

El clima del mar en la ingeniería oceanográfica: variabilidad mensual, anual, decadal, secular,...

Fernando J. Méndez Incera

Instituto de Hidráulica Ambiental "IH Cantabria"

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas

Universidad de Cantabria

¿ Cómo describimos el oleaje ?

¿ Qué es el clima marítimo?

Bases de datos

Calibración

Propagación

Clima del mar

Cambio climático

¿ Cómo describimos el oleaje ?

¿ Qué es el clima marítimo?

Bases de datos

Calibración

Propagación

Clima del mar

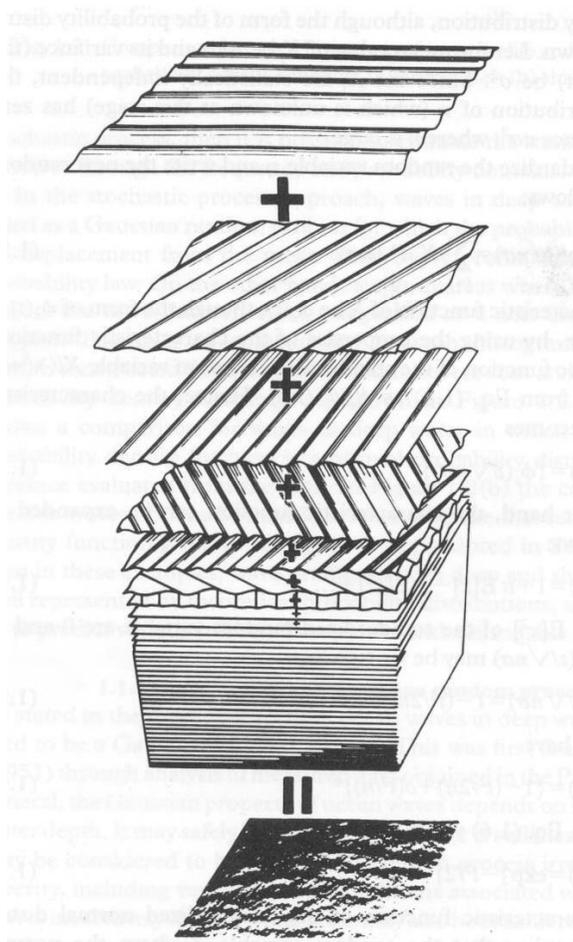
Cambio climático

¿ Cómo describimos el oleaje ?

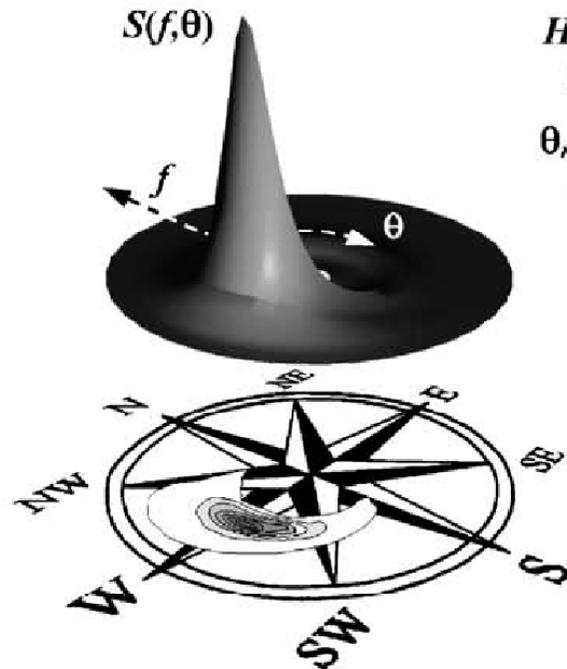


¿Cómo describimos el oleaje?

$$\eta(x, y, t) = \sum_j a_j \cos \left\{ \frac{\omega_j^2}{g} (x \cos \theta_j + y \sin \theta_j) - \omega_j t + \varepsilon_j(\omega_j, \theta_j) \right\}$$



$$S(f, \theta) \Delta f \Delta \theta \cong \frac{1}{2} a_j^2$$



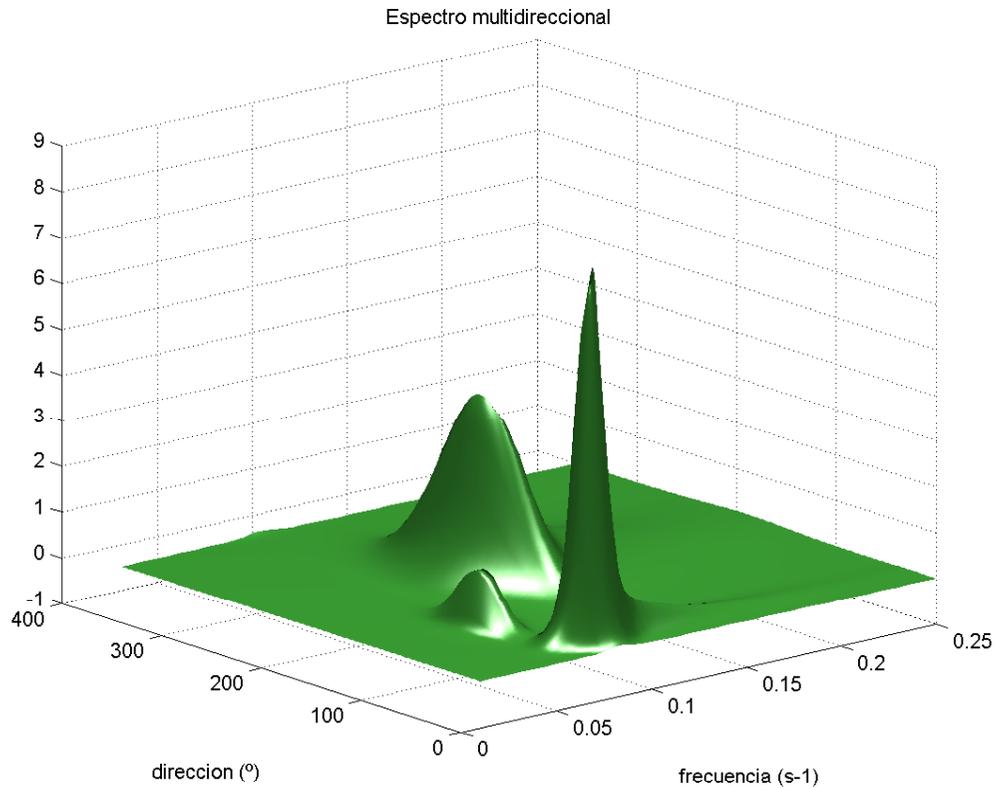
$$H_{mo} = 2.2m$$

$$T_p = 8.3s$$

$$\theta_m^L = 266^\circ N$$

$$\chi = 2.4^\circ$$

¿Cómo describimos el oleaje?



Parámetros importantes

$$H_s = 4 \sqrt{\iint S_p(f, \theta) df d\theta}$$

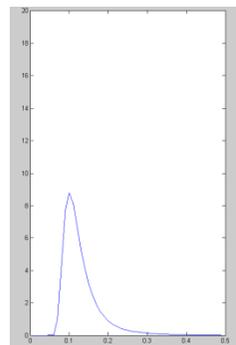
$$T_m = \sqrt{\frac{\iint S_p(f, \theta) df d\theta}{\iint f^2 S_p(f, \theta) df d\theta}}$$

$$\theta_m = \arctan \left[\frac{\iint \sin \theta S_p(f, \theta) df d\theta}{\iint \cos \theta S_p(f, \theta) df d\theta} \right]$$

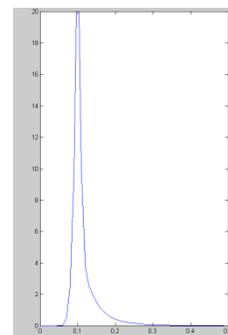
¿ Cómo describimos el oleaje ?



Sea: mar de viento



Swell: mar de fondo



¿ Cómo describimos el oleaje ?

¿ Qué es el clima marítimo?

Bases de datos

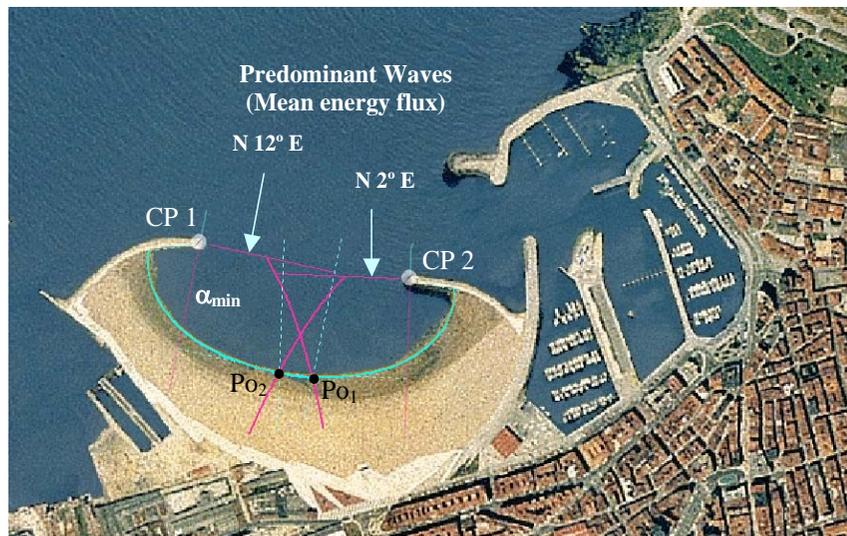
Calibración

Propagación

Clima del mar

Cambio climático

¿Cuál es la forma en planta de estas playas?



¿Cómo estimamos el transporte de sedimentos longitudinal?



¿Con qué frecuencia se produce la inundación de esta playa?



¿Cuál debe ser el tamaño de los bloques de este dique de bloques?



¿Cuántas horas al año la agitación en el interior de la dársena es superior a 30 cm?



¿Cuán frecuente es el rebase del oleaje en este puerto?



¿Cuál es la forma en planta de estas playas?

¿Cómo estimamos el transporte de sedimentos longitudinal?

¿Con qué frecuencia se produce la inundación de esta playa?

¿Cuántas horas al año la agitación es superior a 30 cm?

¿Cuál debe ser el tamaño de los bloques de este dique de bloques?

¿Cuán frecuente es el rebase del oleaje en un puerto?

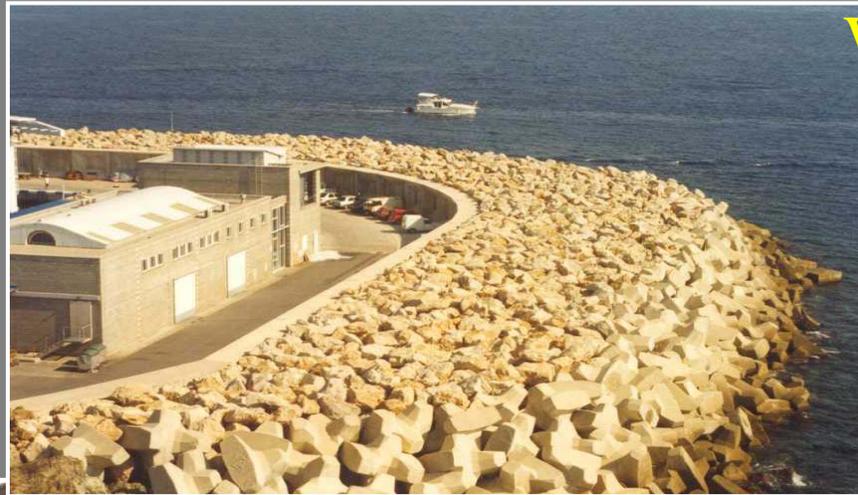


Necesitamos determinar el **clima marítimo** en las inmediaciones de la obra, obteniendo los regímenes medio y extremal de diversos parámetros del estado de mar

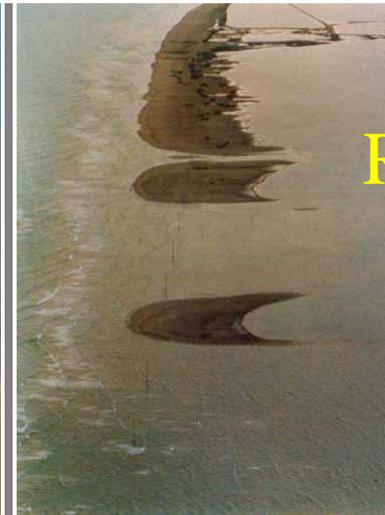
- *Clima marítimo*

Régimen extremal

FIABILIDAD



$$W = f(H, T, \Theta)$$



$$R_u = f(H, T, \Theta)$$

- *Clima marítimo*

**FUNCIONALIDAD
y OPERATIVIDAD**



Transporte de sedimentos = $f(H, T, \Theta)$



Régimen medio

Agitación = $f(H, T, \Theta)$

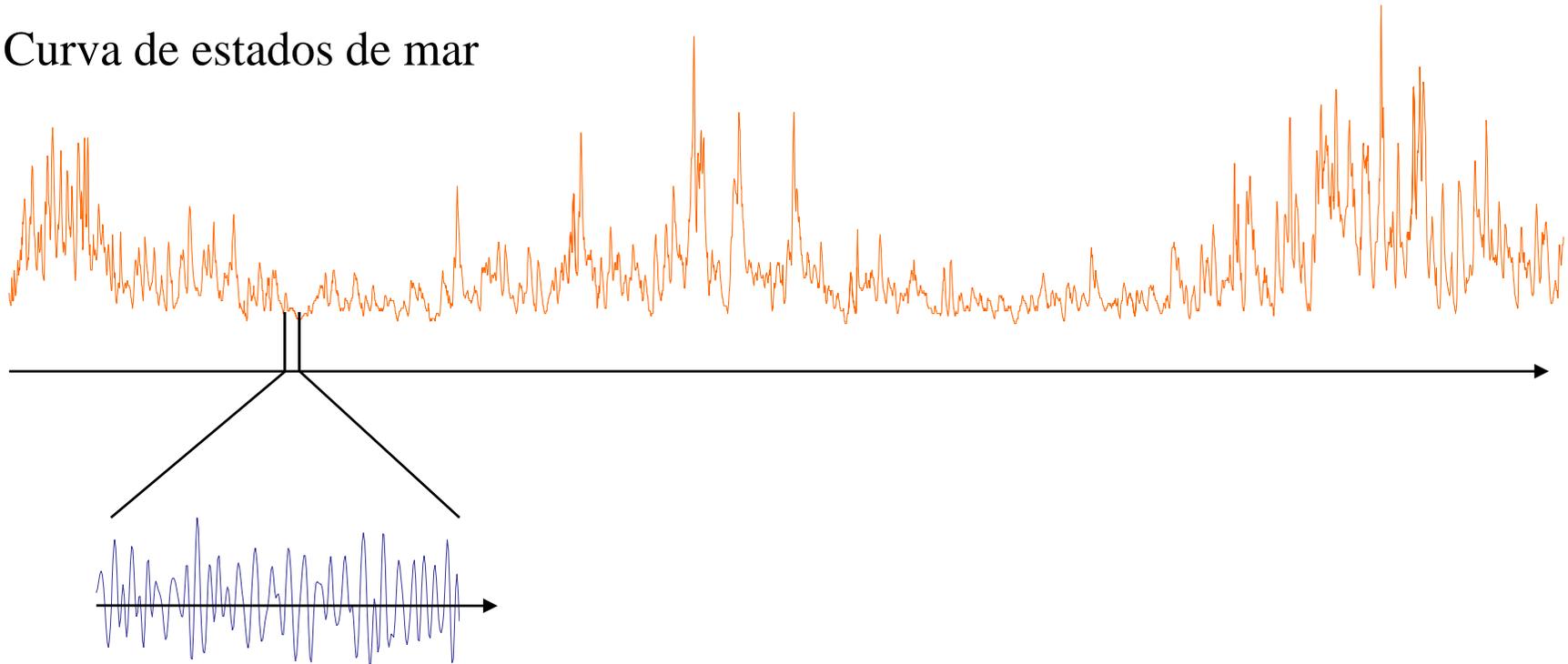
Operatividad depende también de la duración
De excedencia de H

Forma en planta depende la dirección
del flujo medio de energía



- *Clima marítimo*

Curva de estados de mar



Parámetros estadístico/espectrales del estado de mar: H_s, T_p, θ

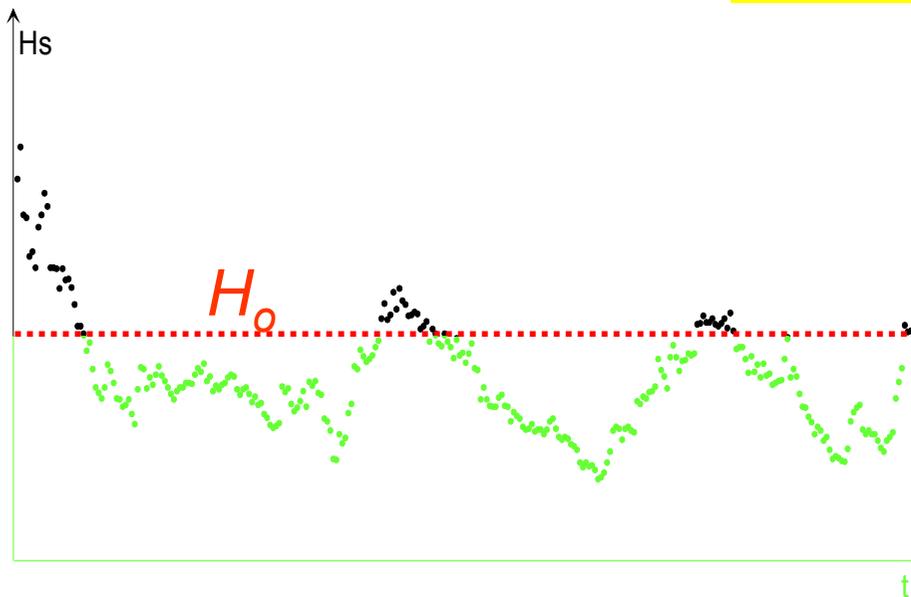
• *Clima marítimo*

Régimen medio

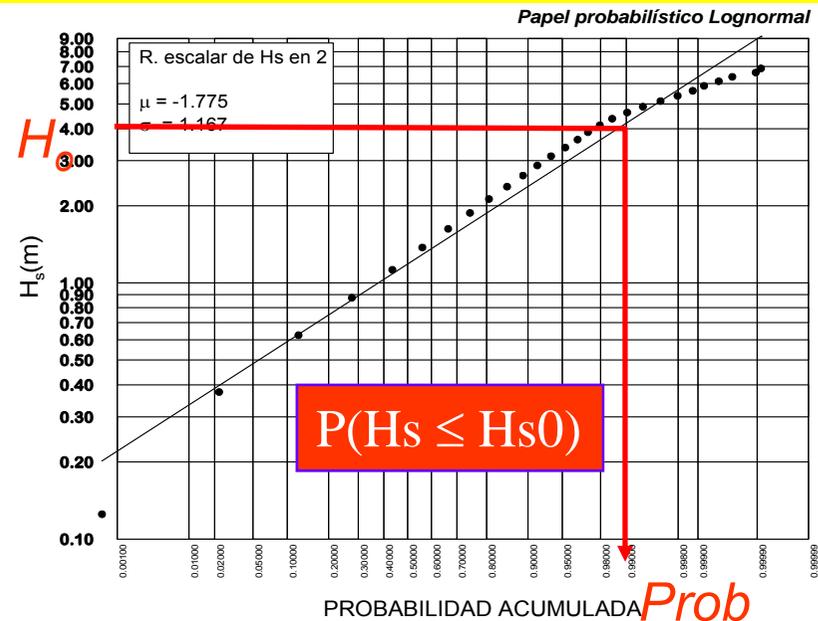
“Distribución estadística de un parámetro de estado de mar en un tiempo determinado.”

- mensual
- estacional
- anual

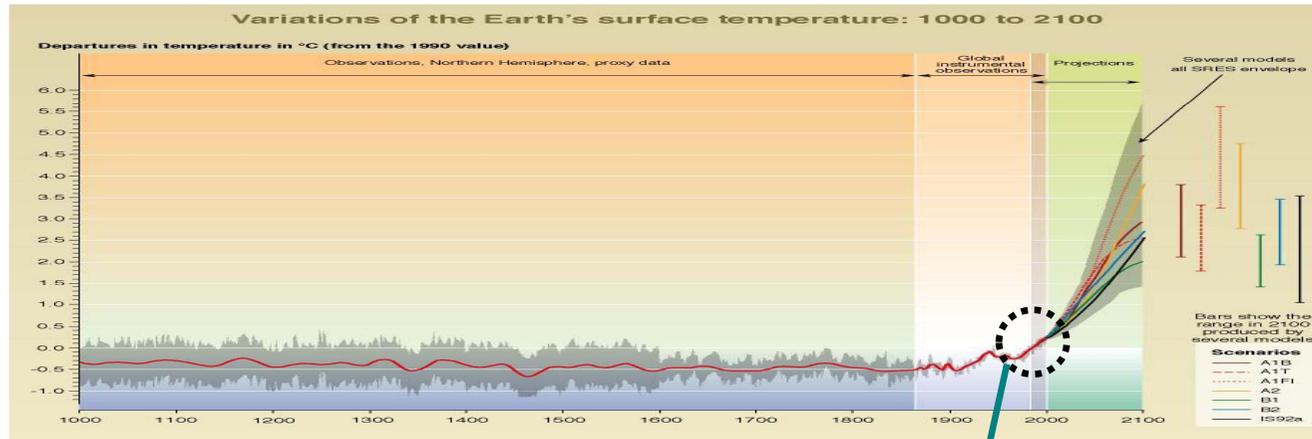
Periodo de tiempo en el cual las condiciones energéticas Son cuasi-estacionarias (en general entre 1 y 3 horas)



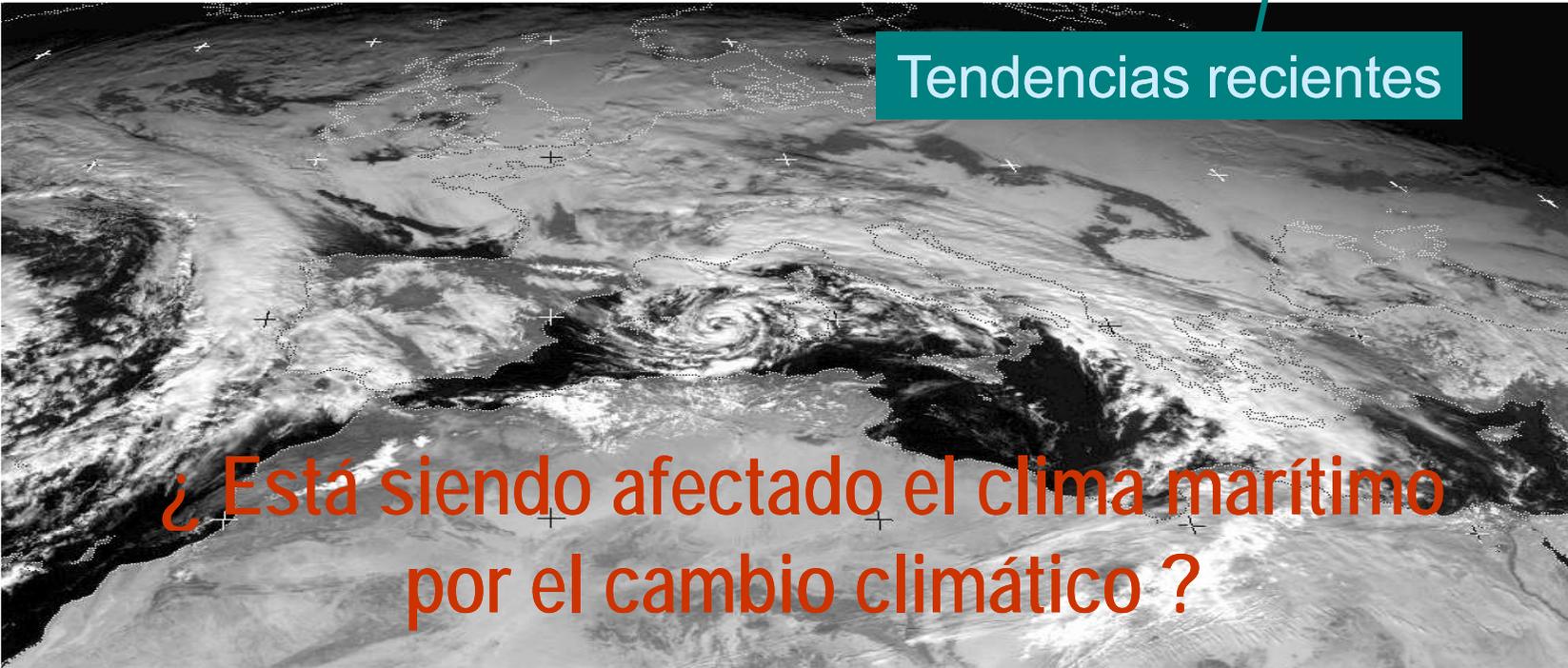
Sea state time series



$F_H(H)$



Tendencias recientes



¿ Está siendo afectado el clima marítimo por el cambio climático ?



“ Un pequeño cambio en la SST puede inducir cambios en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos “

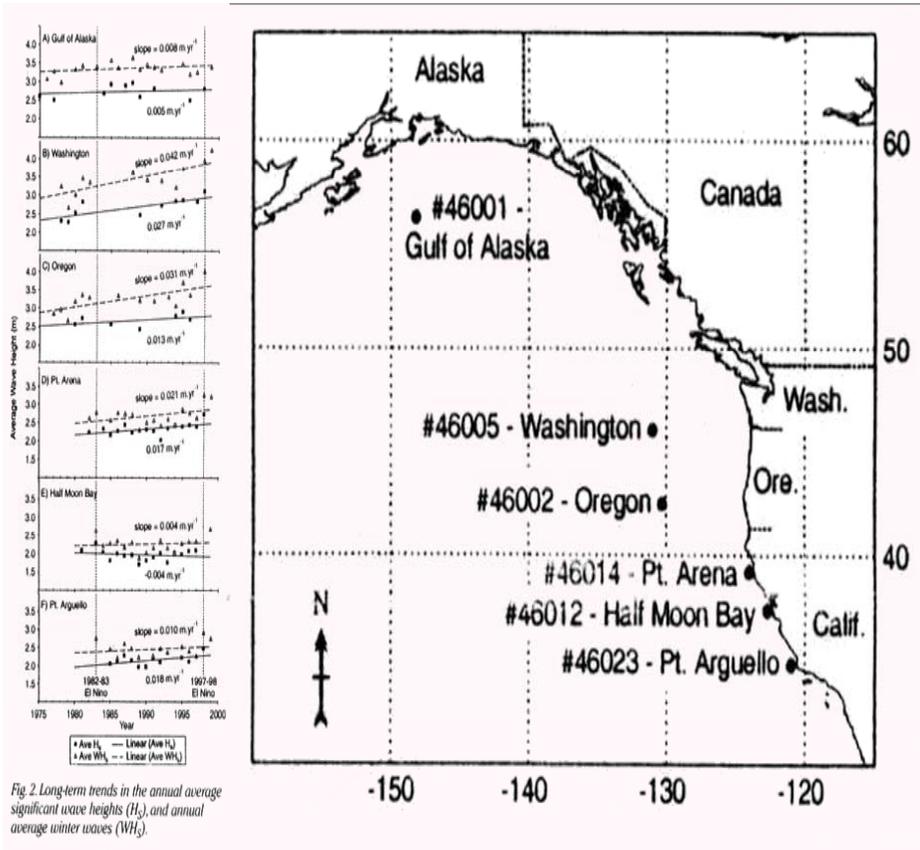


Fig 2. Long-term trends in the annual average significant wave heights (H_s), and annual average winter waves (WH_s).

¿están...

Plataformas petrolíferas



Fiabilidad de las obras marítimas



playas



Ecosistemas marinos



Operatividad de puertos



Riesgo de inundación



... siendo afectados por cambios en el clima marítimo ?

Estamos interesados en tendencias de...

- nivel medio del mar
- régimen medio de Hs
- dirección del flujo de energía
- intensidad y frecuencia de eventos extremos (Hs, marea meteorológica, viento)
- niveles extremos y riesgo de inundación

1. Motivación

HERRAMIENTAS: registros históricos

Instrumentales

- mareógrafos (1900 – 2000)
- boyas (1975 – 2000)

Obtenidos numéricamente (1950 – 2000)

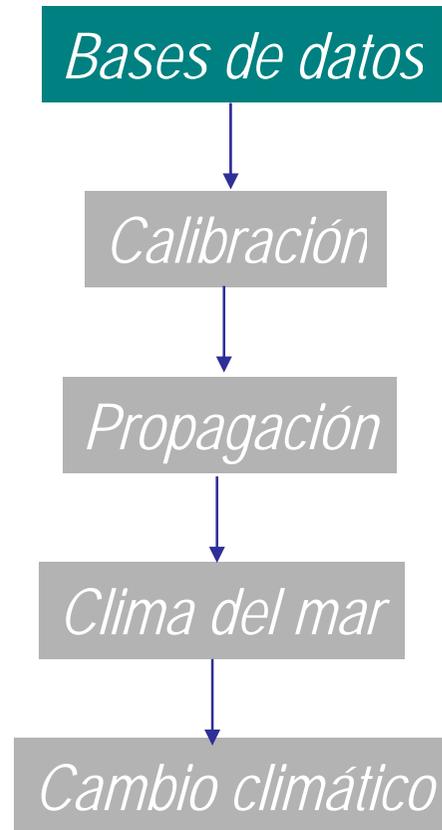
- Reanálisis de oleaje
- Reanálisis de nivel del mar

- Buenos cuantitativamente
- Dispersos en espacio
- Registros cortos

- Buenos cualitativamente
- Buena definición espacial
- Registros largos

OBJECTIVOS

- Calibrar espacialmente los modelos de reanálisis
- Desarrollar herramientas estadísticas para estimar tendencias de cambio en parámetros de clima marítimo

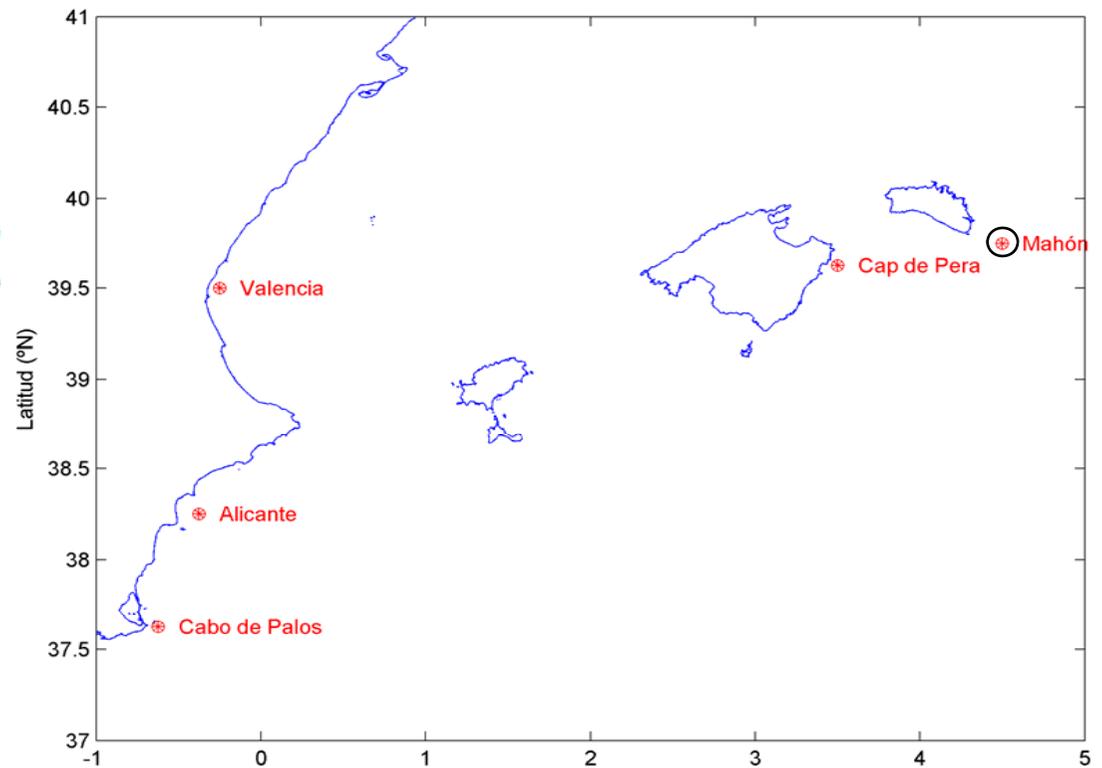
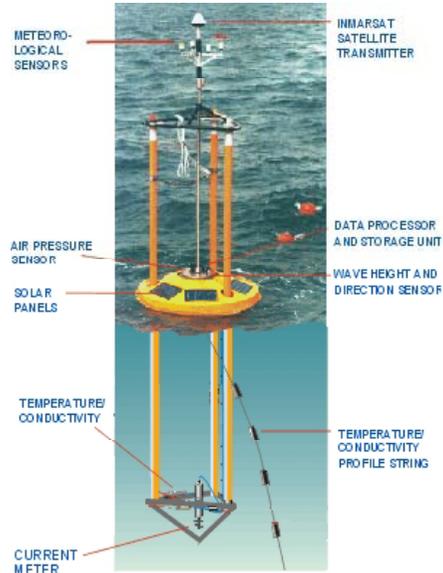


Instrumentales (boyas escalares y direccionales, radar, mareógrafos, estaciones meteorológicas)

Datos visuales (barcos)

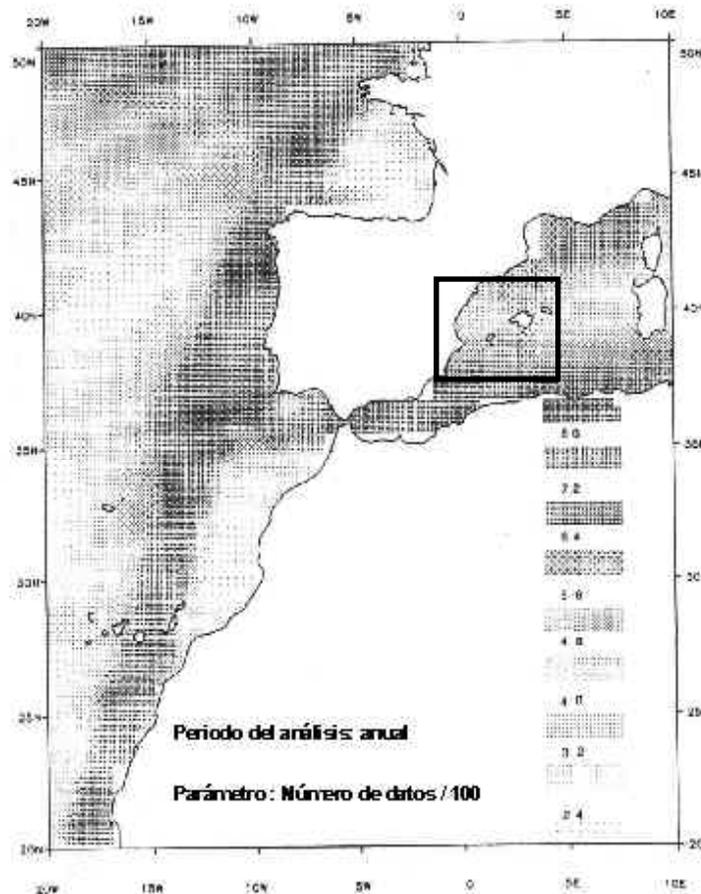
Datos de retroanálisis (WAM, HAMSOM)

Satélite (altímetro)



- Buenas cuantitativamente
- Boyas costeras afectadas por propagación
- Dispersas en espacio, huecos en series
- Registros cortos

Visuales (Barcos)



British Meteorological Office (BMO).

Son datos son tomados por observadores entrenados desde los barcos del tráfico marítimo comercial.

Cada dato visual contiene la siguiente información:

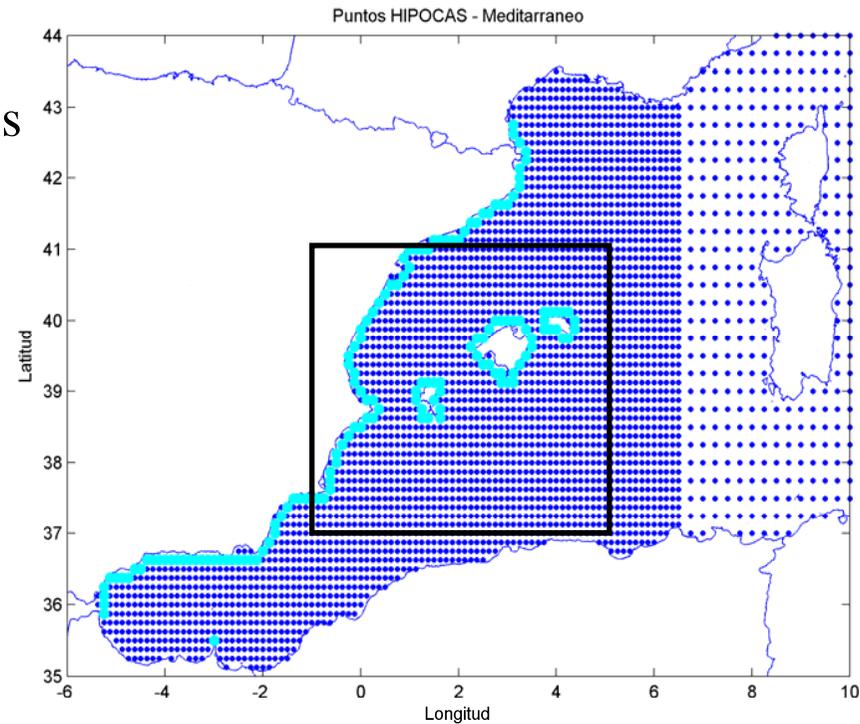
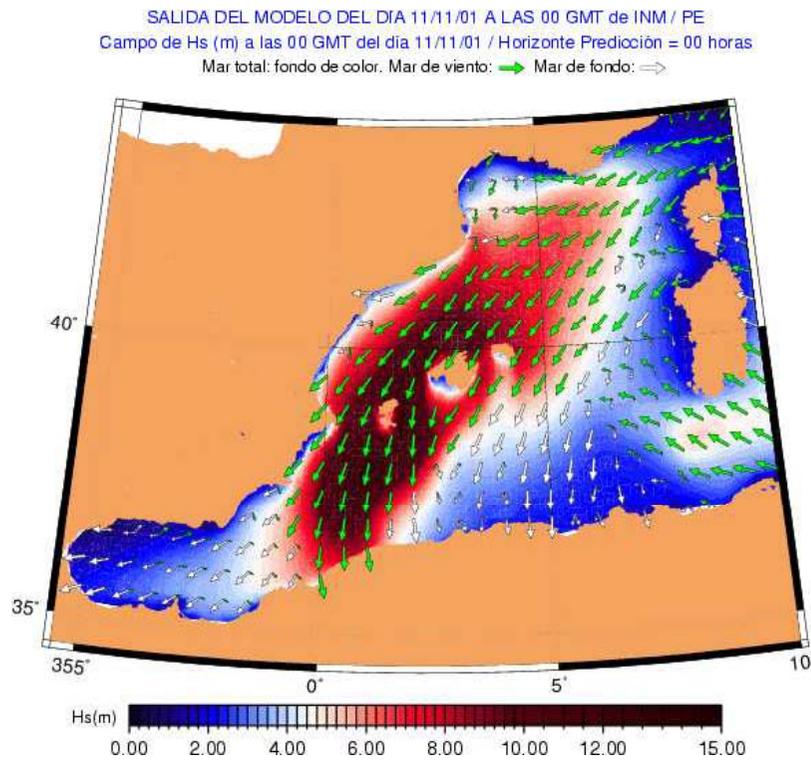
- Longitud y latitud en el punto de observación.
- Fecha y hora del momento de la observación.
- Presión atmosférica y temperatura del aire.
- Velocidad y dirección del viento.
- Altura de ola, período y dirección del oleaje SWELL.
- Altura de ola y período del oleaje SEA. (Se asume que tiene la misma dirección que el viento).

*Buenas cualitativamente
Información direccional
Dispersas en el espacio
Registros largos
Valores extremos no estan bien recogidos*

Datos de modelos de generación de oleaje (WAM, WaveWatch3)

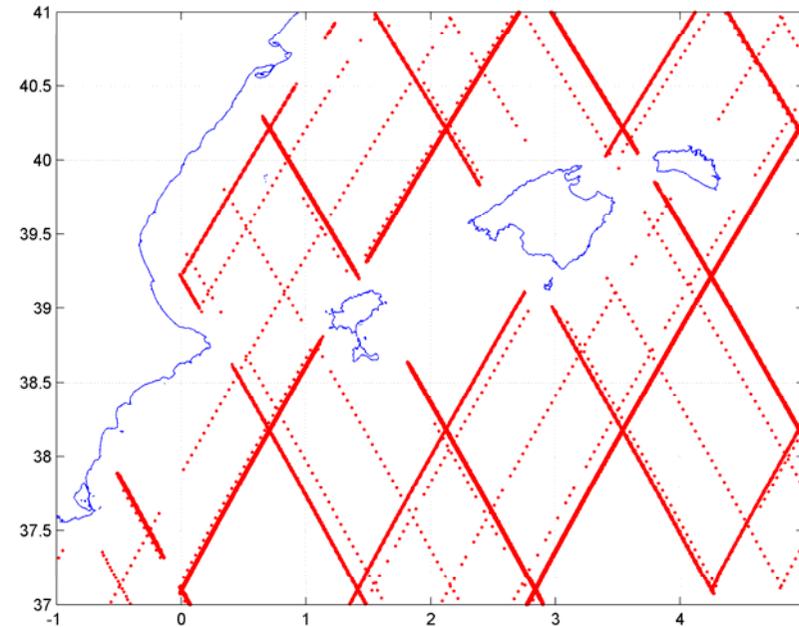
Swell1 (H1,T1, Θ 1) Swell2 (H2,T2, Θ 2) Sea (H3,T3, Θ 3)

1(3)-hour(s) serie continua
SIMAR-44-WAM 44 años de reanálisis



*"Casi" buenos cuantitativamente
Continuos en tiempo y en espacio
Registros largos*

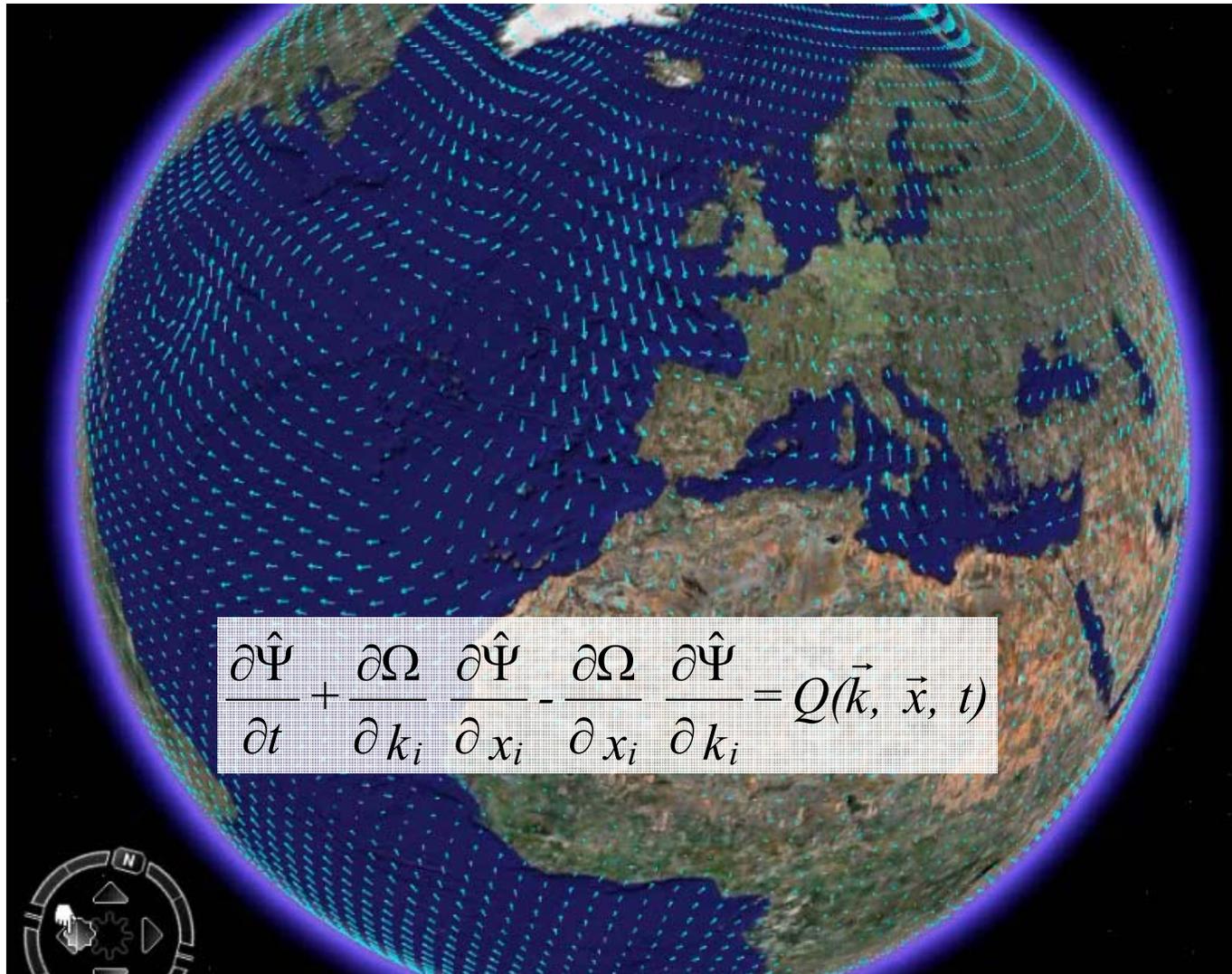
Satelite (altimetro)



H_s, T_m
recientemente θ_m

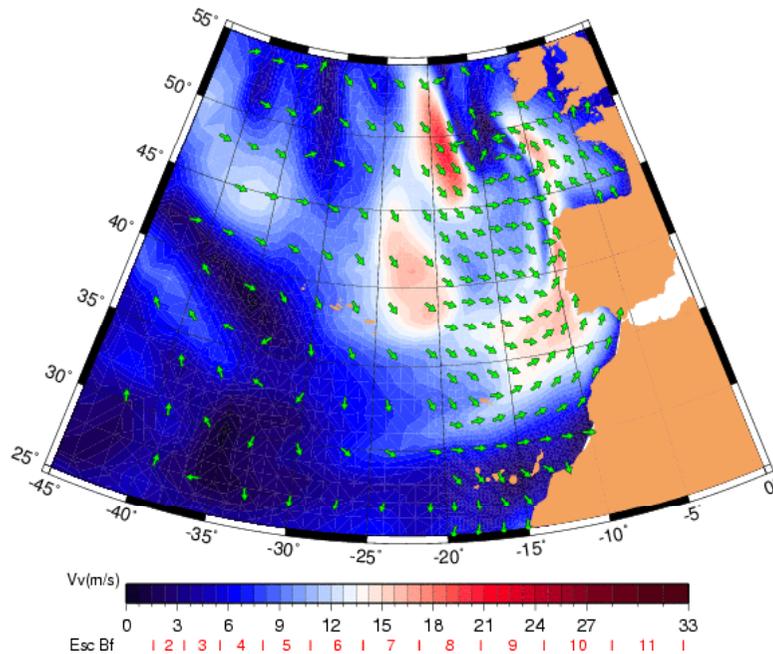
Buenos cuantitativamente (como boyas)
Dispersos en tiempo
Bien distribuidos en el espacio
Registros cortos (<15 años)

Datos de modelos de generación de oleaje (WAM, WaveWatch3)

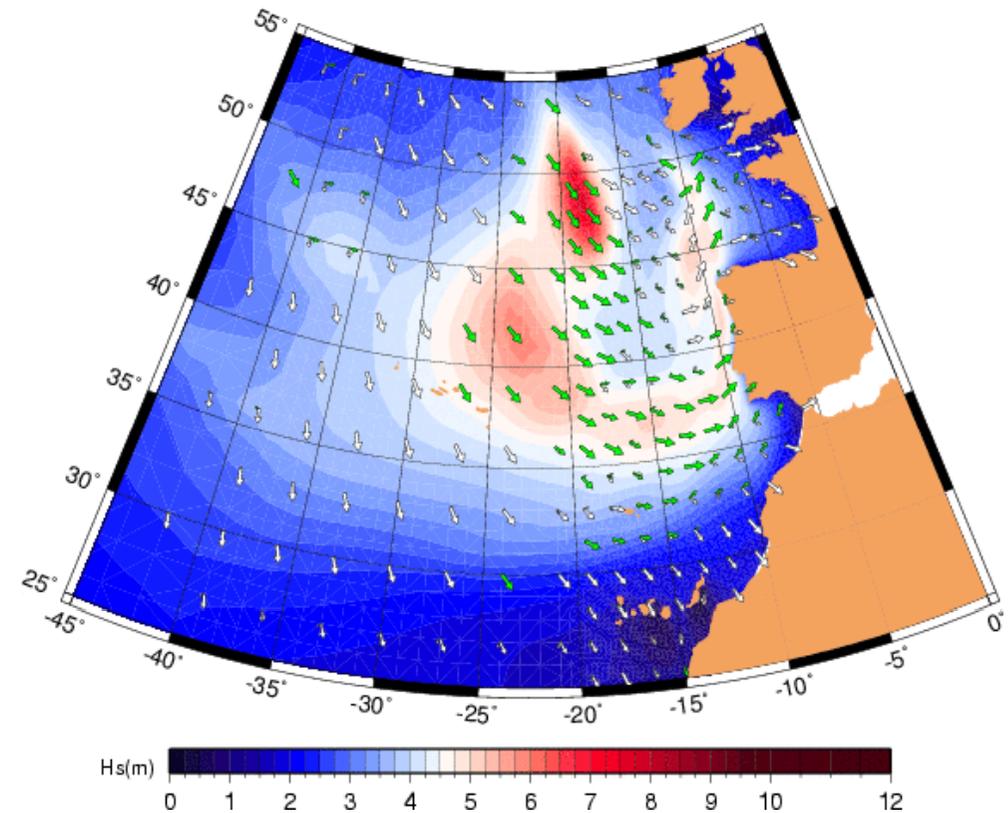


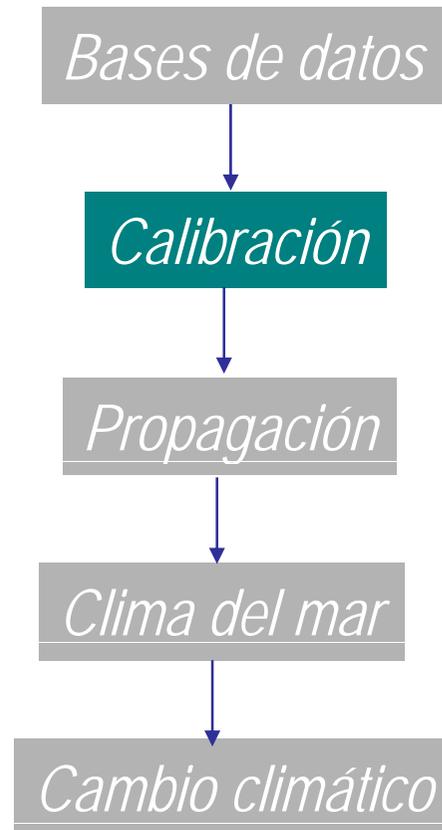
Datos de modelos de generación de oleaje (WAM, WaveWatch3)

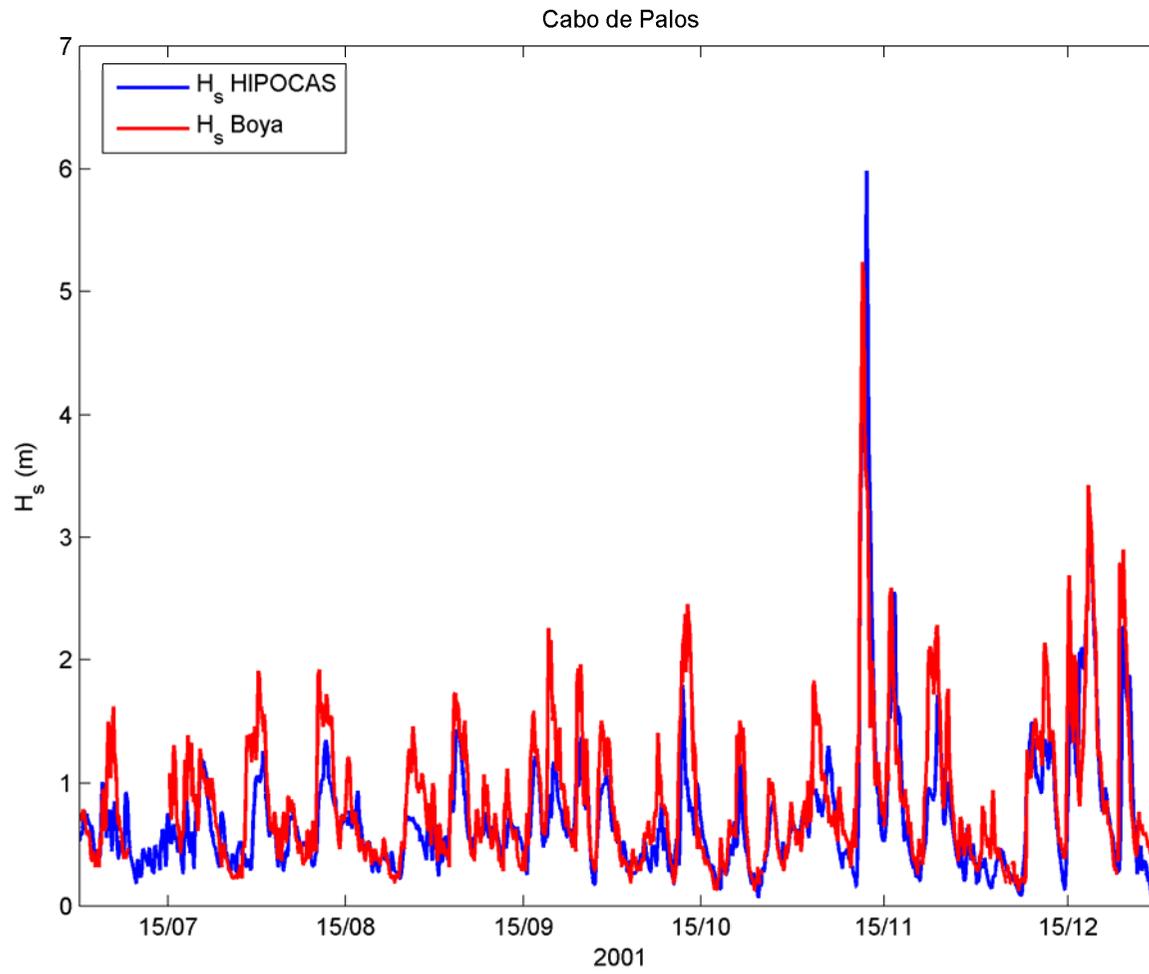
SALIDA DEL MODELO DEL DÍA 31/03/04 A LAS 00 UTC de INM / PE
 Campo de Viento (m/s) a las 00 GMT del día 01/04/04 / Horizonte Predicción = 24 horas
 Módulo de viento en superficie: fondo de color / Dirección de propagación: →

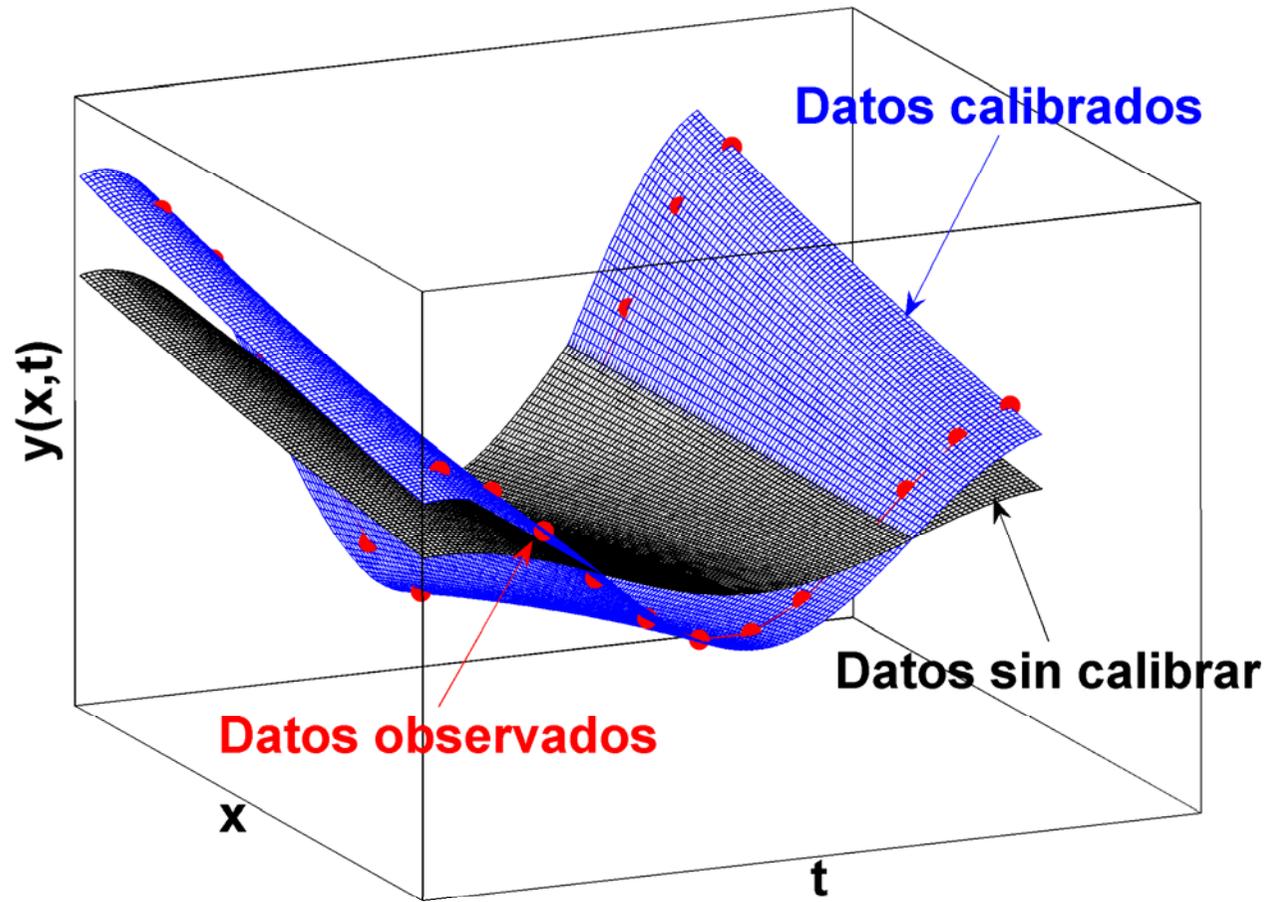


SALIDA DEL MODELO DEL DÍA 31/03/04 A LAS 00 UTC de INM / PE
 Campo de Hs (m) a las 00 GMT del día 01/04/04 / Horizonte Predicción = 24 horas
 Mar total: fondo de color. Mar de viento: → Mar de fondo: ⇒

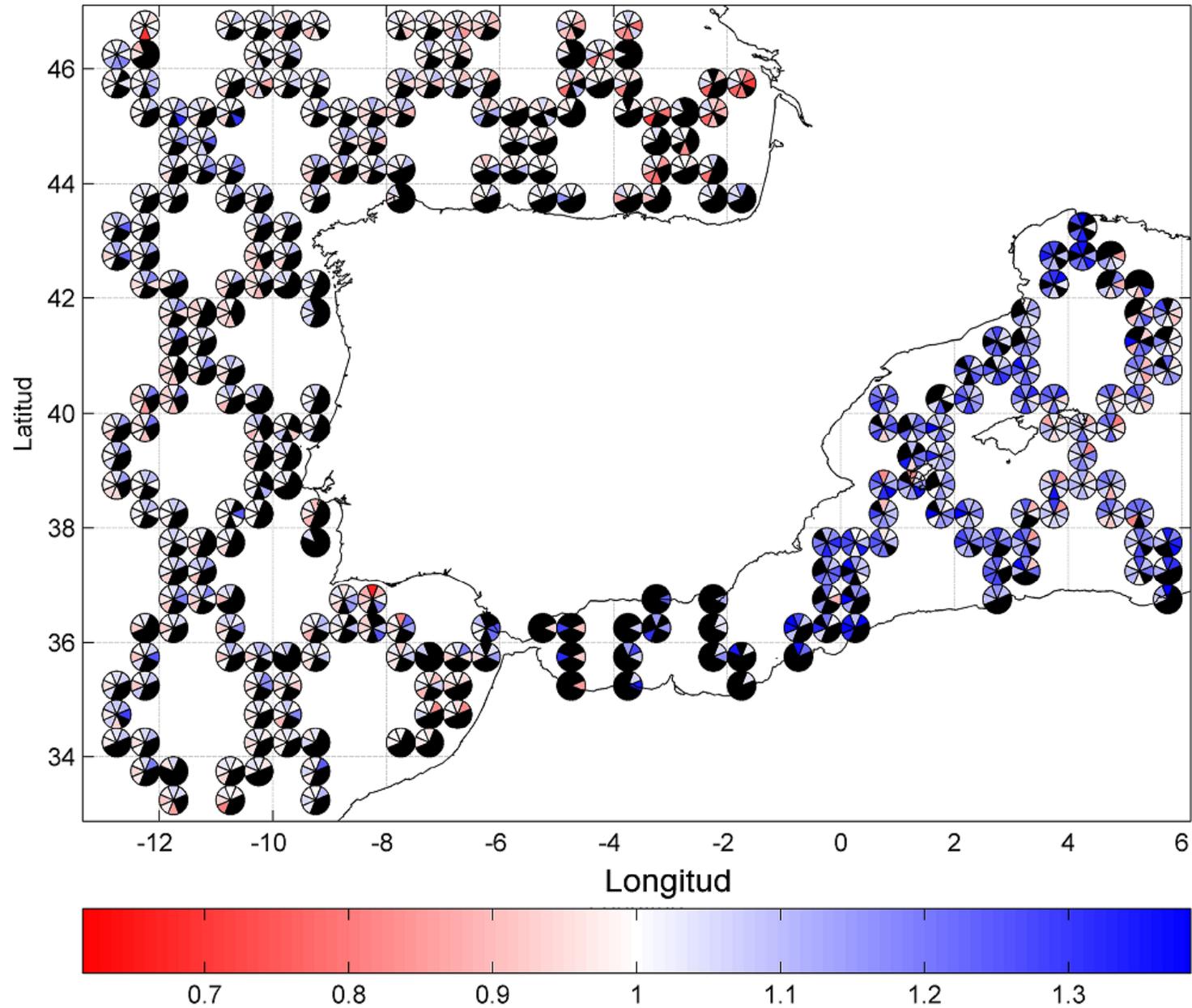






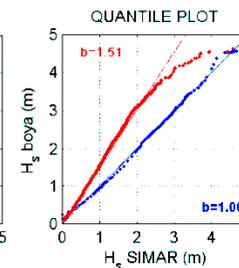
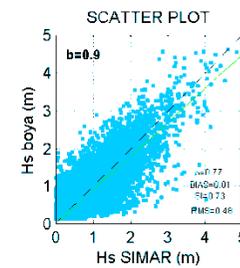
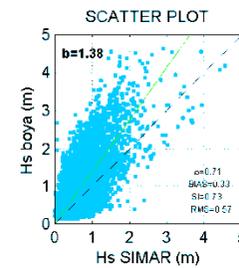
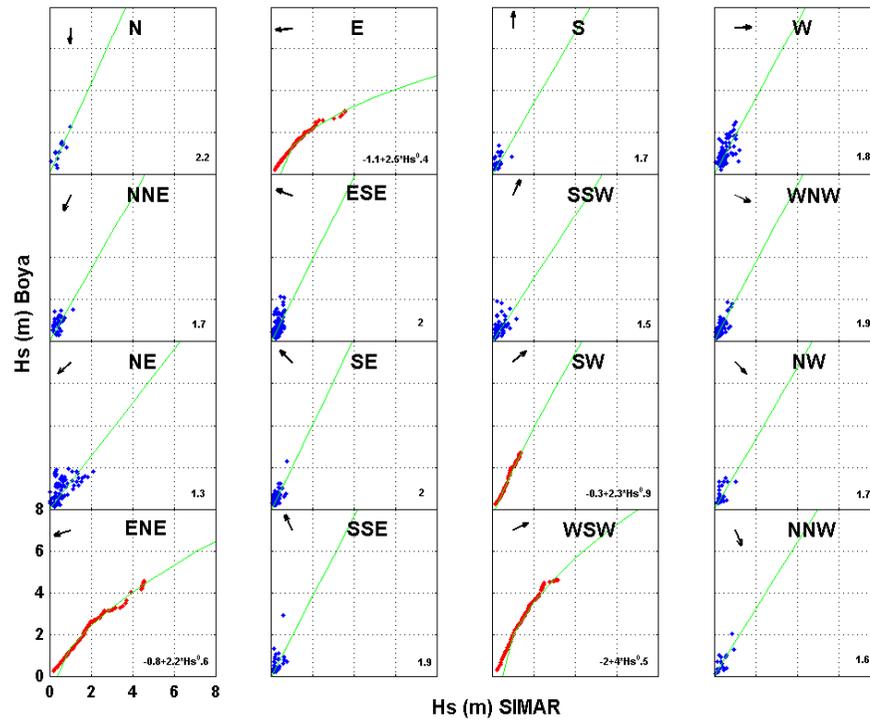


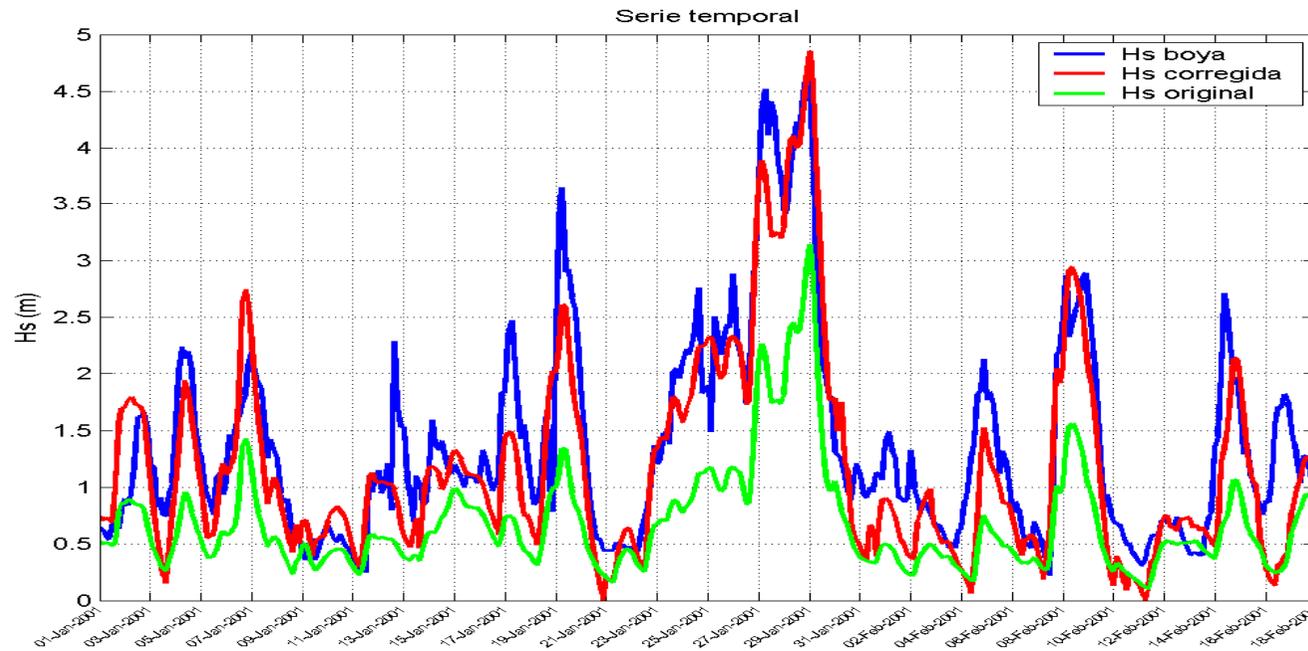
Calibración direccional SIMAR-44



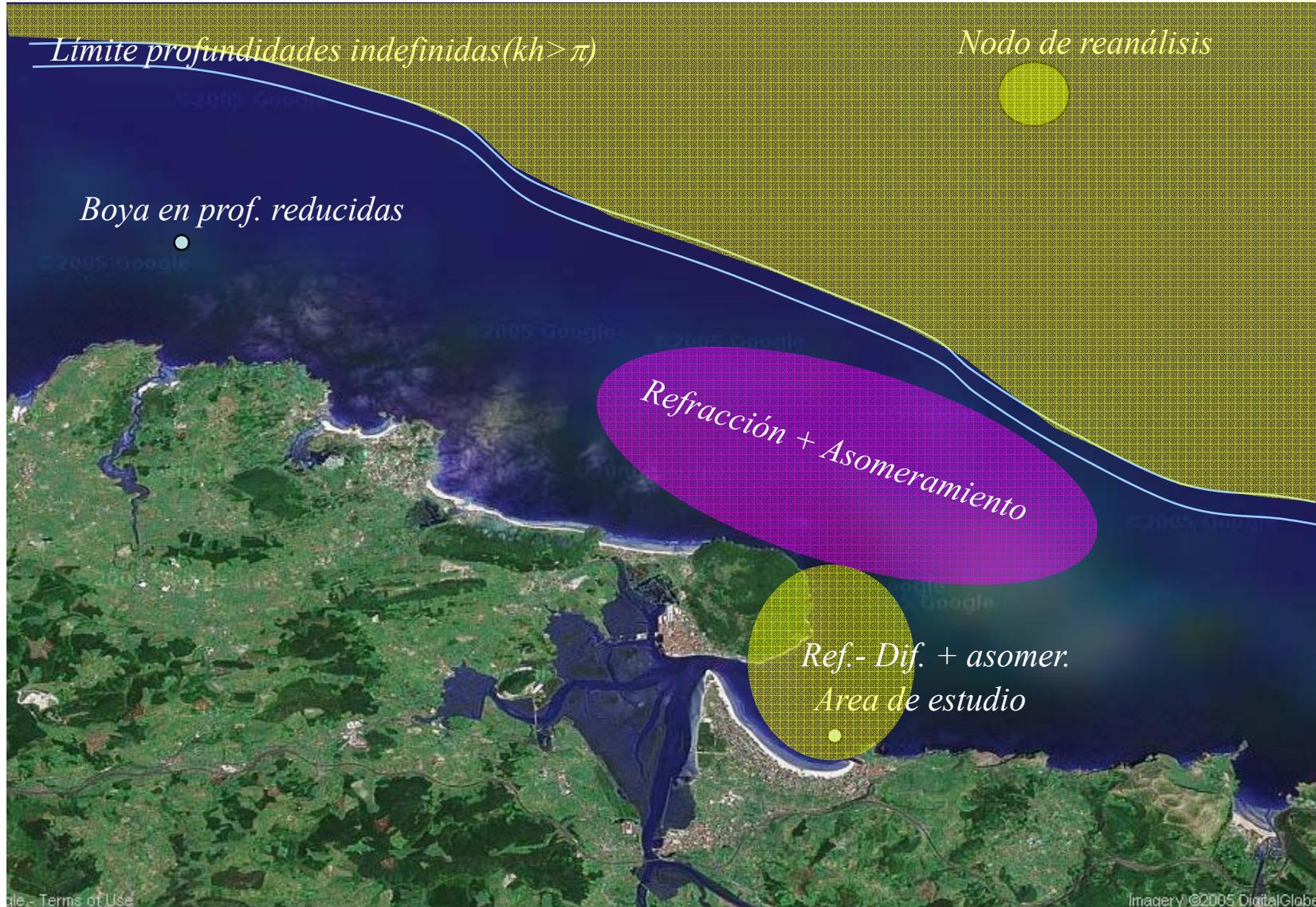


Calibración Boya-SIMAR



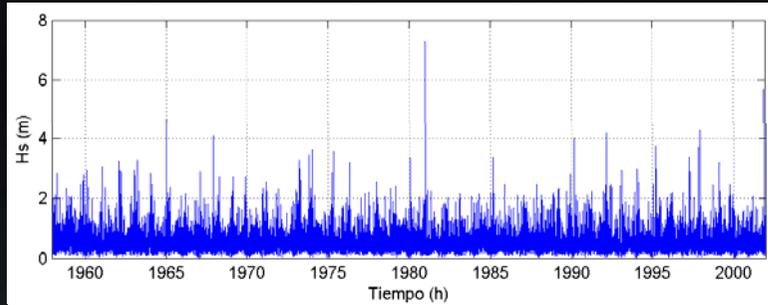




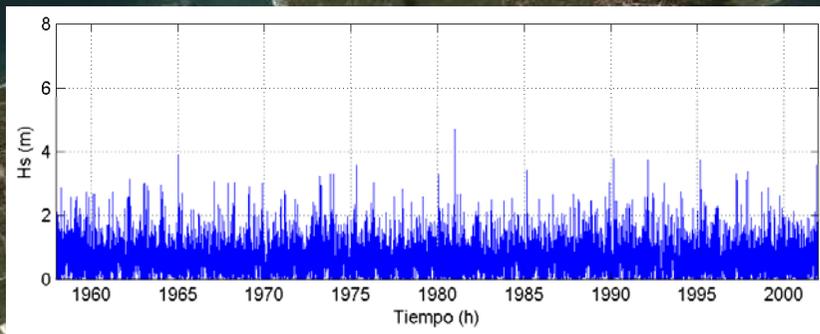


Procesos de transformación del oleaje



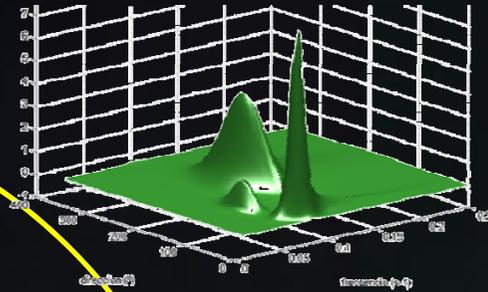
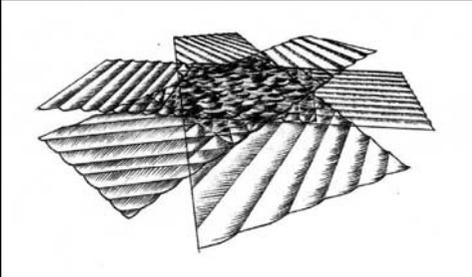


- *Curva de estados de mar en prof. indefinidas*



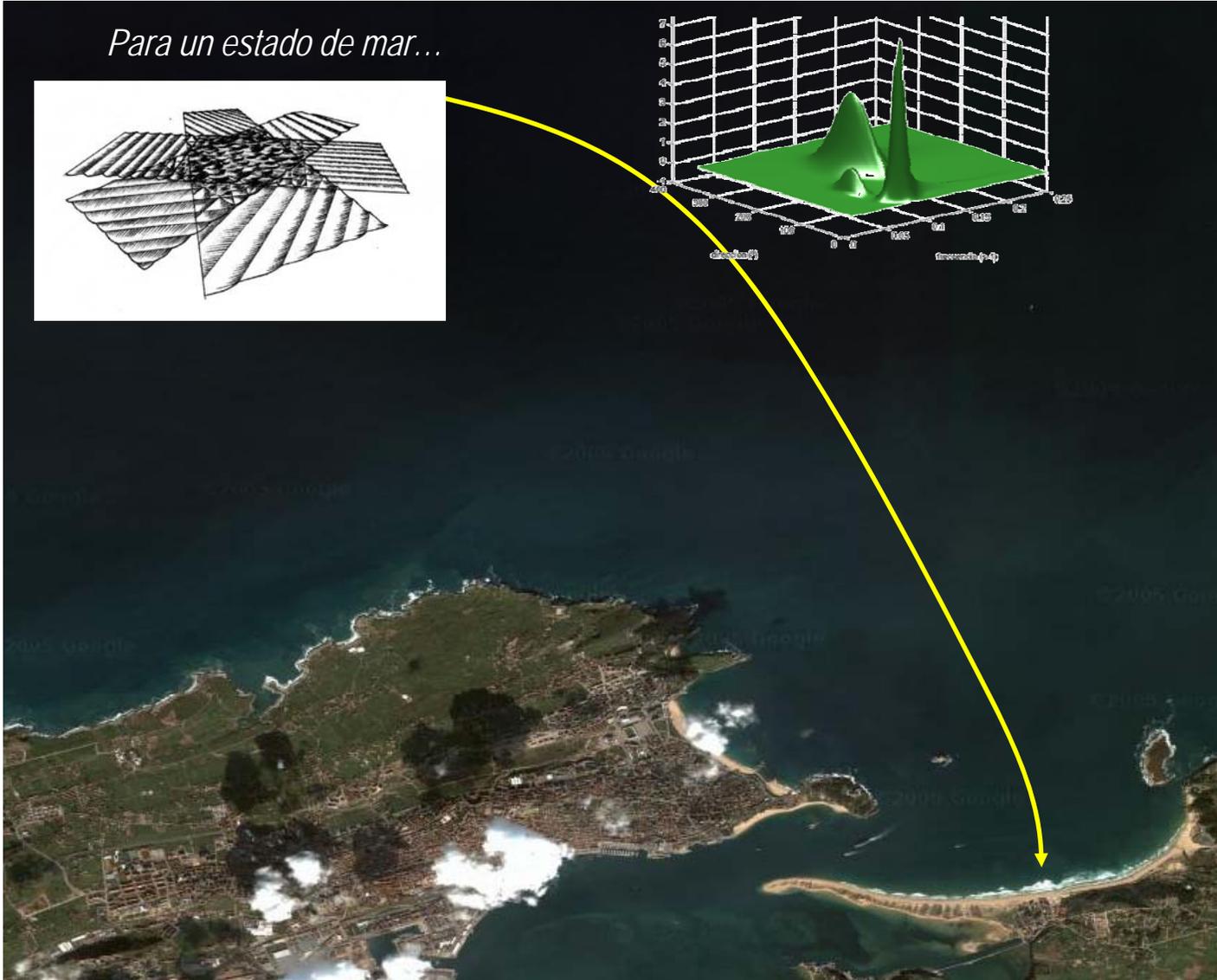
- *Curva de estados de mar en zona objetivo*

Para un estado de mar...

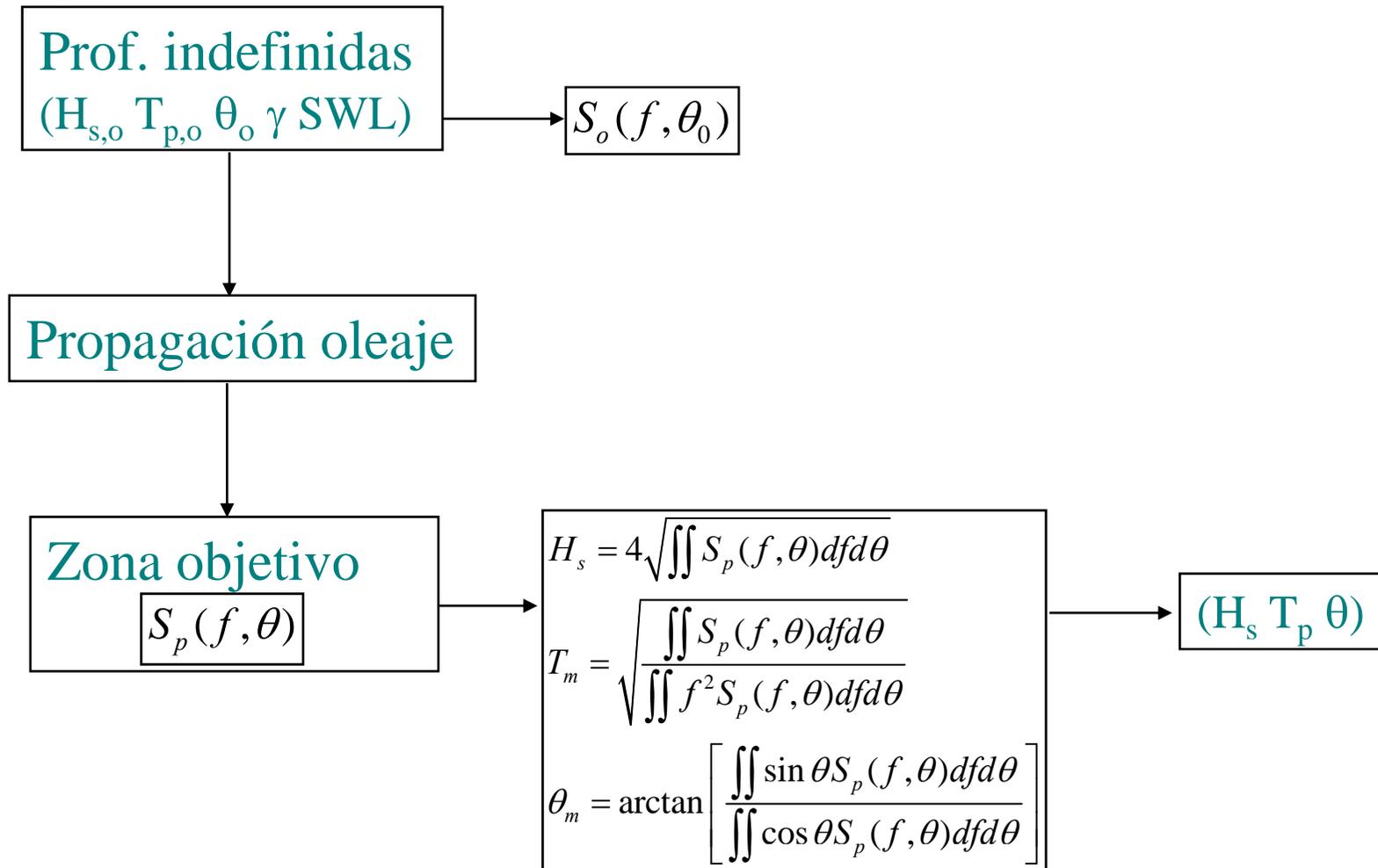


Parametrización del estado de mar

- H_s
- T_p
- θ
- γ
- SWL



Para un estado de mar...



44 años x 8766 estados de mar/año = 385.704 propagaciones

1. Batimetría recta y paralela – Monocromático

Ley de Snell

2. Batimetría recta y paralela – Espectral

Ley de Snell

3. Batimetría irregular – Espectral lineal

4. Batimetría irregular - Hipercubo

*Ecuación Energía,
Ec. Pendiente suave,
aproximación parabólica*

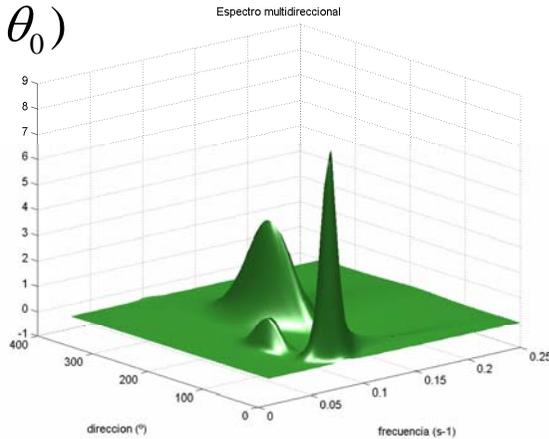
5. Batimetría irregular – clusters SOM

(4) y (5) Objetivo: reducir el número de propagaciones

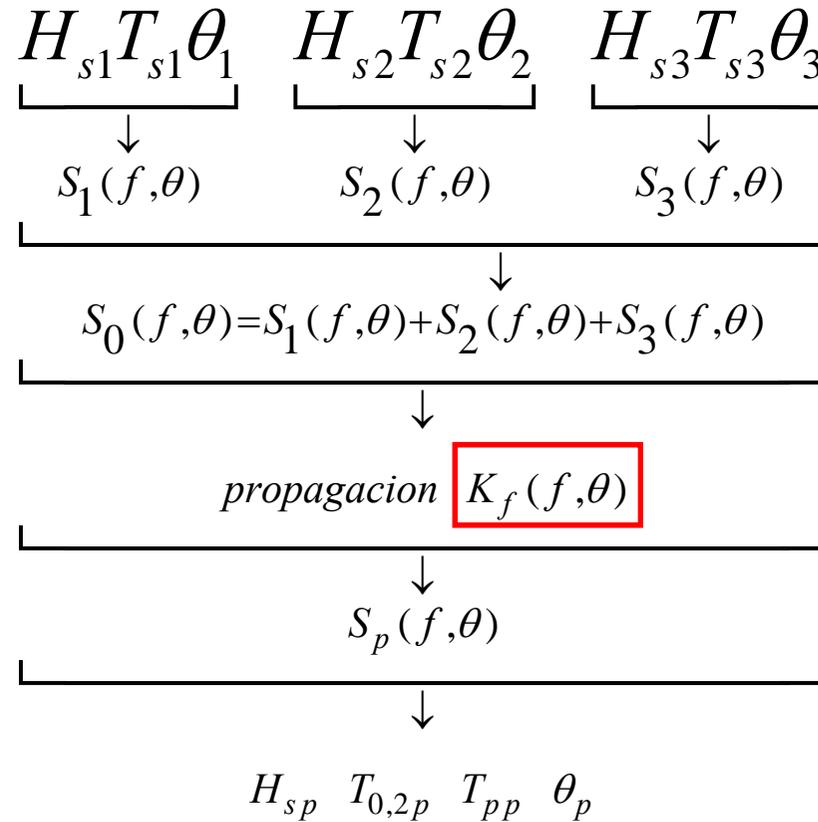
Realizar un número de propagaciones (<500) que cubra todas las posibles combinaciones de estados de mar

2) y 3) Batimetría recta y paralela / irregular – espectral lineal

$$S_0(f, \theta_0)$$



Estado de mar compuesto por: "sea" + "swell1" + "swell2"



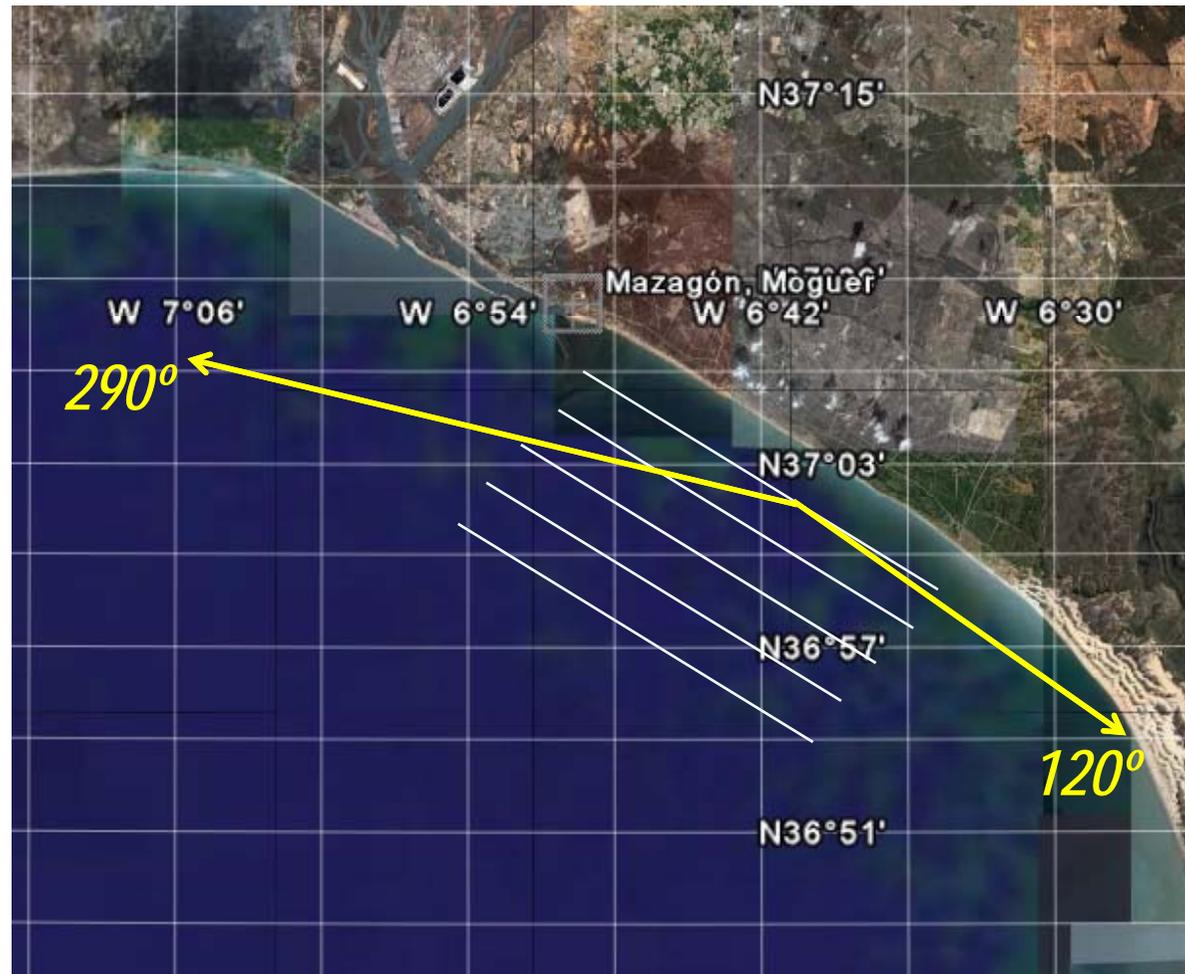
$$S_p(f, \theta) d\theta = S_0(f, \theta_0) |K_f(f, \theta_0)|^2 d\theta_0$$

$$H_s = 4 \sqrt{\iint S_p(f, \theta) df d\theta}$$

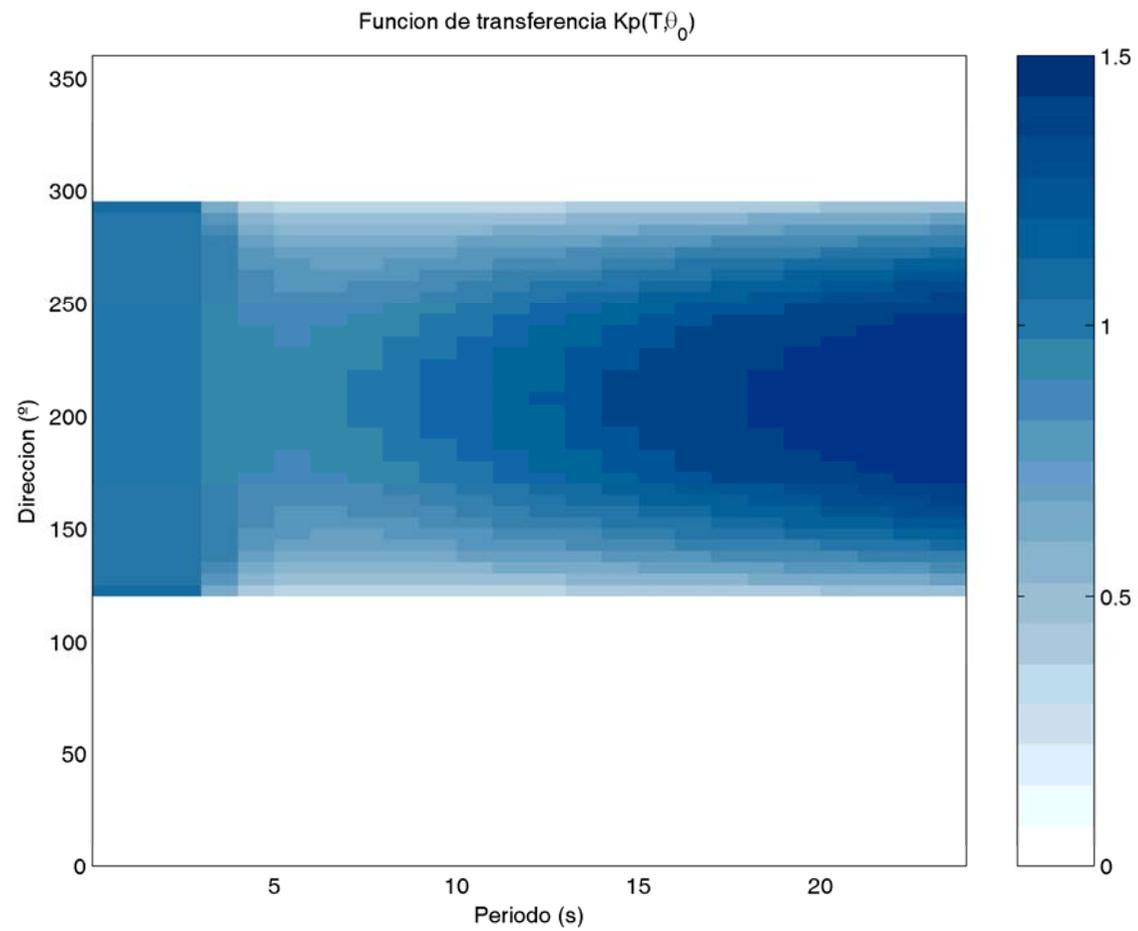
$$T_m = \sqrt{\frac{\iint S_p(f, \theta) df d\theta}{\iint f^2 S_p(f, \theta) df d\theta}}$$

$$\theta_m = \arctan \left[\frac{\iint \sin \theta S_p(f, \theta) df d\theta}{\iint \cos \theta S_p(f, \theta) df d\theta} \right]$$

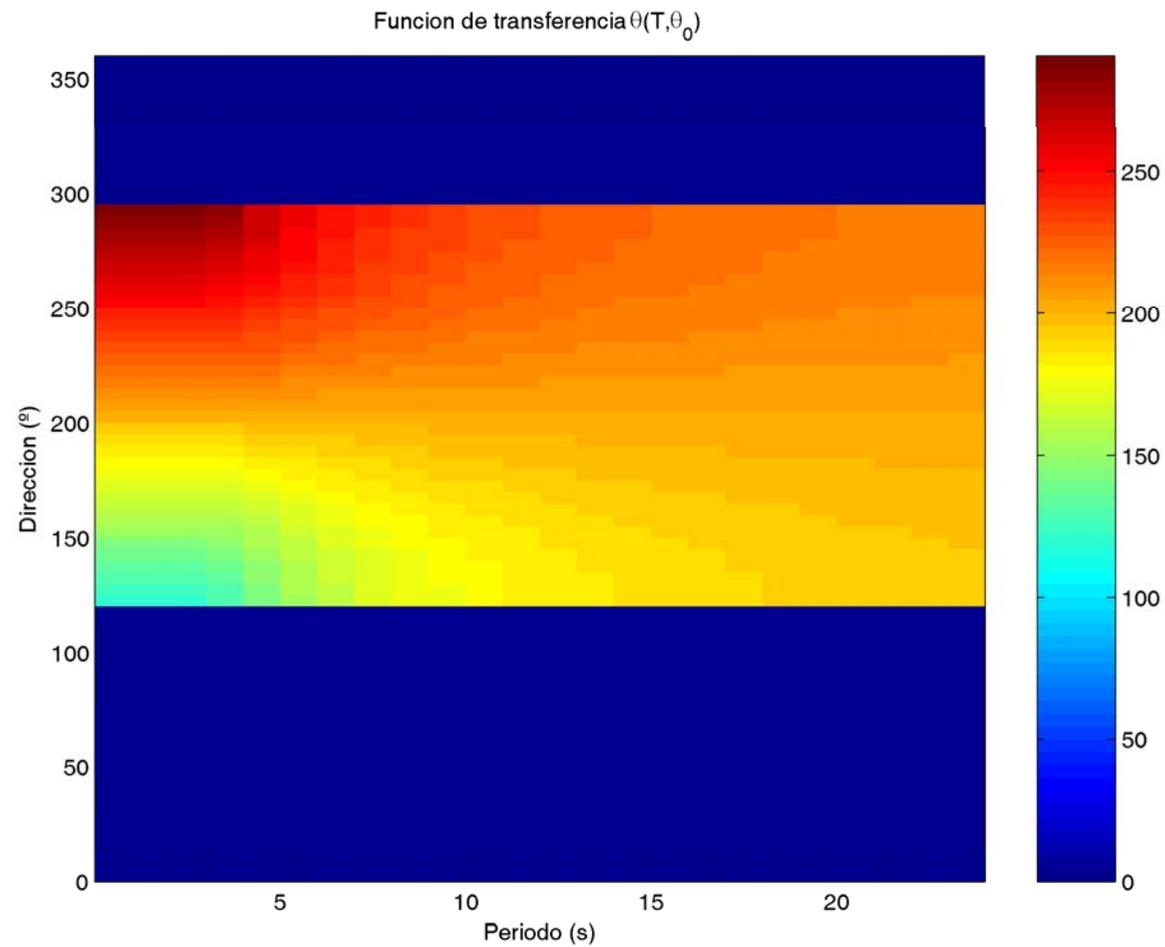
2) Batimetría recta y paralela – espectral lineal



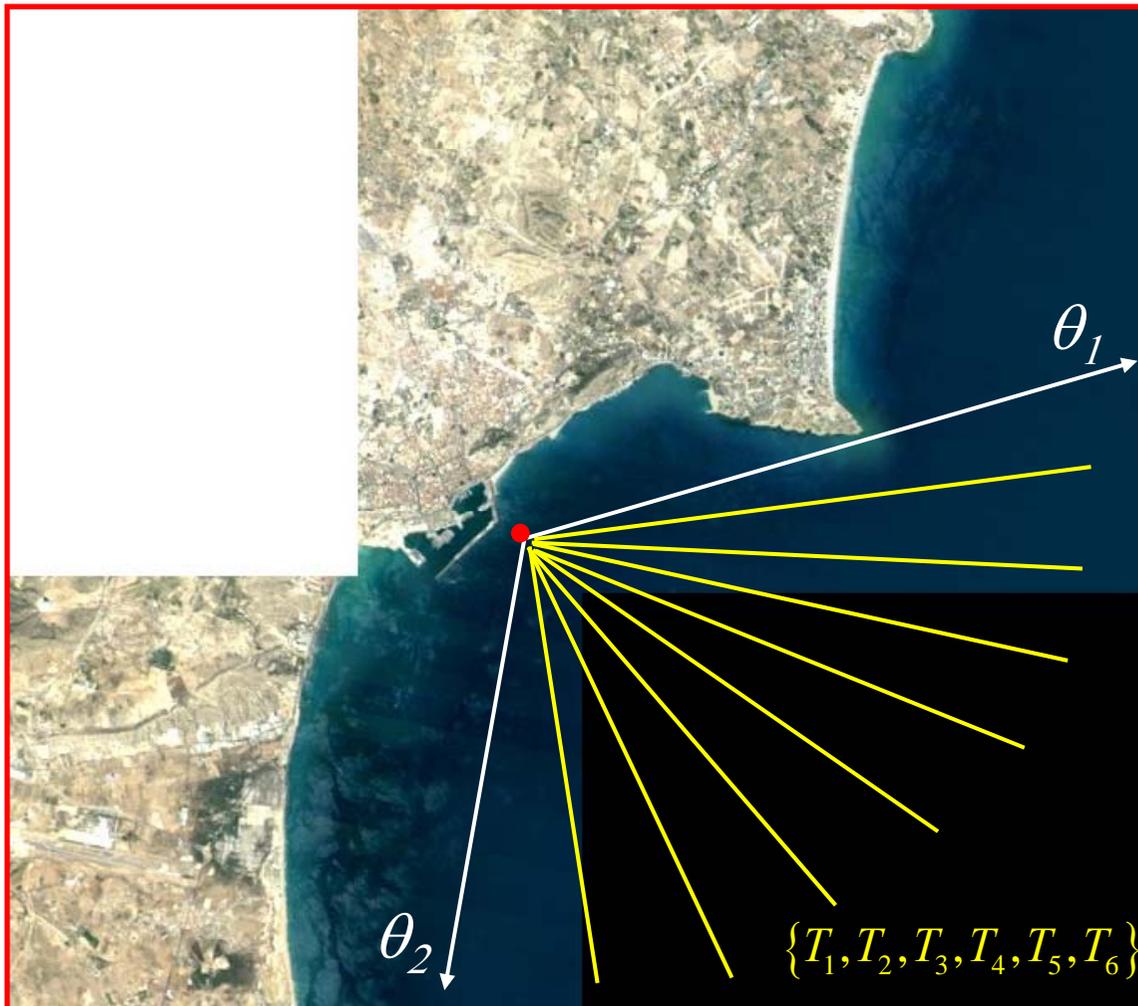
2) Batimetría recta y paralela- espectral lineal



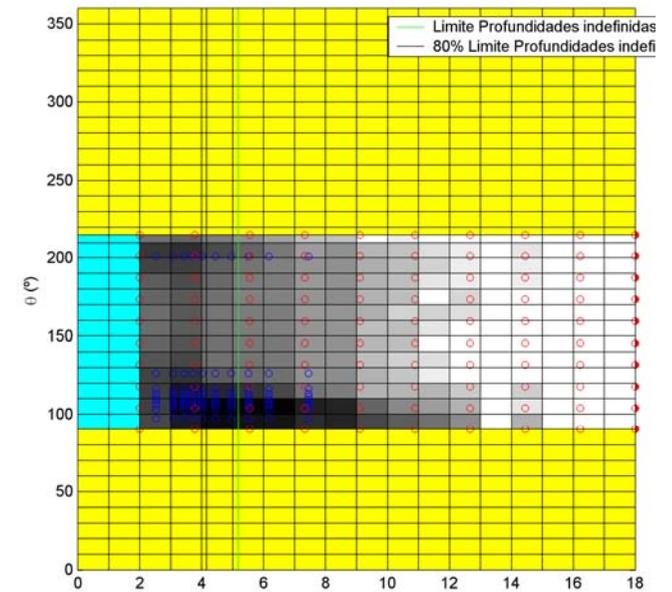
2) Batimetría recta y paralela – espectral lineal



3) Batimetría irregular – espectral lineal



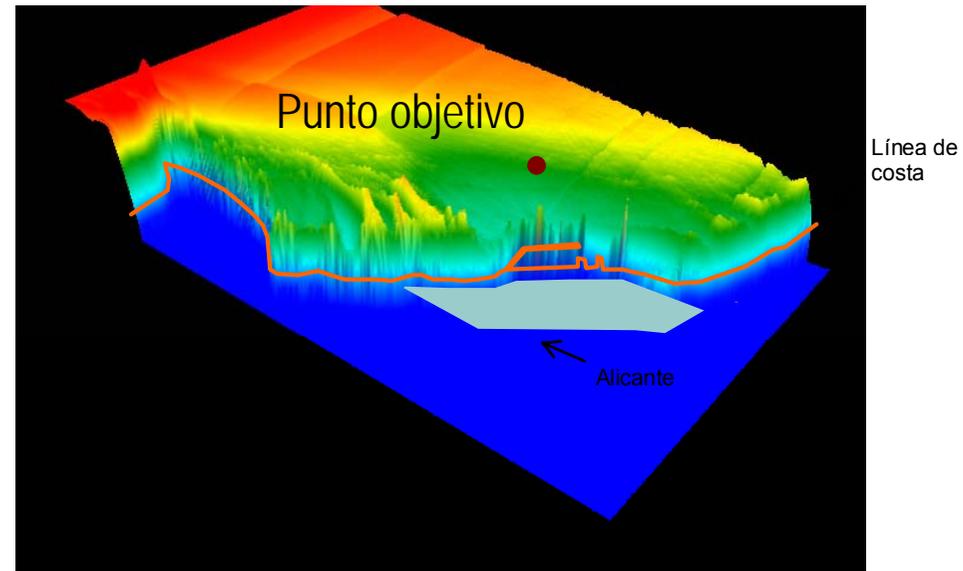
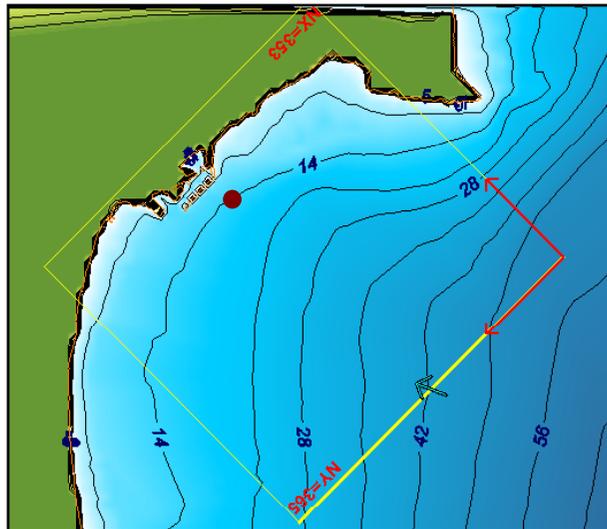
Para cada NMR



10 x 10 x 3 niveles =
300 propagaciones
monocromáticas

3) Batimetría irregular – espectral lineal

$$\{T_i, \theta_i\}$$



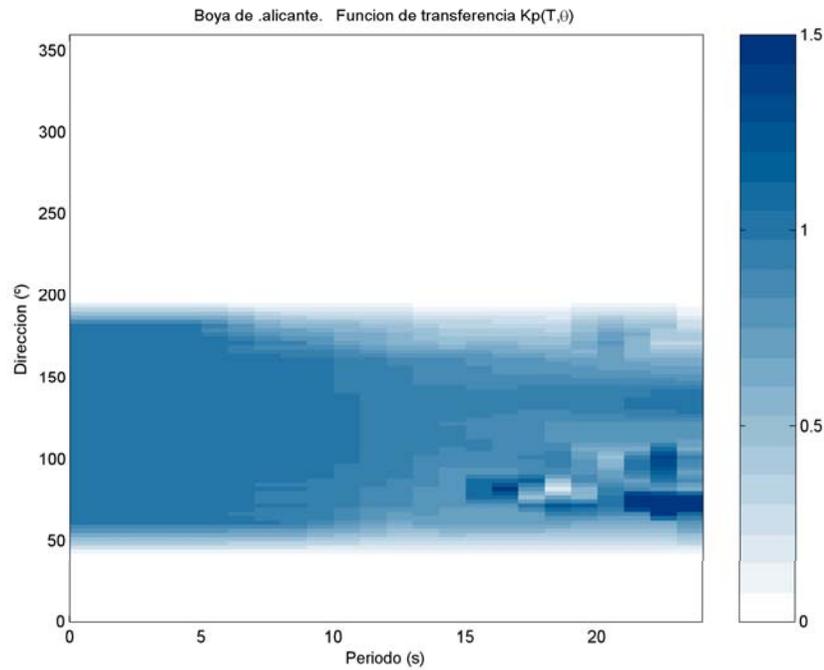
$$\Phi(x, y, z, t) = \phi(x, y) \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \exp[i\sigma t]$$

$$\nabla^2 \Phi(x, y, z, t) = 0 \rightarrow \int_{-h}^{\eta} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \nabla^2 \Phi(x, y, z, t) dz = 0$$

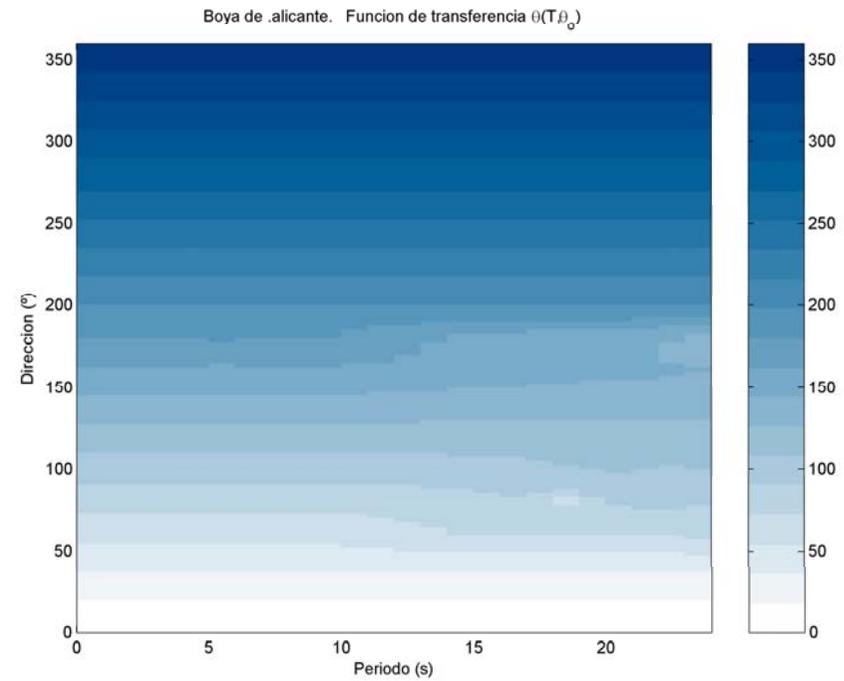
$$\nabla(CC_g \nabla \phi) + k^2 CC_g \phi = 0$$

3) Batimetría irregular – espectral lineal

$$K_f(f, \theta_0)$$



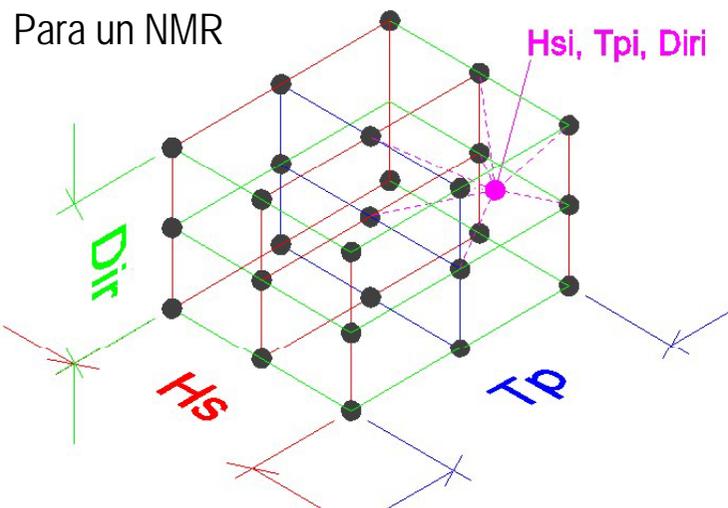
$$\theta(f, \theta_0)$$



4) Batimetría irregular : HIPERCUBO

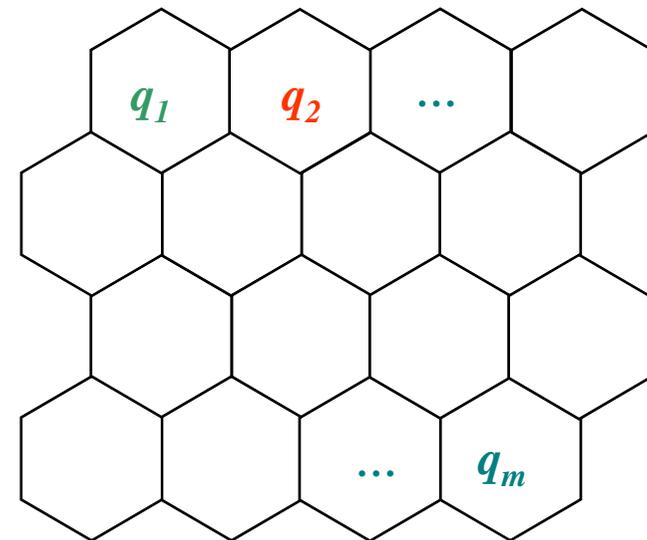
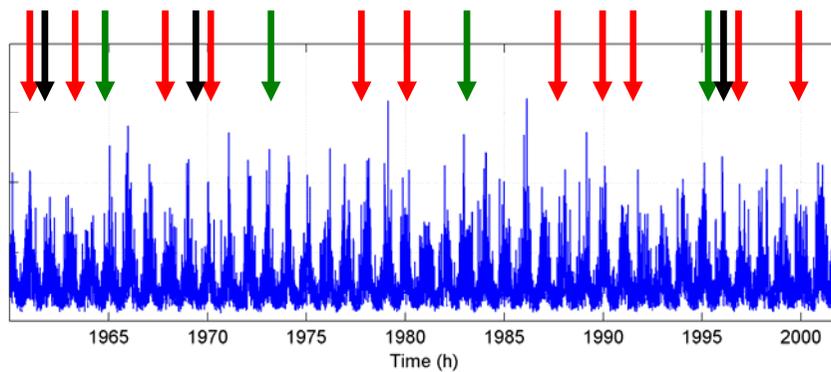
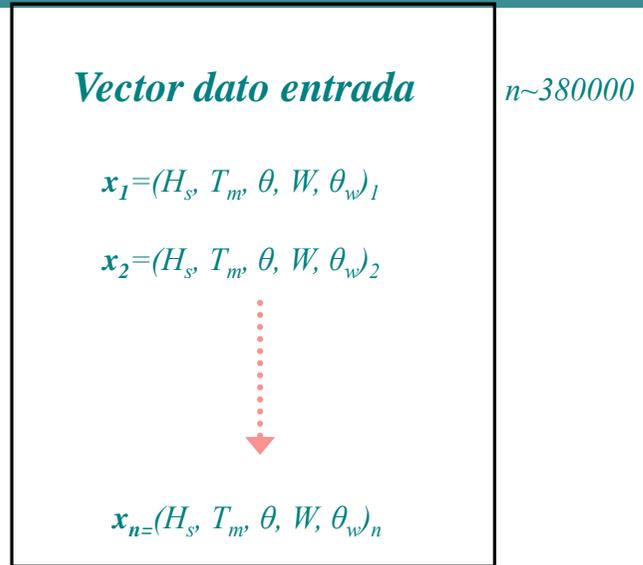
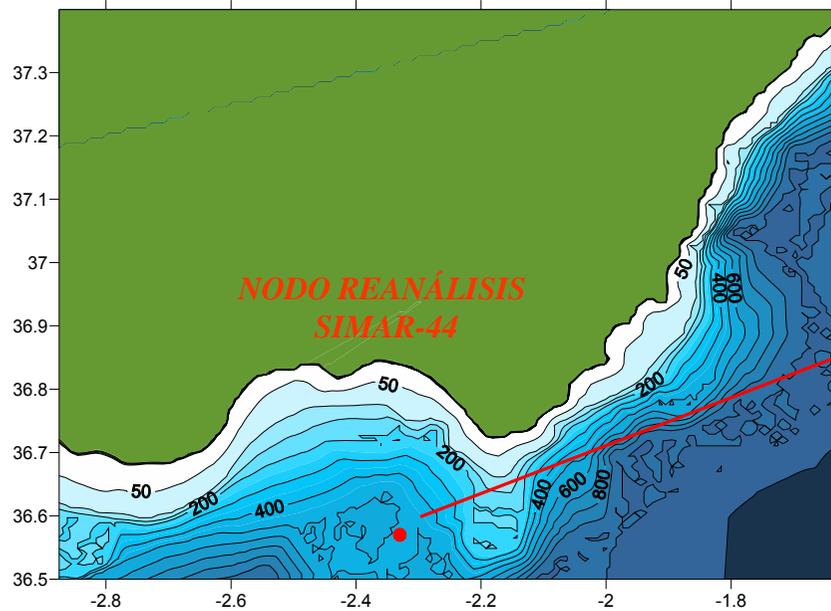
wave propagation cases							
sea level (m)		direction		SWH (m)		peak period (s)	
1	1	1	NNW	1	1,5	1	6
2	3	2	NW	2	3	2	8
		3	WNW	3	5	3	10
		4	W	4	8	4	13
		5	WSW			5	16
		6	SW			6	19
		7	SSW				

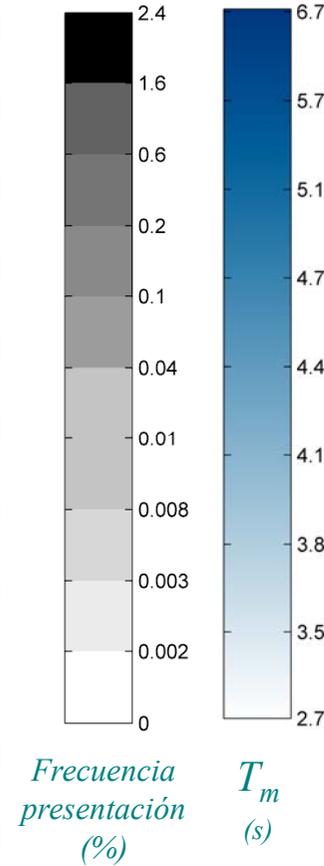
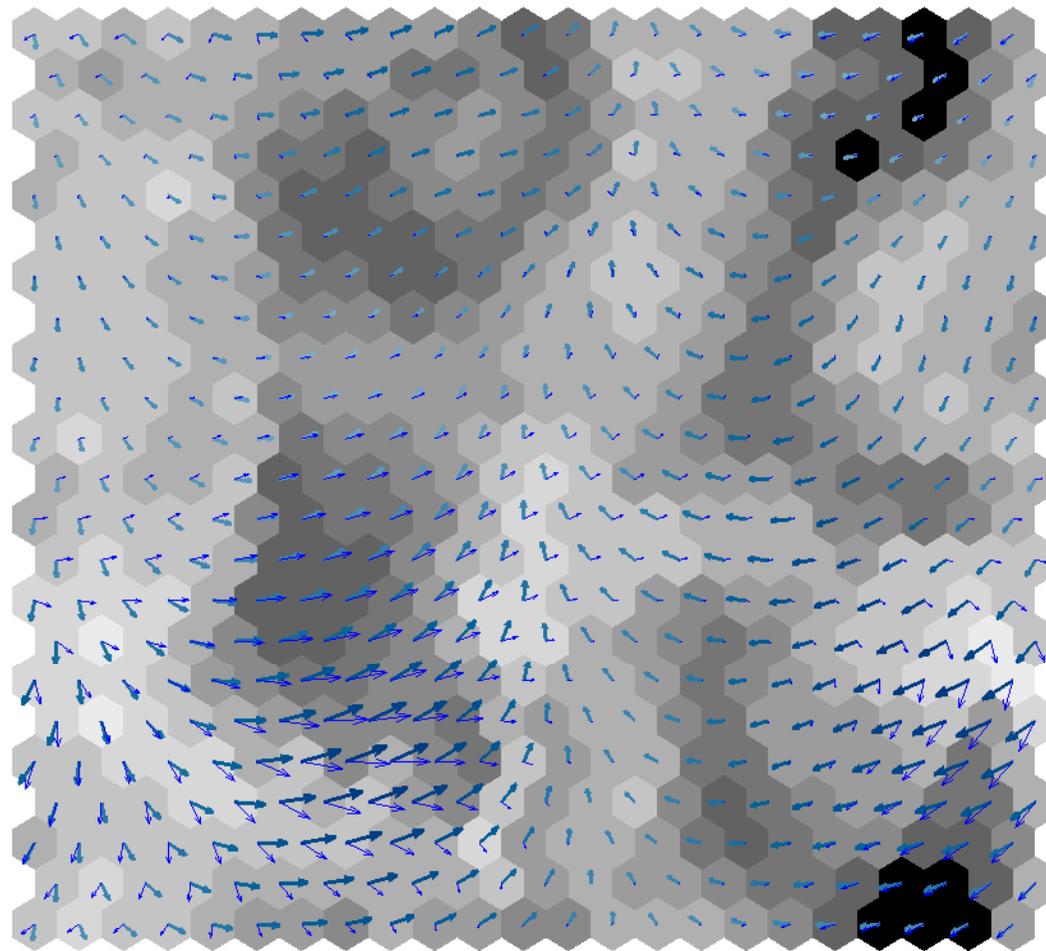
$2 \times 7 \times 4 \times 6 = 336$ propagaciones de oleaje irregular
(típico: 10×10 frecuencia-dirección para el espectro direccional)



Interpolación para obtener los parámetros locales (Hs_i, Tp_i, Dir_i)

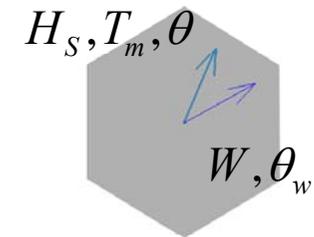
5) Batimetría irregular : SOM (Redes neuronales autoorganizativas)

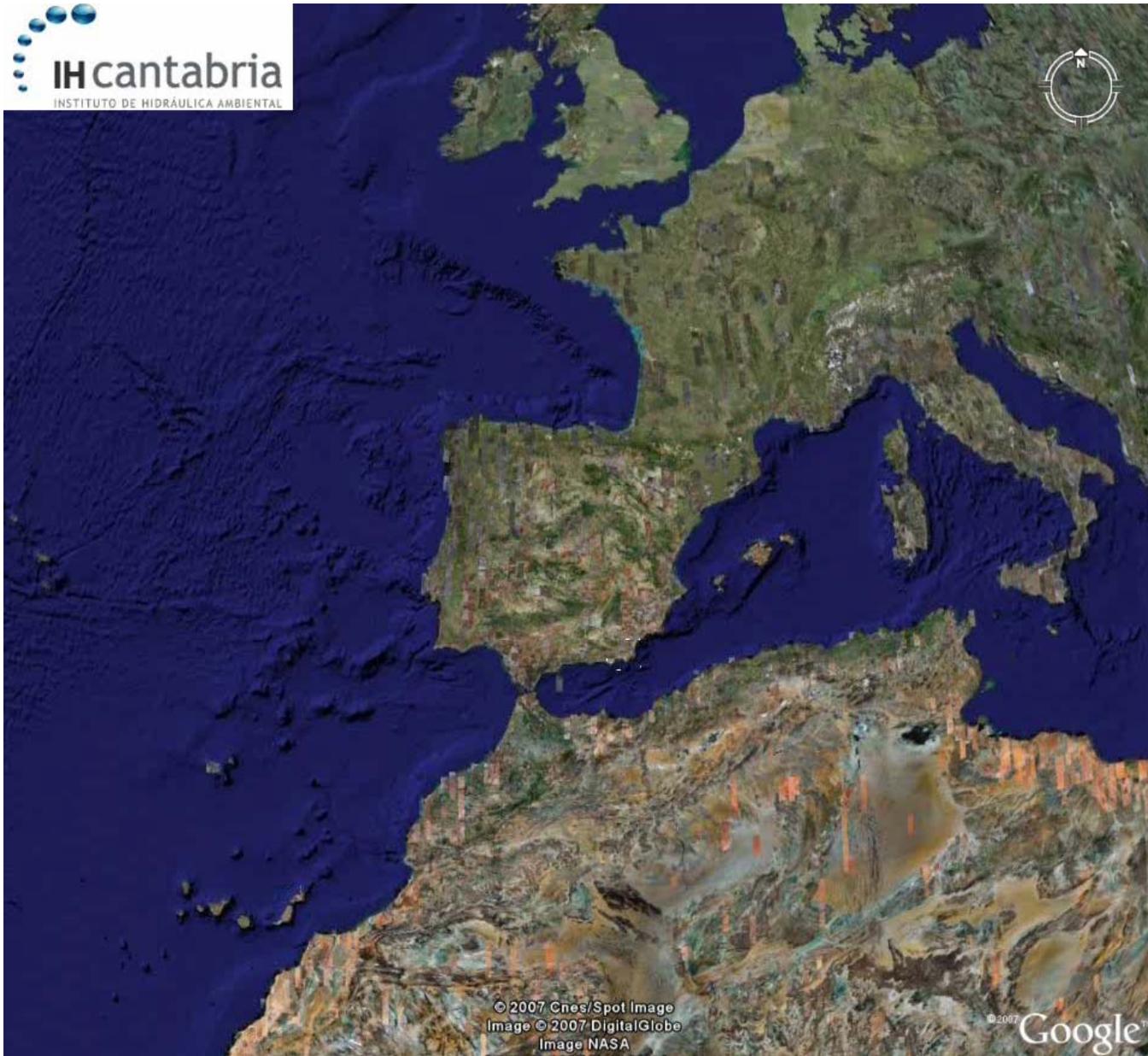


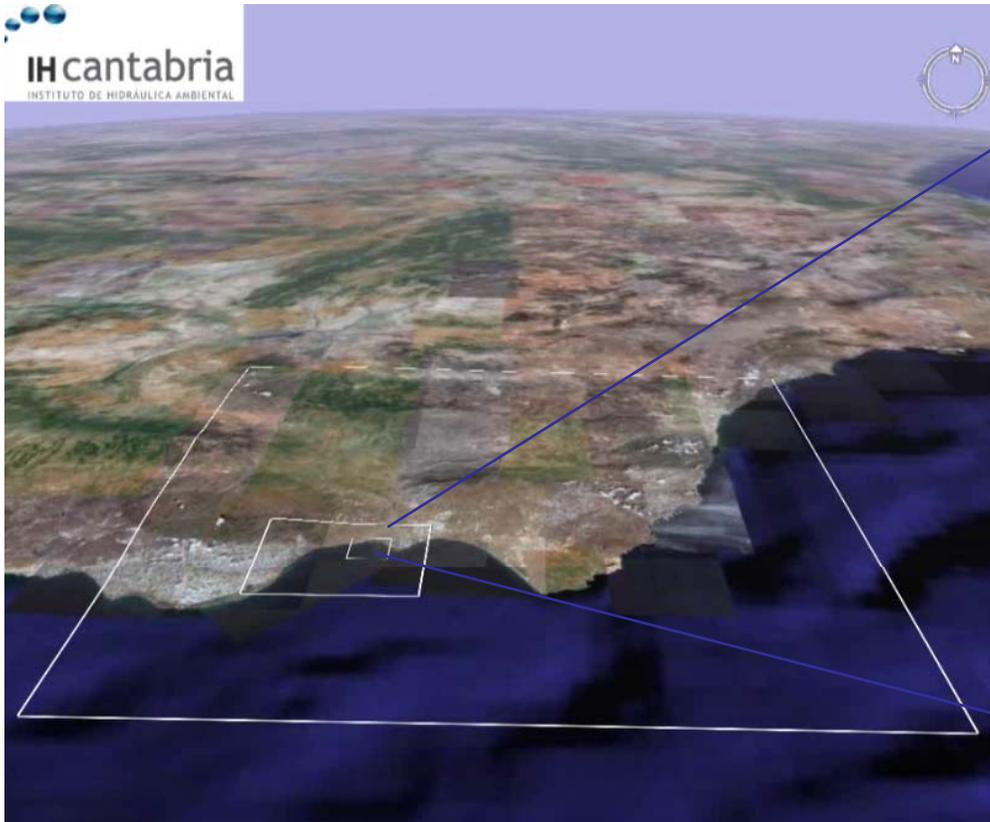


INFORMACIÓN MAPA:

- Frecuencia de ocurrencia de cada estado de mar:
- $H_s, T_m, \theta, W, \theta_w$
 - H_s : tamaño flecha gruesa
 - T_m : color flecha gruesa
 - D : dirección de la flecha gruesa
 - W : tamaño flecha fina
 - θ_w : dirección flecha gruesa.



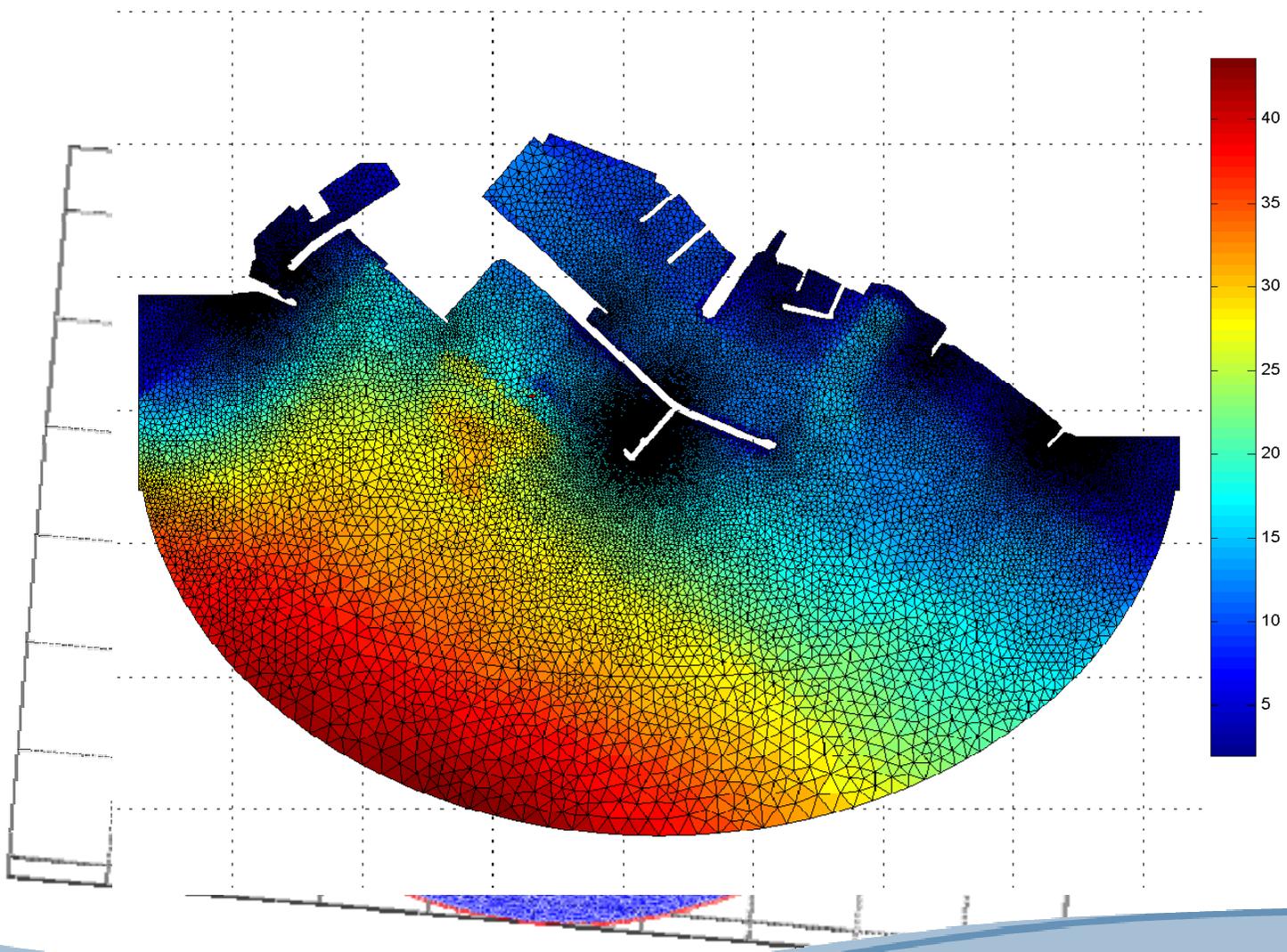




Modelo SWAN

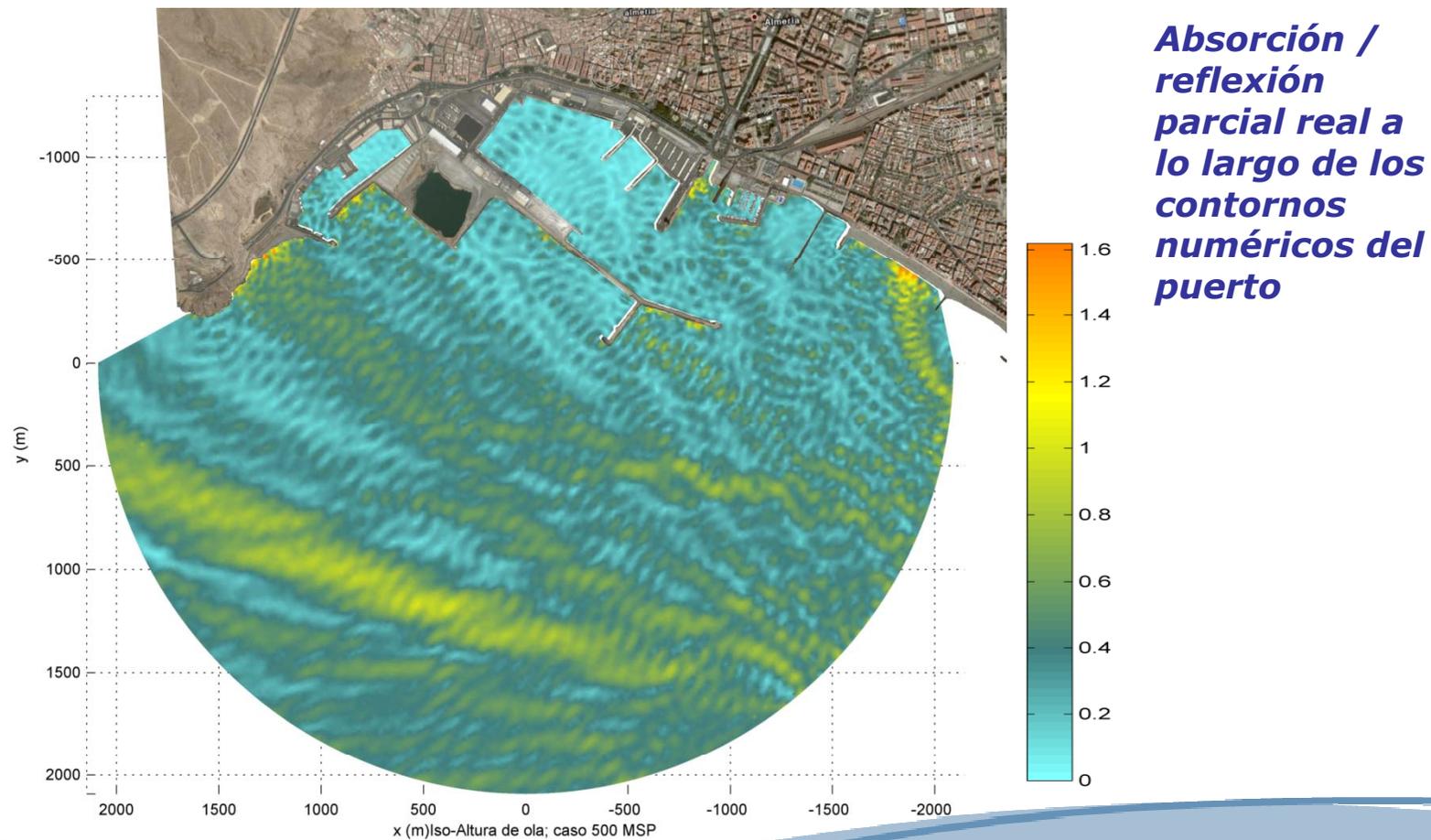


Modelos MSP / MANOLO



Resultados modelo MSP (ejemplo)

Altura de ola significativa MSP, caso 500; $H_s=0.43$ m; $T_p = 4.64$ s; $\Theta=S33E$



● *Serie en profundidades indefinidas*

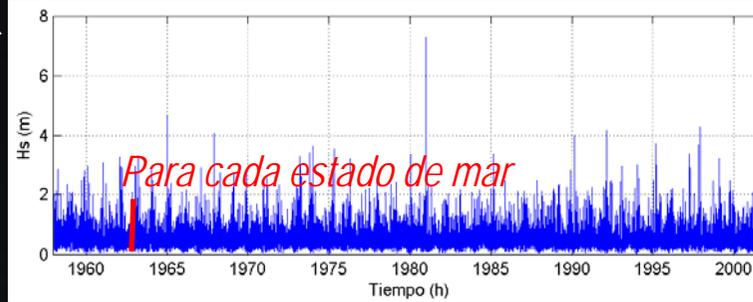
$$\underbrace{H_{s1} T_{s1} \theta_1}_{S_1(f, \theta)} \quad \underbrace{H_{s2} T_{s2} \theta_2}_{S_2(f, \theta)} \quad \underbrace{H_{s3} T_{s3} \theta_3}_{S_3(f, \theta)}$$

$$S_0(f, \theta) = S_1(f, \theta) + S_2(f, \theta) + S_3(f, \theta)$$

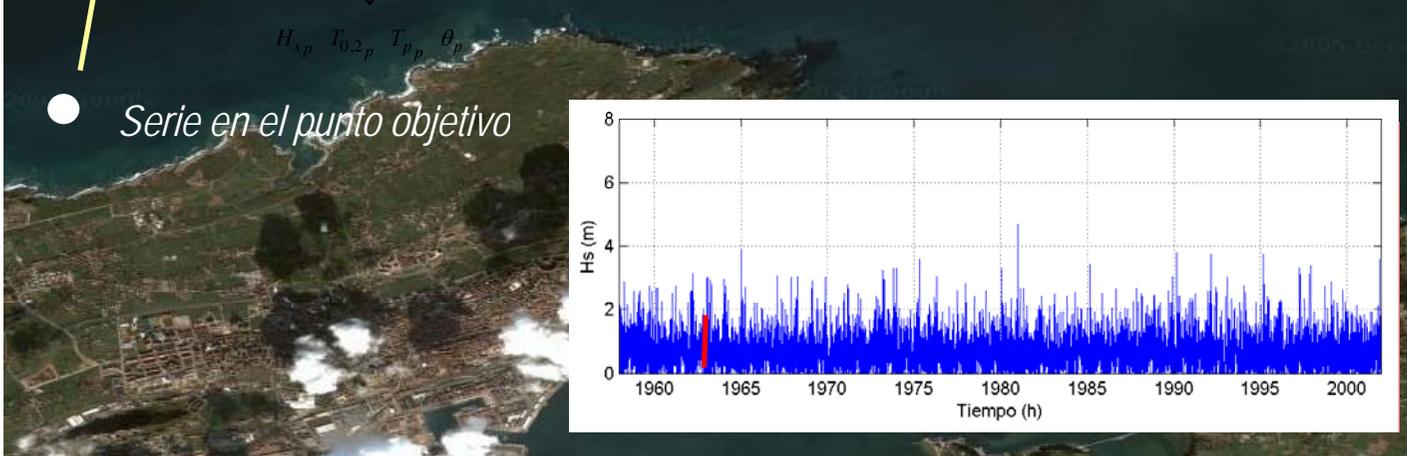
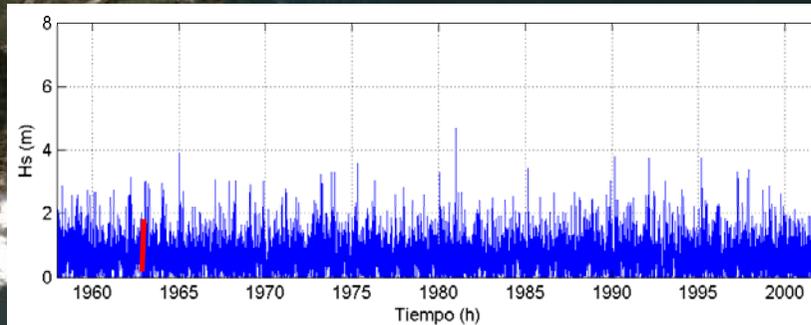
propagation $K_f(f, \theta)$

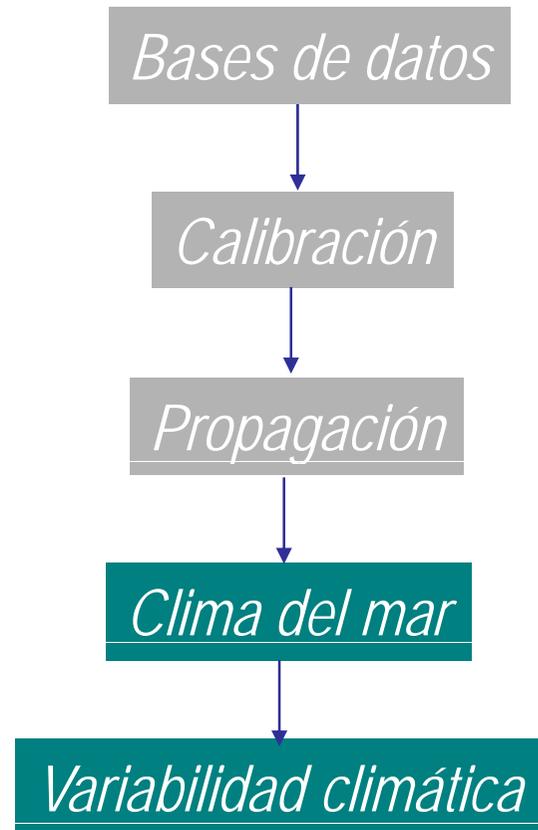
$$S_p(f, \theta)$$

$$H_{sp} \quad T_{0,2p} \quad T_{pp} \quad \theta_p$$



● *Serie en el punto objetivo*



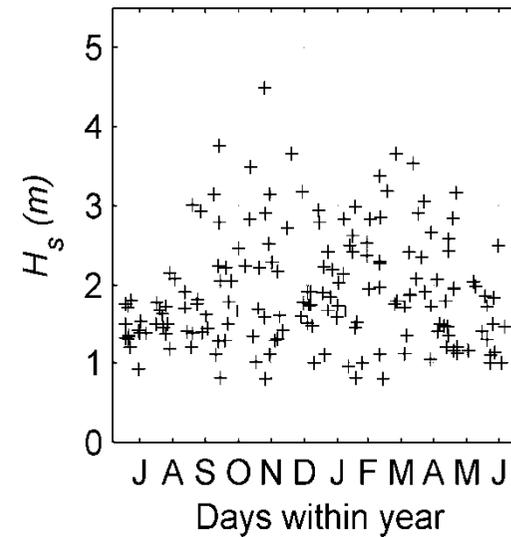
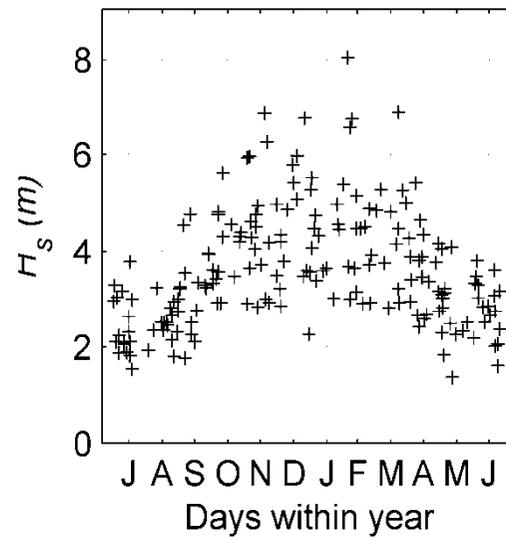


Escalas temporales de interés

Estacional

Interanual

Secular

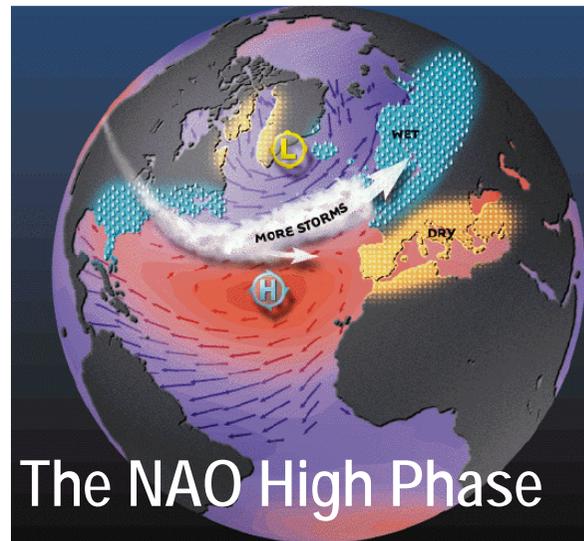


Escalas temporales de interés

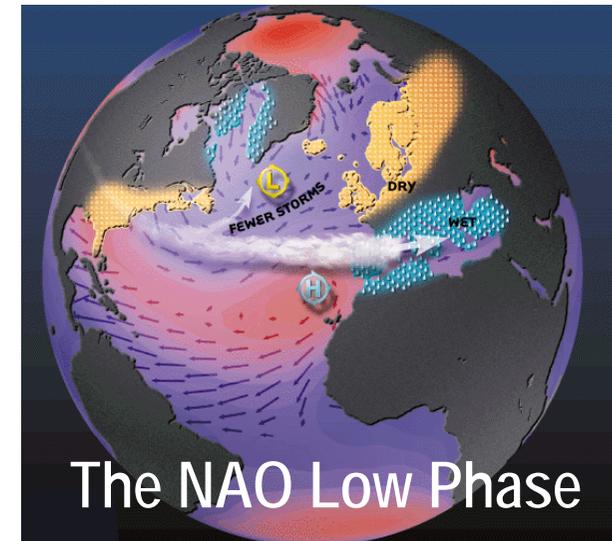
Estacional

Interanual

Secular



- Stronger subtropical high
- Deeper Icelandic Low
- Increased pressure difference
- Stronger storms move north
- Warm & wet winters in Europe
- Cold & dry winters in Canada
- Mild & wet winters in East US
- Intense “vortex” (circumpolar winds in stratosphere)



- Weak Icelandic low
- Weak subtropical high
- Less Pressure difference
- Fewer storms move west
- Mediterranean is moist
- Northern Europe is cold
- US east coast is cold & snowy
- Weak stratospheric polar vortex

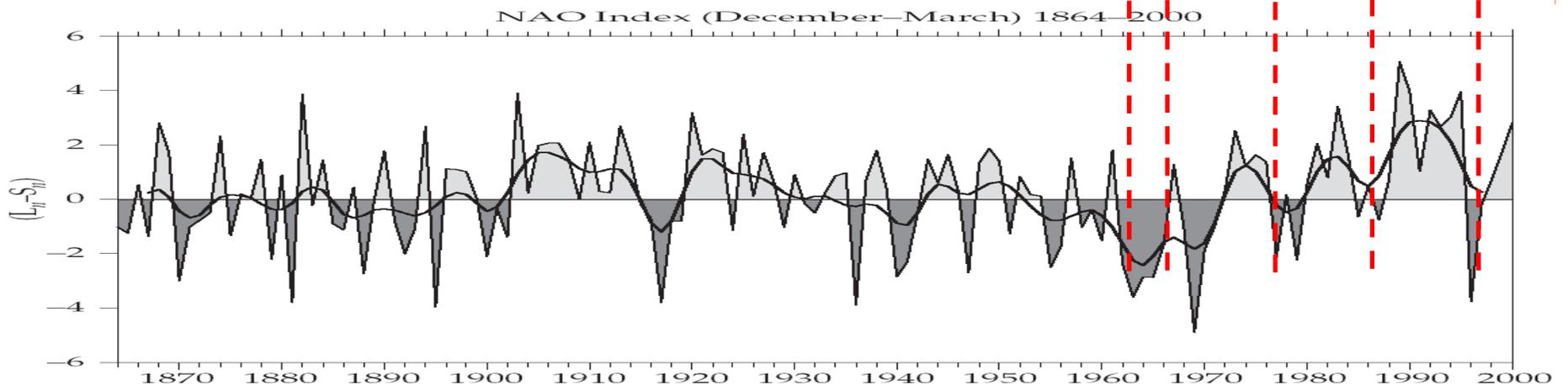
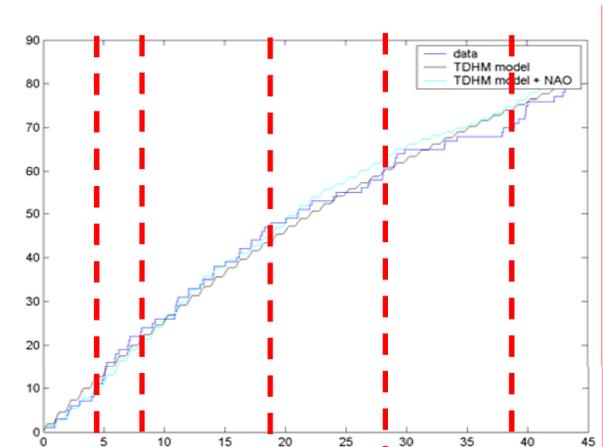
Escalas temporales de interés

- Higher rate of occurrence of extreme events in the Mediterranean during a negative NAO phase

Estacional

Interanual

Secular

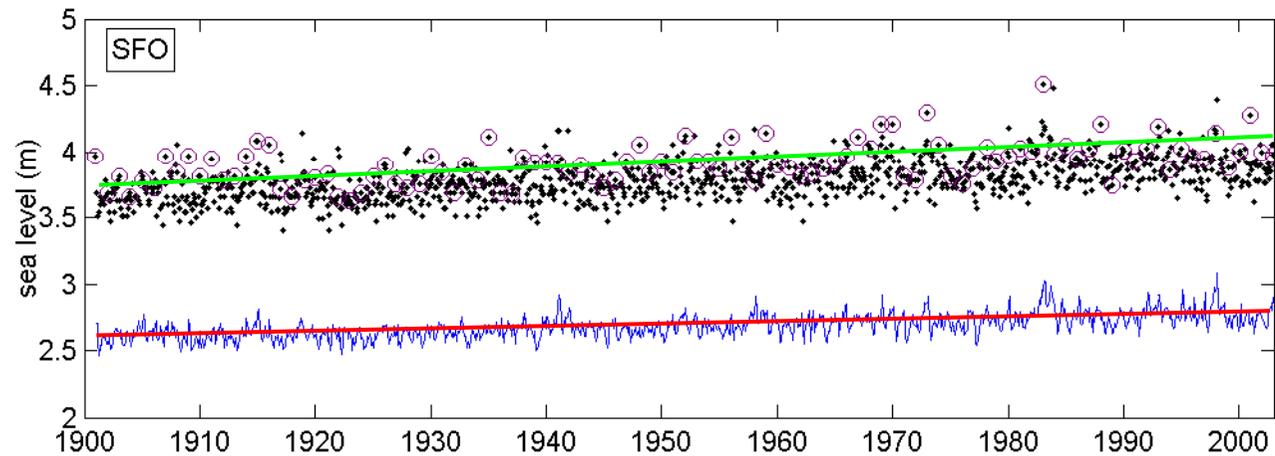


Escalas temporales de interés

Estacional

Interanual

Secular



VARIABLES ESCALARES

- Distribución mensual de **Lognormal**

- Parametros: μ , σ .

$$f(Hs; \mu, \sigma) = \frac{1}{Hs\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(\ln(Hs) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$



Unidad de tiempo = 1 mes

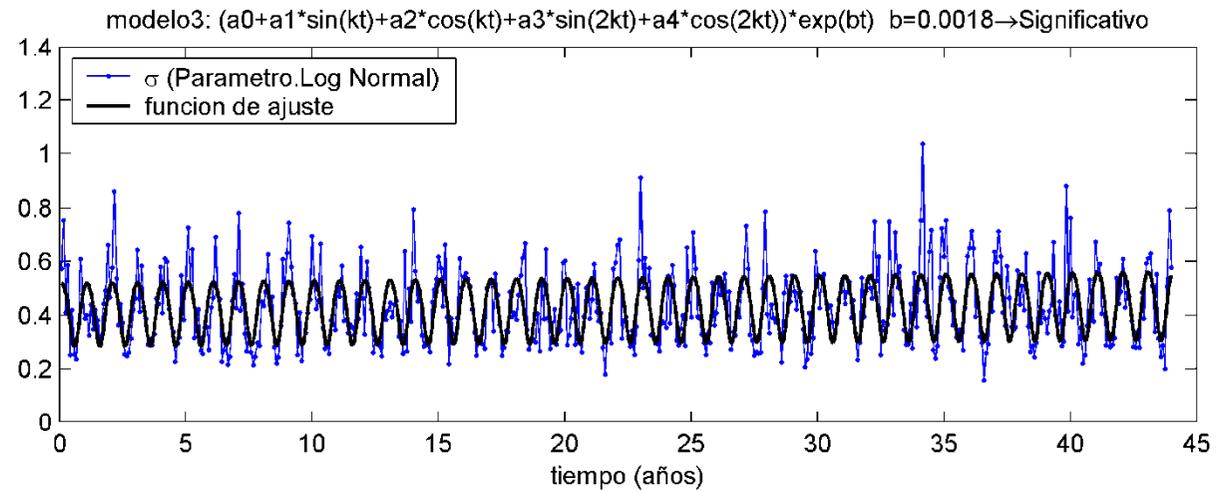
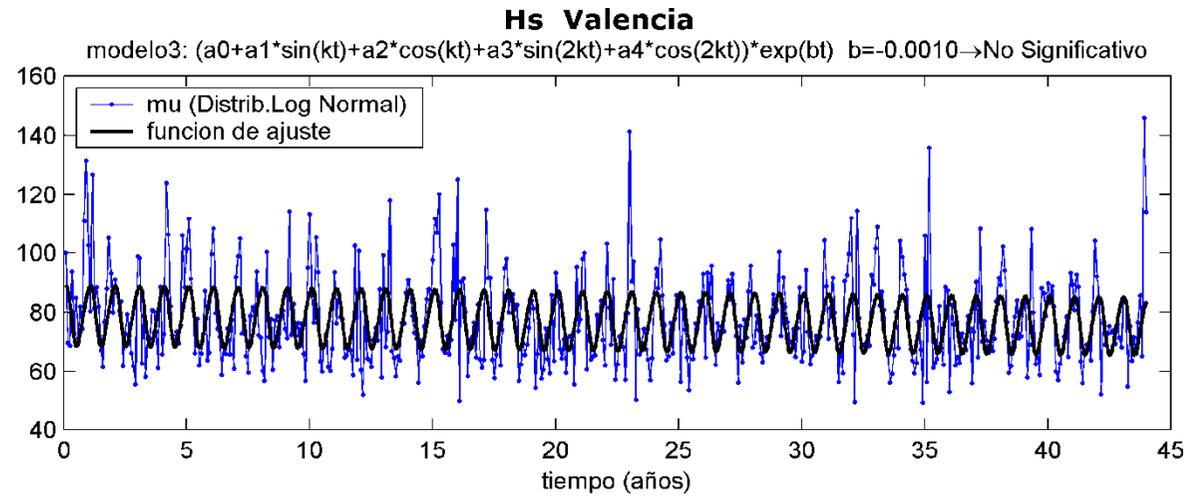


Ajuste a modelo no lineal con estacionalidad y tendencia de largo plazo

$$[\beta_0 + \beta_1 \cdot \text{sen}(kt) + \beta_2 \cos(kt) + \beta_3 \text{sen}(2kt) + \beta_4 \cos(2kt)] \cdot e^{\beta_5 t}$$

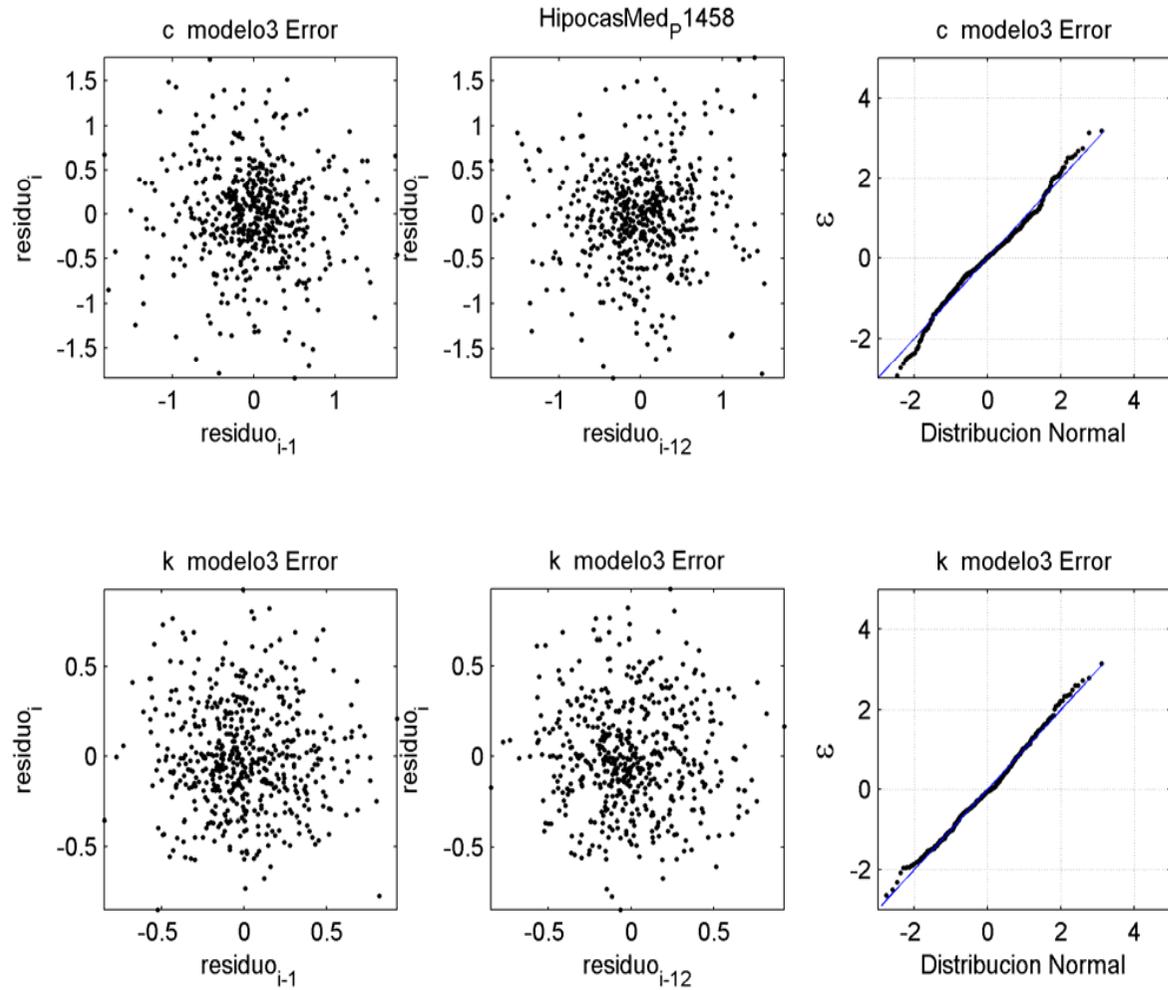
Tendencias régimen medio

ajuste



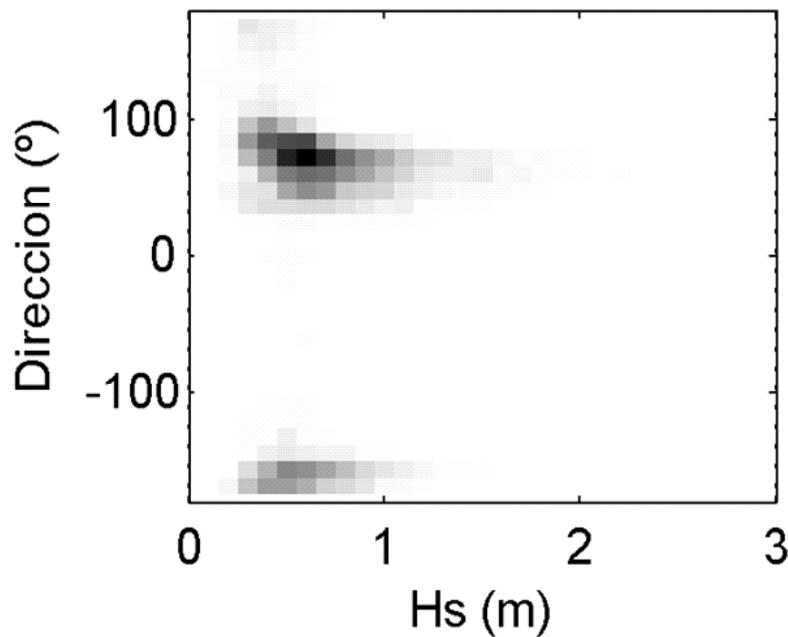
Tendencias régimen medio

Bondad ajuste

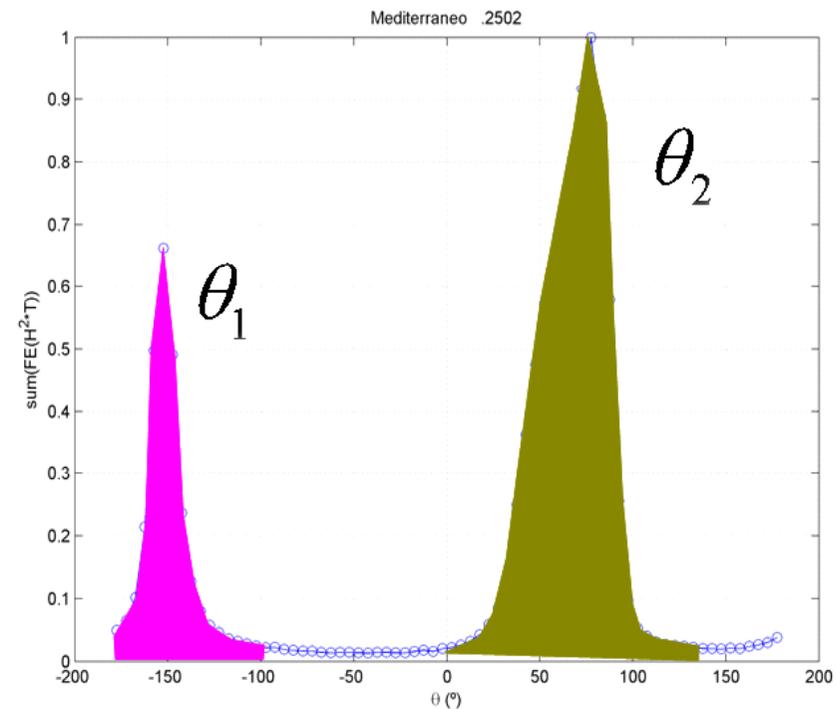


VARIABLES DIRECCIONALES

$$\vec{F}_E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \vec{c}_g = \frac{1}{8} \rho g H^2 c_g (\cos \theta_H \vec{i} + \sin \theta_H \vec{j})$$

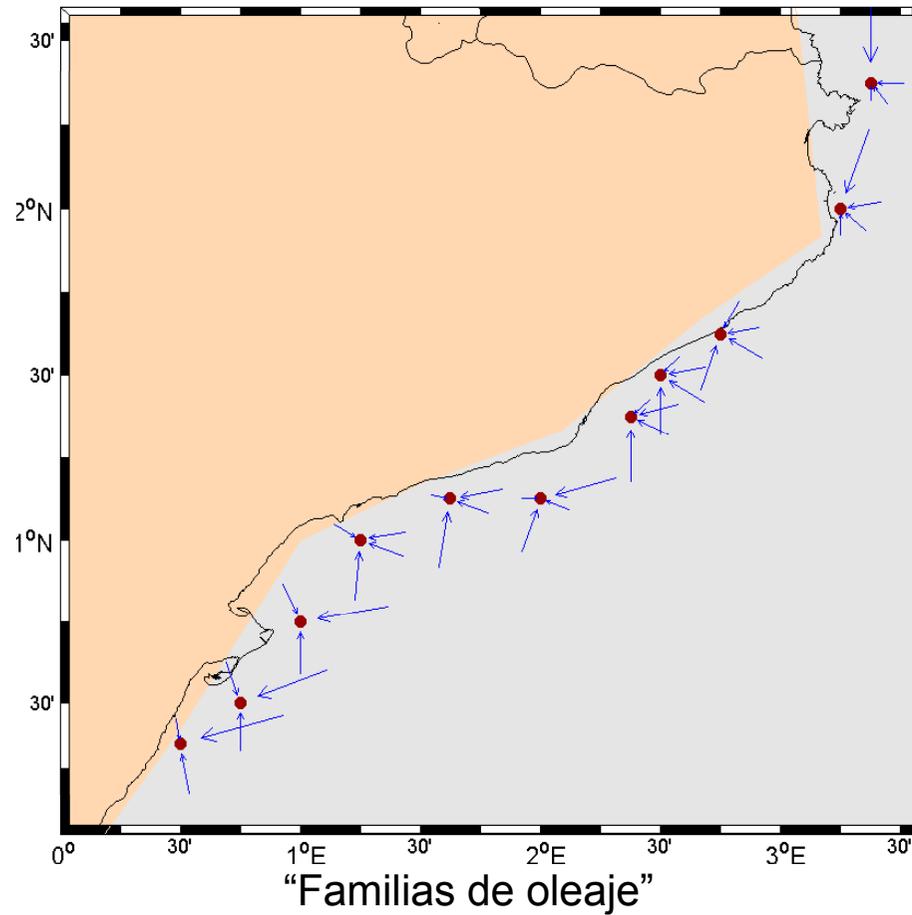


Joint pdf (H_s, θ)



Proportion of energy against the direction

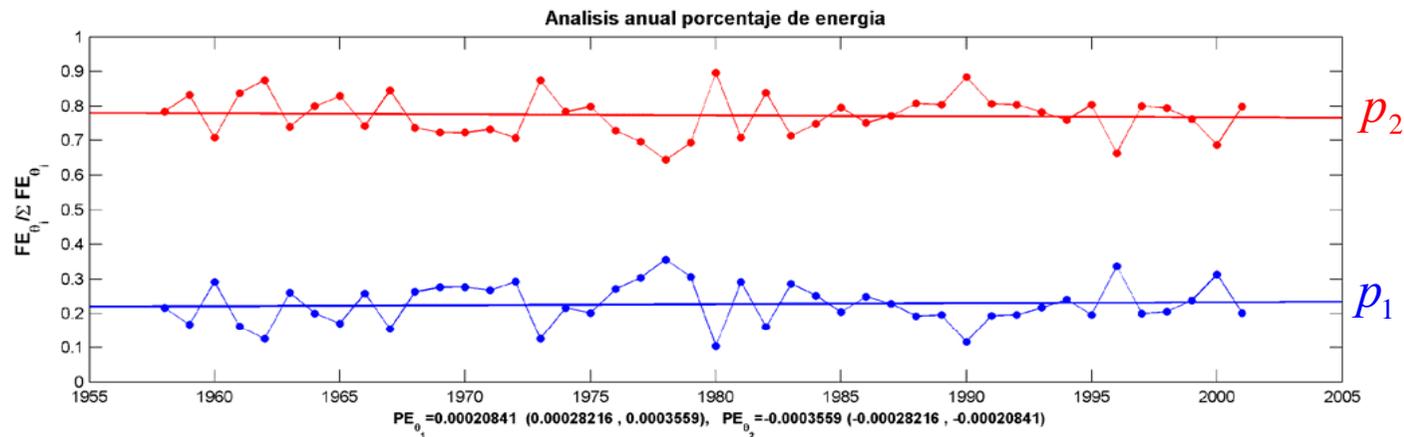
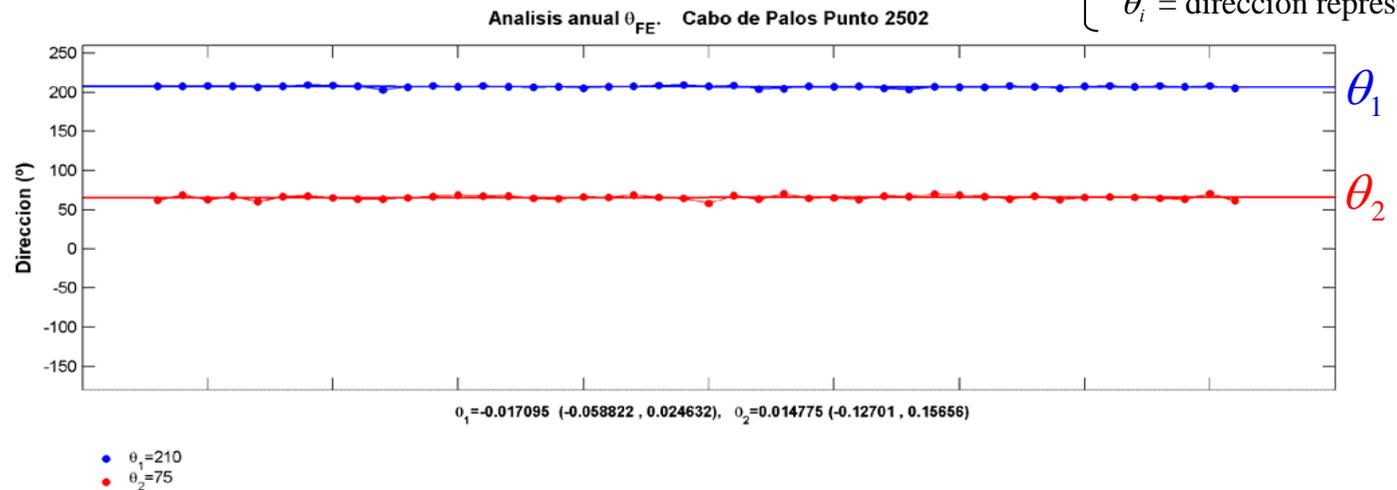
VARIABLES DIRECCIONALES



Tendencias régimen medio

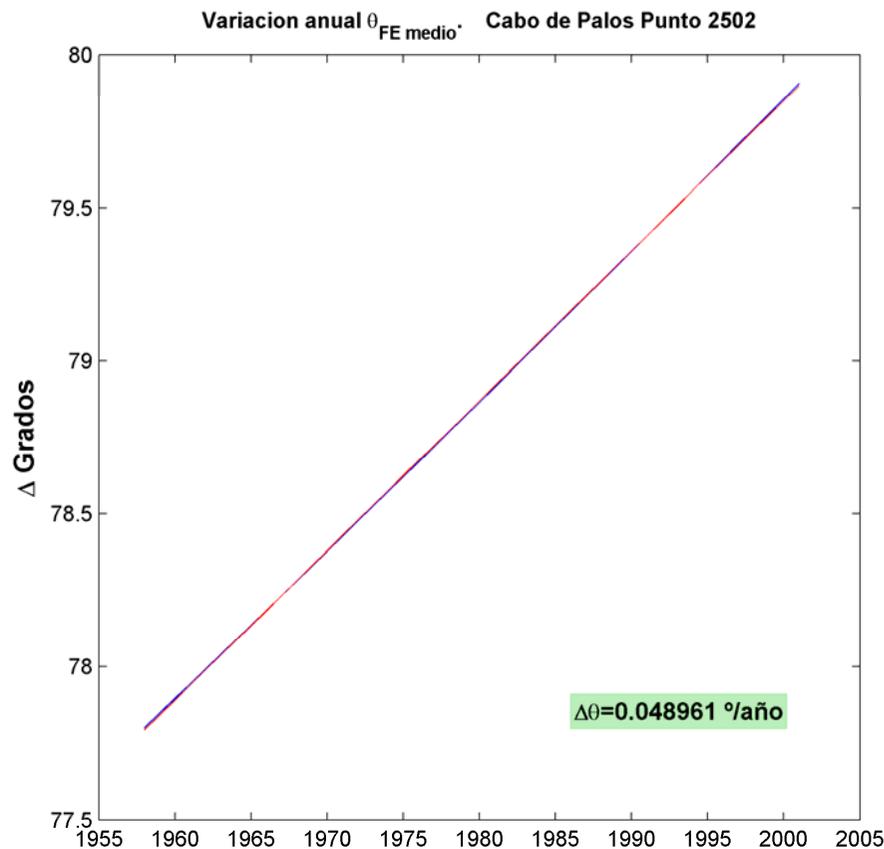
VARIABLES DIRECCIONALES

p_i = porcentaje de energía de cada familia.
 θ_i = dirección representativa de cada familia.

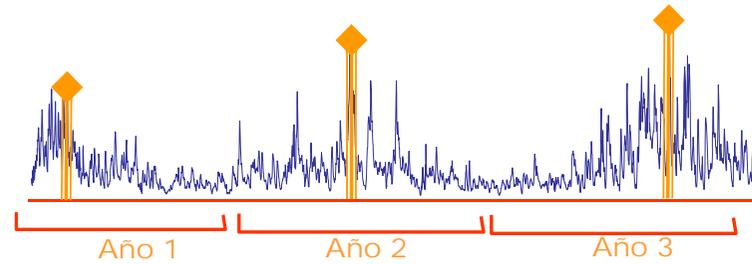


VARIABLES DIRECCIONALES

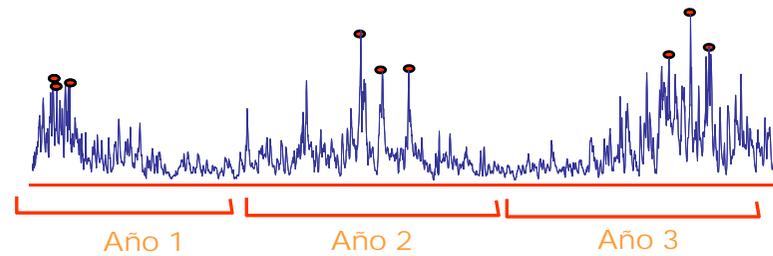
$$\theta = \arctan \left(\frac{\sum_{i=1}^n p_i \sin \theta_i}{\sum_{i=1}^n p_i \cos \theta_i} \right)$$



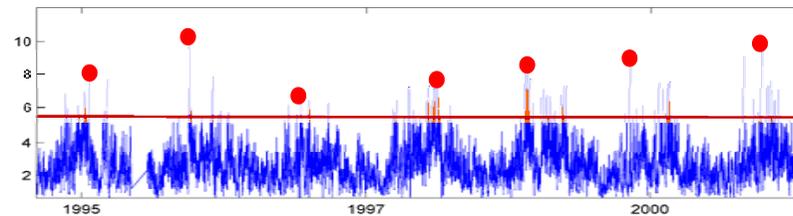
1-. Método de Máximos anuales



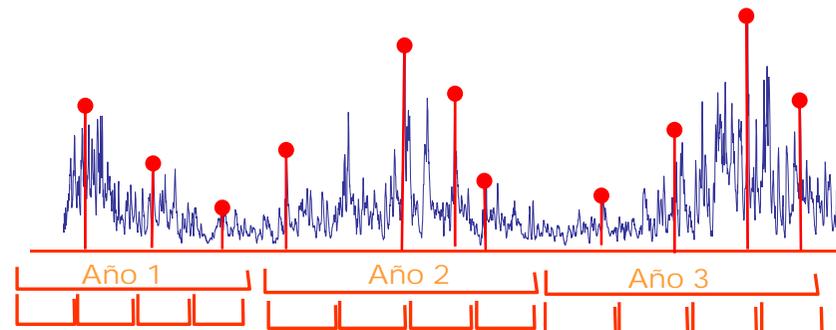
2-. RLO, r-máximos anuales



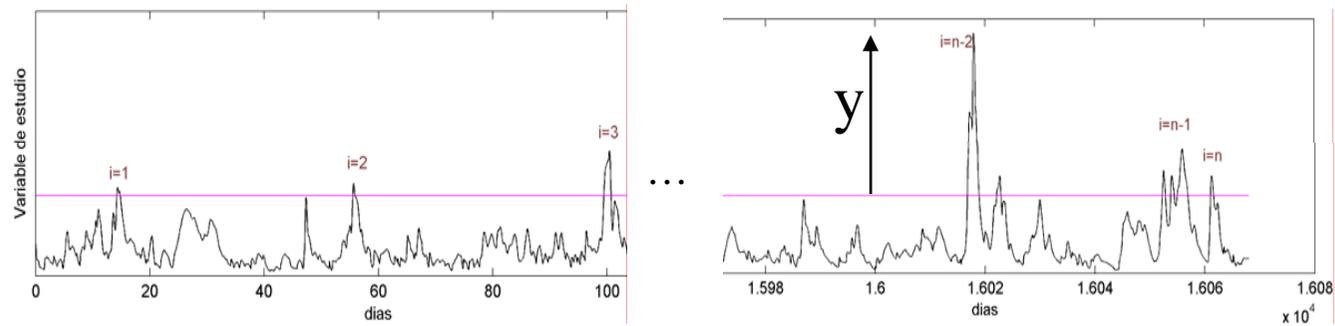
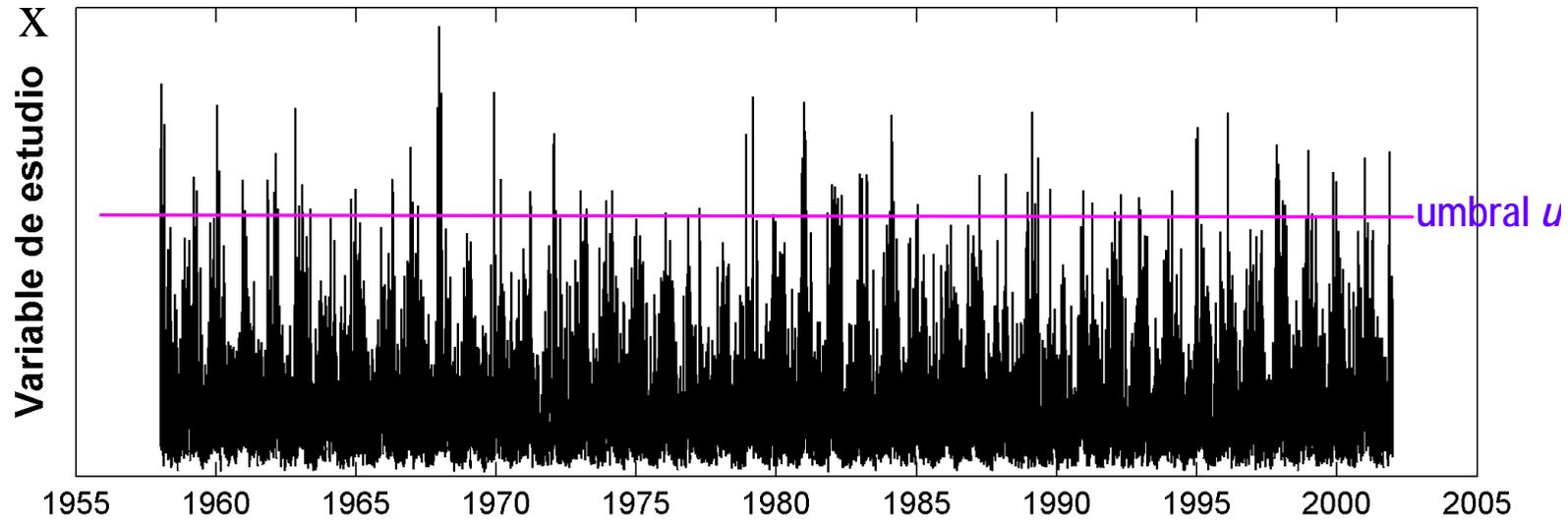
3-. POT, excedencias sobre un umbral



4-. Método de máximos en un bloque de tiempo

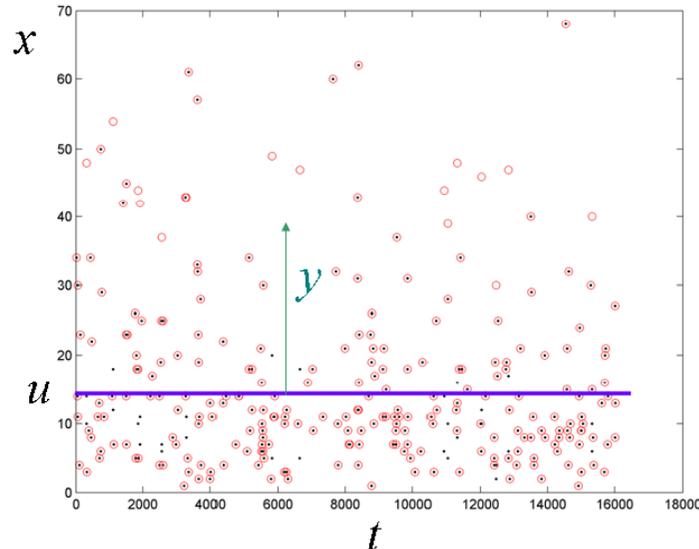


Tendencias régimen extremal



Time series: $\{(y_1, t_1), (y_2, t_2), \dots, (y_{N-1}, t_{N-1}), (y_N, t_N)\}$

Tendencias régimen extremal



Distribución de Pareto – Poisson
(**GPD–P**)

y_1, y_2, \dots, y_N excedencias
independientes en T años

Frecuencia: el número de excedencias en un año se distribuye según la distribución de Poisson con media ν

$$P_\nu(n) = \frac{\nu^n e^{-\nu}}{n!}$$

Intensidad: Las excedencias y_1, y_2, \dots, y_N se distribuyen según GPD

$$G(y; \sigma, \xi) = 1 - \left(1 + \xi y / \sigma\right)^{-1/\xi}$$

Tendencias régimen extremal

Distribución GPD-P

Intensidad: $G(y; \sigma, \xi) = 1 - (1 + \xi y / \sigma)^{-1/\xi}$

Frecuencia: $P_\nu(n) = \frac{\nu^n e^{-\nu}}{n!}$

Relación entre GPD-P y GEV (Generalized Extreme Value)

$$\Pr \left\{ \max_{1 \leq i \leq N} Y_i \leq x \right\} = \Pr \{ N = 0 \} + \sum_{n=1}^{\infty} \Pr \{ N = n, Y_1 \leq x, \dots, Y_n \leq x \} =$$

$$e^{-\nu} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\nu^n e^{-\nu}}{n!} \left\{ 1 - \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\psi} \right)^{-1/\xi} \right\}^n = \exp \left\{ -\nu \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\psi} \right)^{-1/\xi} \right\}$$

$$\sigma = \psi + \xi(u - \mu)$$

$$\nu = \left(1 + \frac{\xi(u - \mu)}{\psi} \right)^{-1/\xi}$$

GEV

$$H(x; \mu, \psi, \xi) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\psi} \right) \right]^{-1/\xi} \right\}$$

$\mu \rightarrow$ localizacion

$\psi \rightarrow$ escala

$\xi \rightarrow$ forma

Tendencias régimen extremal

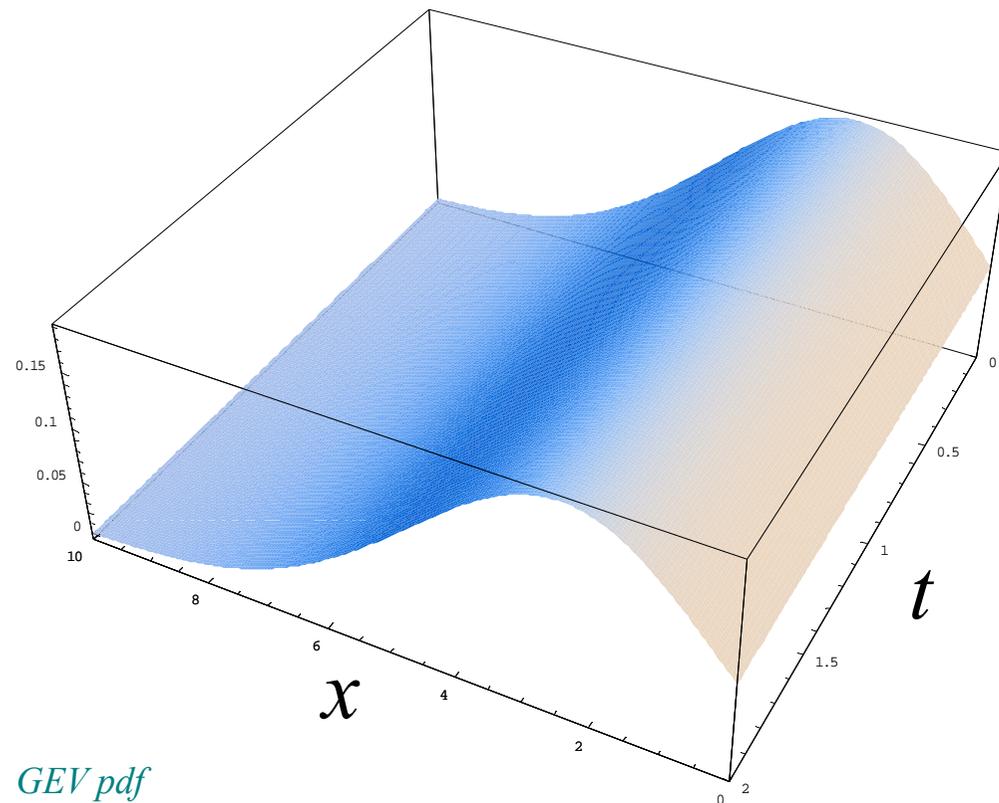
Como calculamos tendencias de largo plazo ?

Modelo estacionario

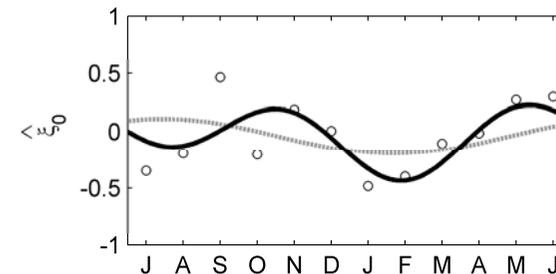
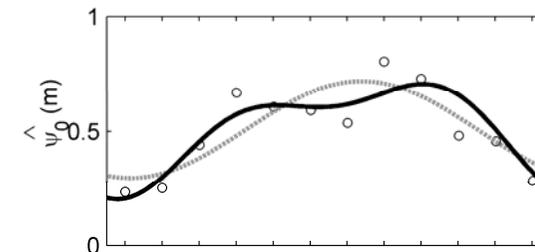
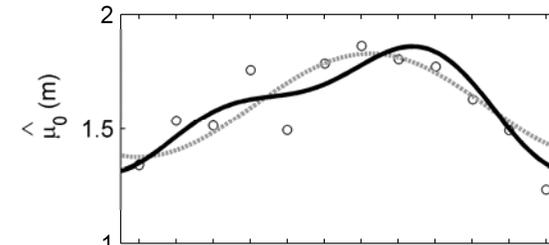
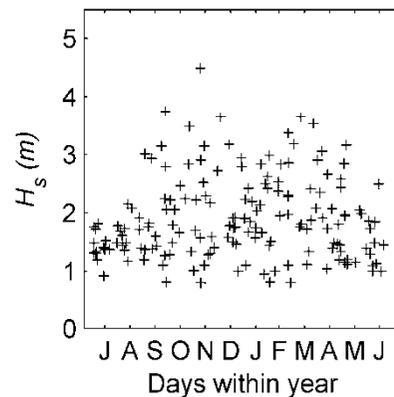
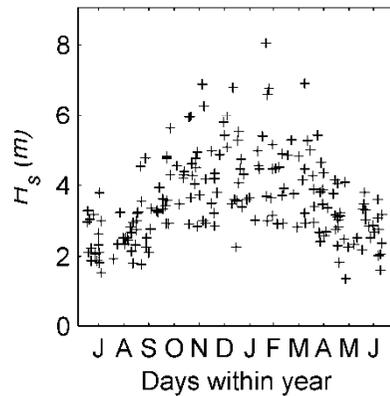
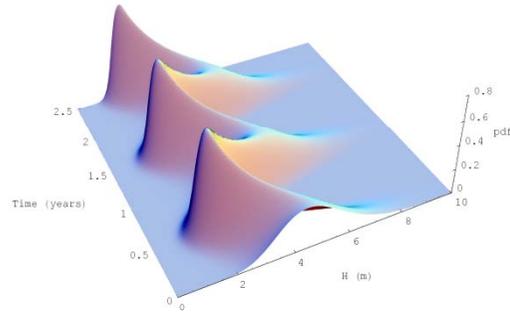
$$\mu = \mu_0$$

$$\psi = \psi_0$$

$$\xi = \xi_0$$



Tendencias régimen extremal

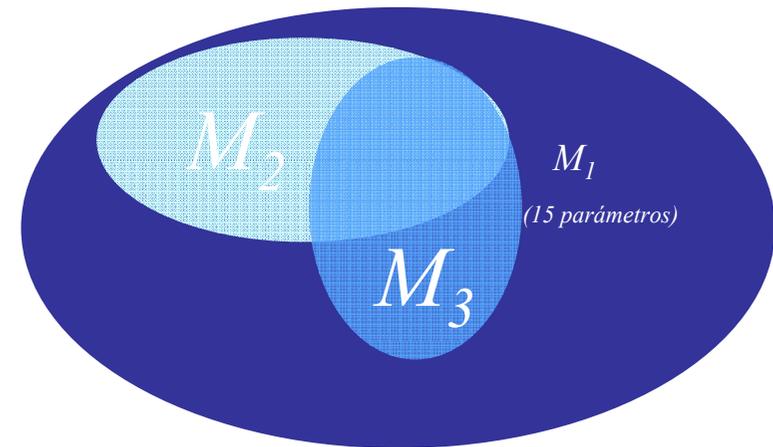


$$\theta = \begin{cases} \mu(t) = \beta_0 + \beta_1 \cos(2\pi t) + \beta_2 \sin(2\pi t) + \beta_3 \cos(4\pi t) + \beta_4 \sin(4\pi t) \\ \psi(t) = \alpha_0 + \alpha_1 \cos(2\pi t) + \alpha_2 \sin(2\pi t) + \alpha_3 \cos(4\pi t) + \alpha_4 \sin(4\pi t) \\ \xi(t) = \gamma_0 + \gamma_1 \cos(2\pi t) + \gamma_2 \sin(2\pi t) + \gamma_3 \cos(4\pi t) + \gamma_4 \sin(4\pi t) \end{cases}$$

Tendencias régimen extremal

¿Cómo ajustar el modelo?

Queremos obtener el modelo más simple posible que ajuste los datos suficientemente bien (Principio de Parsimonia)



$$\theta : \begin{cases} \mu(t) = \beta_0 + \beta_1 \cos(2\pi t) + \beta_2 \sin(2\pi t) + \beta_3 \cos(4\pi t) + \beta_4 \sin(4\pi t) \\ \psi(t) = \alpha_0 + \alpha_1 \cos(2\pi t) + \alpha_2 \sin(2\pi t) + \alpha_3 \cos(4\pi t) + \alpha_4 \sin(4\pi t) \\ \xi(t) = \gamma_0 + \gamma_1 \cos(2\pi t) + \gamma_2 \sin(2\pi t) + \gamma_3 \cos(4\pi t) + \gamma_4 \sin(4\pi t) \end{cases}$$

Codificación

Tendencias régimen extremal

Codificación

Cromosoma (7 genes) **[1 0 1 1 1 0 0]** (*un posible modelo*)

$$\mu(t) = \beta_0 + \underbrace{\beta_1 \cos(2\pi t) + \beta_2 \text{sen}(2\pi t)}_{\text{Ciclo anual}} + \underbrace{\beta_3 \cos(4\pi t) + \beta_4 \text{sen}(4\pi t)}_{\text{Ciclo semianual}}$$

$$\psi(t) = \alpha_0 + \underbrace{\alpha_1 \cos(2\pi t) + \alpha_2 \text{sen}(2\pi t)}_{\text{Ciclo anual}} + \underbrace{\alpha_3 \cos(4\pi t) + \alpha_4 \text{sen}(4\pi t)}_{\text{Ciclo semianual}}$$

GEV/Gumbel

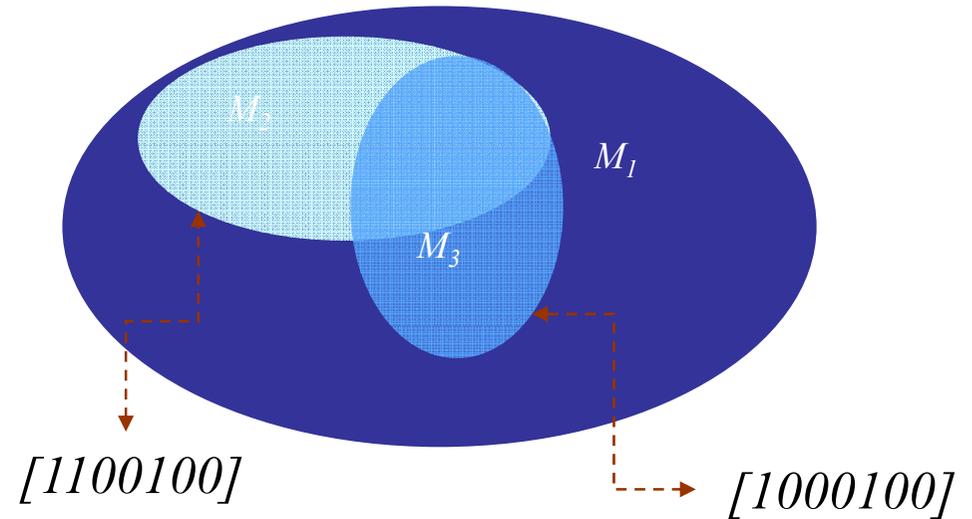
$$\xi(t) = \underbrace{\gamma_0}_{\text{Ciclo anual}} + \underbrace{\gamma_1 \cos(2\pi t) + \gamma_2 \text{sen}(2\pi t)}_{\text{Ciclo anual}} + \underbrace{\gamma_3 \cos(4\pi t) + \gamma_4 \text{sen}(4\pi t)}_{\text{Ciclo semianual}}$$

Tendencias régimen extremal

Codificación

Selección Automática

STEPWISE

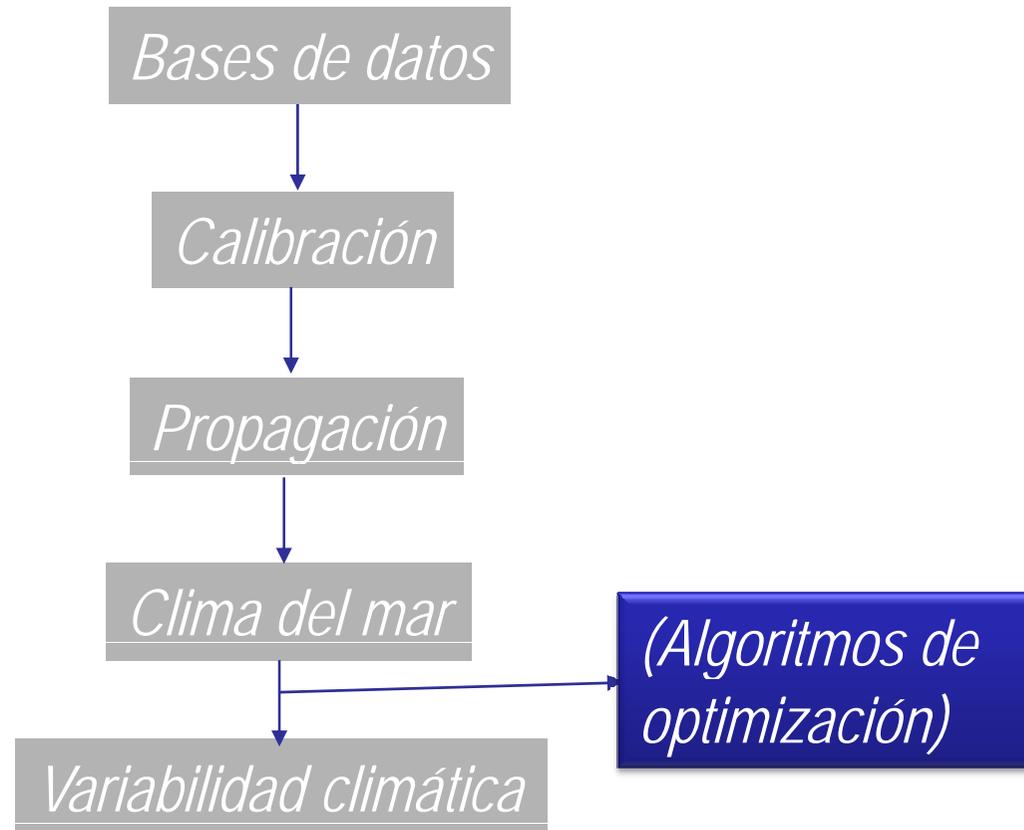


Criterio para la selección del modelo (Akaike): $AIC = -2\hat{\ell}(p) + 2p$

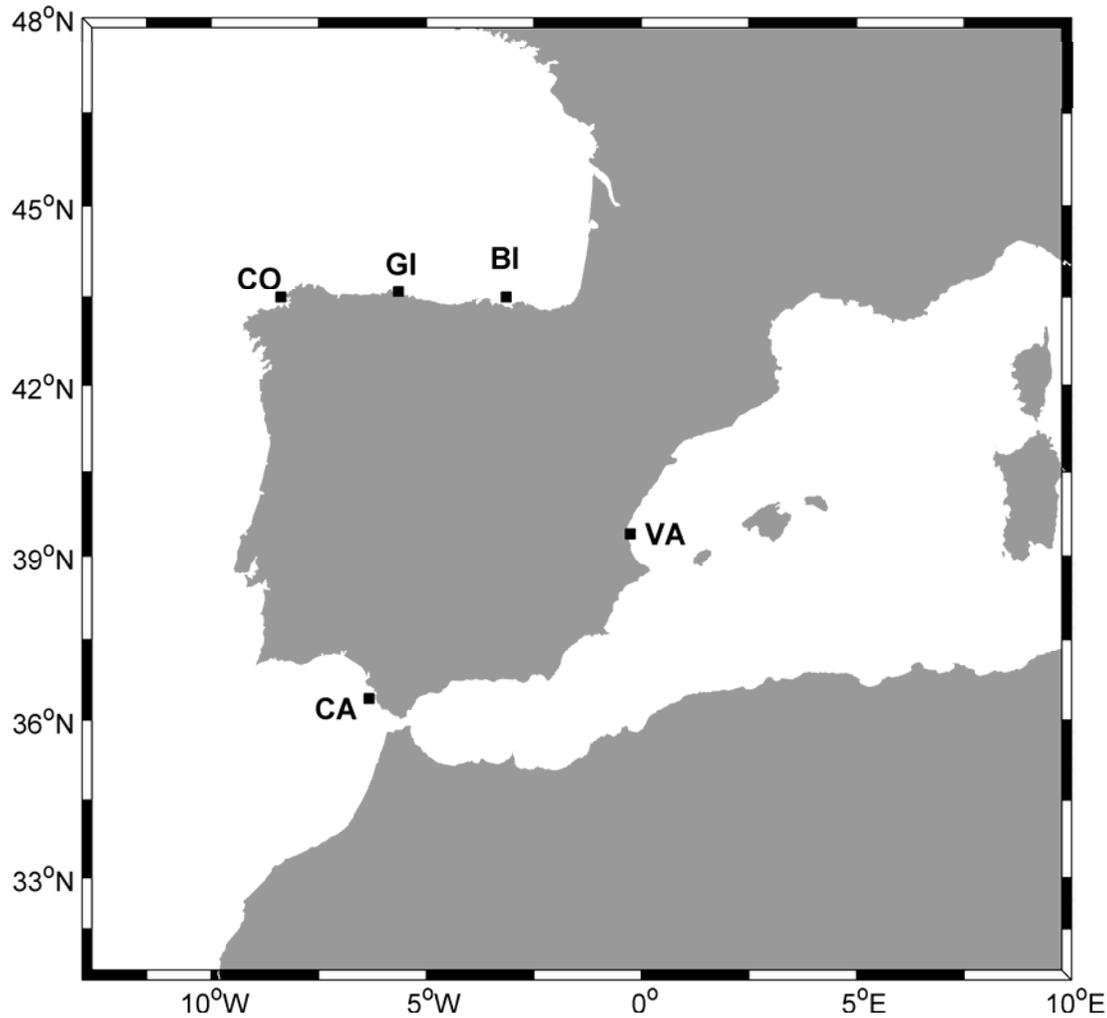
Técnica de ajuste para cada modelo: **Máxima Verosimilitud**

$$\ell(\theta | t_i, x_i) = -\sum_{i=1}^m \left\{ \log \psi(t_i) + (1 + 1/\xi(t_i)) \log \left[1 + \xi(t_i) \left(\frac{x_i - \mu(t_i)}{\psi(t_i)} \right) \right]_+ + \left[1 + \xi(t_i) \left(\frac{x_i - \mu(t_i)}{\psi(t_i)} \right) \right]_+^{-1/\xi(t_i)} \right\}$$

$$\theta = (\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$$



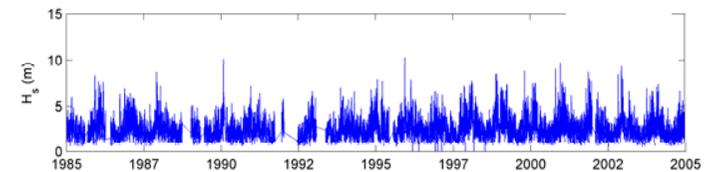
Tendencias régimen extremal



OPPE

Red costera, REDCOS

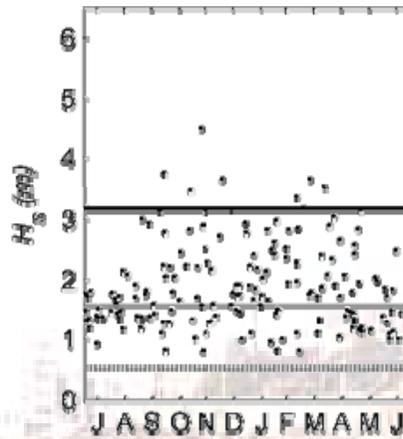
	Profundidad (m)	Registro
Bilbao (BI)	50	1985-2003
Gijón (GI)	23	1984-2002
Coruña (CO)	50	1984-2003
Cádiz (CA)	22	1984-2002
Valencia(VA)	20	1985-2003



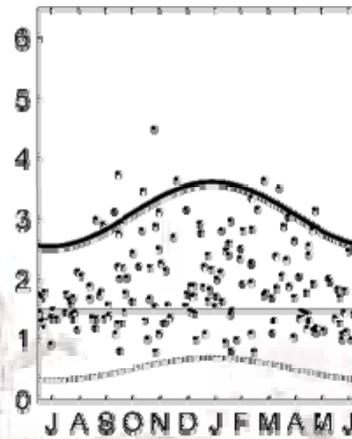
Tendencias régimen extremal

Valencia

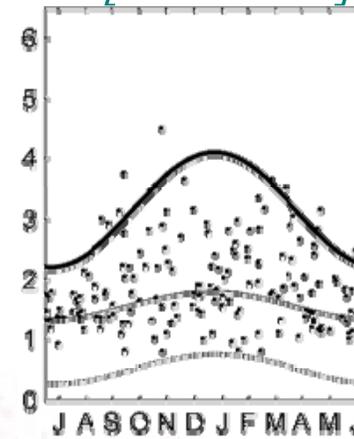
[00.00.0.00]



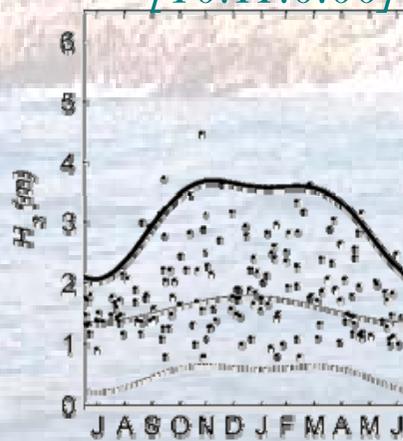
[00.10.0.00]



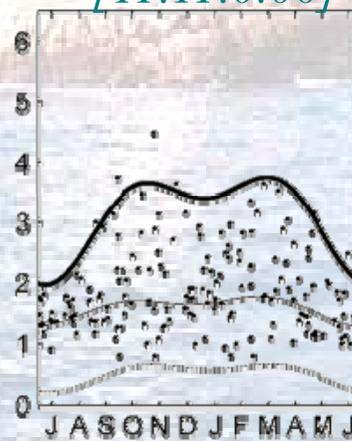
[10.10.0.00]



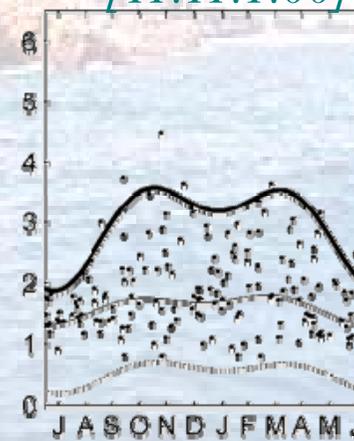
[10.11.0.00]

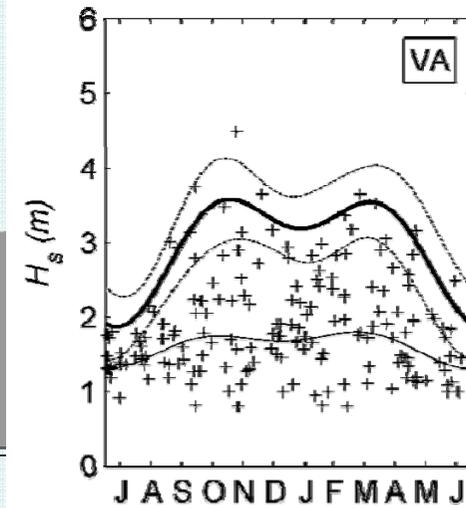
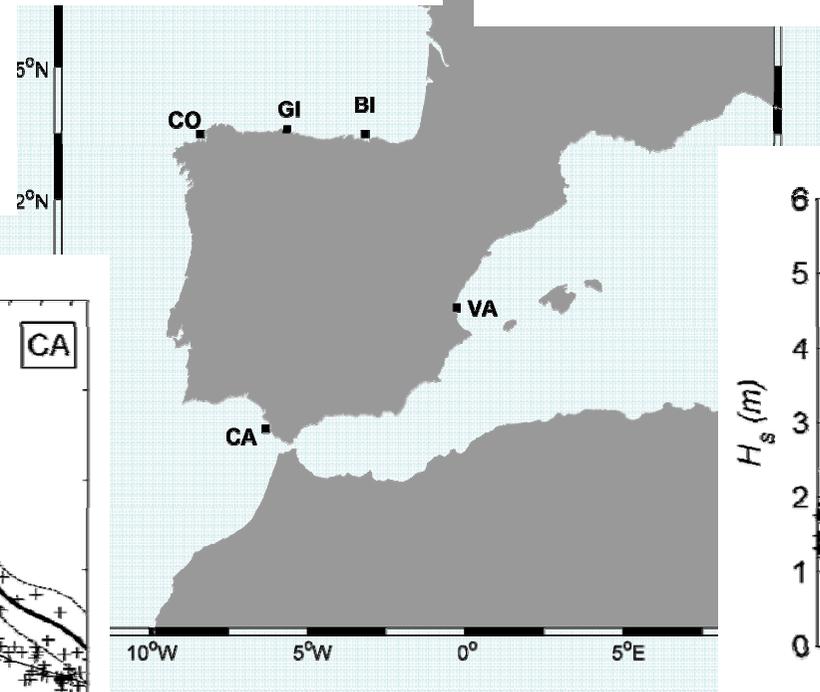
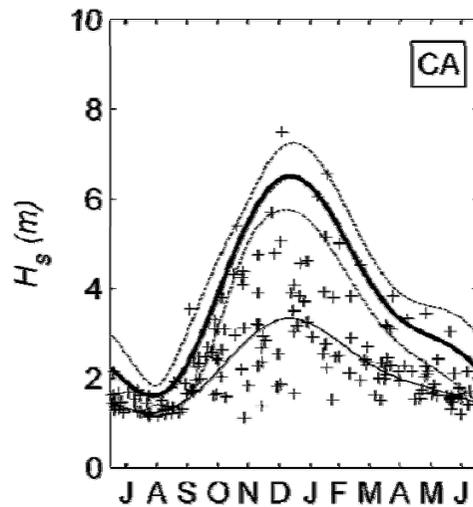
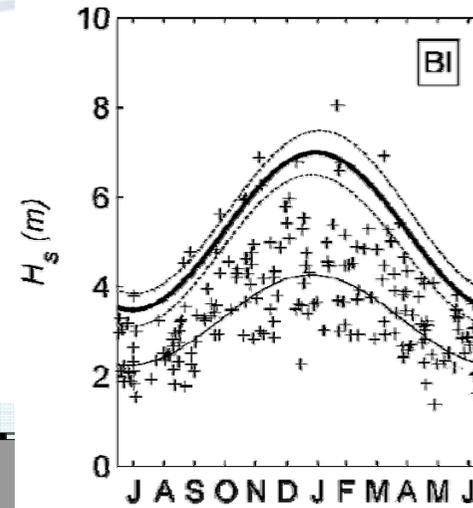
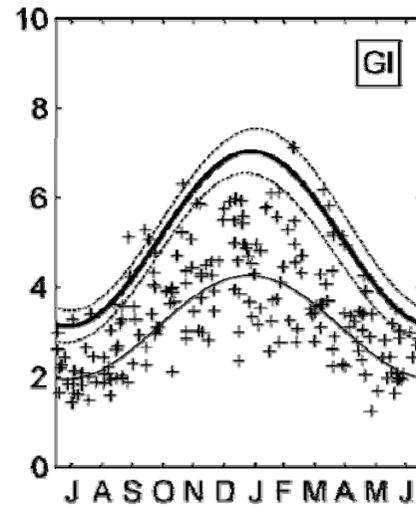
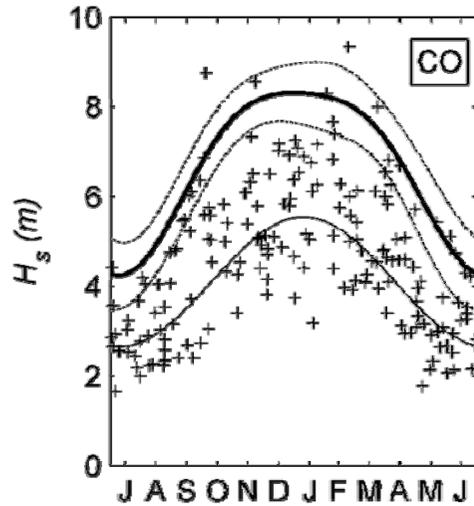


[11.11.0.00]

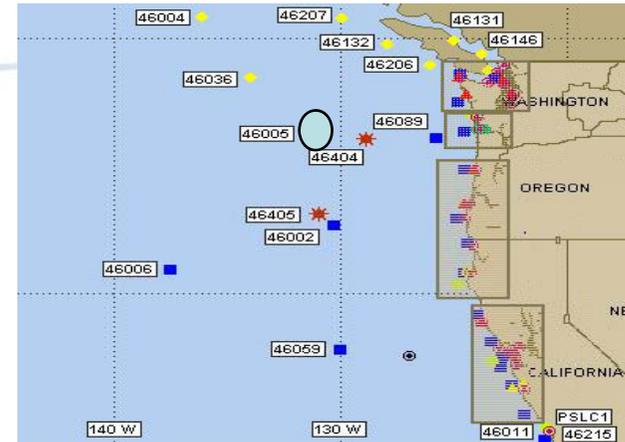


[11.11.1.00]





Tendencias régimen extremal



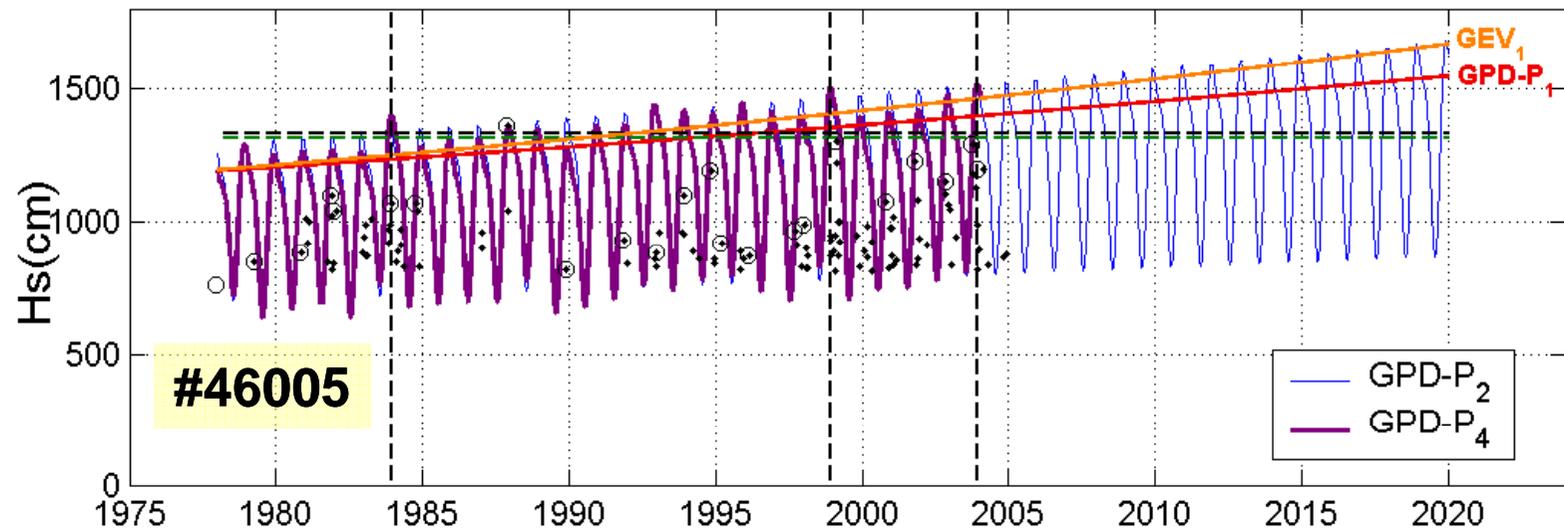
$$\mu_t = [\beta_0 + \beta_1 \cos(2\pi t) + \beta_2 \sin(2\pi t) + \beta_3 \cos(4\pi t) + \beta_4 \sin(4\pi t)] e^{(\beta_5 t)} + \beta_{SOI} SOI(t)$$

$$\psi_t = \psi_0$$

$$\xi = \xi_0$$

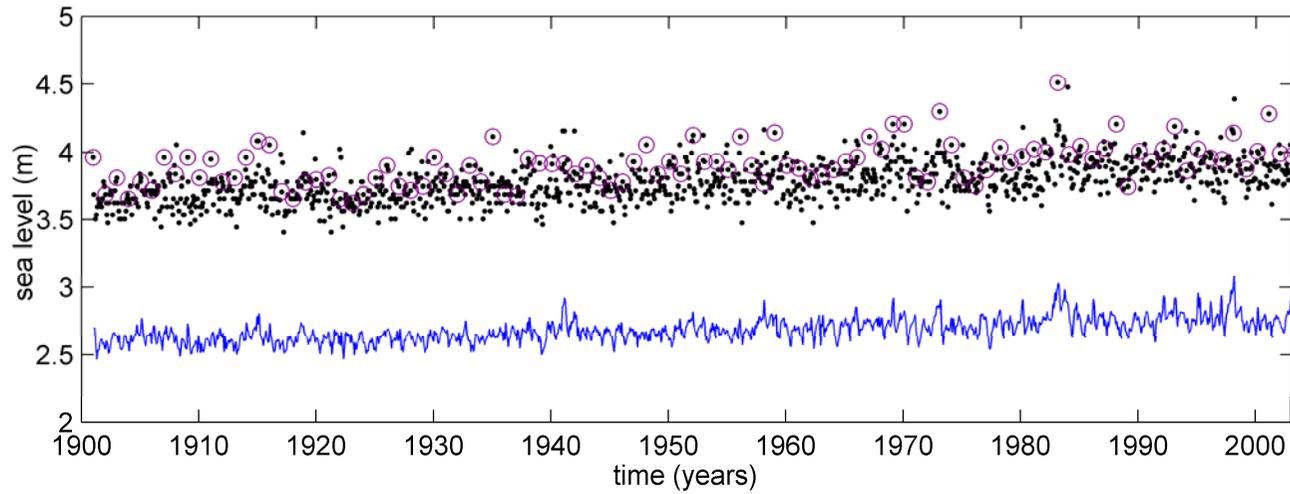
Largo plazo

El Niño

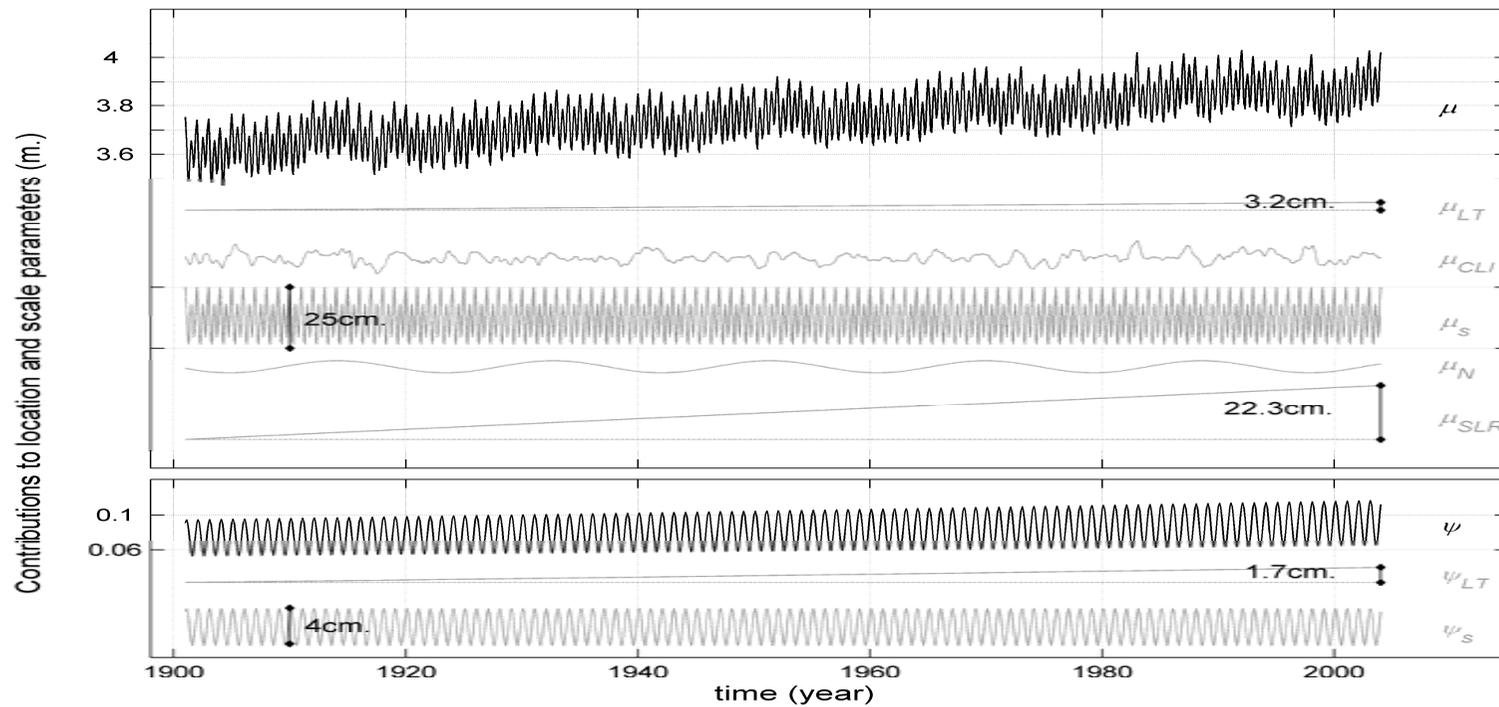


Cuantil de 25 años de período de retorno

Tendencias régimen extremal



Mareógrafo de San Francisco.
1900-2003
Régimen extremal mensual



Efectos en la costa española



“Efectos del cambio climático en el litoral español” (2002-2004)

Oficina Española de Cambio Climático
(Ministerio de Medio Ambiente, ESPAÑA)

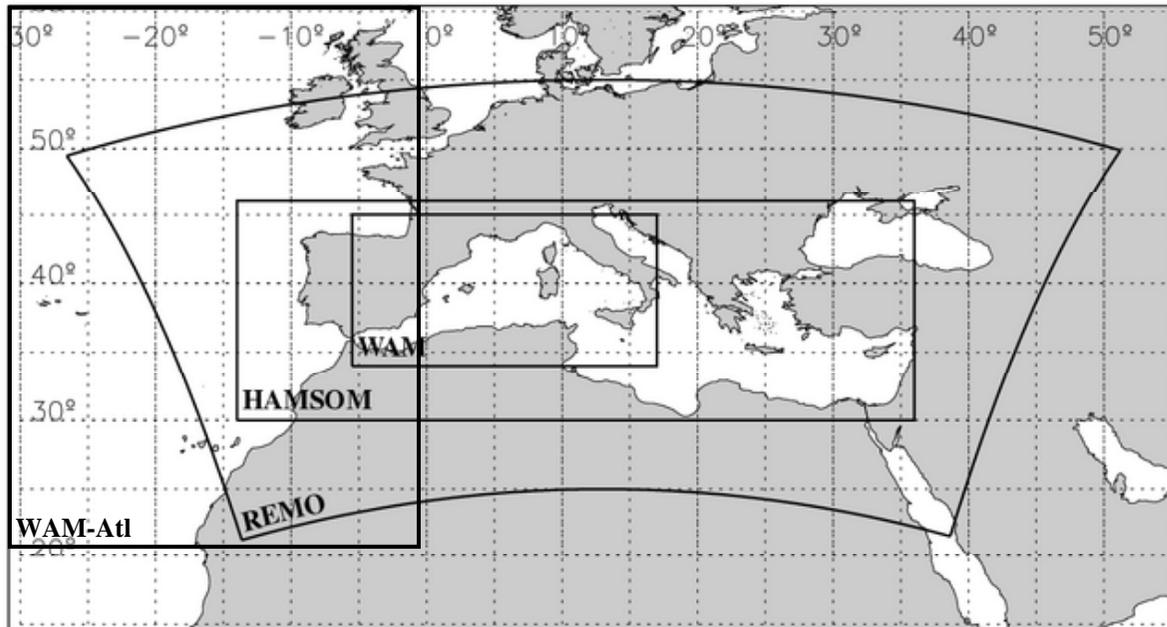


Fase I: Evaluar cambios en el nivel del mar y en el clima marítimo a lo largo del litoral español

Fase II: Evaluar cambios en la costa: playas, puertos, estuarios...

Fase III: Establecimiento de estrategias

Efectos en la costa española



SIMAR-44: Hindcast model (1958-2001) *EPPE(2003)*

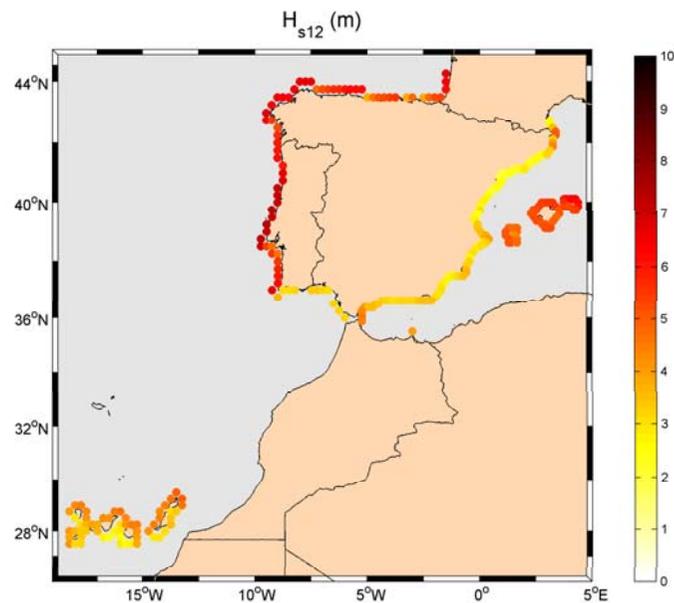
REMO: W_c

HAMSOM: MM_c

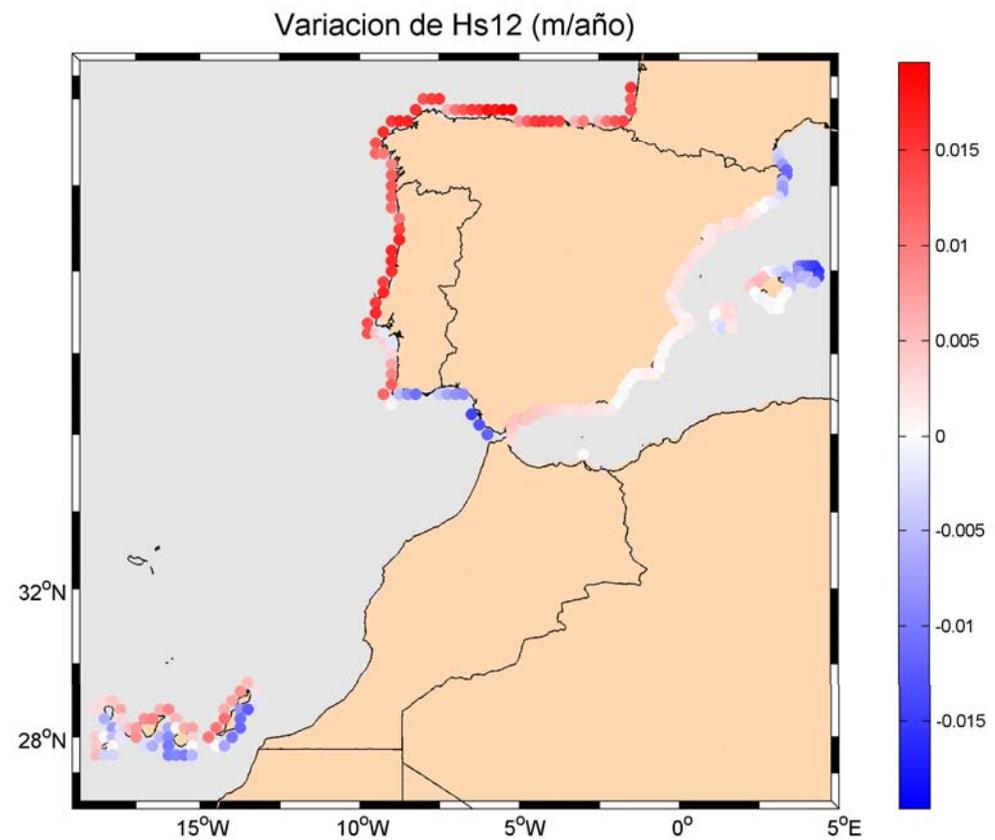
WAM: Hs_c (Calibrado... *Tomás et al, 2007*)

Efectos en la costa española

Fase I: Evaluar cambios en el nivel del mar y en el clima marítimo a lo largo del litoral español

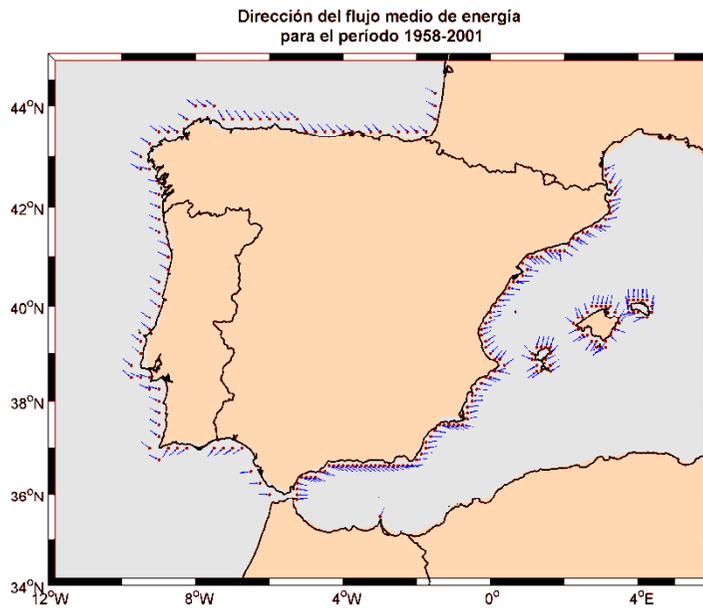


Hs excedida 12 horas al año

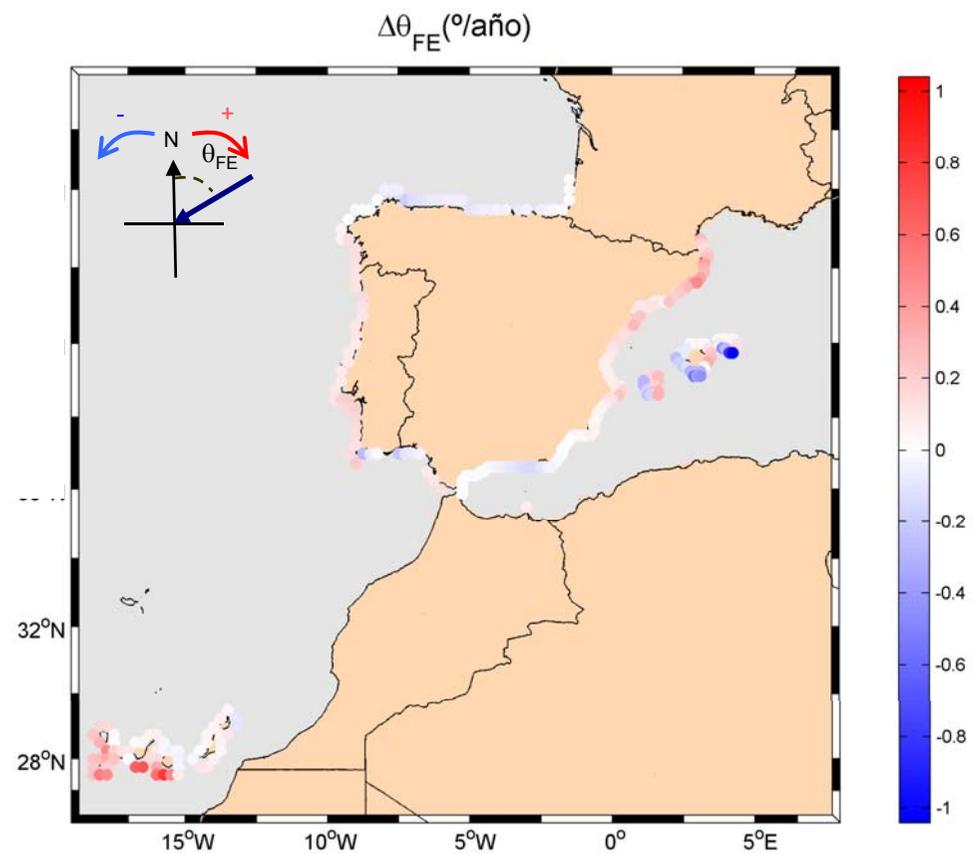


Efectos en la costa española

Fase I: Evaluar cambios en el nivel del mar y en el clima marítimo a lo largo del litoral español

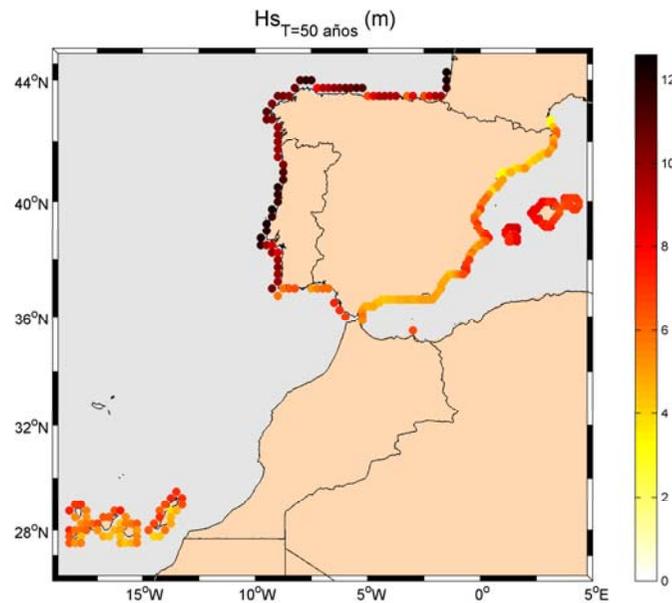


Dirección del flujo medio de energía

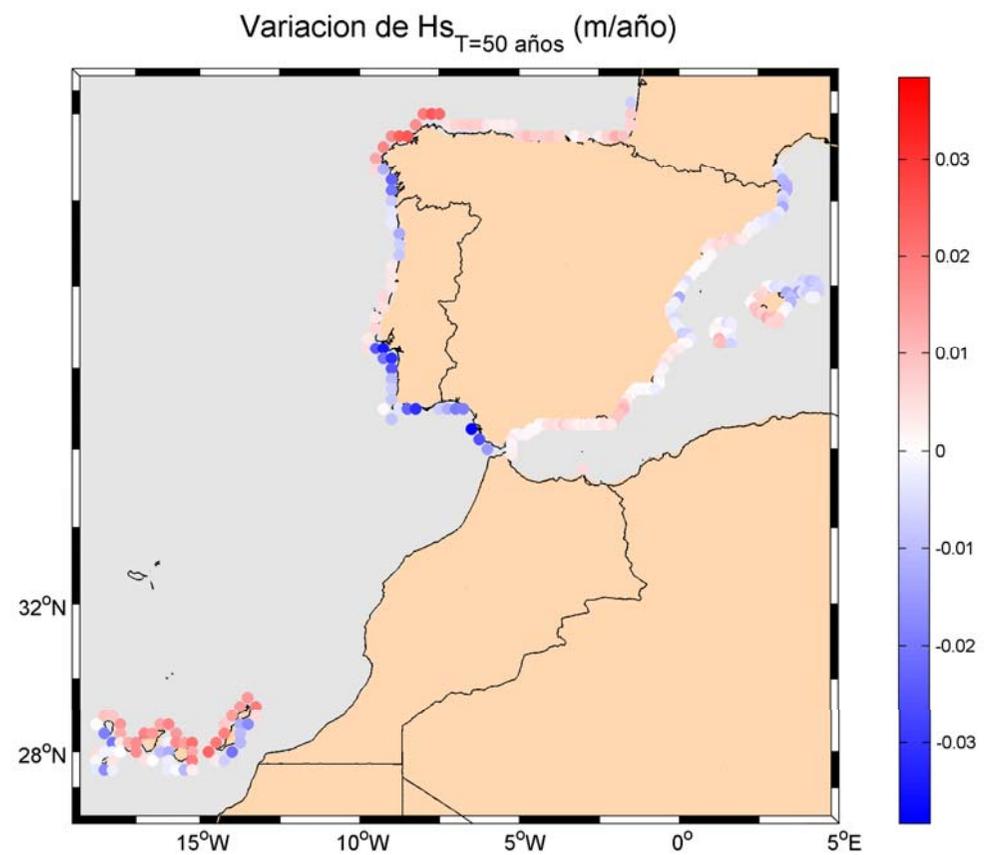


Efectos en la costa española

Fase I: Evaluar cambios en el nivel del mar y en el clima marítimo a lo largo del litoral español



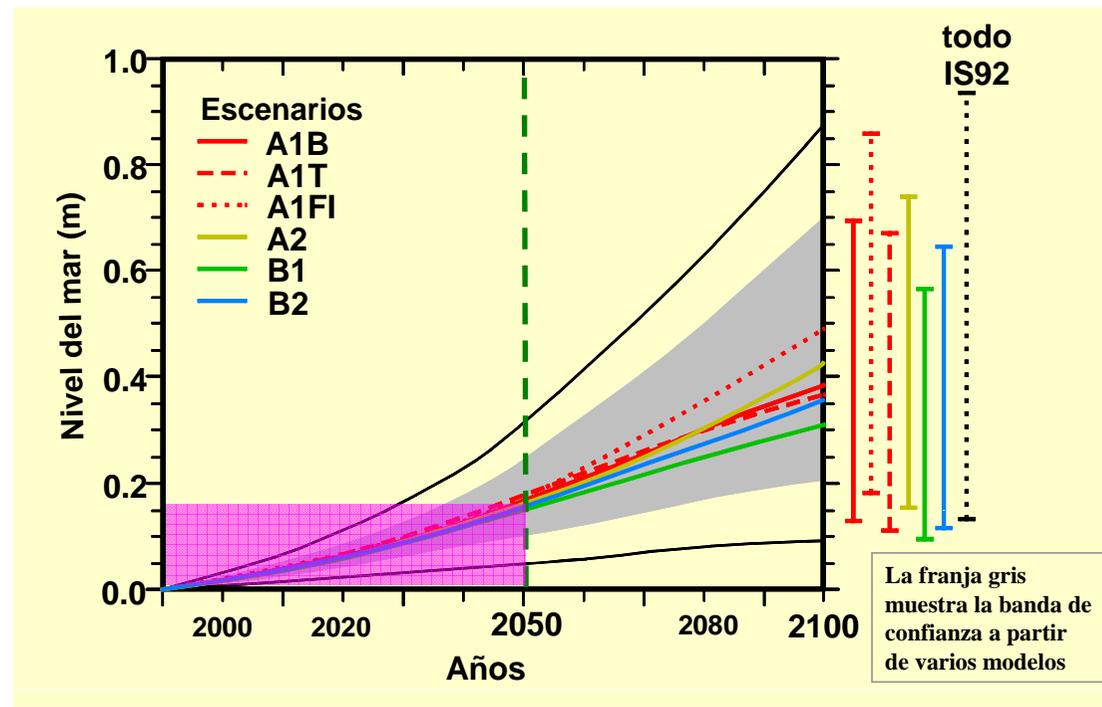
Hs excedida 1 vez cada 50 años



Efectos en la costa española

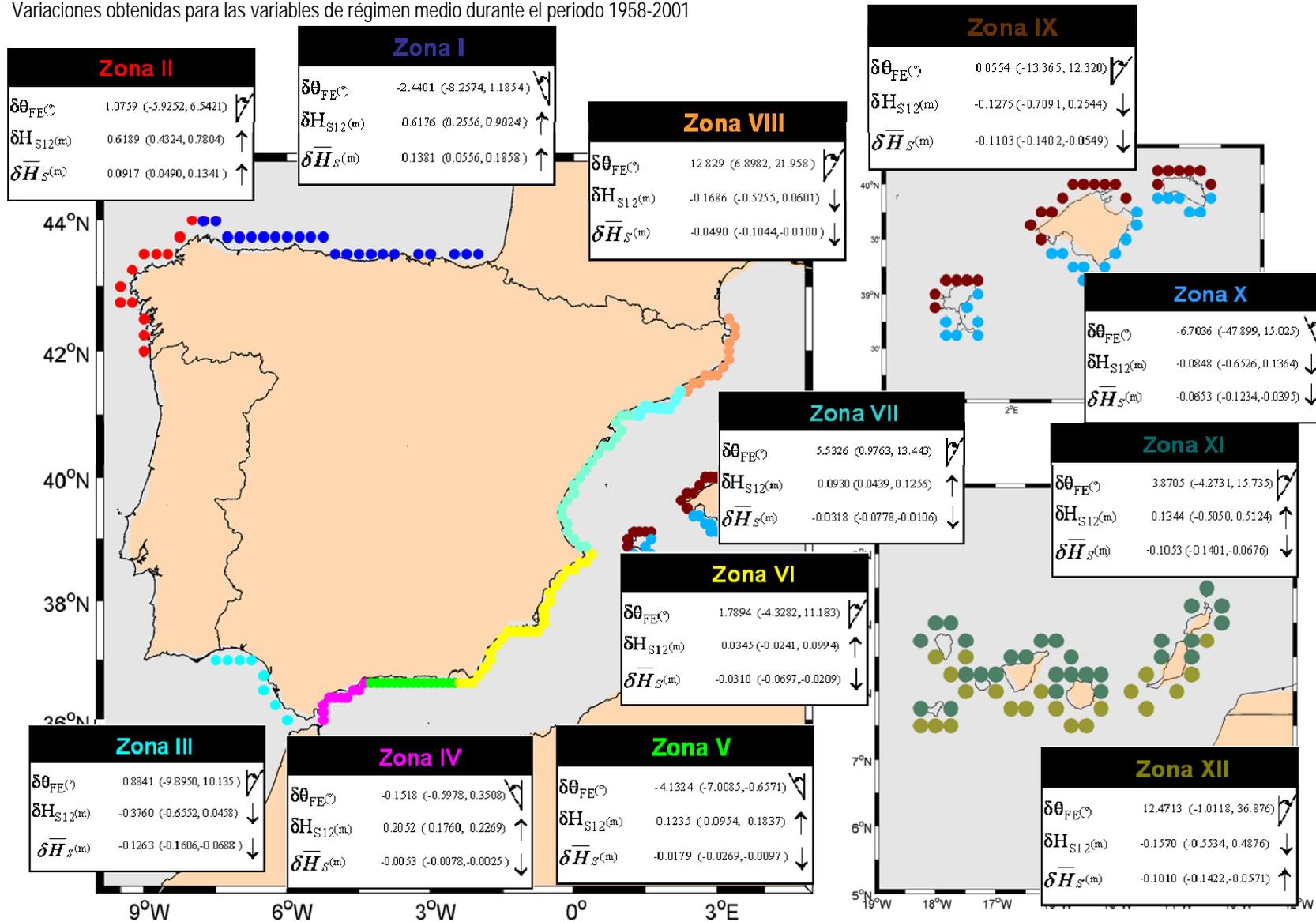
Fase I: Evaluar cambios en el nivel del mar y en el clima marítimo a lo largo del litoral español

Ascenso del nivel medio del mar



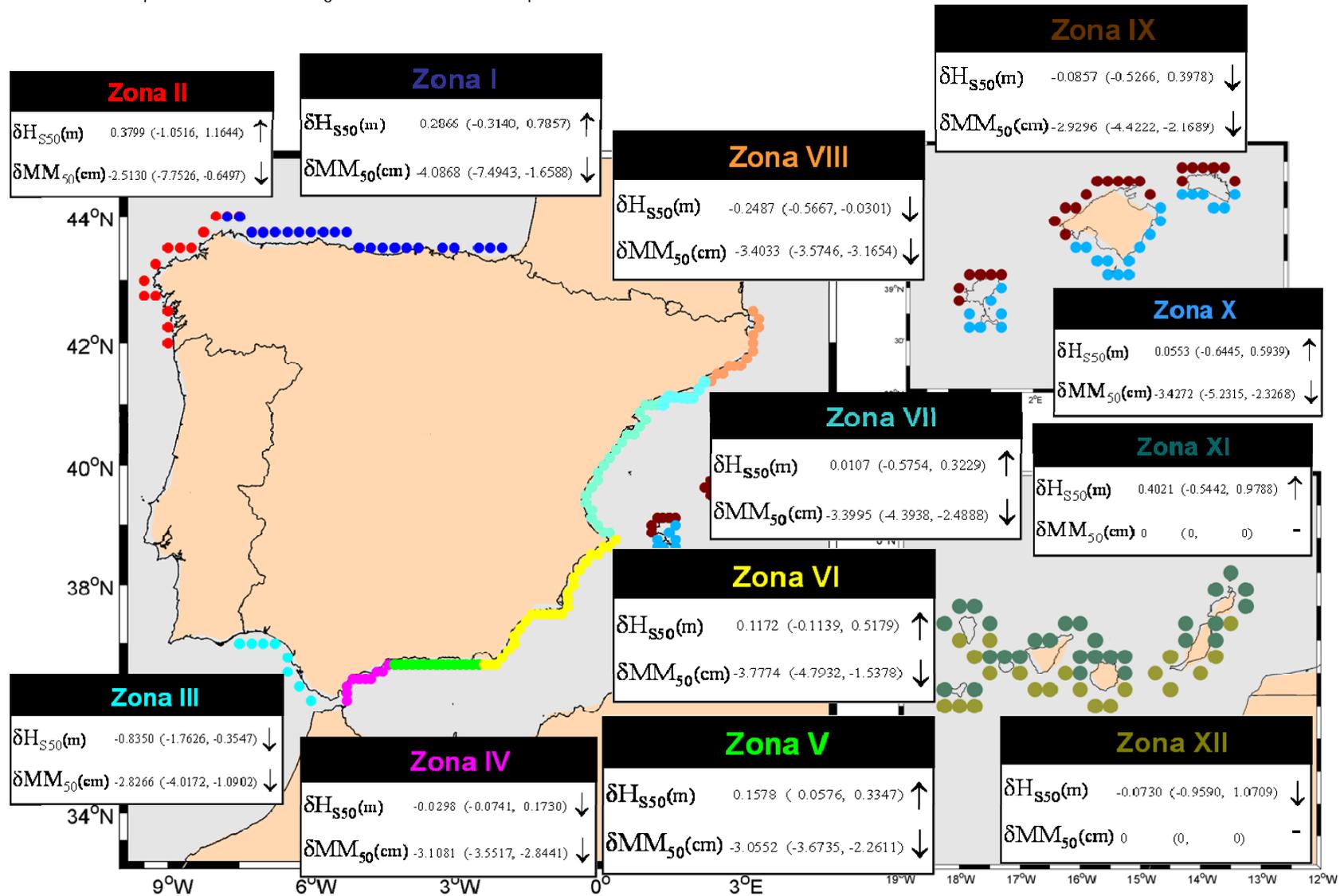
Efectos en la costa española

Variaciones obtenidas para las variables de régimen medio durante el periodo 1958-2001



Efectos en la costa española

Variaciones obtenidas para las variables de régimen extremal durante el periodo 1958-2001



Efectos en la costa española



“Efectos del cambio climático en el litoral español” (2002-2004)

Oficina Española de Cambio Climático
(Ministerio de Medio Ambiente, ESPAÑA)



Fase I: Evaluar cambios en el nivel del mar y en el clima marítimo a lo largo del litoral español

Fase II: Evaluar cambios en la costa: playas, puertos, estuarios...

Fase III: Establecimiento de estrategias

Efectos en la costa española

EFFECTOS PRINCIPALES EN PLAYAS:

ELEMENTO MORFOLÓGICO	ELEMENTOS ANALIZADOS	OLEAJE				NIVEL DEL MAR	MAREA METEOROLÓGICA
		REGIMEN MEDIO			EXTREMAL		
		ΔH_{s12}	ΔH_{RMS}	$\Delta \theta$	$\Delta H_{s,T=50 \text{ años}}$	NM	ΔMM
PLAYAS	COTA DE INUNDACIÓN				POSIBLE AUMENTO COTA DE INUNDACIÓN	POSIBLE AUMENTO COTA DE INUNDACIÓN	POSIBLE AUMENTO COTA DE INUNDACIÓN
	PERFIL	AUMENTO PROFUNDIDAD DE CORTE, POSIBLE RETROCESO EN PLAYAS COLMATADAS				RETROCESO PLAYA	
	FORMA EN PLANTA			BASCULAMIENTO PLAYAS, POSIBLE RETROCESO		CAMBIO EN TÓMBOLOS, SALIENTES Y DOBLES SALIENTES	
	TRANSPORTE LITORAL		VARIACIÓN CAPACIDAD DE TRANSPORTE	VARIACIÓN CAPACIDAD DE TRANSPORTE			

Efectos en la costa española

VARIACIÓN DE LA COTA DE INUNDACIÓN

$$CI = MA + MM + Ru$$

PERTURBANDO

$$\frac{\delta CI}{CI} = \frac{\delta MM + \delta \eta + 0.0396 \left(\frac{gT^2}{2\pi} \right)^{0.5} \frac{\delta H_s}{\sqrt{H_s}}}{MA + MM + 0.0792 \left(H_s \frac{9.81T^2}{2\pi} \right)^{0.5}}$$



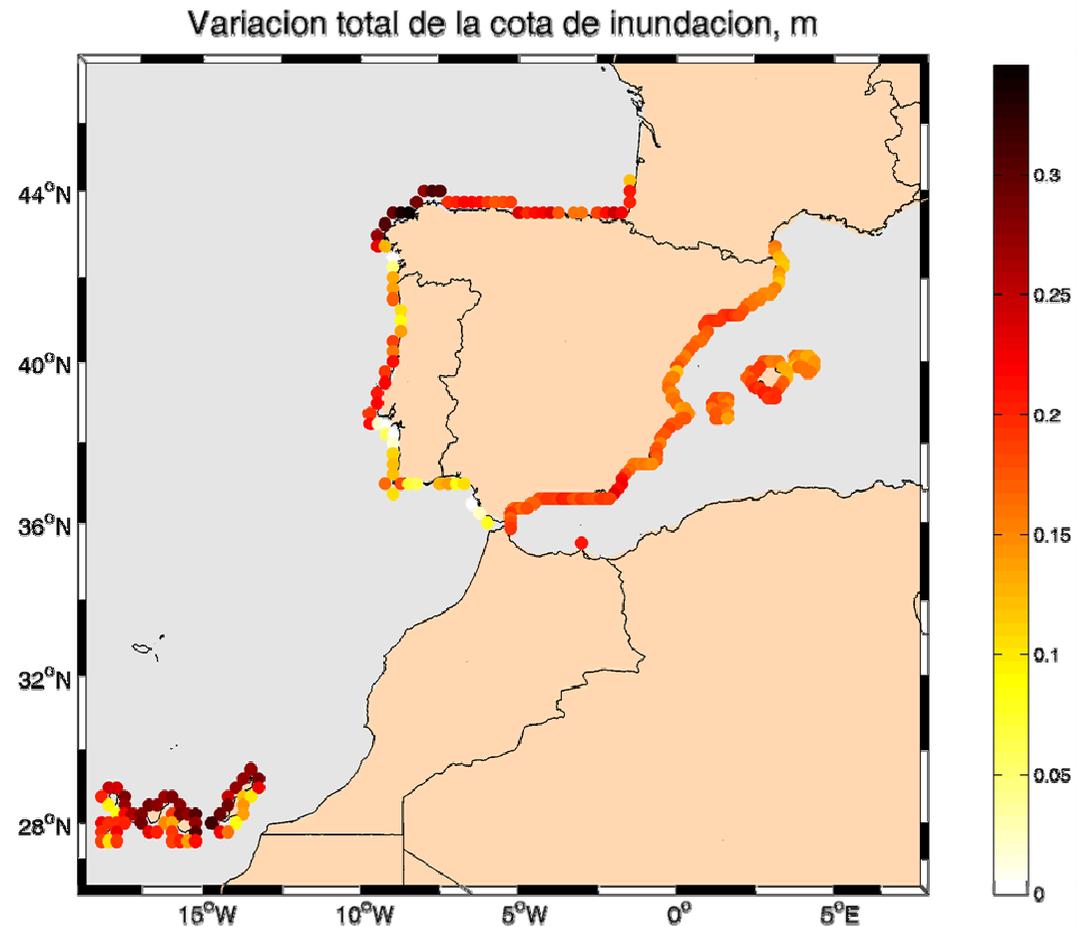
Run- up dado por Nielsen (1991) \longrightarrow $R_{u2\%} = 0.0792 \left(H_s \frac{9.81T_p^2}{2\pi} \right)^{0.5}$

Efectos en la costa española

Fase II: Evaluar cambios en la costa: playas, puertos, estuarios...

Cota de inundación de 50 años de período de retorno

DATOS REPRESENTATIVOS		
Costa Gallega e Islas Canarias	Zona Mediterránea	Golfo de Cádiz
↑ 35 cm	↑ 20 cm	↑ 10 cm



Año Horizonte: 2050

RETROCESO POR AUMENTO DEL NIVEL MEDIO DEL MAR

- El ascenso del nivel del mar produce un ascenso del perfil de playa sin que la forma del perfil se vea modificado.
- El ascenso debe producirse a costa de la arena existente.
- El futuro perfil se ve **retranqueado** para cubrir el déficit de arena.

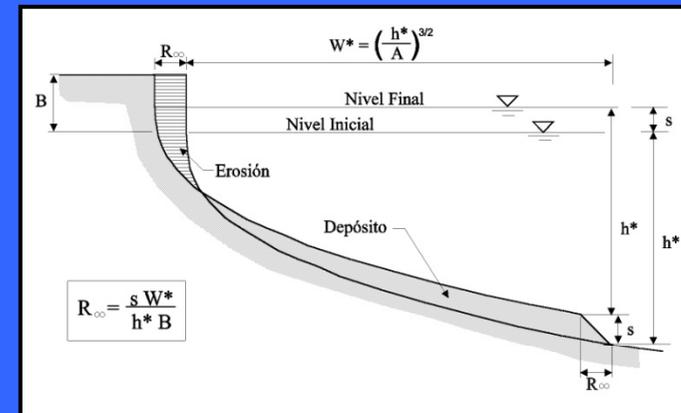
Regla de Bruun:

$$R = \Delta\eta \frac{w_*}{(h_* + B)}$$

Dean (1987):

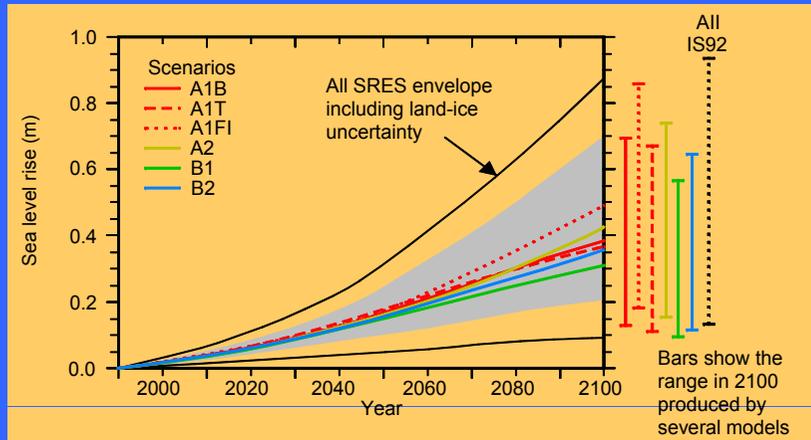
$$\frac{R}{\Delta\eta} = \frac{(1.57H_{s12})^{1.5}}{(0.51w^{0.44})^{3/2} (1.57H_{s12} + B)}$$

R = Retroceso del perfil de playa
 $\Delta\eta$ = Variación del nivel medio
 w_* = anchura del perfil de playa
 h_* = profundidad de corte
 B = altura de la berma



Efectos en la costa española

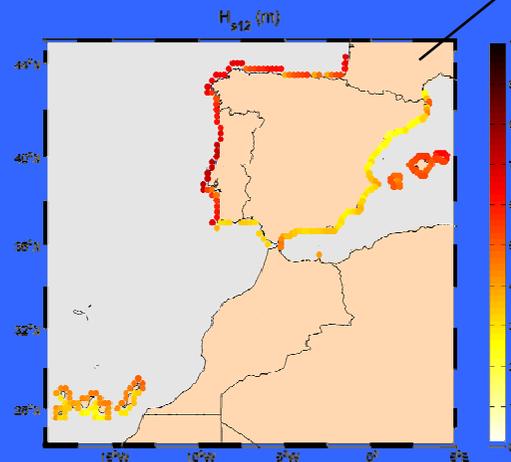
IPCC: Variación del nivel del mar



-Se ha considerado la **tendencia media** en el aumento del nivel medio del mar. ¡Gran incertidumbre!

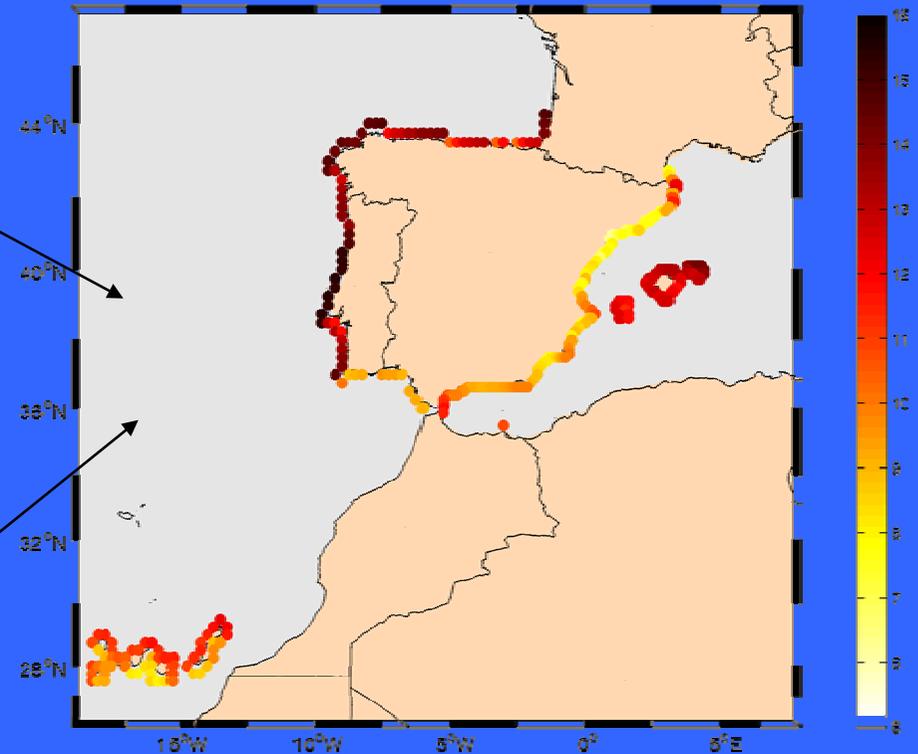
Características de la playa tipo:

- D50 0.3 mm
- B= 1 m
- Hs12: media de los valores proporcionados por el modelo HIPOCAS

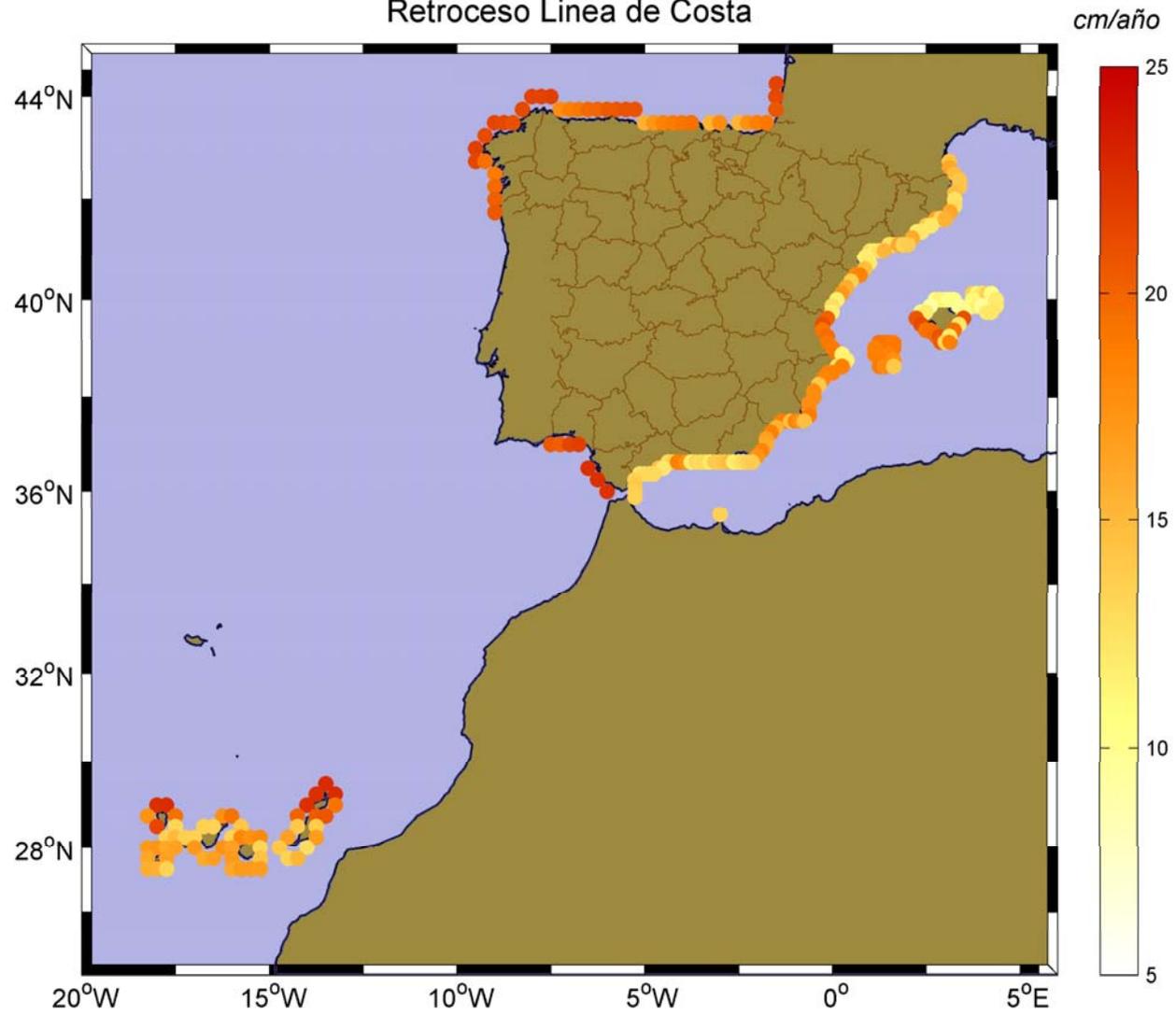


Año objetivo: 2050

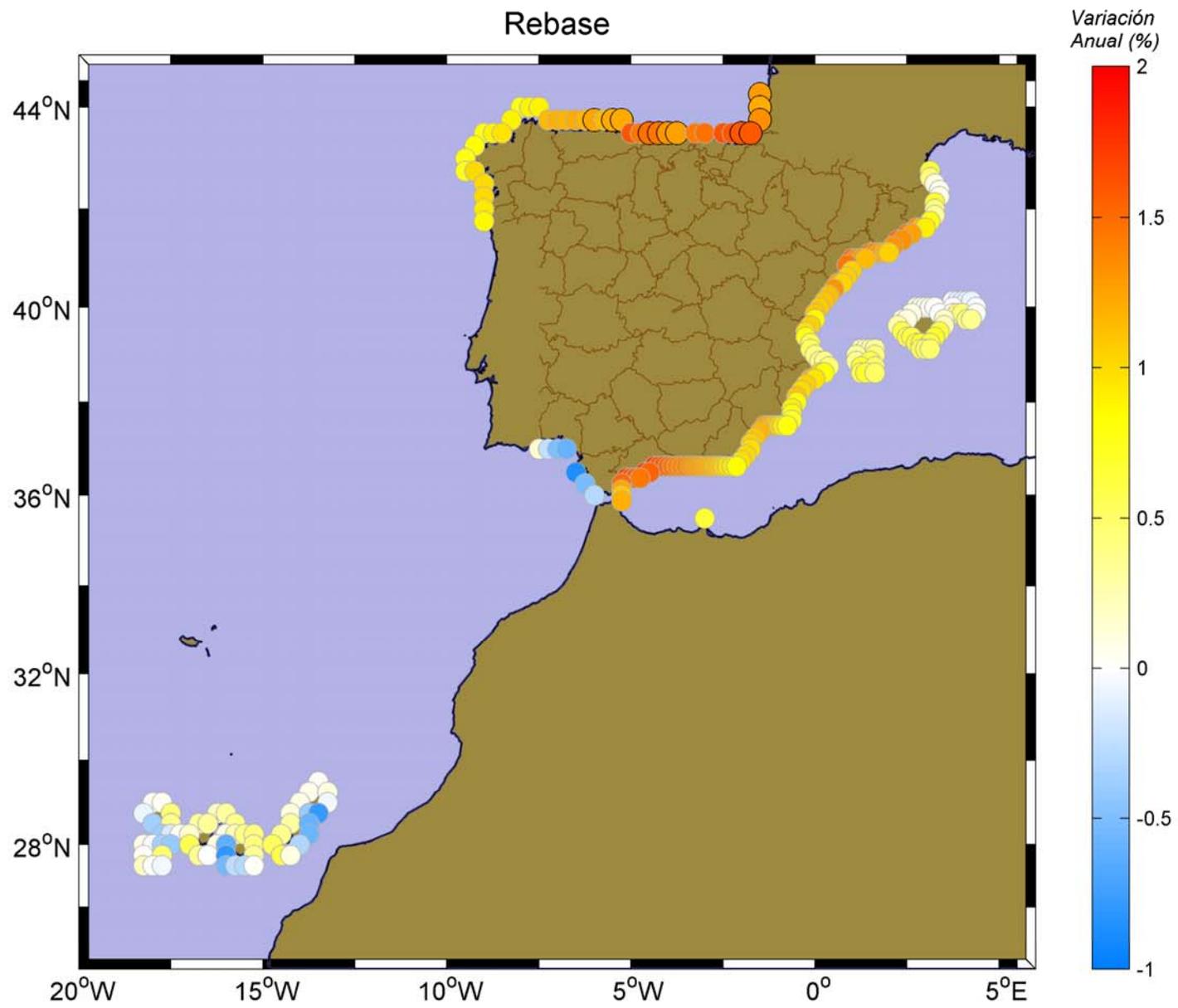
Retroceso playas por aumento de η (m)



Retroceso Línea de Costa



Rebase



Efectos en la costa española

Fase II: Evaluar cambios en la costa: playas, puertos, estuarios...

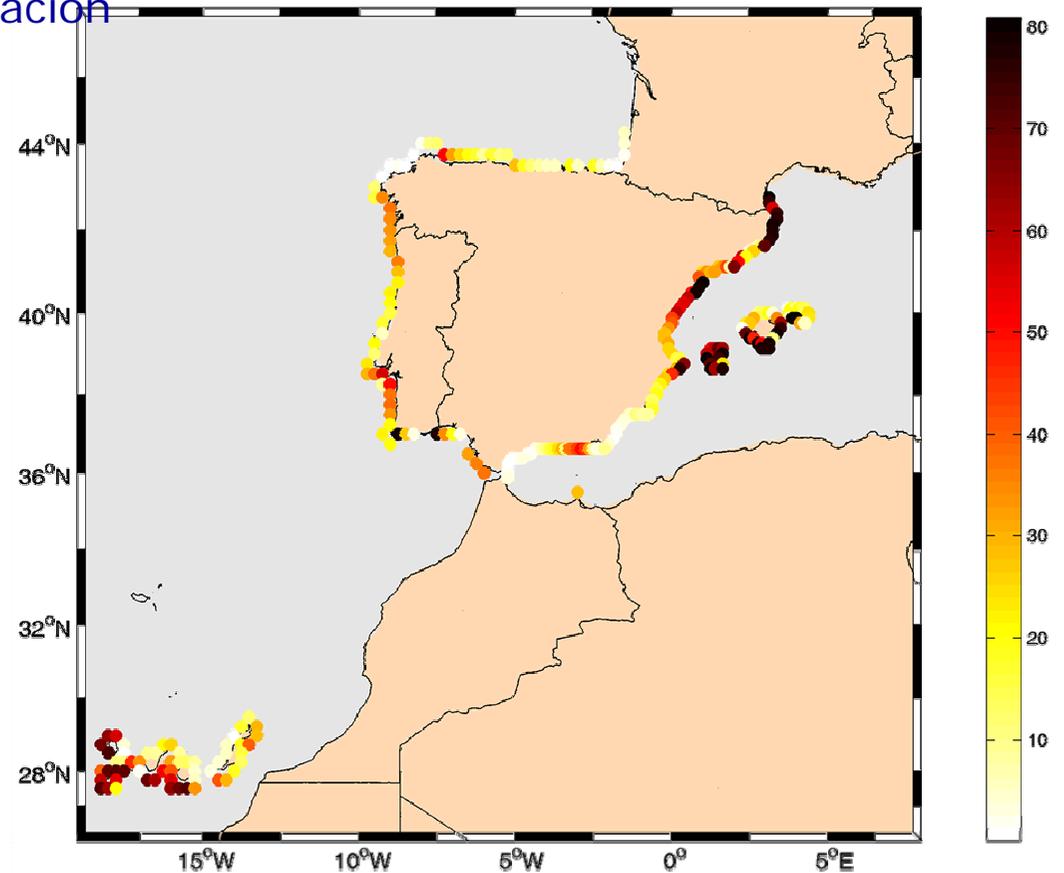
Retroceso de la línea de costa por variación del ángulo del flujo medio de energía

1000 m longitude beaches !

Obtained in 10 m water depth using Snell's Law

DATOS REPRESENTATIVOS		
Costa Brava, Sur de las Islas Baleares y Canarias	Norte de Galicia y Sur Mediterráneo	Resto costa
$RE_{max} = 70$ m	$RE_{max} = 10$ m	$RE_{max} = 20$ m

Retroceso playas por variación de θ



Año Horizonte: 2050

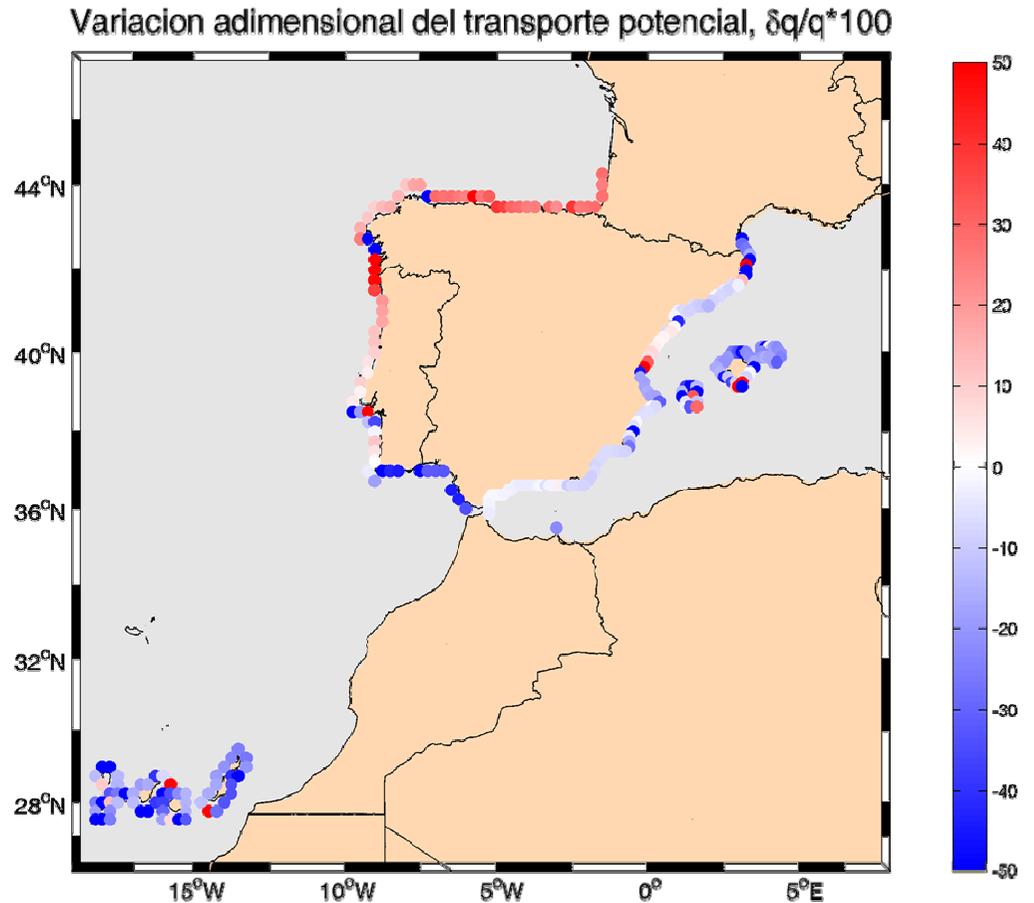
Efectos en la costa española

Fase II: Evaluar cambios en la costa: playas, puertos, estuarios...

Variación del transporte longitudinal

Obtained using Snell's Law

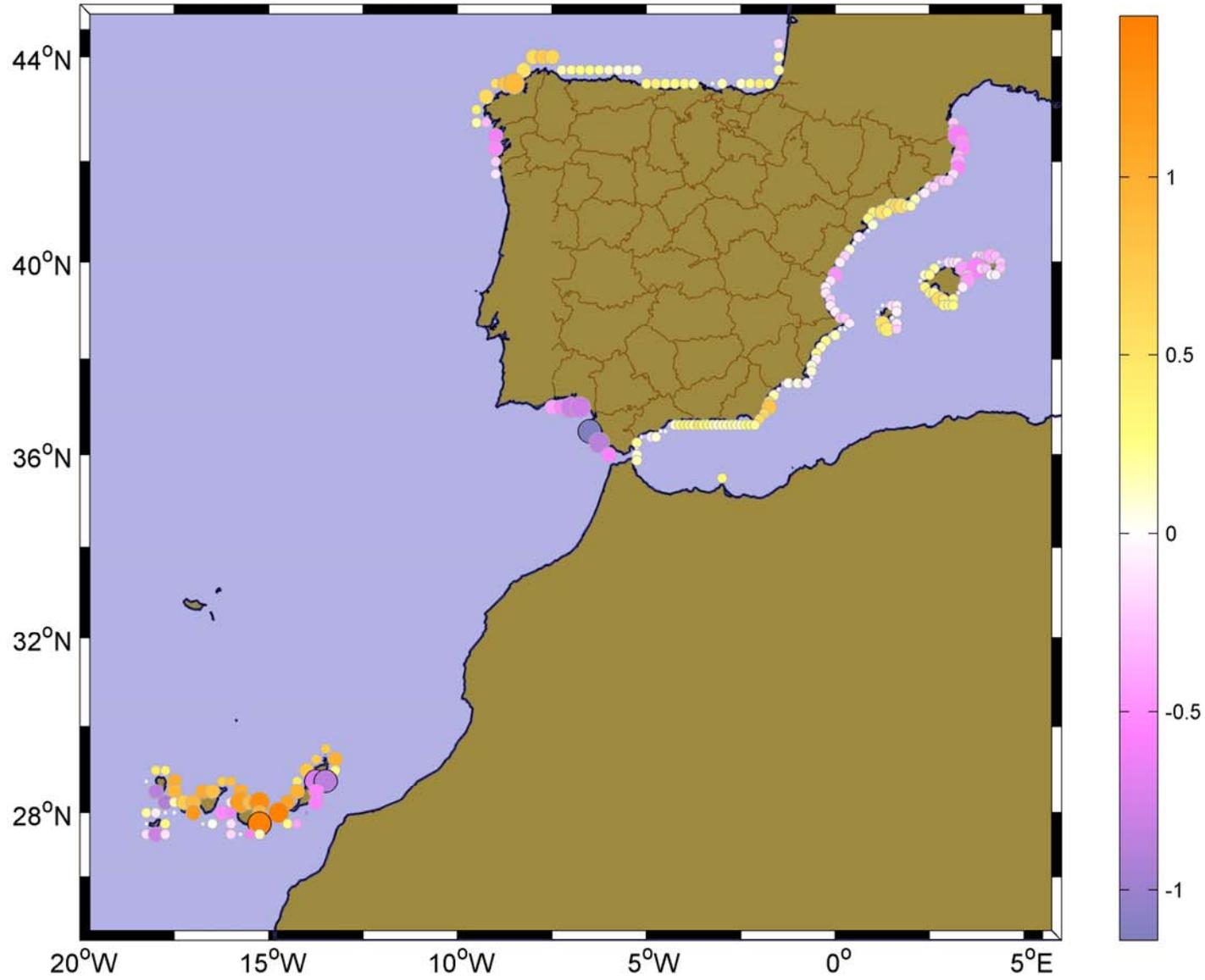
DATOS REPRESENTATIVOS		
Costa Gallega, Costa Cantábrica	Costa Mediterránea	Golfo de Cádiz y Mar de Alborán
↑ 40 %	↓ 20-10 %	↓ 40 %



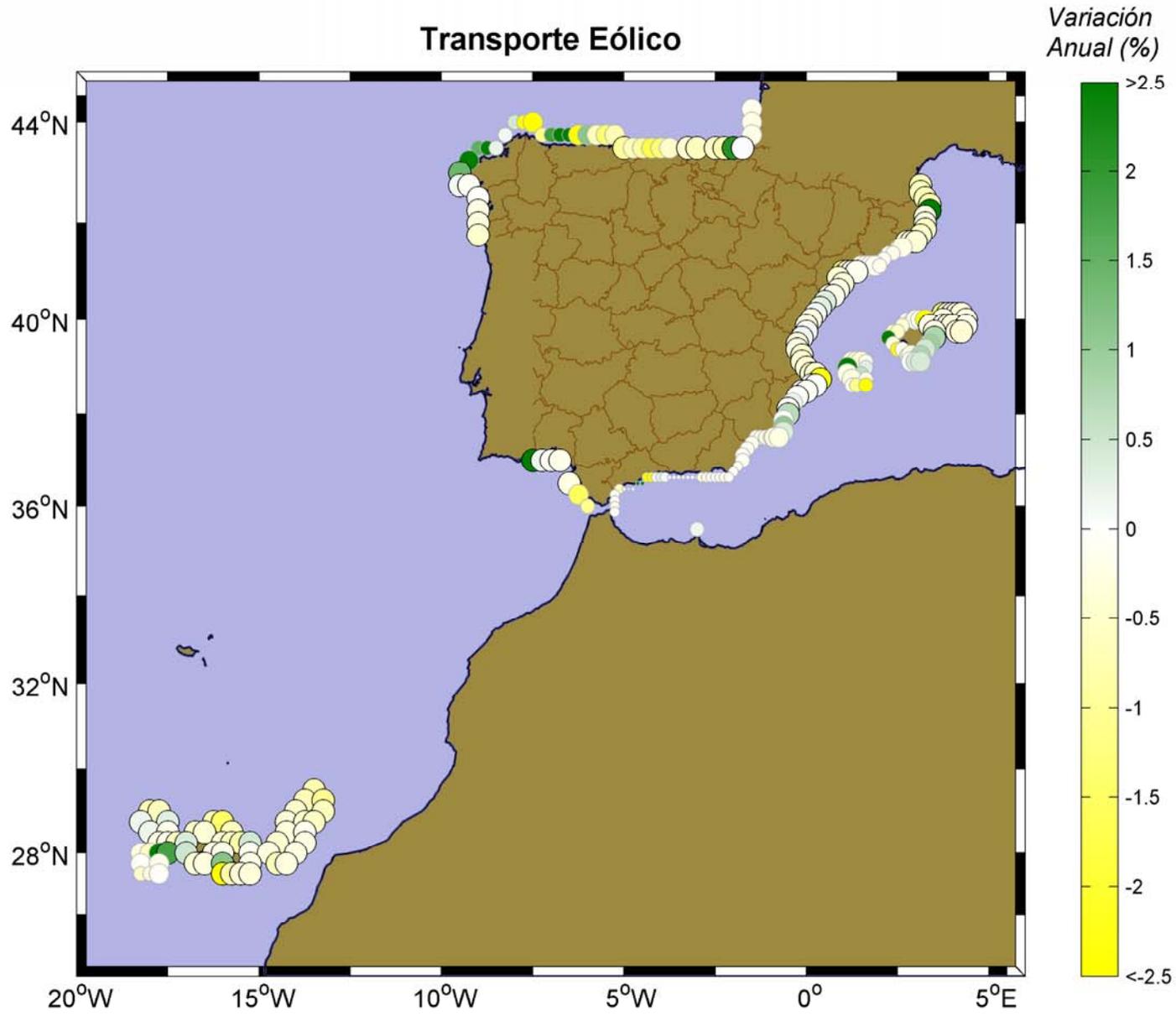
Año Horizonte: 2050

Estabilidad no limitada profundidad

Variación Anual (%)



Transporte Eólico



El clima del mar en la ingeniería oceanográfica: variabilidad mensual, anual, decadal, secular,...

Fernando J. Méndez Incera

Instituto de Hidráulica Ambiental "IH Cantabria"

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas

Universidad de Cantabria