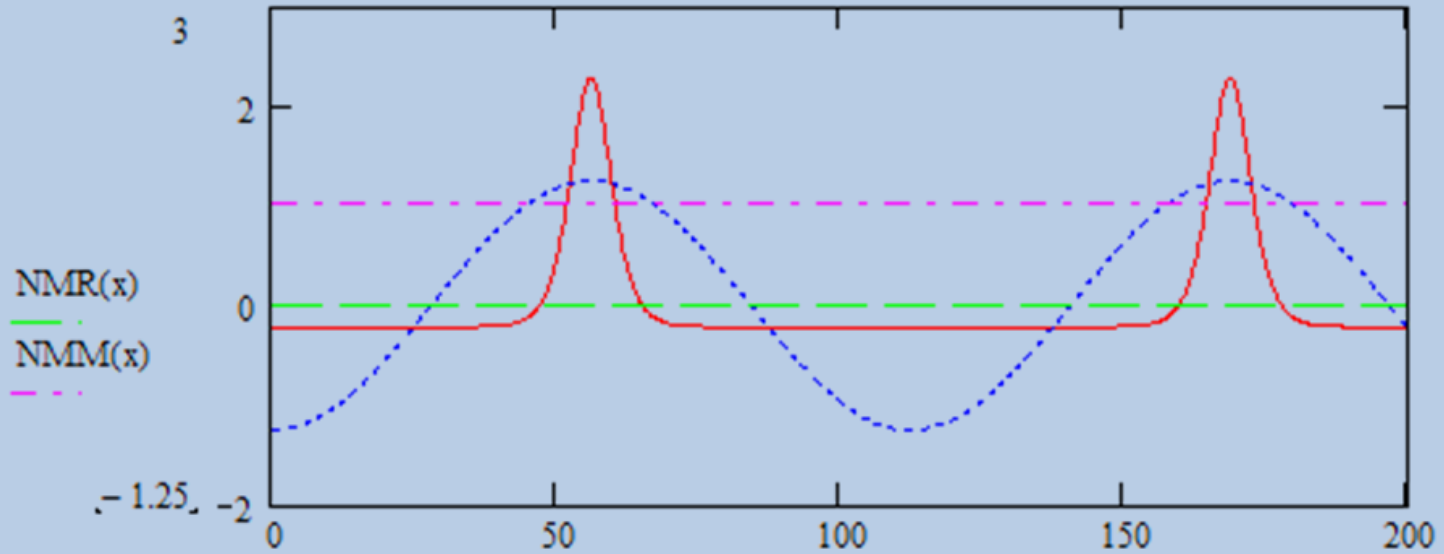


Universidad de La Laguna

parámetros de la ola

Otros parámetros

- *f* frecuencia de la ola $f = 1/T$
- σ frecuencia angular $\sigma = 2\pi f = 2\pi/T$
- *k* número de onda $k = 2\pi/L$
- *u,w* velocidad de las partículas
- *h* (o *d*) profundidad del fondo
- NMR nivel medio en reposo
- NMM nivel medio en movimiento



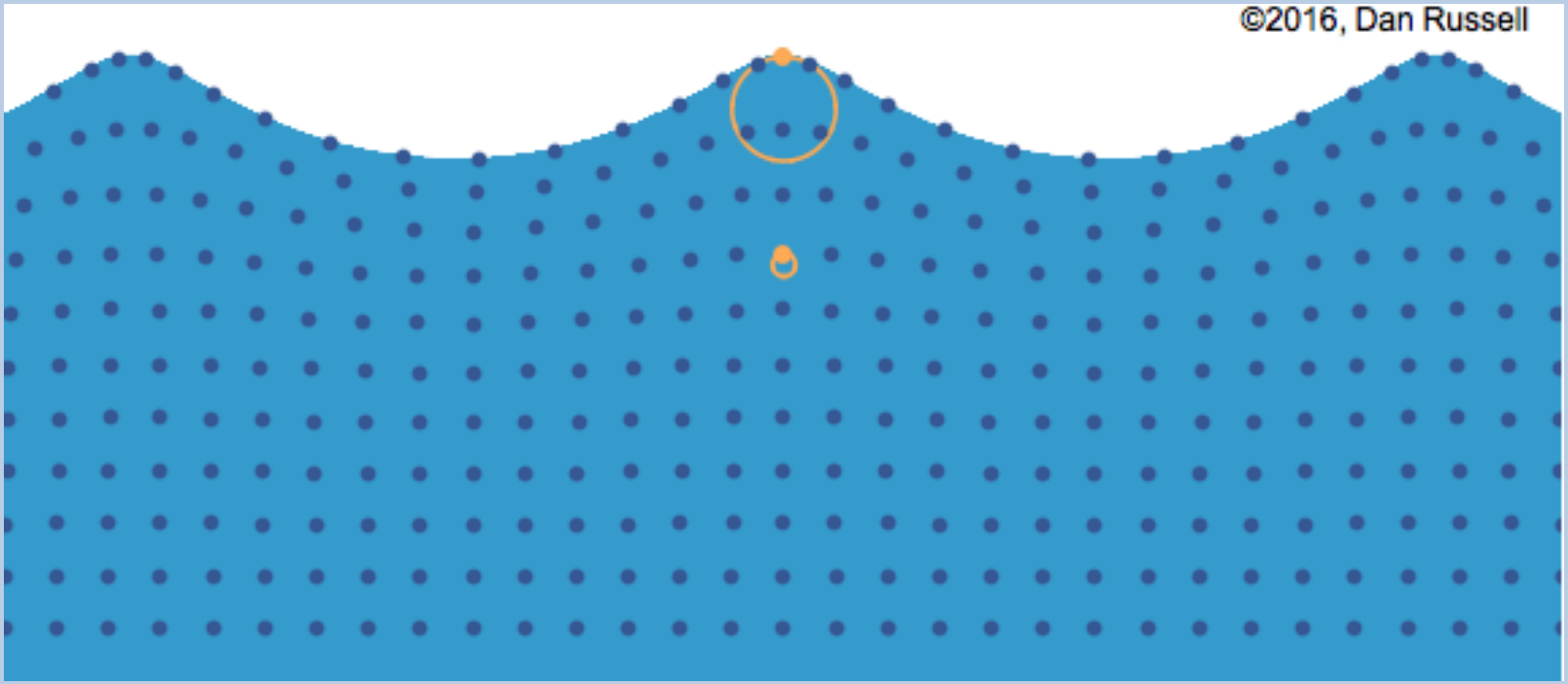
Universidad de La Laguna

movimiento de las partículas

Las partículas de agua se mueven cíclicamente

El tamaño de las órbitas es mayor en la superficie

Las partículas a profundidad mayor que *L/2* prácticamente no se mueven



Universidad de La Laguna

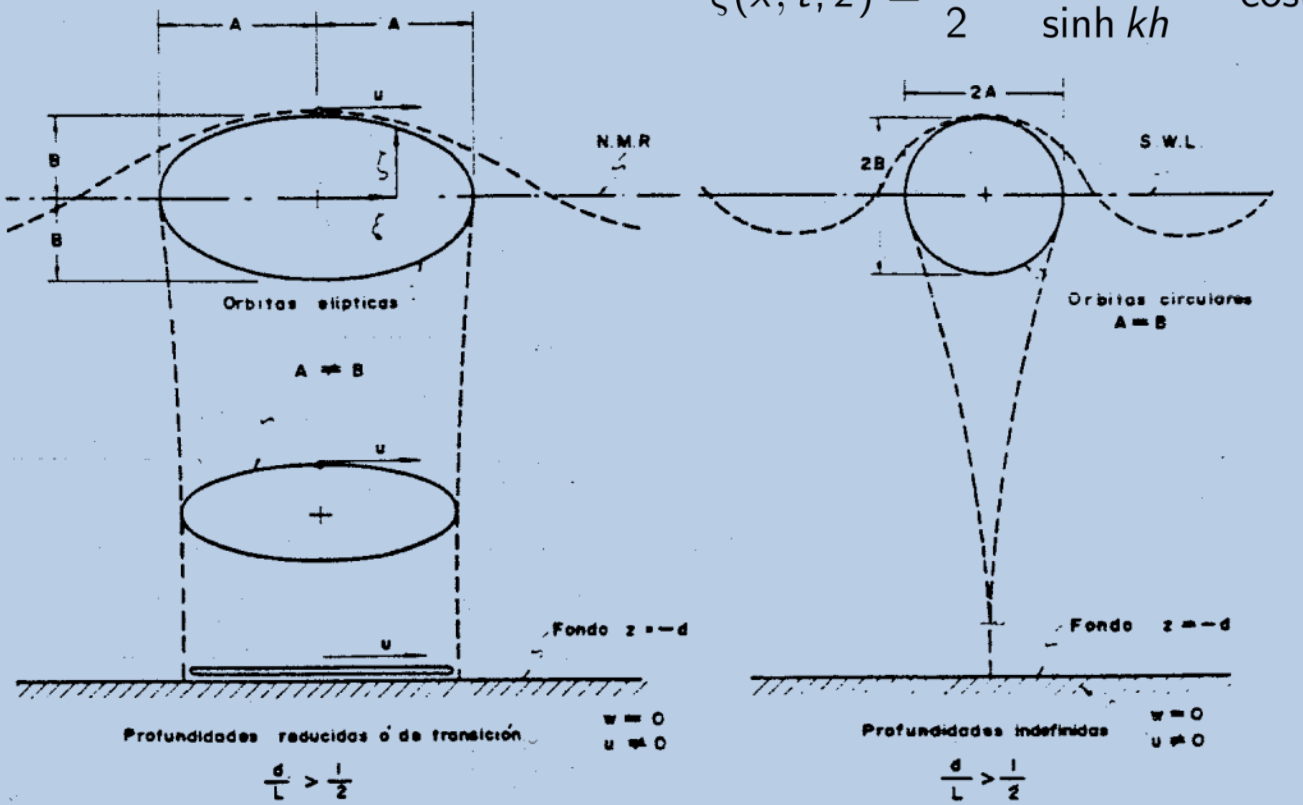
movimiento de las partículas

Las órbitas en aguas profundas son círculos, y en profundidad reducida son elipses

Componentes horizontal y vertical del desplazamiento

$$\xi(x,t;z) = -\frac{H}{2}\frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh}\sin(kx-\sigma t)$$

$$\zeta(x,t;z) = \frac{H}{2}\frac{\sinh k(z+h)}{\sinh kh}\cos(kx-\sigma t)$$



Universidad de La Laguna

teorías del oleaje

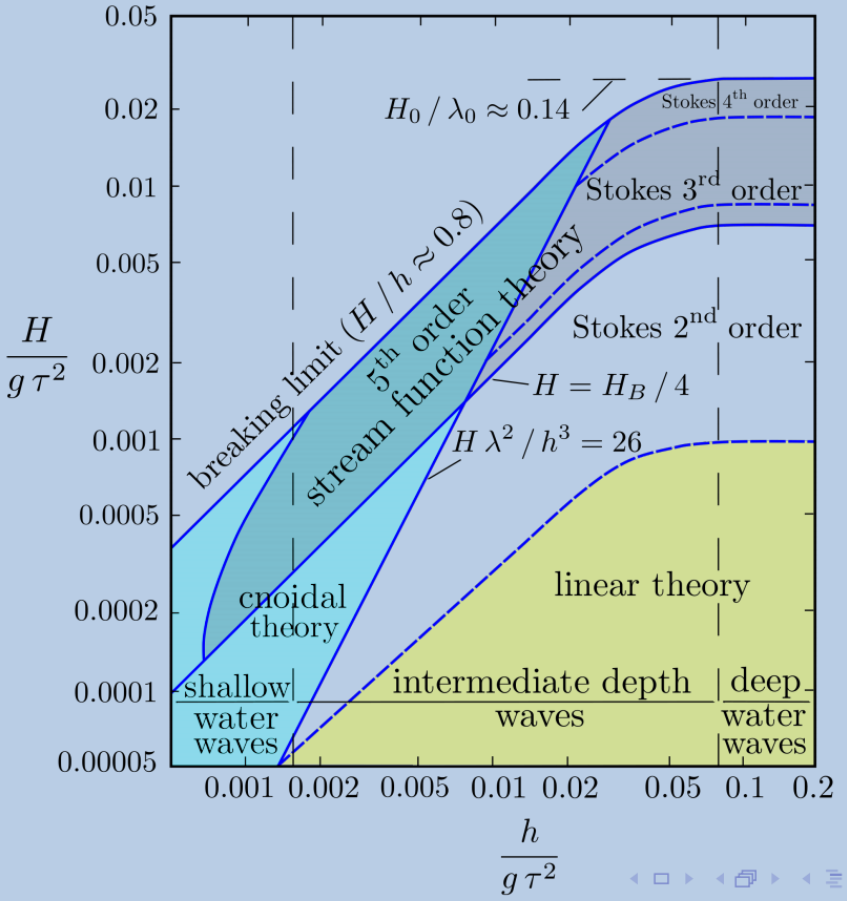
La ecuación que describe el oleaje

$$\frac{p}{\rho}+\frac{1}{2}\left(\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)^2\right)-\frac{\partial\varphi}{\partial t}+g\eta=0$$

es muy difícil de resolver.

Para calcular los parámetros del oleaje se emplean soluciones aproximadas, que dan lugar a distintas *teorías* del oleaje:

- teoría lineal o de Airy
- teoría de Stokes 2°,3er,..orden
- teoría c-noidal
- teoría trocoidal o de Gerstner
- ...



Universidad de La Laguna

teorías del oleaje

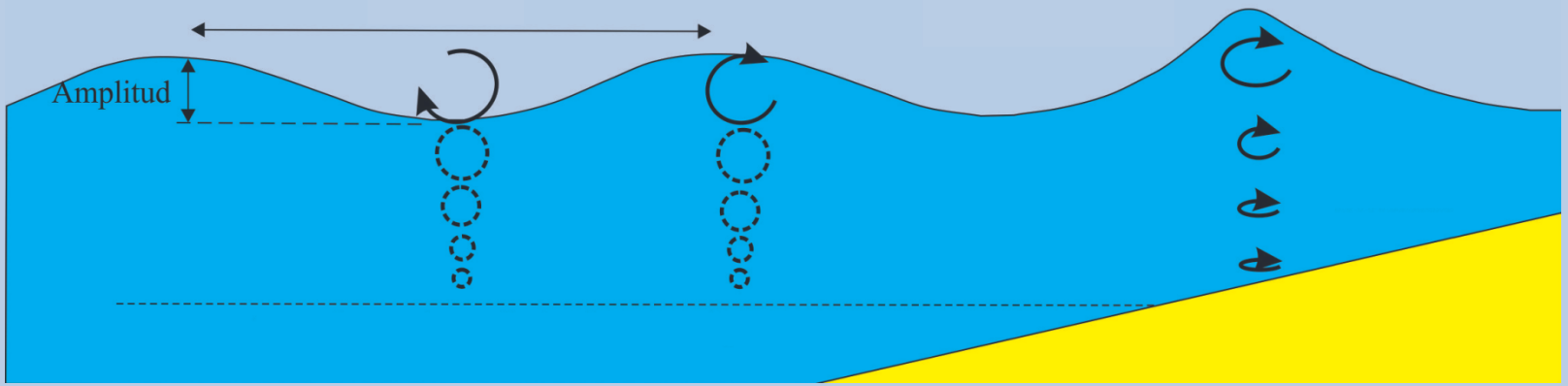
La teoría lineal o de Airy es la más simple $\eta = H/2 \cdot \cos(kx - \sigma t)$

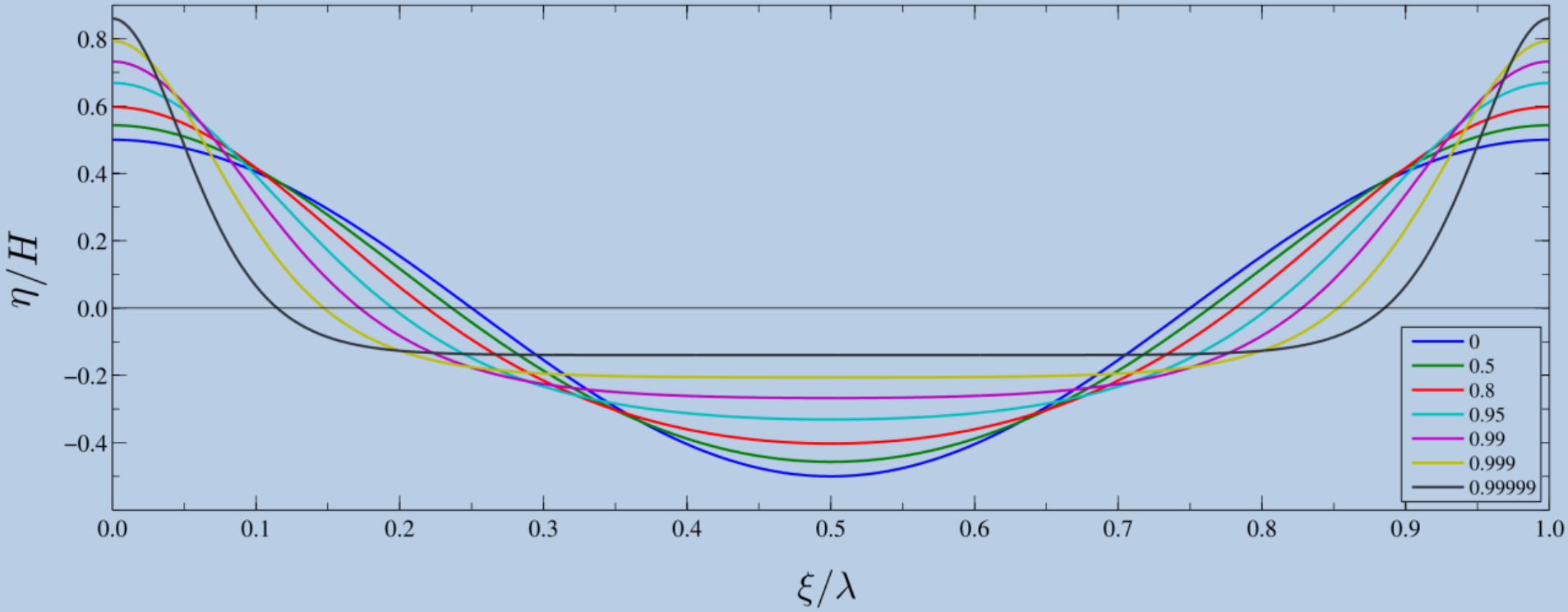
RELATIVE DEPTH	SHALLOW WATER $\frac{d}{L} < \frac{1}{25}$	TRANSITIONAL WATER $\frac{1}{25} < \frac{d}{L} < \frac{1}{2}$	DEEP WATER $\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$
1. Wave profile	Same As →	$\eta = \frac{H}{2}\cos\left[\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right] = \frac{H}{2}\cos\theta$	← Same As
2. Wave celerity	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gd}$	$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi}\tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$	$C = C_0 = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi}$
3. Wavelength	$L = T\sqrt{gd} = CT$	$L = \frac{gT^2}{2\pi}\tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$	$L = L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = C_0 T$
4. Group velocity	$C_g = C = \sqrt{gd}$	$C_g = nC = \frac{1}{2}\left[1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)}\right]\cdot C$	$C_g = \frac{1}{2}C = \frac{gT}{4\pi}$
5. Water Particle Velocity (a) Horizontal	$u = \frac{H}{2}\sqrt{\frac{g}{d}}\cos\theta$	$u = \frac{H}{2}\frac{gT}{L}\frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)}\cos\theta$	$u = \frac{\pi H}{T}e^{\frac{2\pi z}{L}}\cos\theta$
(b) Vertical	$w = \frac{H\pi}{T}\left(1 + \frac{z}{d}\right)\sin\theta$	$w = \frac{H}{2}\frac{gT}{L}\frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)}\sin\theta$	$w = \frac{\pi H}{T}e^{\frac{2\pi z}{L}}\sin\theta$
6. Water Particle Accelerations (a) Horizontal	$a_x = \frac{H\pi}{T}\sqrt{\frac{g}{d}}\sin\theta$	$a_x = \frac{g\pi H}{L}\frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)}\sin\theta$	$a_x = 2H\left(\frac{\pi}{T}\right)^2 e^{\frac{2\pi z}{L}}\sin\theta$
(b) Vertical	$a_z = -2H\left(\frac{\pi}{T}\right)^2\left(1 + \frac{z}{d}\right)\cos\theta$	$a_z = -\frac{g\pi H}{L}\frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)}\cos\theta$	$a_z = -2H\left(\frac{\pi}{T}\right)^2 e^{\frac{2\pi z}{L}}\cos\theta$
7. Water Particle Displacements (a) Horizontal	$\xi = -\frac{HT}{4\pi}\sqrt{\frac{g}{d}}\sin\theta$	$\xi = -\frac{H}{2}\frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\sinh(2\pi d/L)}\sin\theta$	$\xi = -\frac{H}{2}e^{\frac{2\pi z}{L}}\sin\theta$
(b) Vertical	$\zeta = \frac{H}{2}\left(1 + \frac{z}{d}\right)\cos\theta$	$\zeta = \frac{H}{2}\frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\sinh(2\pi d/L)}\cos\theta$	$\zeta = \frac{H}{2}e^{\frac{2\pi z}{L}}\cos\theta$
8. Subsurface Pressure	$p = \rho g(\eta - z)$	$p = \rho g\eta\frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} - \rho g z$	$p = \rho g\eta e^{\frac{2\pi z}{L}} - \rho g z$

Universidad de La Laguna

teorías del oleaje

La teoría c-noidal es la que mejor describe el oleaje en aguas someras





Universidad de La Laguna

oleaje irregular

No es común que se presente oleaje regular (*monocromático*,...). Lo que observamos en estado natural es la mezcla de muchas olas distintas

Universidad de La Laguna

oleaje irregular

En el análisis del *estado del mar* se emplean métodos estadísticos

Rayleigh $p(H \leq x) = 1 - e^{-\frac{x^2}{Hrms^2}}$

Siendo $H_{rms} = 2\sqrt{2}\sigma$

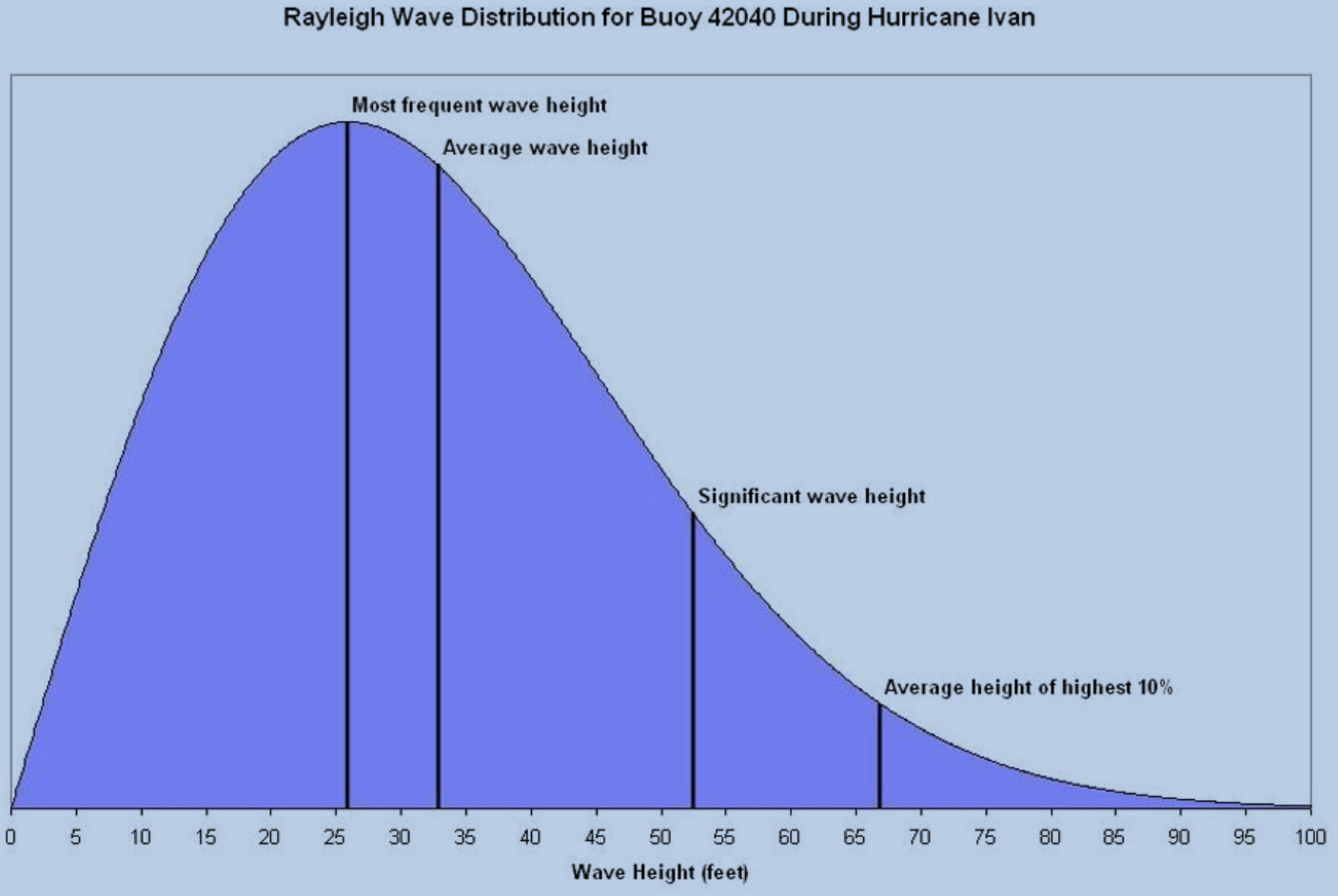
	Descripción	Valor
$H_{1\,\%}$	Altura excedida por el 1 % de las olas	6.07σ
$\bar{H}_{1\,\%}$	Media de altura del 1 % más alto	6.67σ
$H_{2\,\%}$	Altura excedida por el 2 % de las olas	5.59σ
$\bar{H}_{2\,\%}$	Media de altura del 2 % más alto	6.23σ
$H_{10\,\%}$	Altura excedida por el 10 % de las olas	4.29σ
$\bar{H}_{10\,\%}$	Media de altura del 10 % más alto	5.09σ
$\bar{H}_{1/3} = H_S$	Altura de ola significante	4.0σ
$\bar{H}$	Altura media de ola	$\sqrt{2\pi}\sigma$
$H_{1/2}$	Mediana de la altura de ola	2.35σ
H_{moda}	Altura de ola más probable	2.0σ
H_{rms}	Raíz-media-cuadrado de las alturas	$2\sqrt{2}\sigma$

Universidad de La Laguna

oleaje irregular

Se llama altura de ola significativa (o *significante*) al valor medio de las alturas del tercio de olas más altas

Se utiliza para caracterizar el estado del mar



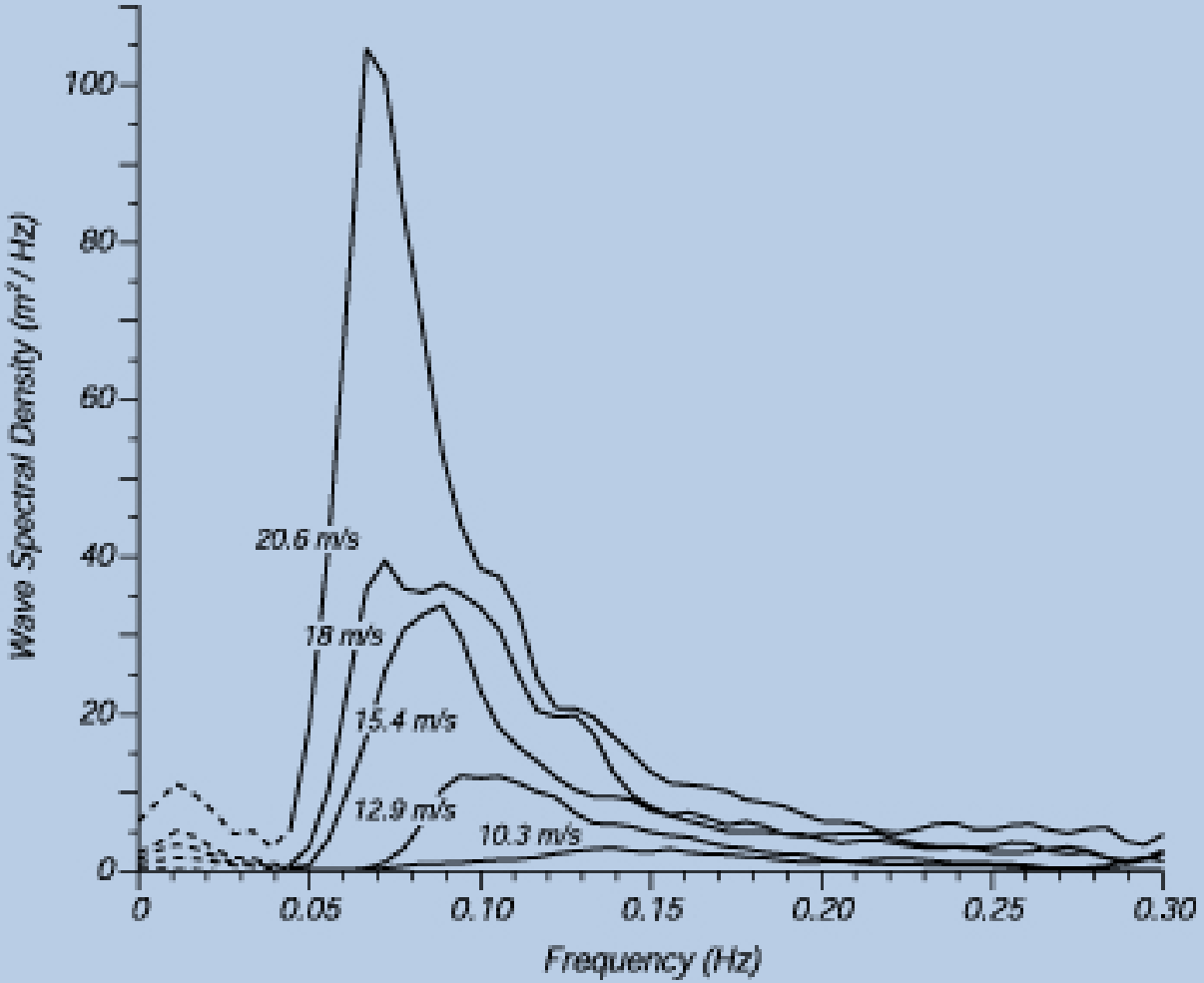
Universidad de La Laguna

oleaje irregular

Se llama *periodo pico* al periodo del oleaje más energético

Es mayor que el periodo *medio*

Se utiliza para caracterizar el estado del mar



Universidad de La Laguna

oleaje irregular

Oleaje de viento (o tipo SEA): periodos diseminados, habitualmente pequeños

Universidad de La Laguna

oleaje irregular

Oleaje de fondo (o tipo SWELL): periodos concentrados en torno al pico

Universidad de La Laguna

medida del oleaje

El oleaje se mide con boyas, que proporcionan *registros de oleaje*

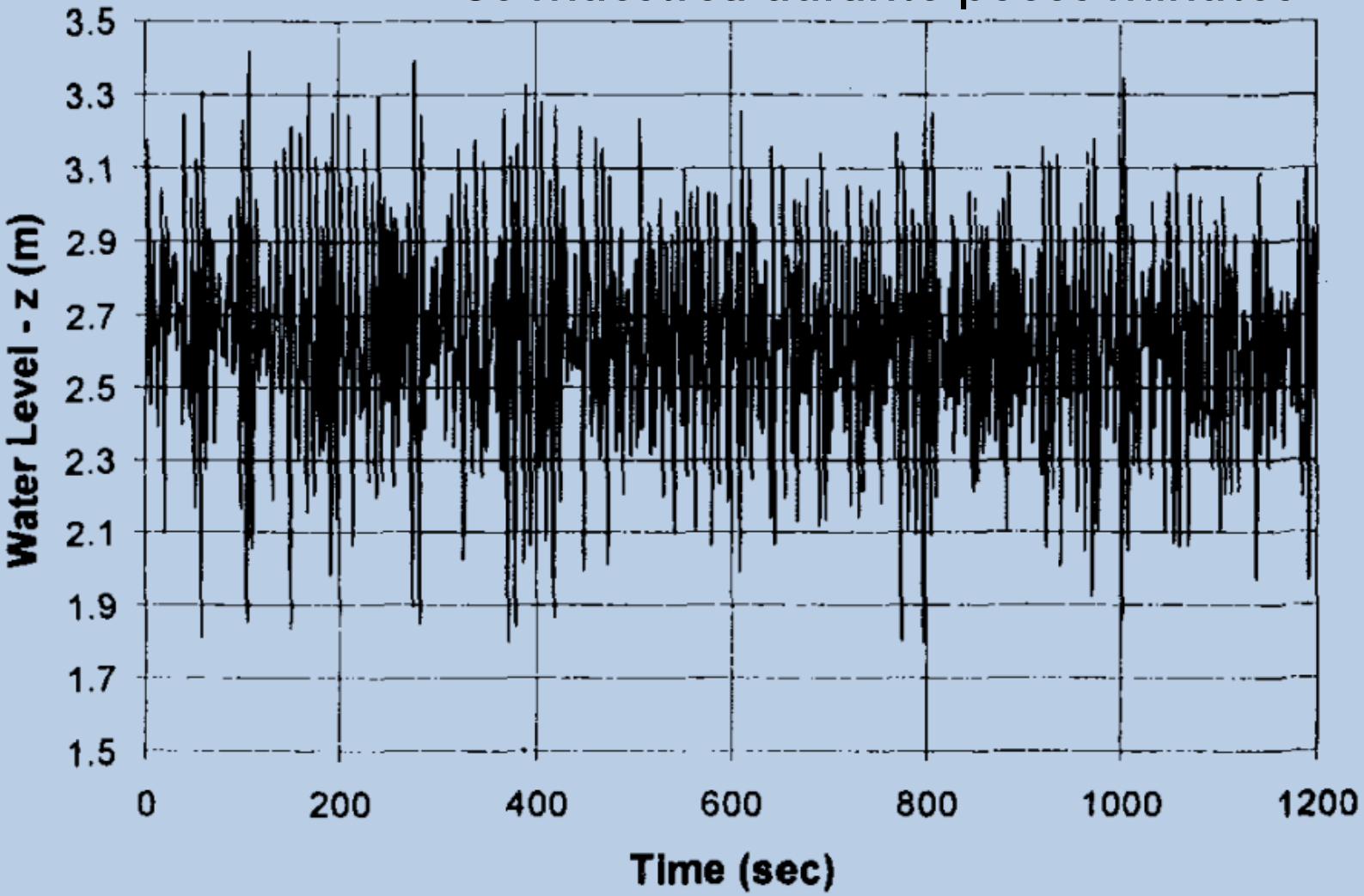
Existen boyas escalares (sólo miden altura y periodo) y direccionales (miden además la dirección de procedencia)

Universidad de La Laguna

medida del oleaje

De los registros de oleaje se obtienen la altura de ola y el periodo medio

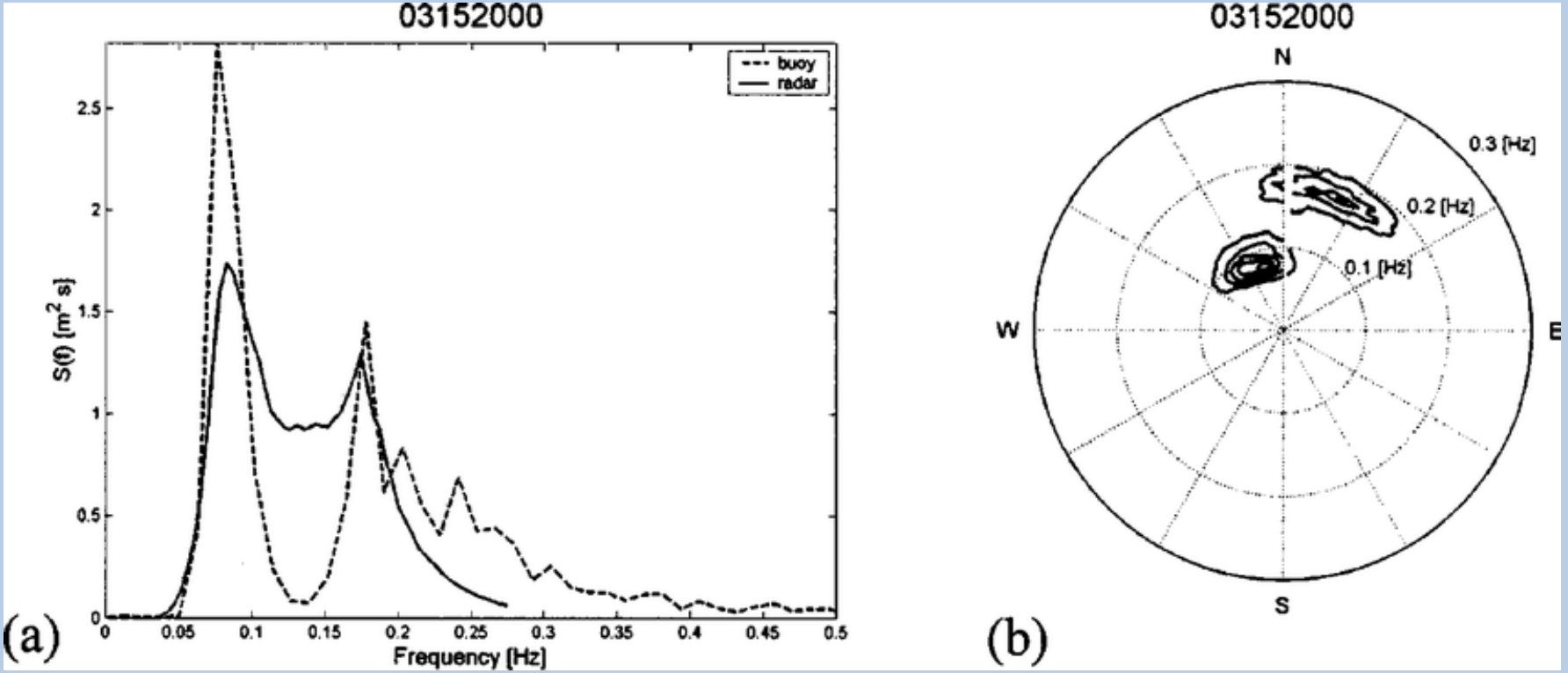
Se muestrea durante pocos minutos



Universidad de La Laguna

medida del oleaje

Mediante la transformada de Fourier se calcula el espectro de densidad de energía, del que se obtienen muchos más parámetros



Universidad de La Laguna

generación del oleaje

El oleaje es generado por la acción del viento sobre la superficie

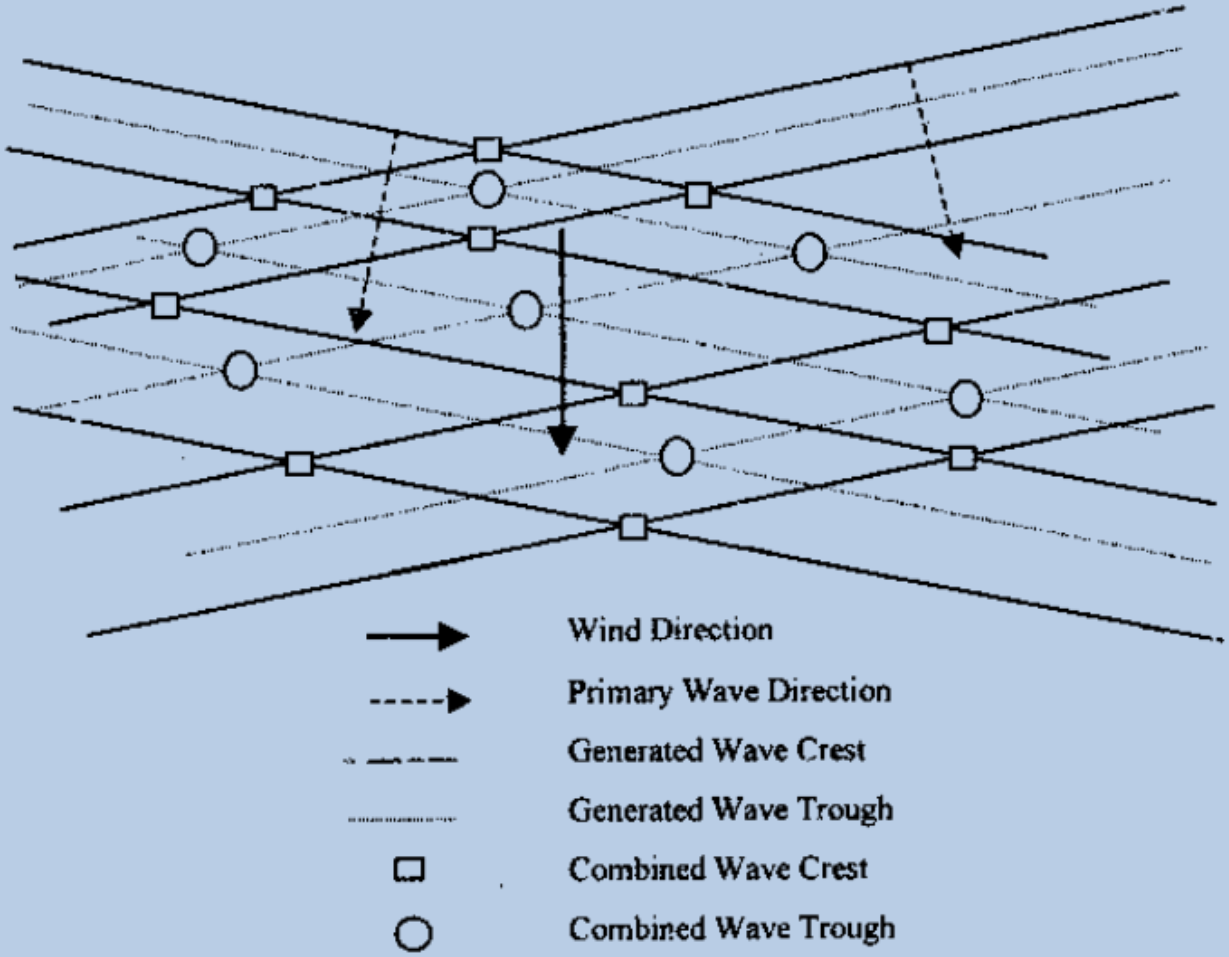
En un primer momento se forman ondículas (*ripples*)

Universidad de La Laguna

generación del oleaje

El oleaje es generado por la acción del viento sobre la superficie

A medida que avanzan, las ondículas suman sus amplitudes



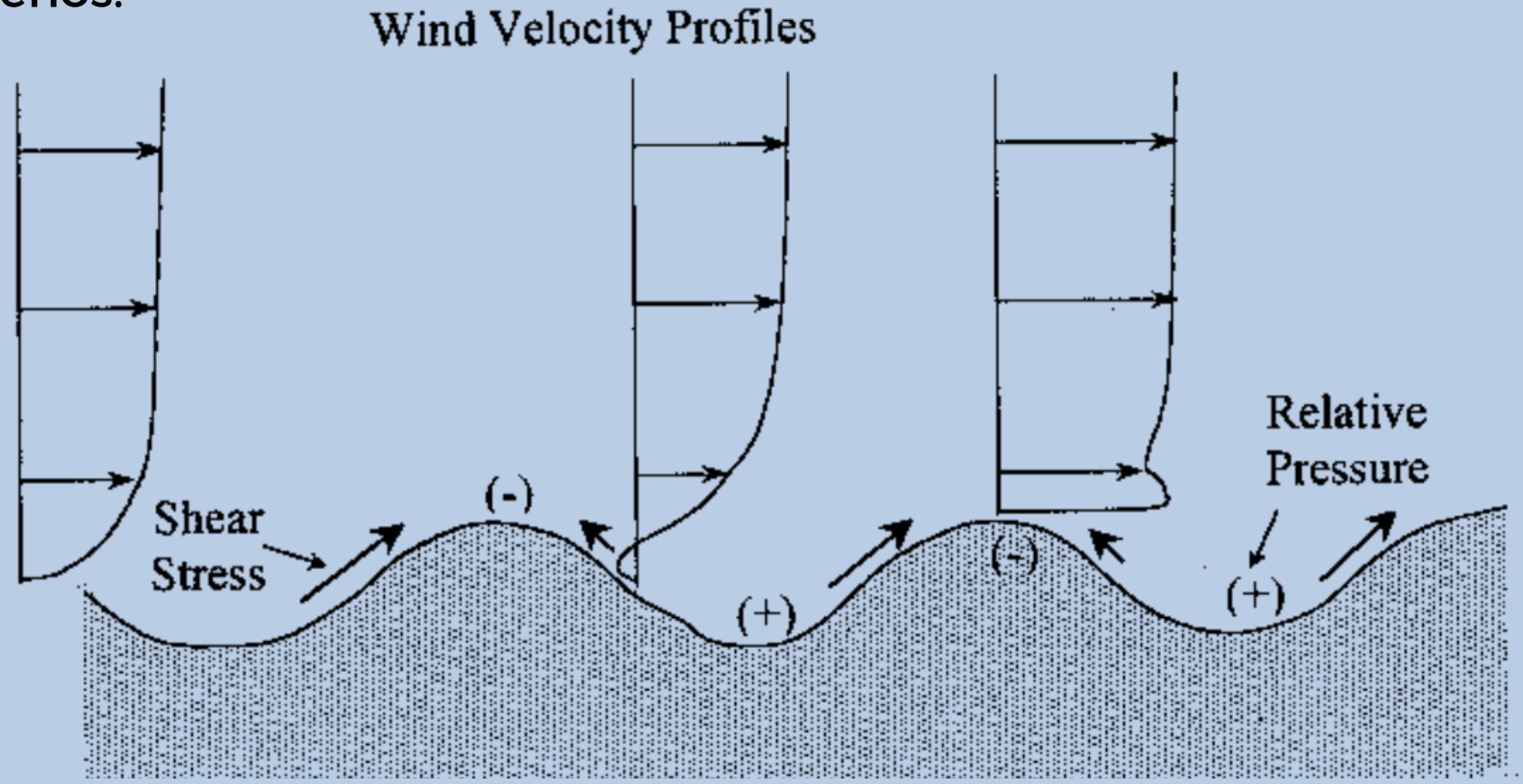
Universidad de La Laguna

generación del oleaje

Una vez se forman las ondículas, el viento transfiere energía al oleaje por dos mecanismos:

Los senos provocan que el aire reduzca su velocidad, empujando la superficie hacia la cresta posterior

La forma de la ola acelera el aire en las crestas y lo frena en los senos.

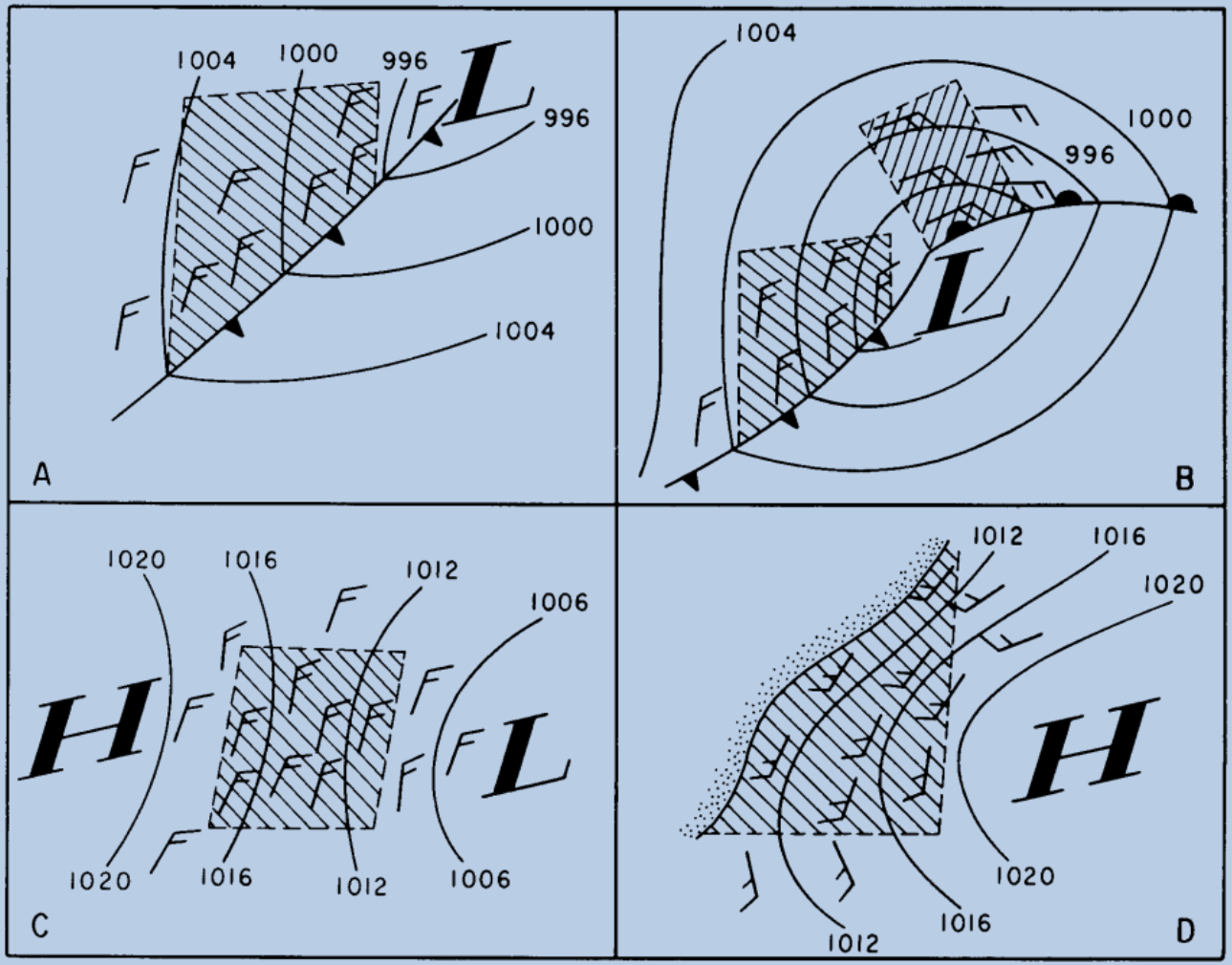


Universidad de La Laguna

generación del oleaje

Si se mantiene el viento, el oleaje sigue creciendo, hasta el peralte límite

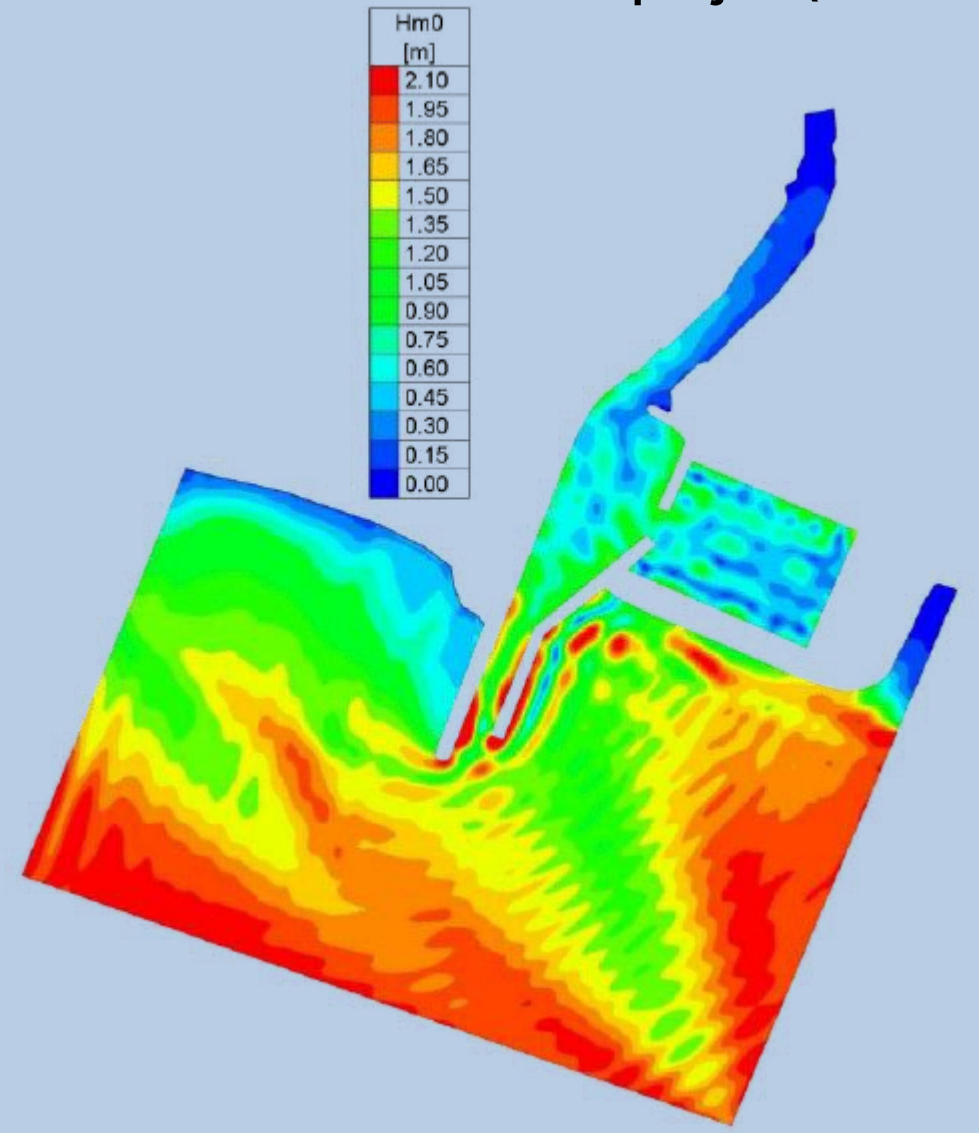
La limitación la ponen la duración del viento y el *fetch*



Universidad de La Laguna

generación del oleaje

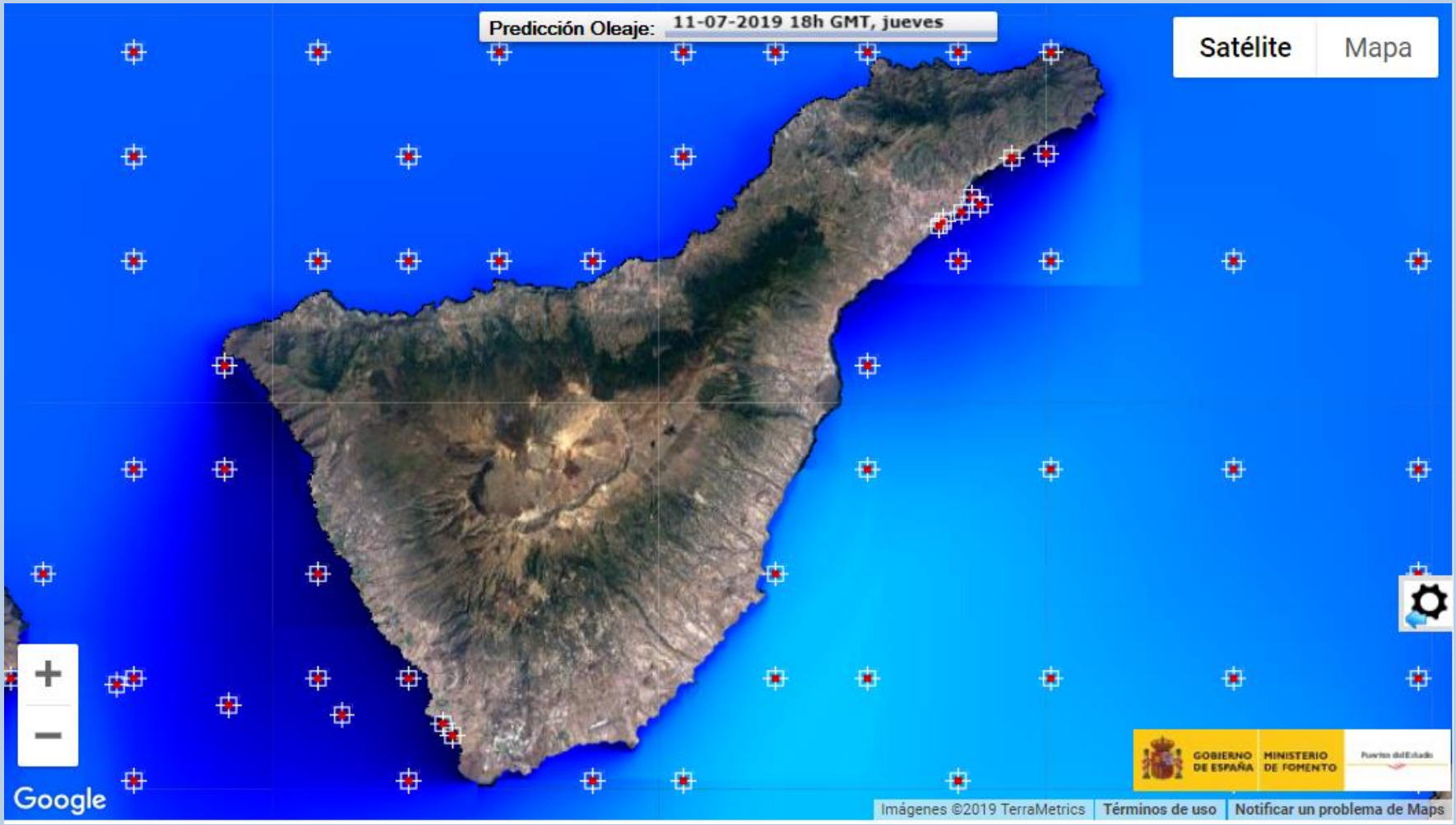
La prediccion de los parámetros del oleaje generado se hace mediante modelos complejos (elementos finitos)



Universidad de La Laguna

generación del oleaje

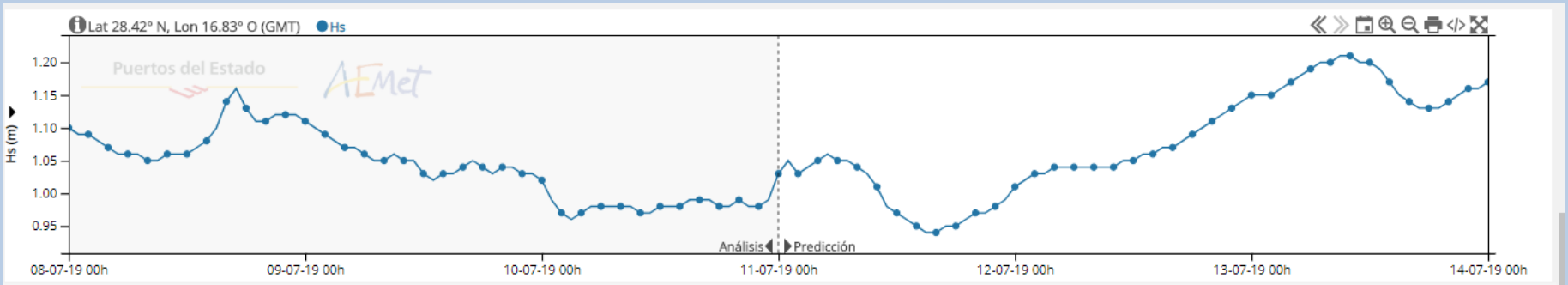
Puertos del Estado emplea el modelo WAM-SWAN para la predicción del oleaje



Universidad de La Laguna

generación del oleaje

Los parámetros que predice el modelo son: altura significativa, periodo pico, periodo medio y dirección de procedencia



GOBIERNO DE ESPAÑA · MINISTERIO DE FOMENTO · Puertos del Estado

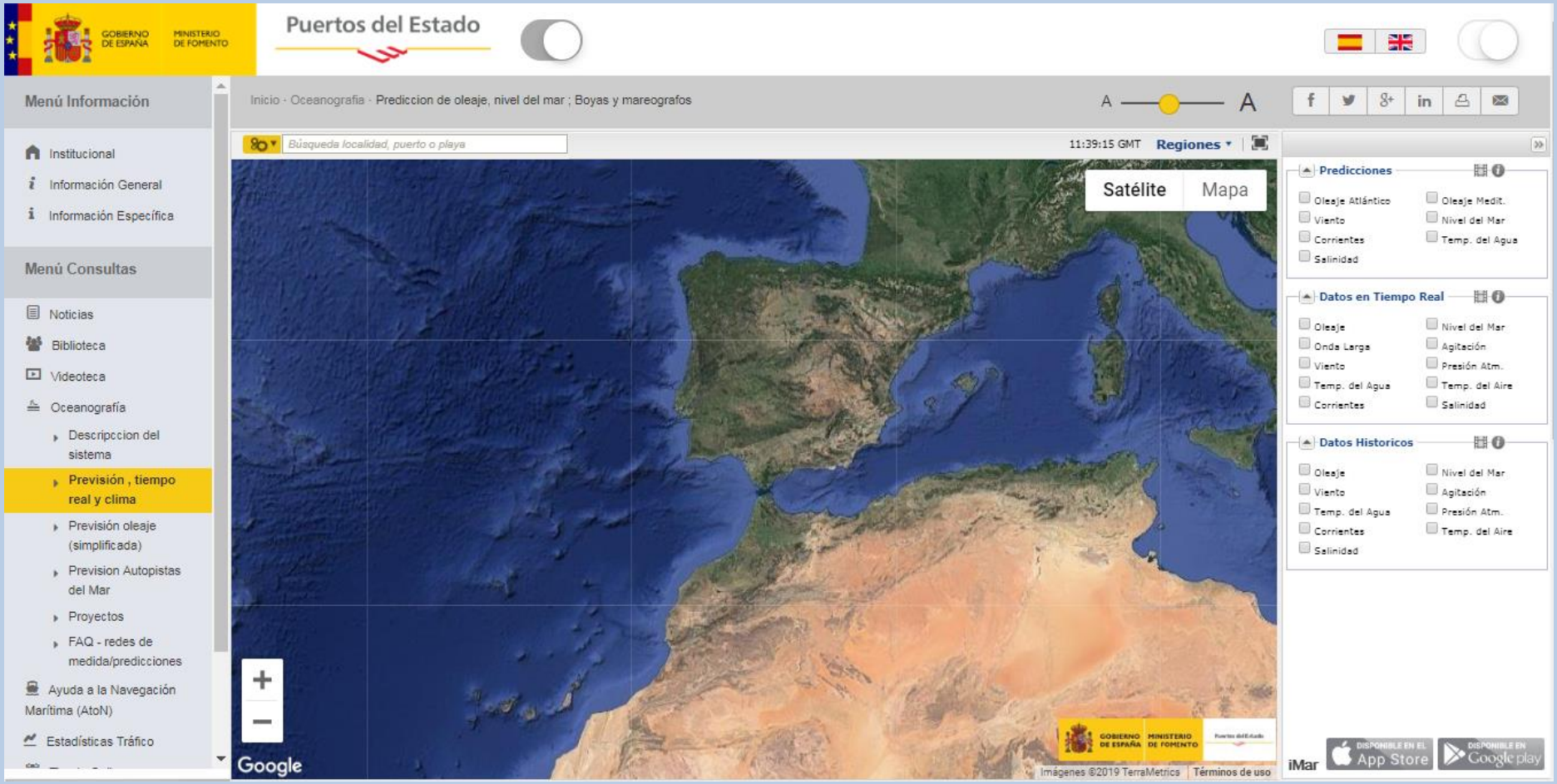
Predicción de viento y oleaje para **Lat 28.42° N, Lon 16.83° O**

jueves 11 de julio | viernes 12 de julio | sábado 13 de julio

	Hora	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Viento	Vv(m/s)	7.9	7.3	6.2	6.9	6.1	5.5	5.9	5.9	6.6	6.1	5.4	5.0	5.1	4.7	4.5	4.6	4.6	4.3	4.3	4.6	5.2	5.4	5.6	5.7
	Dir.	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←
Mar Total	Hs (m)	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Dir.	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
	Tp (s)	8	8	8	8	8	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	8	8
	Tz (s)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Mar de Viento	Hs (m)	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
	Dir.	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙
Mar de Fondo	Hs (m)	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
	Dir.	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
	Tz (s)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6

Universidad de La Laguna

generación del oleaje

Acceso a la web de Puertos del Estado:

http://www.puertos.es/es-es