



Atlas[®]

Atlas de inundación del litoral peninsular español



DOCUMENTO TEMÁTICO



Ministerio de Medio Ambiente
Dirección General de Costas

Universidad de Cantabria UC

G.I.O.C.
Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas



DOCUMENTO TEMÁTICO

**COTA DE INUNDACIÓN:
ATLAS DE INUNDACIÓN EN EL LITORAL PENINSULAR ESPAÑOL**

SECCIÓN I. INTRODUCCIÓN

SECCIÓN II. DETERMINACIÓN DE LA COTA DE INUNDACIÓN

SECCIÓN III. COTA DE INUNDACIÓN EN EL LITORAL PENINSULAR ESPAÑOL

ANEJOS

ANEJO I. REFERENCIAS

ANEJO II. DEFINICIONES Y LISTA DE SÍMBOLOS

Sección I. Introducción

I.1	Marco del Presente Documento	I.2
I.2	Alcance del Documento.....	I.3
I.3	Estructura del Documento	I.3

SECCIÓN I.

INTRODUCCIÓN



I. INTRODUCCIÓN

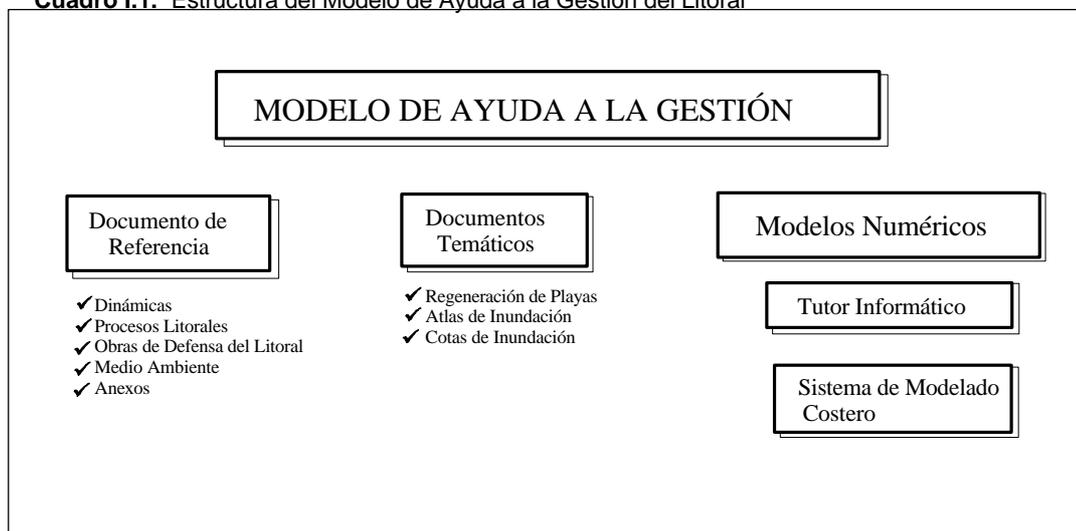
I.1 Marco del Presente Documento

El presente documento forma parte de un conjunto de textos y modelos numéricos, denominados genéricamente *Modelo de Ayuda a la Gestión del Litoral*, que han sido desarrollados con el objetivo de:

- Evaluar con precisión la dinámica de los sistemas costeros.
- Diseñar con fiabilidad las estrategias de actuación necesarias.
- Establecer una metodología para el diseño, ejecución y seguimiento de las actuaciones a realizar en la costa.
- Recopilar la experiencia española en el campo de la Ingeniería Litoral.

La estructura y objetivos particulares de dichos textos y modelos es la siguiente, ver cuadro I.1:

Cuadro I.1. Estructura del Modelo de Ayuda a la Gestión del Litoral



- Documento de Referencia

El objetivo del Documento de Referencia es desarrollar los fundamentos teóricos que se utilizan en los Documentos Temáticos.



- Documentos Temáticos

El objetivo de los Documentos Temáticos es desarrollar la metodología de diseño de las diversas actuaciones en la costa.

- Modelos Numéricos

El objetivo de los Modelos Numéricos es doble:

- Facilitar la aplicación de la información del Documento de Referencia en soporte informático (Tutor Informático de Costas, TIC).
- Ofrecer un paquete de programas numéricos que permitan la correcta utilización de la metodología propuesta en los Documentos Temáticos (Modelado del Sistema Costero, MSC).

I.2 Alcance del Documento

El presente Documento Temático de Cota de Inundación tiene como objetivo específico el desarrollo de una metodología que permita la determinación del régimen del nivel del mar, o régimen de cota de inundación, en un punto del litoral.

Dicha metodología es posteriormente aplicada a la base de datos instrumentales del litoral español y, con base en dichos datos, se presenta un atlas de inundación del litoral peninsular español.

I.3 Estructura del Documento

El presente documento se ha estructurado en tres secciones diferenciadas:

Sección I. En la que se enmarca el presente documento dentro del Modelo de Ayuda a la Gestión del Litoral y se especifica el alcance del mismo.



Sección II. En la que se detalla la metodología propuesta para la determinación de la cota de inundación.

Sección III. En la que se aplica la metodología del cálculo a la base de datos instrumentales del litoral peninsular español y se presentan los gráficos del ATLAS DE INUNDACIÓN.

El documento consta, además, de dos anejos en los que se incluyen referencias bibliográficas así como la lista de los símbolos y definiciones utilizados en el documento.

Anejo I. Referencias

Anejo II. Definiciones y lista de símbolos.

Se ha redactado también un documento complementario denominado “Metodología e información utilizada en la elaboración del Documento Temático Cota de Inundación” en el que se explican con detalle los diferentes pasos y resultados intermedios obtenidos con la aplicación de la metodología.

Sección II. Determinación de la Cota de Inundación

II.1	Introducción	II.2
II.2	Metodologías de Determinación de la Cota de Inundación	II.3
	II.2.1 Métodos directos	II.3
	II.2.2 Métodos indirectos	II.4
II.3	Método de Simulación Empleado	II.8
	II.3.1 Simulación del nivel del mar en mar abierto (nivel de marea).....	II.10
	II.3.2 Simulación del nivel del mar en playas (cota de inundación)	II.11

SECCIÓN II.

DETERMINACIÓN DE LA COTA DE INUNDACIÓN





II. DETERMINACIÓN DE LA COTA DE INUNDACIÓN

II.1 Introducción

El régimen de inundación alcanzado por una playa por acción de la dinámica marina y meteorológica es un fenómeno especialmente complejo, tanto por el gran número de elementos que intervienen en el proceso de inundación, como por la interacción entre dichos elementos.

El fenómeno de inundación en una playa puede ser representado de acuerdo al siguiente esquema, Figura II.1: en un instante determinado, la playa está caracterizada por un nivel de marea (NM) compuesto por la marea astronómica y la marea meteorológica (MA+MM) y una batimetría. Sobre dicho nivel de marea se encuentra el oleaje que, en función de sus características y de la batimetría de la playa, se propaga hacia la costa. Al alcanzar la costa, el oleaje rompe en la playa, produciéndose un movimiento de ascenso de la masa de agua a lo largo del perfil de playa *run-up* (RU). Todos estos factores están relacionados entre sí. Además de la interacción entre los elementos (oleaje-batimetría-nivel de marea-ascenso), el fenómeno de la inundación presenta la complicación añadida de que algunos de los factores (oleaje, viento...) son variables aleatorias y, por tanto, su presentación está sujeta a una determinada probabilidad.

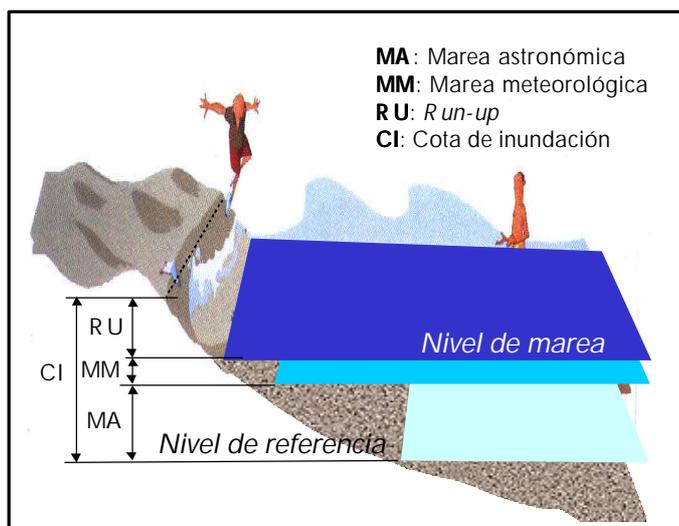


Figura II.1. Factores que afectan a la cota de inundación



Por consiguiente, la determinación de la cota de inundación es un problema estocástico de extremos. Una de las consecuencias de que sea un problema estocástico, es que no existe un “límite determinista al que llegan las olas durante el peor temporal”, sino que cada nivel tendrá “una probabilidad de ser sobrepasado en un temporal determinado”. Por lo tanto, el objetivo que se plantea es la obtención de la función de distribución de la cota de inundación.

II.2 Metodologías de Determinación de la Cota de Inundación

Los métodos existentes para estimar la distribución de la cota de inundación en una determinada localización, usando datos de campo, pueden dividirse en: (1) **métodos directos** en los que se analizan los extremos de los niveles de agua observados y (2) **métodos indirectos** en los que los factores (marea astronómica, marea meteorológica y oleaje) se analizan por separado y el nivel extremo se deduce a partir de ellos. Dentro de estos últimos, a su vez, puede distinguirse entre **métodos indirectos teóricos** en los que los factores son combinados de manera teórica a través de sus funciones de distribución y los **métodos indirectos de simulación**.

En lo que sigue se detallan someramente los diferentes métodos antes mencionados con especial atención al método de simulación que es, por razones que se desarrollan más adelante, el que se ha considerado como más adecuado para la resolución del problema de cota de inundación del litoral español.

II.2.1 Métodos directos

Los métodos directos son, básicamente, el método clásico del máximo anual y el método de excedencias.

Método del máximo anual. El método de análisis de distribuciones de extremos más conocido, simple y ampliamente utilizado es el del máximo anual, Gumbel (1958). Esta aproximación ya ha sido utilizada por varios investigadores para determinar niveles extremos del mar, Lennon (1963), Suthons (1963) y Graff (1981).



De acuerdo con Tawn y Vassie (1991), este método es altamente ineficaz en su uso de los datos y proporciona resultados incorrectos. Estos autores advirtieron que las hipótesis realizadas en el método del máximo anual básicamente dicen que los niveles horarios son: (a) independientes, (b) idénticamente distribuidos y (c) que el número de horas en un año es suficientemente largo para mantener las aproximaciones asintóticas.

Sin embargo, debido a la naturaleza de las mareas y de la dependencia de la serie de marea meteorológica, está claro que (a) y (b) no se cumplen.

El método de excedencias anuales. Se han realizado una serie de propuestas para extender el método del máximo anual con el objeto de incorporar todas las observaciones de niveles extremos independientes en la estimación de la distribución del máximo anual: (1) Método POT (*Peaks over thresholds*), Davidson y Smith (1990); (2) método de excedencia, Tawn (1988) y (3) (point process method), Smith, (1989).

Estos métodos se basan en la teoría del valor límite extremo para sucesiones estacionarias aleatorias y, por tanto, se asume que los niveles extremos son de datos estacionarios. Esta hipótesis es crítica puesto que, debido a la marea, el nivel del agua es altamente no estacionario. De acuerdo con este argumento, el método de excedencias no es apropiado para determinar los niveles extremos, Dixon y Tawn (1994).

II.2.2 Métodos indirectos

Métodos indirectos teóricos

Las aproximaciones indirectas existentes, el método de la probabilidad conjunta (*Joint Probability Method*, JPM), Pugh y Vassie (1978) y el método de la probabilidad conjunta revisado, Tawn y Vassie (1991) son, junto con el método indirecto de simulación que se verá más adelante, las únicas opciones viables para estimar los niveles extremos cuando las series de datos son cortas.

La principal ventaja de estos métodos es explotar nuestro conocimiento de la marea en reducidas series de datos a las que no se puede aplicar el método del máximo anual. Básicamente, estos métodos buscan la función de densidad de las



diferentes variables involucradas y calculan la función densidad del nivel de marea combinando aquellas. La naturaleza de la combinación de las funciones de densidad depende de si hay o no independencia de variables.

Método de la probabilidad conjunta

Este método fue introducido por Pugh y Vassie (1978) para calcular niveles extremos debido al efecto combinado de la marea astronómica y la marea meteorológica (MA y MM). En un momento dado, el nivel observado, después de promediar en el oleaje, tiene 3 componentes: nivel medio, marea astronómica y marea meteorológica. Usando métodos estándar, las dos primeras componentes se pueden apartar quedándonos tan sólo con la serie de marea meteorológica.

Debido a que la marea astronómica es determinista, la función de densidad de dicho factor puede calcularse a partir de expansiones de la serie de marea astronómica, mientras que la función de la marea meteorológica se determina a partir del residuo armónico.

La función de densidad del nivel de marea se calcula finalmente usando las funciones de densidad de marea astronómica y marea meteorológica. Suponiendo que la marea astronómica y la marea meteorológica pueden ser consideradas independientes, entonces

$$p(z) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{MA}(z - y) p_{MM}(y) dy \quad (1)$$

donde $p_{MA}(z - y)$, $p_{MM}(y)$ y $p(z)$ son las funciones de densidad de marea astronómica, marea meteorológica y nivel de marea respectivamente.

La extensión del método propuesto por Pugh y Vassie (1978) al objeto de incorporar el *run-up* del oleaje, ha sido realizada recientemente por Medina et al. (1997). La inclusión del *run-up* nos lleva a un problema con 2 variables estocásticas, marea meteorológica y RU, extendiendo el JPM desarrollado por Pugh y Vassie (1978) que considera sólo MM.

En este nuevo problema debemos conocer la distribución de las variables MM y RU. Además, debe tenerse en cuenta la posible dependencia entre estas



dos variables. Si MM y RU son dependientes, la función de densidad para el nivel del mar (cota de inundación) resulta:

$$p(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_{MA}(z - y - x) p_{MM,RU}(y, x) dx dy \quad (2)$$

donde $p_{MM, RU}(y, x)$ es la función de densidad conjunta de MM y RU. Si la marea meteorológica y el *run-up* son independientes, entonces

$$p(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_{MA}(z - y - x) p_{MM}(y) p_{RU}(x) dx dy \quad (3)$$

donde $p_{RU}(x)$ es la función de densidad de RU.

Hay que tener en cuenta que la disponibilidad de datos de *run-up* en una playa dada suele ser escasa y que, por tanto, la función de densidad de RU se debe inferir a partir de datos de oleaje y de algún estudio de *run-up*.

El estudio del RU en playas artificiales y naturales ha recibido una atención considerable por parte de los investigadores en los últimos años; por ejemplo Guza y Thornton (1981), Holman (1986), Nielsen y Hanslow (1991), Holland y Holman (1993).

En este estudio, se utiliza la distribución obtenida por Nielsen y Hanslow (1991) para playas naturales. Usando distribuciones de RU medidas en un amplio espectro de playas de arena, estos autores mostraron que, para un estado de mar, la distribución de Rayleigh es un modelo estadístico razonable para el máximo nivel alcanzado por olas individuales. Este resultado también se obtuvo teóricamente por Battjes (1971) para el caso especial de correlación perfecta entre H y T . Esto es:

$$F(R_u) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{R_u - R_{100}}{R_{urms}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

donde R_{100} es el nivel más alto excedido por el 100% de las olas y R_{urms} es la escala vertical de la distribución (*run-up* cuadrático medio). Hay que señalar que en el artículo original los autores utilizan L_{zwm} en lugar de R_{urms} .



Para condiciones extremas de oleaje, se puede asumir que la playa es disipativa y $R_{urms} = 0.05 (H_{rms} L_o)^{0.5}$ siendo H_{rms} la altura de ola cuadrática media y L_o la longitud de onda en profundidades indefinidas. Nótese que para una relación típica $T_S = a_1 H_S^{0.5}$ se obtiene que $R_{urms} = a_2 H_S$, donde a_1 y a_2 son dos parámetros que dependen del clima de oleaje de la zona.

Hay que señalar que la función de densidad de RU es una función de Rayleigh cuyo parámetro R_{urms} depende de la variable aleatoria H_S que tiene su propia función de densidad (por ejemplo LogNormal) por lo que la función de densidad de la cota de inundación es:

$$p(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_{MA}(z - y - x) p_{MM}(y) p_{RU}(x) dx dy \quad (5)$$

con

$$p_{RU}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{RU}^*(x, H_S) p_{H_S}(H_S) dH_S \quad (6)$$

siendo $p_{RU}^*(\cdot)$ la función de densidad de Rayleigh y $p_{H_S}(\cdot)$ la función de densidad de H_S .

El método de la probabilidad conjunta asume que los niveles extremos horarios son independientes. Claramente, los niveles horarios no son independientes pero los niveles extremos pueden ser sólo ligeramente dependientes. Tawn y Vassie (1989) estudiaron este aspecto y encontraron que la hipótesis era falsa pero conllevaba solo una pequeña sobreestimación de los niveles de retorno.

En el método revisado de la probabilidad conjunta (Tawn y Vassie (1989), Pérez y Serrano (1997)), la dependencia temporal de las variables se considera a través de un parámetro, llamado índice extremal θ , que se puede obtener empíricamente a partir de los datos.

Aunque los resultados del método revisado de la probabilidad conjunta son válidos cuando hay dependencia temporal entre variables, los registros existentes no son lo suficientemente largos para tener datos en las regiones de los



extremos de MA y MM y, por lo tanto, la determinación del índice extremal es imposible muchas veces.

Métodos indirectos de simulación

Del análisis previo se puede concluir que los métodos directos no pueden ser usados para determinar niveles extremos en el litoral español debido a la falta de registros largos. El método de la probabilidad conjunta, y especialmente el método de la probabilidad conjunta revisada, son adecuados para el análisis de niveles máximos cuando los factores involucrados se limitan a la marea meteorológica y la marea astronómica (con el comentario realizado anteriormente relativo a la necesidad de un registro suficientemente largo para estimar θ). El método de la probabilidad conjunta puede también ser utilizado como una primera aproximación para el cálculo de la cota de inundación en playas con la inclusión del RU. Sin embargo, es necesario realizar hipótesis simplificadoras como, por ejemplo, la definición de una relación T_s - H_s . Dada la importancia de ambas variables, período y altura de ola, en el *run-up* del oleaje y la disponibilidad de datos medidos de la distribución T_s - H_s resulta más adecuado el uso de un método que permita incluir dicha información.

Los métodos de simulación son métodos numéricos genéricos que generan una población de datos con base en las funciones de distribución de las variables que gobiernan dicha población. Estos métodos permiten un modelado más real de los procesos físicos que tienen lugar al incluir todo tipo de relación entre variables, siempre que ésta sea conocida o determinada a partir de datos medidos. En lo que sigue se detalla la simulación realizada para la determinación de la cota de inundación en el litoral peninsular español.

II.3 Método de Simulación Empleado

La metodología utilizada para el cálculo del régimen de niveles de cota de inundación presentada en este documento ha consistido en la simulación del proceso físico de inundación con base en las funciones de distribución de las variables marea astronómica, marea meteorológica, altura de ola significativa y período de pico. Estas funciones de distribución se han determinado con base en la información disponible en las fuentes:



- Boyas pertenecientes a la REMRO.
- Mareógrafos pertenecientes a la REDMAR.
- Mareógrafos pertenecientes al IEO.
- Datos visuales del National Climatic Data Center de Asheville

Por motivos de claridad de exposición, el desarrollo detallado del método de simulación así como el tratamiento estadístico de los datos utilizados se presenta en un documento complementario denominado “Metodología e información utilizada en la elaboración del Documento Temático Cota de Inundación” (en adelante documento complementario), indicándose, a continuación, las líneas básicas de la metodología aplicada.

El proceso general del cálculo de un régimen de niveles de cota de inundación es el siguiente:

- Estudio de la dependencia estadística entre las variables involucradas.
- Estudio de la dependencia temporal entre datos sucesivos de una variable.
- Obtención de las funciones de distribución de las diferentes variables.
- Establecimiento de formulaciones para factores de los que no hay información directa (por ejemplo oleaje a pie de playa en función de oleaje en boya, *run-up* en función de oleaje a pie de playa).
- Simulación temporal por medio de Monte Carlo.
- Determinación de los regímenes de cota de inundación.

Para todas las zonas analizadas se ha determinado la cota de inundación en dos supuestos diferentes que se han denominado:

Mar abierto: en el que los únicos factores que generan variación del nivel del mar son la marea astronómica y la marea meteorológica. Al nivel del mar obtenido como suma de estos dos factores se le denominará, en el presente documento, nivel de marea.

Playas: en el que el nivel del mar está gobernada por la marea astronómica y meteorológica, así como por el *run-up* del oleaje. Al nivel del mar obtenido como suma de estos tres factores se le denominará, en el presente documento, cota de inundación.



II.3.1 Simulación del nivel del mar en mar abierto (nivel de marea)

Para la realización de la simulación se considera que la marea astronómica es un fenómeno determinista que en un instante dado, t , viene dada por:

$$S_{MA}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (7)$$

donde a_0 , a_i , ω_i , φ_i son datos de los mareógrafos (nivel medio, amplitud, frecuencia y fase de los componentes armónicos) y N es el número de armónicos considerados.

Los datos de marea meteorológica, obtenidos a partir de los residuos de las series medidas por los mareógrafos, son analizados estadísticamente. Para cada serie de datos se analiza su dependencia con la serie de marea astronómica y la distribución teórica de mejor ajuste. En todos los casos analizados los datos de marea astronómica y marea meteorológica mostraron ser independientes desde el punto de vista estadístico encontrándose como mejor ajuste de las series de marea meteorológica la función de Gumbel de máximos. En concreto todas las series han sido ajustadas con dos funciones de Gumbel, una para los valores medios y otra para los extremos. (Véase documento complementario).

El proceso de simulación ha consistido en la generación numérica de niveles de mar como suma del nivel debido a marea astronómica más el nivel producido por la marea meteorológica.

$$S_{NM}(t) = S_{MA}(t) + S_{MM}(t) \quad (8)$$

Para la obtención de la serie de niveles $S_{NM}(t)$, se realizan las siguientes consideraciones:

- Se obtiene un dato de nivel de mar NM, cada minuto.
- Se admite que la marea meteorológica MM, es constante en el intervalo de una hora.
- Para la secuencia temporal de datos de marea meteorológica se utiliza una serie ARMA (0, 0).
- El valor de marea meteorológica se obtiene a partir de un número aleatorio $x_r = (0,1)$ de acuerdo con:



$$\begin{aligned}
 S_{MM}(t) &= \lambda_m - \delta_m \ln(-\ln x_r) && \text{si} && x_r < F_u \\
 S_{MM}(t) &= \lambda_e - \delta_e \ln(-\ln x_r) && \text{si} && x_r \geq F_u \\
 F_u &= \exp \left[-\exp \left(\frac{\lambda_e - \lambda_m}{\delta_e - \delta_m} \right) \right]
 \end{aligned}$$

donde los valores de λ_m , δ_m , λ_e y δ_e corresponden a los ajustes de las ramas media (m) y extremal (e) de la serie de datos de marea meteorológica. (Véase documento complementario).

El cálculo del régimen medio de NM se realiza a partir de la serie de valores obtenida por simulación. El régimen extremal de NM se calcula como la función de distribución de los máximos anuales de la variable NM.

II.3.2 Simulación del nivel del mar en playas (cota de inundación)

La determinación del régimen de niveles de mar en una playa requiere el conocimiento de la distribución del *run-up* debido al oleaje. Dado que, en general, no existen datos medidos de dicha variable, la estima de dicho fenómeno se realiza a partir de la formulación de Nielsen y Hanslow (1991). Esta formulación exige el conocimiento de la altura de ola significativa y el período de pico del oleaje a pie de playa, así como el talud medio de la zona de ascenso descenso de la misma.

La metodología que se expone a continuación asume que dichos valores son conocidos, es decir, se han efectuado las propagaciones necesarias para conocer los regímenes de H_S-T_p en la playa. Esta metodología tiene carácter general y puede ser utilizada para cualquier playa.

En el apartado III.3 del presente documento se detallan las simplificaciones que se han efectuado para la determinación del oleaje a pie de playa en cualquier punto del litoral peninsular y que han permitido la confección del ATLAS DE INUNDACIÓN que se acompaña. Las implicaciones y restricciones de estas simplificaciones son comentadas con detalle en el apartado III.4 del presente documento.



Al igual que en el caso de mar abierto, el método de simulación se inicia con la realización de un test de independencia de las variables involucradas: marea astronómica, marea meteorológica, altura de ola significativa, período de pico. Los resultados obtenidos señalan que:

- La marea astronómica es independiente del resto de las variables. En algunos casos se ha encontrado una cierta correlación con la altura de ola significativa, si bien dicha correlación no es significativa estadísticamente.
- Existe una dependencia, en la mayor parte de las series analizadas, entre la marea meteorológica y el estado de mar (H_S).
- Existe una dependencia entre las series de alturas de ola significativa y las series de período de pico.
- Existe una dependencia entre datos consecutivos de marea meteorológica y entre datos consecutivos de oleaje.

Teniendo en cuenta las consideraciones realizadas en los puntos anteriores, se han determinado las funciones de distribución de las diferentes variables para cada una de las zonas de estudio. (Véase documento complementario).

El proceso de simulación ha consistido en la generación numérica de niveles de mar en la playa (cota de inundación) como suma del nivel de la marea astronómica más el nivel producido por la marea meteorológica más el nivel generado por el *run-up* del oleaje, figura II.2.

$$S_{CI}(t) = S_{MA}(t) + S_{MM}(t) + R_U(t) \quad (9)$$

Para la obtención de la serie de niveles $S_{CI}(t)$, se realizan las siguientes consideraciones:

- La marea astronómica es un proceso determinista que puede ser estimado por:

$$S_{MA}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega_i t + \phi_i)$$

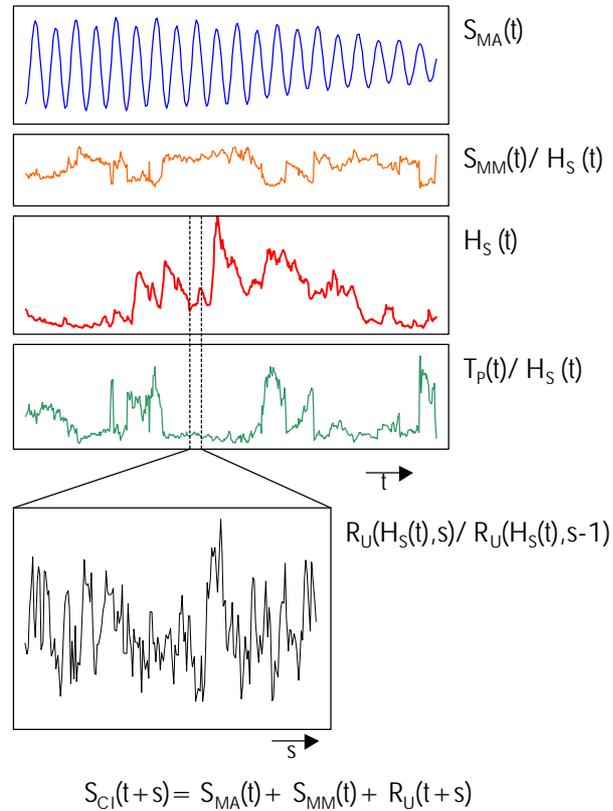


Figura II.2

- Los datos de altura de ola significativa a pie de playa se caracterizan por medio de dos distribuciones de Gumbel, una para la rama media y otra para la extremal (véase documento complementario). El valor de la altura de ola significativa H_s de un estado de mar se obtiene a partir de un número aleatorio $x_r = (0, 1)$ de acuerdo con:

$$H_s(t) = \lambda_m - \delta_m \ln(-\ln x_r) \quad \text{si} \quad x_r < F_u$$

$$H_s(t) = \lambda_e - \delta_e \ln(-\ln x_r) \quad \text{si} \quad x_r \geq F_u$$

$$F_u = \exp \left[-\exp \left(\frac{\lambda_e - \lambda_m}{\delta_e - \delta_m} \right) \right]$$

$$H_s(t) = ARMA(0,0)$$



donde los valores de λ_m , δ_m , λ_e , δ_e corresponden a los ajustes de las distribuciones de altura de ola significativa de la rama media y extremal.

- El período de pico asociado a dicho estado de mar se obtiene de la función de distribución conjunta H_s/T_p por medio de otro número aleatorio $y_r = (0,1)$.
- Se asume que la distribución de T_p es $N(\mu, \sigma^2)$ y que está condicionada a H_s con:

$$\mu_{T_p/H_s} = a + b\sqrt{H_s}$$

$$\sigma_{T_p/H_s} = \sum_{i=0}^3 a_i H_s^i$$

- La distribución de *run-up* del estado de mar se asume que es una función Rayleigh de acuerdo a la formulación de Nielsen y Hanslow (1991).
- La función de densidad conjunta de *run-up* consecutivas se ajusta, de acuerdo a Sobey (1996), a una función del tipo:

$$f(R_{u1}, R_{u2}) = \frac{4R_{u1}R_{u2}}{R_{urms}^2(1-K^2)} \exp\left[-\frac{R_{u1}^2 + R_{u2}^2}{R_{urms}^2(1-K^2)}\right] I_0\left(\frac{K}{1-K^2} \frac{2R_{u1}R_{u2}}{R_{urms}^2}\right)$$

donde el parámetro K puede definirse en función del coeficiente de correlación entre *run-ups* consecutivos r_{RU} . (Véase documento complementario).

- Con el valor del período medio \bar{T} , asociado al período de pico T_p , del estado de mar objeto de estudio, y asumiendo que la duración del estado de mar es de 1 hora, se determinan todos los niveles de *run-up* de dicho estado de mar.
- Para cada estado de mar se estima la marea meteorológica asociada MM/H_s . Se asume que la distribución de MM es $N(\mu, \sigma^2)$ condicionada a H_s con:

$$\mu_{MM/H_s} = \sum_{i=0}^2 a_i H_s^i$$



$$\sigma_{MM/H_s} = \sum_{i=0}^3 a_i H_s^i$$

- Los valores límites admitidos para las distintas variables son:
 - $MM_{m\acute{a}x} = MM$ (910 mb), bajo la hipótesis de borrasca estática
 - $MM_{m\acute{i}n} = MM$ (1200 mb)
 - $H_{sm\acute{a}x} = H_s$ (R= 500 años en ROM 03-91)
 - $H_{sm\acute{i}n} = 0.0$ m
 - $T_{m\acute{a}x} = 22$ s
 - $T_{m\acute{i}n} = f(\text{zona})$

El cálculo del régimen medio de las sobreelevaciones en la playa se realiza a partir de la serie de valores obtenida por simulación. El régimen extremal se calcula con la función de distribución de los máximos anuales de S_{Cl} .

Sección III. Cota de Inundación en el Litoral Peninsular Español

III.1	Introducción	III.2
III.2	Zonificación del Litoral	III.2
III.3	Características de la Información Utilizada.....	III.6
III.4	Características de los Resultados	III.8
	III.4.1 Nivel de referencia.....	III.8
	III.4.2 Nivel del mar en mar abierto (nivel de marea)	III.8
	III.4.3 Nivel del mar en playas (cota de inundación).....	III.9
	III.4.4 Consideraciones para el uso de los resultados	III.10
III.5	ATLAS DE INUNDACIÓN.....	III.13

SECCIÓN III.

**COTA DE INUNDACIÓN EN EL LITORAL
PENINSULAR ESPAÑOL**



III. COTA DE INUNDACIÓN EN EL LITORAL PENINSULAR ESPAÑOL

III.1 Introducción

La caracterización del régimen de niveles y, en particular, el régimen de niveles máximos alcanzados por la acción conjunta de la dinámica marina y atmosférica es imprescindible para poder abordar cualquier estudio y proyecto de ingeniería marítima.

Al objeto de proporcionar al proyectista de dicha información se ha procesado la información disponible en las bases de datos del Programa de Clima Marítimo e Instituto Español de Oceanografía de acuerdo con la metodología presentada en la Sección II del presente documento y desarrollada en el documento complementario.

Con base en dicha información y metodología se han confeccionado una serie de gráficos en los que se presentan los regímenes de niveles en mar abierto y playas del litoral peninsular español. La ausencia de datos de oleaje en las diferentes fachadas de las islas de los archipiélagos Balear y Canario ha imposibilitado la confección de gráficos de dichas zonas.

En la presente Sección se detallan las características de la información utilizada y las restricciones que han de tenerse en cuenta en el uso de la información presentada en el ATLAS DE INUNDACIÓN.

III.2 Zonificación del Litoral

A efectos de caracterización del régimen de niveles del litoral se ha establecido una zonificación del mismo en “áreas homogéneas” de acuerdo con sus características de oleaje, marea astronómica y marea meteorológica, configuración de la costa y el emplazamiento de las fuentes de información disponible. En el análisis efectuado se asume que el régimen de inundación dentro de un “área homogénea” es idéntico en todos los puntos del litoral de dicha zona. Esta zonificación, necesaria por las limitaciones de información



disponible, puede dar lugar a saltos bruscos del régimen de inundación entre zonas limítrofes, por lo que se llama la atención al lector a ese respecto.

- ❑ Zonificación debido al oleaje: en lo que se refiere a la zonificación del litoral debido al oleaje se ha aceptado la zonificación establecida en la ROM 03.91 que se detalla en la figura III.1.
- ❑ Zonificación debido a la marea astronómica: en función de la información existente y de la configuración de la costa se ha establecido la zonificación por efecto de la marea astronómica recogida en la figura III.2.
- ❑ Zonificación debido a la marea meteorológica: en función de la información existente se ha establecido la zonificación de la marea meteorológica recogida en la figura III.3.
- ❑ Zonificación del litoral: Como resultado de la zonificación de las diferentes variables involucradas en el litoral peninsular queda dividido en doce zonas homogéneas. Dado que el oleaje es, en general, el fenómeno más relevante en la generación del nivel de inundación de una playa, la nomenclatura elegida en la zonificación del litoral del presente documento ha sido la siguiente:
 - Se utiliza la nomenclatura de “Área”, para designar las zonas de oleaje homogéneo. Estas Áreas coinciden con las utilizadas en la ROM 03-91.
 - Dentro de cada Área, se establecen unas “subzonas” que recogen franjas del litoral con características de marea diferenciadas. La nomenclatura de las subzonas queda definida por una letra: (a, b, c, ...).

En la figura III.4 se detallan las diferentes Áreas y subzonas analizadas.

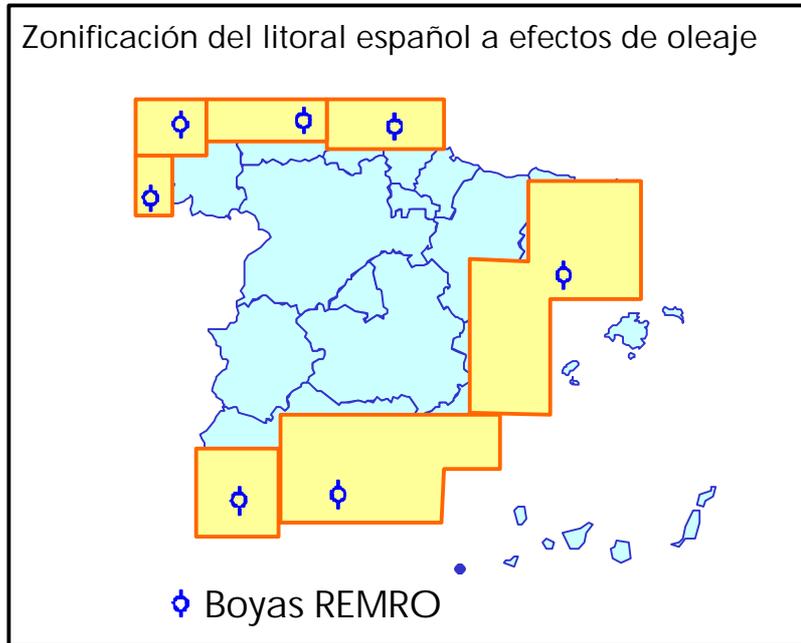


Figura III.1.

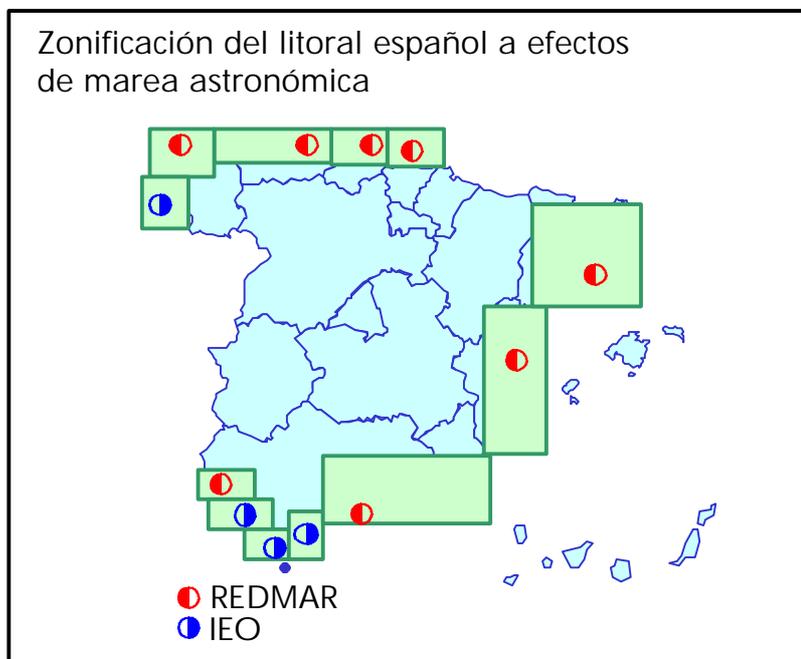


Figura III.2

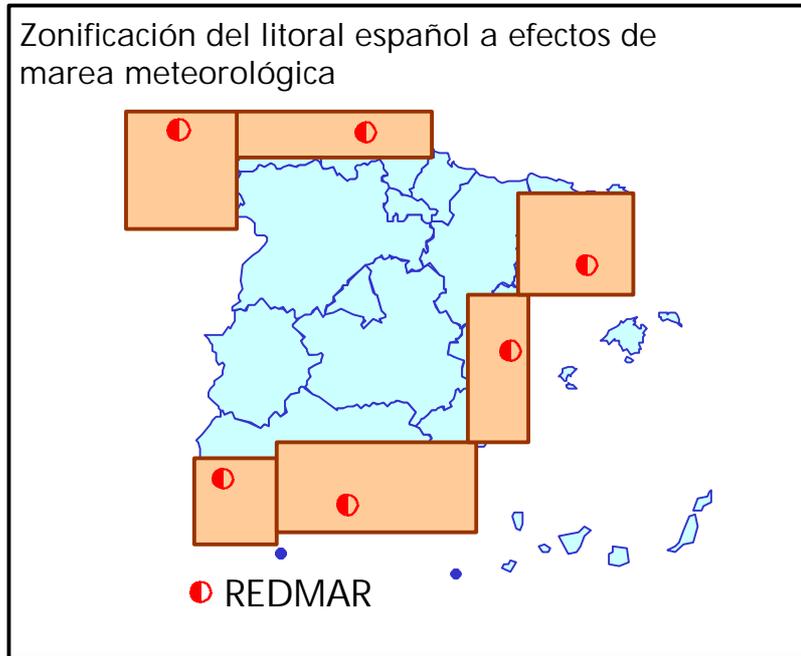


Figura III.3

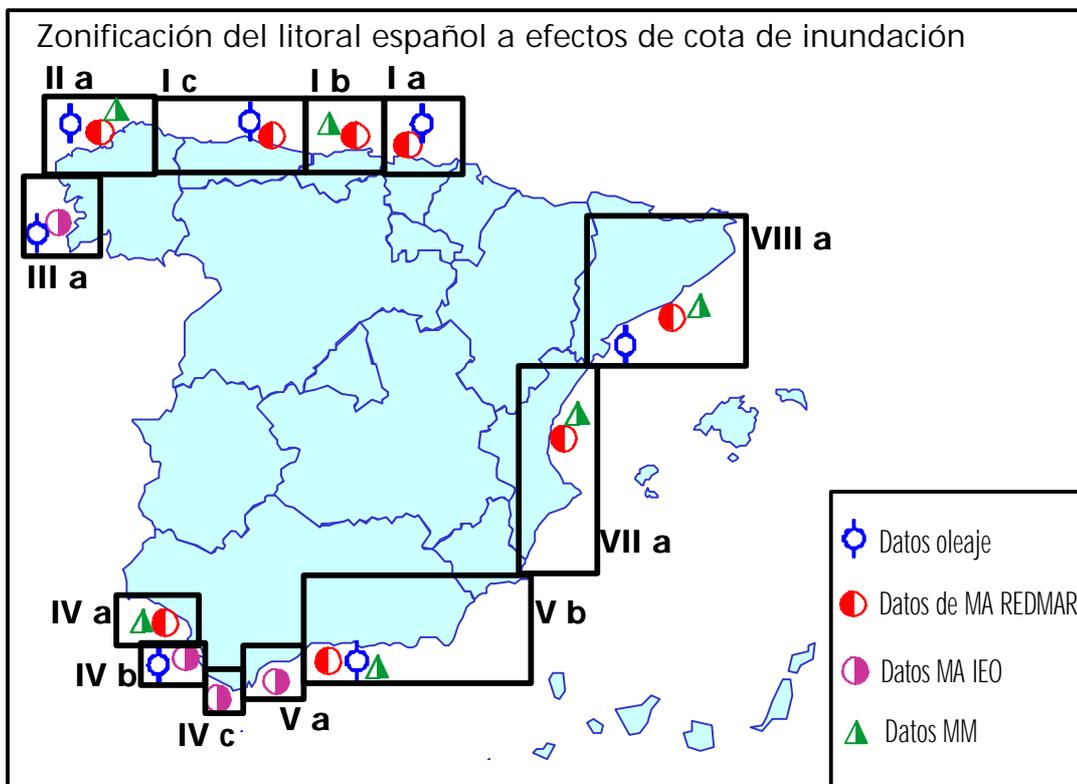


Figura III.4



III.3 Características de la Información Utilizada

La información utilizada en la determinación de los regímenes de nivel de mar presentados en este ATLAS procede de las siguientes fuentes:

- Boyas pertenecientes a la REMRO.
- Mareógrafos pertenecientes a la REDMAR.
- Mareógrafos pertenecientes al IEO.
- Datos visuales del National Climatic Data Center de Asheville.

La posición, profundidad de fondeo y período de medida de los diferentes equipos utilizados en el análisis efectuado, se detalla en el documento complementario.

El régimen de nivel de mar en mar abierto (nivel de marea) se ha evaluado a partir de los datos de marea astronómica y marea meteorológica (residuo) medidos por los diferentes mareógrafos utilizados.

El régimen de nivel de mar en playas (cota de inundación) se ha evaluado a partir de los datos de marea astronómica y marea meteorológica (residuo) medidas por los diferentes mareógrafos y de la estima del oleaje a pie de playa. La metodología utilizada para estimar el oleaje a pie de playa ha sido la siguiente:

- Se admite la hipótesis de que las playas tienen batimetría recta y paralela, es decir, puede utilizarse la ley de Snell para obtener las características del oleaje en cualquier profundidad, conocidas las características en aguas profundas.
- La propagación del oleaje medido por la boya, normalmente escalar, hasta pie de playa se realiza en dos pasos: a) de la boya hacia aguas profundas y b) de aguas profundas hasta la playa. Figura III.5.
- El primer paso tiene como objetivo fundamental recuperar la información direccional del oleaje usualmente no medido por la boya. El procedimiento consiste, básicamente, en encontrar los parámetros de ajuste.

$$H_{s0} = a + bH_{v_0}^c$$

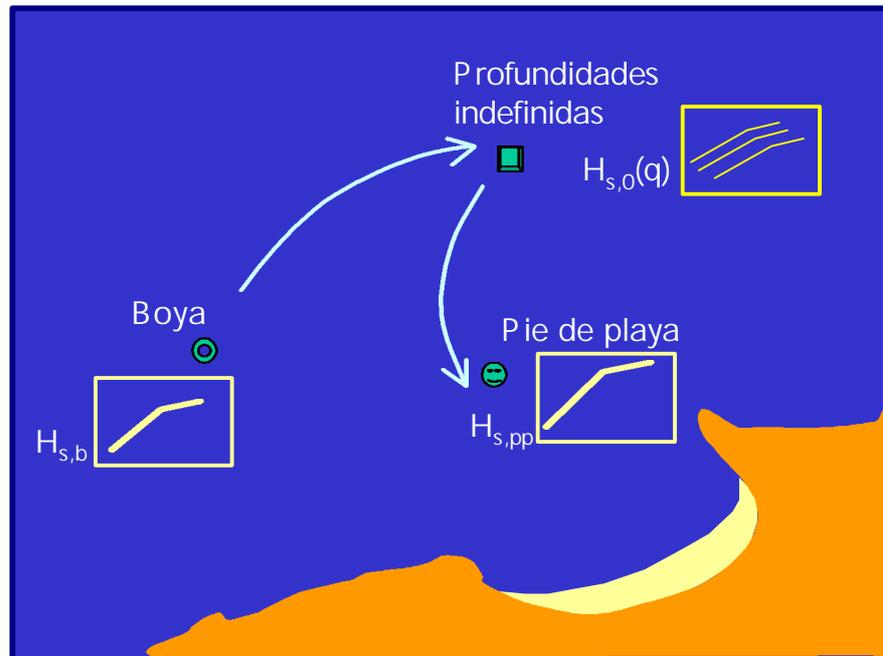


Figura III.5

que ligan la altura de ola significativa H_{s0} medida por la boya con la altura de ola visual H_{v0} de la base de datos de N.C.D.C. (de la que se asume tiene una información direccional correcta). En otras palabras, se intenta calibrar el régimen de altura de ola visual de modo tal que si se propagara hasta la boya, el régimen escalar en dicho punto coincidiera con el medido por la boya. El desarrollo completo del procedimiento se detalla en el documento complementario.

- Una vez obtenido el régimen direccional en aguas profundas, este régimen es propagado por Snell hasta la playa. En este punto se vuelven a integrar todas las direcciones para obtener así el régimen escalar a pie de playa necesario en la formulación de *run-up* de Nielsen y Hanslow (1991).



III.4 Características de los Resultados

III.4.1 Nivel de referencia

Con objeto de utilizar una única referencia para todas las zonas, todos los resultados de nivel de mar se han referenciado al nivel medio del mar en Alicante NMMA. No obstante, y dado que en los trabajos de ingeniería marítima suele ser usual utilizar otras referencias como el cero del Puerto, en el ATLAS de INUNDACIÓN se presenta un pequeño croquis, tomado del Programa de Clima Marítimo (Puertos del Estado – CEDEX), en el que se señala la posición relativa de las diferentes referencias.

III.4.2 Nivel del mar en mar abierto (nivel de marea)

Régimen medio de nivel de marea

Se ha elegido presentar los resultados en doble formato: función de distribución (probabilidad acumulada) y número de horas al año que se supera una cota dada. La relación entre ambos se establece de la siguiente manera:

$$N = 8760 (1-F)$$

donde:

- N es el número de horas al año que se supera la cota dada;
- 8760 es el número de horas del año;
- F es la probabilidad acumulada.

Régimen extremal de nivel de marea

Se ha elegido presentar los resultados en papel probabilístico Gumbel de máximos y en una doble escala: probabilidad acumulada y período de retorno. La relación entre ambas escalas es:

$$R = 1/(1-F)$$

donde R es el período de retorno (años) y F es la probabilidad acumulada.



Igualmente, se han obtenido las bandas de confianza del 90%.

En la hipótesis de población normal, el intervalo de confianza del 90% viene dado por $\left(\bar{x} - 1.645\hat{S}\sqrt{\frac{n}{a}}, \bar{x} + 1.645\hat{S}\sqrt{\frac{n}{b}}\right)$ donde a y b son valores que dependen de n (tamaño de la muestra).

III.4.3 Nivel del mar en playas (cota de inundación)

Para cada Área del ATLAS se han establecido las diferentes “direcciones significativas”, con intervalos de 22.5° , que son posibles en dicha Área. Cada dirección u orientación significativa refleja la normal a las curvas batimétricas de una playa. De este modo, en cada Área del ATLAS es posible evaluar la cota de inundación en playas con diferente orientación, figura III.6.

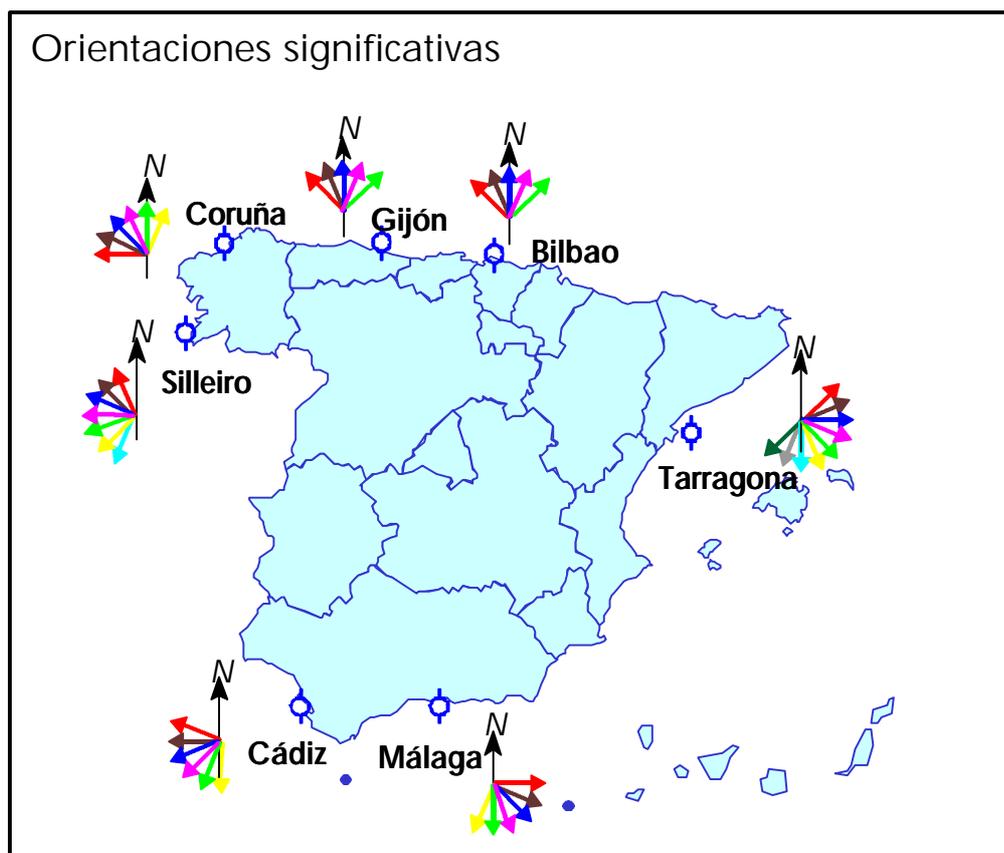


Figura III.6



Régimen medio de cota de inundación en playas

Se ha optado por presentar los resultados para dos tipos de playas: disipativas (líneas continuas) y reflejantes con pendiente $m = 0.15$ (líneas discontinuas).

Los distintos colores presentados corresponden a las diferentes orientaciones de las playas presentadas en el cuadro “Orientaciones significativas”.

Los resultados se presentan en términos de número de olas al año que superan una cota dada.

El número medio de olas por año se ha obtenido a partir de los datos horarios de números de olas del registro de las boyas REMRO.

Régimen extremal de cota de inundación en playas

Al igual que en el régimen extremal de nivel medio del mar, se ha elegido presentar los resultados en papel probabilístico Gumbel de máximos y en la doble escala probabilidad acumulada y período de retorno.

Se presentan, igualmente, las bandas de confianza del 90%, obtenidas de idéntica manera al caso del nivel de marea.

Sólo se presentan los resultados para playas disipativas ya que en las playas reflejantes no lo son indefinidamente y los resultados obtenidos no serían reales.

III.4.4 Consideraciones para el uso de los resultados

Los regímenes de inundación contenidos en el presente ATLAS de INUNDACIÓN constituyen una información de indudable valor para el diseño de actuaciones en el litoral. No obstante, es importante recordar que la elaboración de la información se ha realizado con limitaciones en los datos y/o admitiendo una serie de simplificaciones que el usuario debe tener en cuenta al objeto de aplicar correctamente los resultados del presente ATLAS. En concreto:



- La serie de datos instrumentales de mareógrafos es, hoy en día, corta. Por lo tanto, las extrapolaciones del régimen extremal del nivel de marea más allá de los 50-100 años de período de retorno, deben hacerse con cautela.
- Los regímenes de cota de inundación en playas se han realizado asumiendo que la propagación del oleaje que afecta a dicha playa puede ser calculado por la ley de Snell (batimetría recta y paralela). El usuario deberá verificar la validez de dicha hipótesis en cada playa objeto del estudio.
- La cota de inundación de la playa se obtiene bajo la hipótesis de que el talud de la misma es indefinido. En general, esto no corresponde con la realizada y a partir de una determinada cota del talud de playa cambiará y el perfil de la playa estará compuesto por una zona de berma, duna o paseo marítimo.

Al objeto de estimar de modo simplificativo la cota y/o distancia alcanzada por el run-up del oleaje en un talud compuesto por dos alineaciones, se recomienda utilizar la formulación de van der Meer y Janssen (1995). Esta formulación, figura III.7, nos permite determinar el run-up R_u , en un perfil compuesto por dos alineaciones α y β conocido el run-up que tendría en la primera alineación R_{u0} (dado por el ATLAS) y las características de rugosidad y percolación de la segunda alineación.

Para obtener R_{u0} es necesario hacer una estima del nivel de marea (Z_{NM}) por el cual se propaga la ola que llega a la cota Z_{CI} . En una primera aproximación, si Z_{CI} es la cota de inundación correspondiente a R años de período de retorno, se tomará como Z_{NM} la correspondiente, también, a R años de período de retorno.

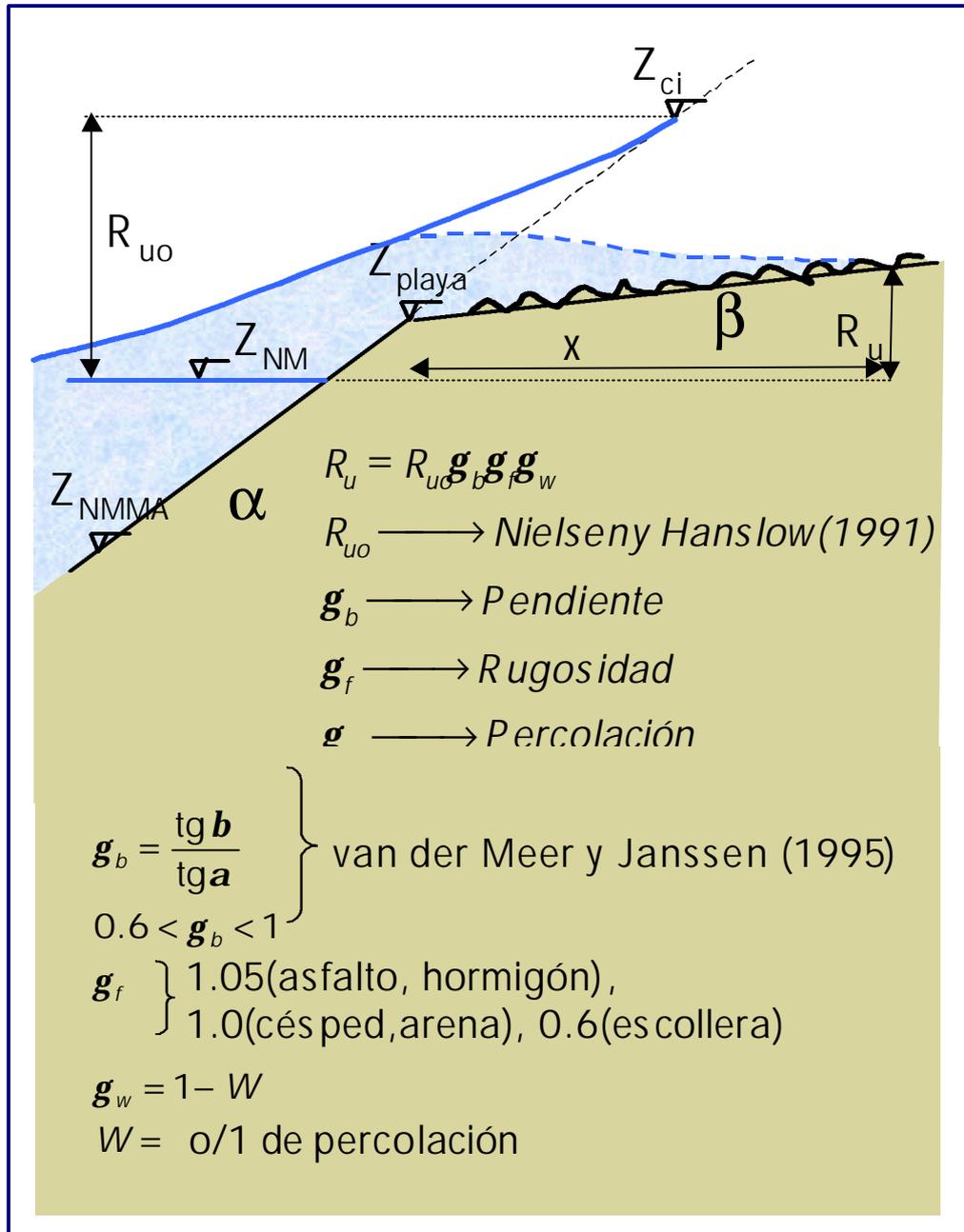
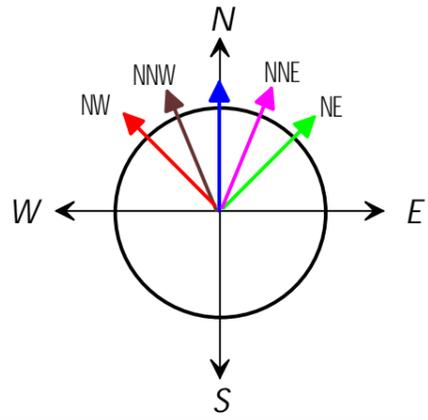


Figura III.7

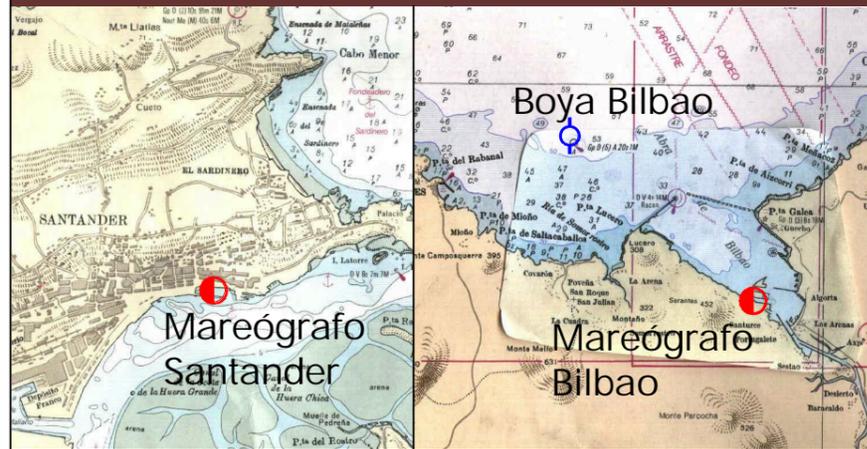


III.5 ATLAS DE INUNDACIÓN

ORIENTACIONES SIGNIFICATIVAS



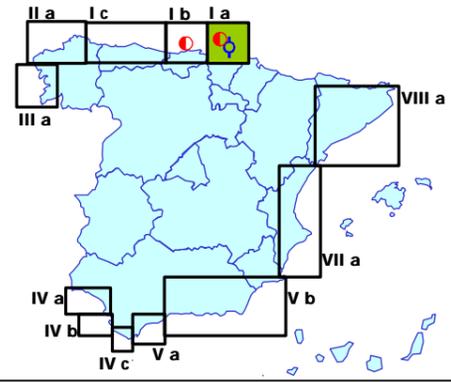
LOCALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN INSTRUMENTAL



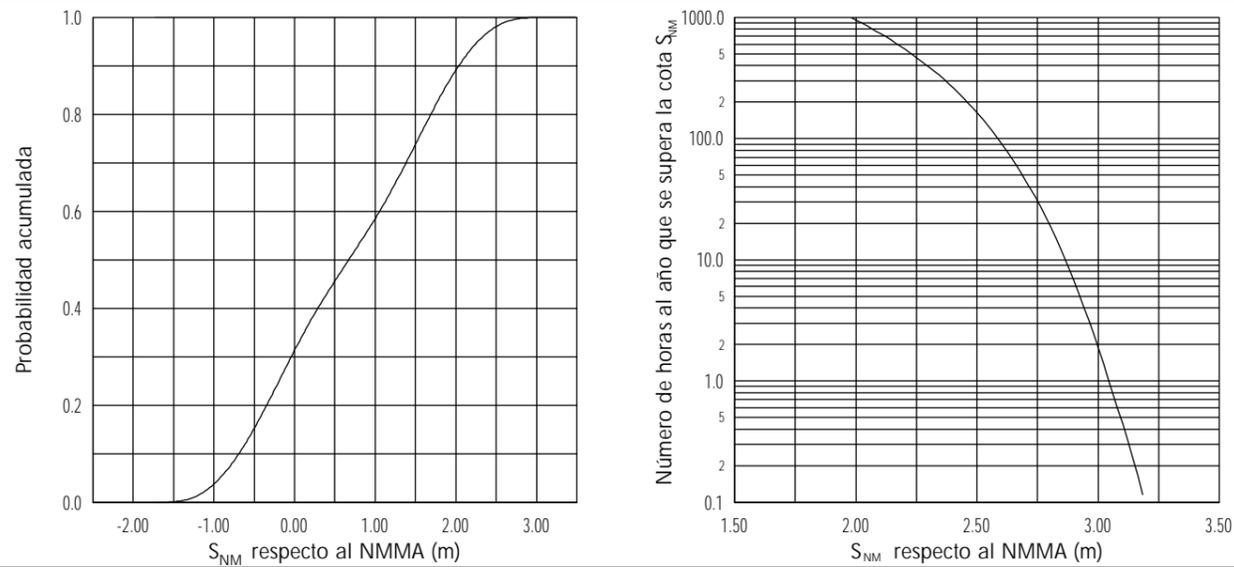
INFORMACIÓN ANALIZADA

MAREA ASTRONÓMICA		OLEAJE	
Mareógrafo	Bilbao	Boya	Bilbao
Situación	43°20'14" N 03°02'09" W	Situación	43°24' N 03°08'36" W
Período medida	1992 / 1996	Profundidad	50 m
MAREA METEOROLÓGICA		OBSERVACIONES VISUALES	
Residuo Nivel del Mar del Mareógrafo de Santander		Cuadrícula: 43°N - 45°N 1.5°W - 7°W Período medida: 1950-1985	

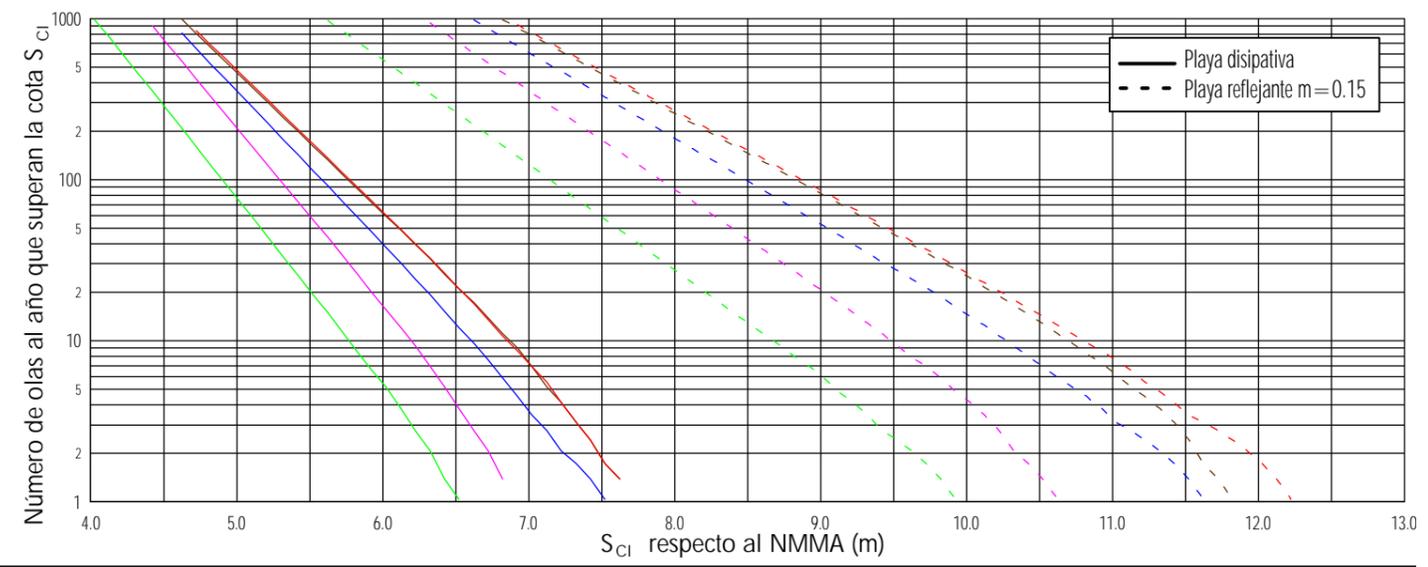
ÁREA - I Subzona - a



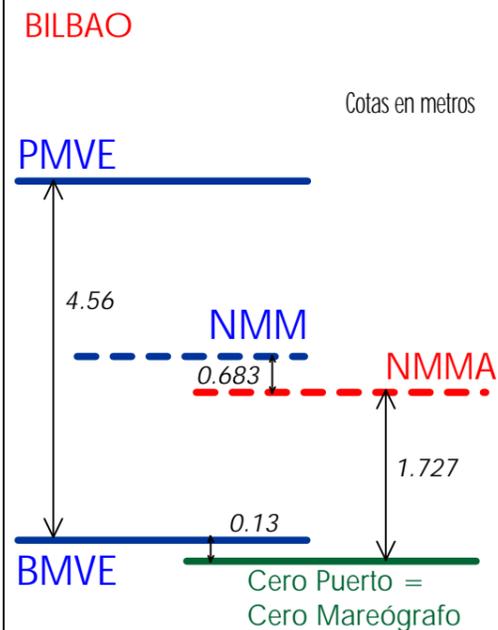
RÉGIMEN MEDIO DEL NIVEL DE MAREA



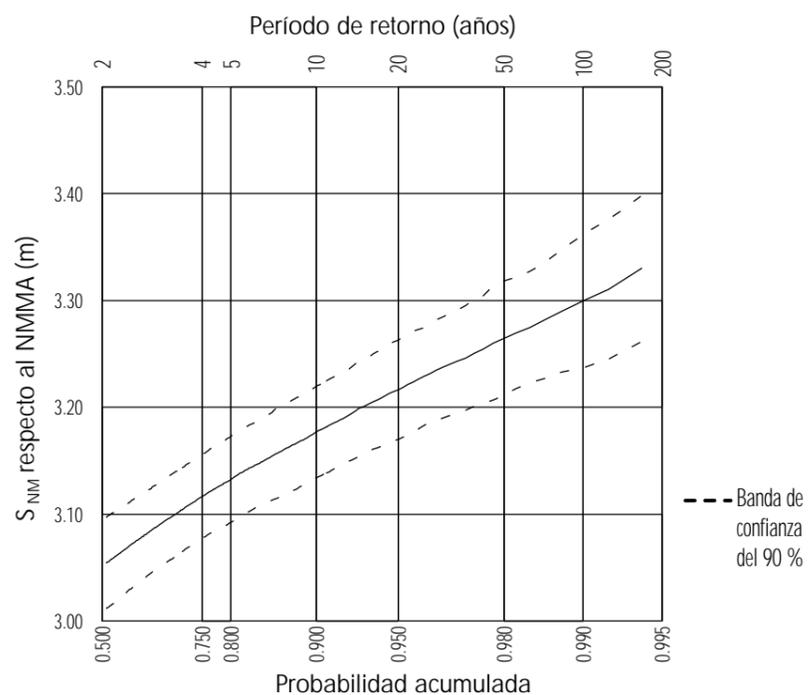
RÉGIMEN MEDIO DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



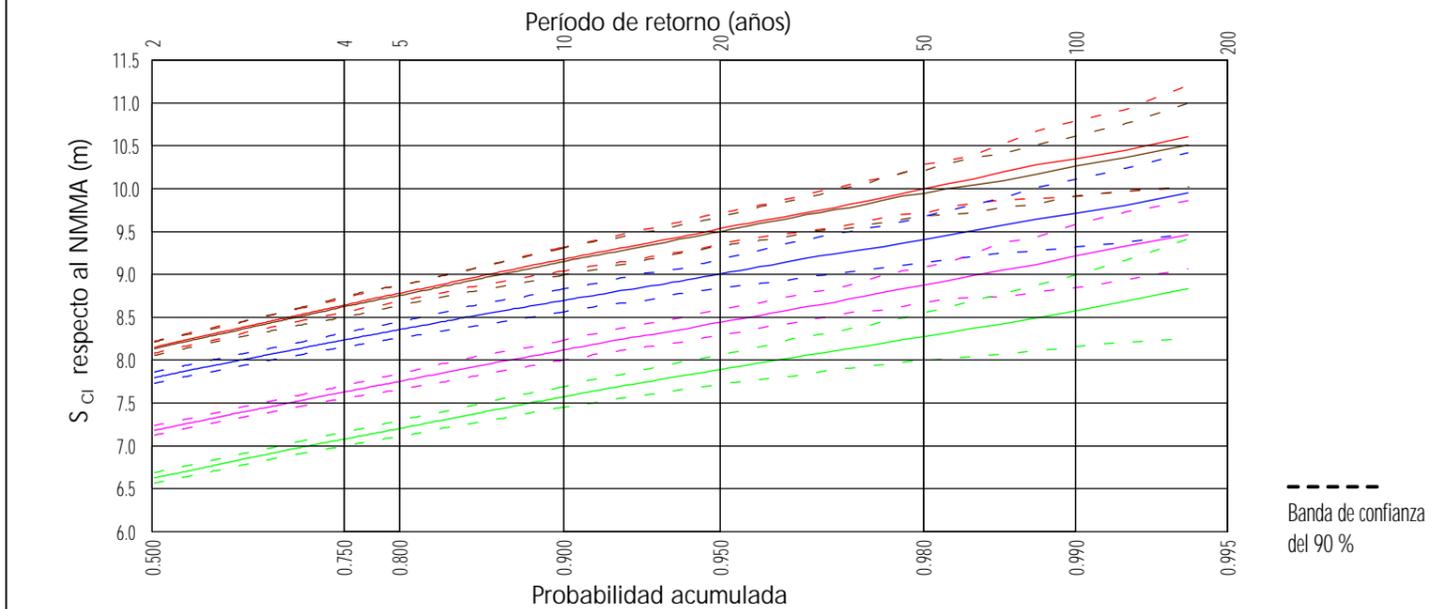
NIVELES DE REFERENCIA



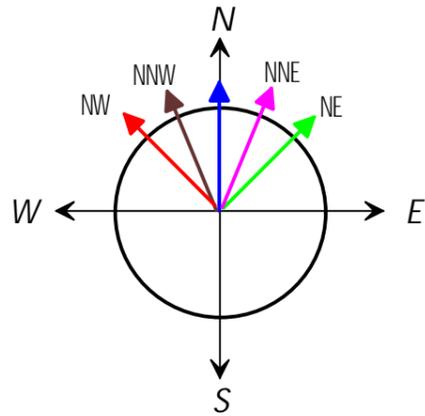
RÉGIMEN EXTREMAL DE NIVEL DE MAREA



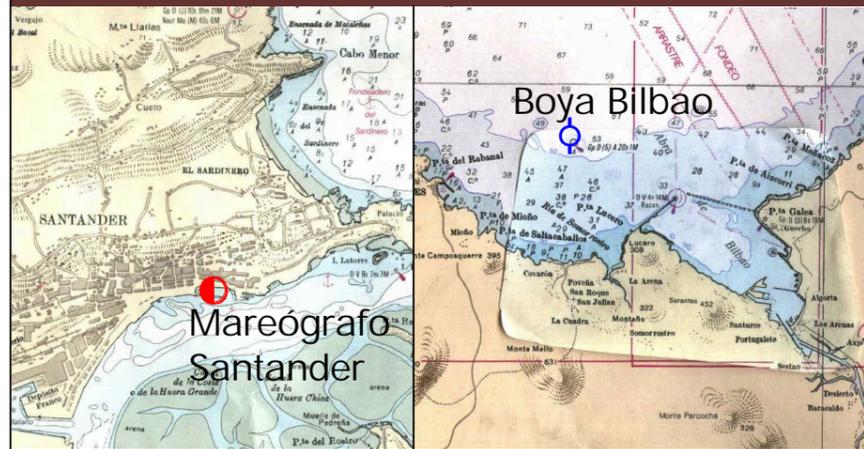
RÉGIMEN EXTREMAL DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



ORIENTACIONES SIGNIFICATIVAS



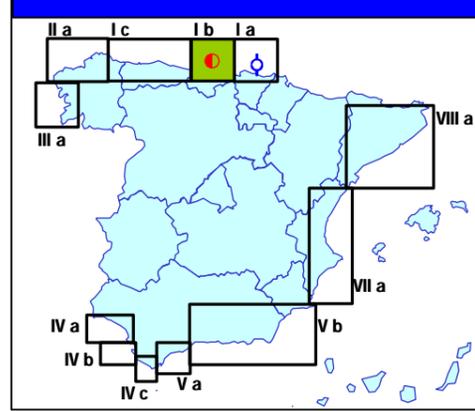
LOCALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN INSTRUMENTAL



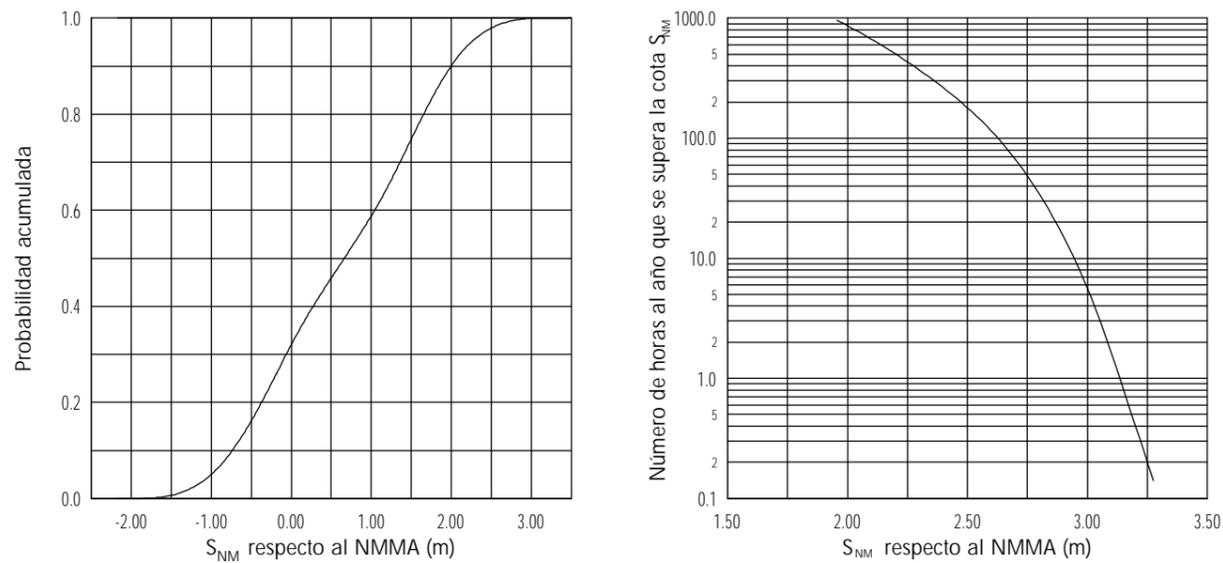
INFORMACIÓN ANALIZADA

MAREA ASTRONÓMICA		OLEAJE	
Mareógrafo	Santander	Boya	Bilbao
Situación	43°27'45" N 03°47'22" W	Situación	43°24' N 03°08'36" W
Período medida	1992 / 1996	Profundidad	50 m
MAREA METEOROLÓGICA		OBSERVACIONES VISUALES	
Residuo Nivel del Mar del Mareógrafo de Santander		Cuadrícula: 43°N - 45°N 1.5°W - 7°W Período medida: 1950-1985	

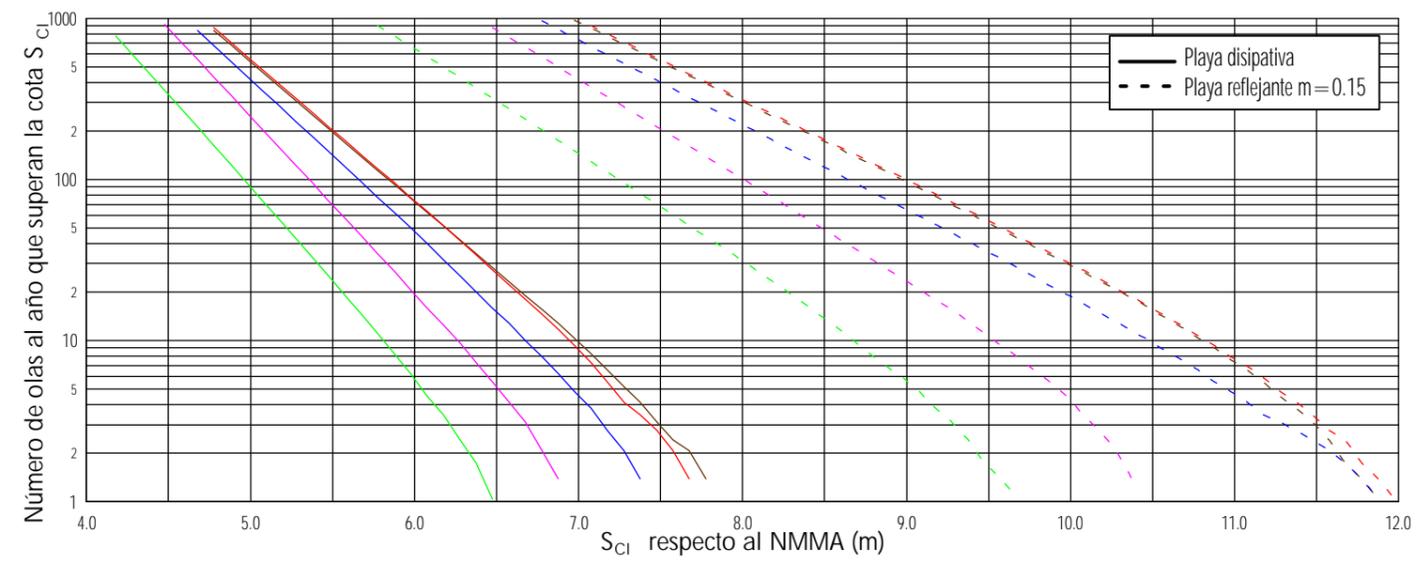
ÁREA - I Subzona - b



RÉGIMEN MEDIO DEL NIVEL DE MAREA

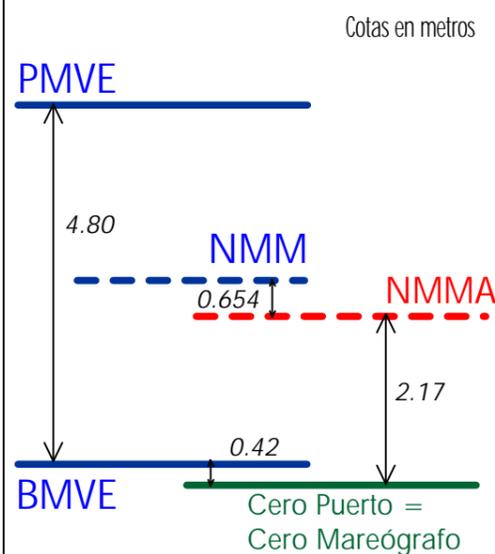


RÉGIMEN MEDIO DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA

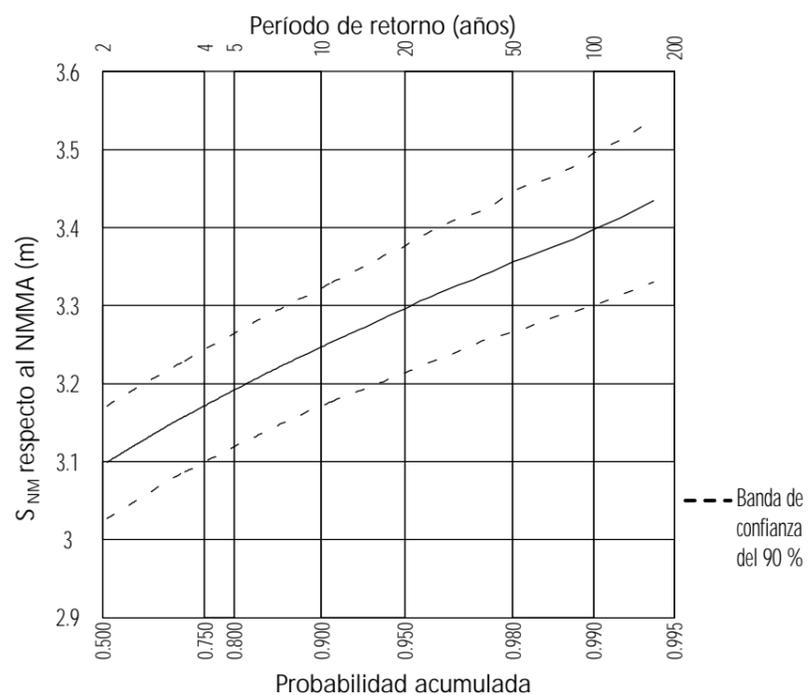


NIVELES DE REFERENCIA

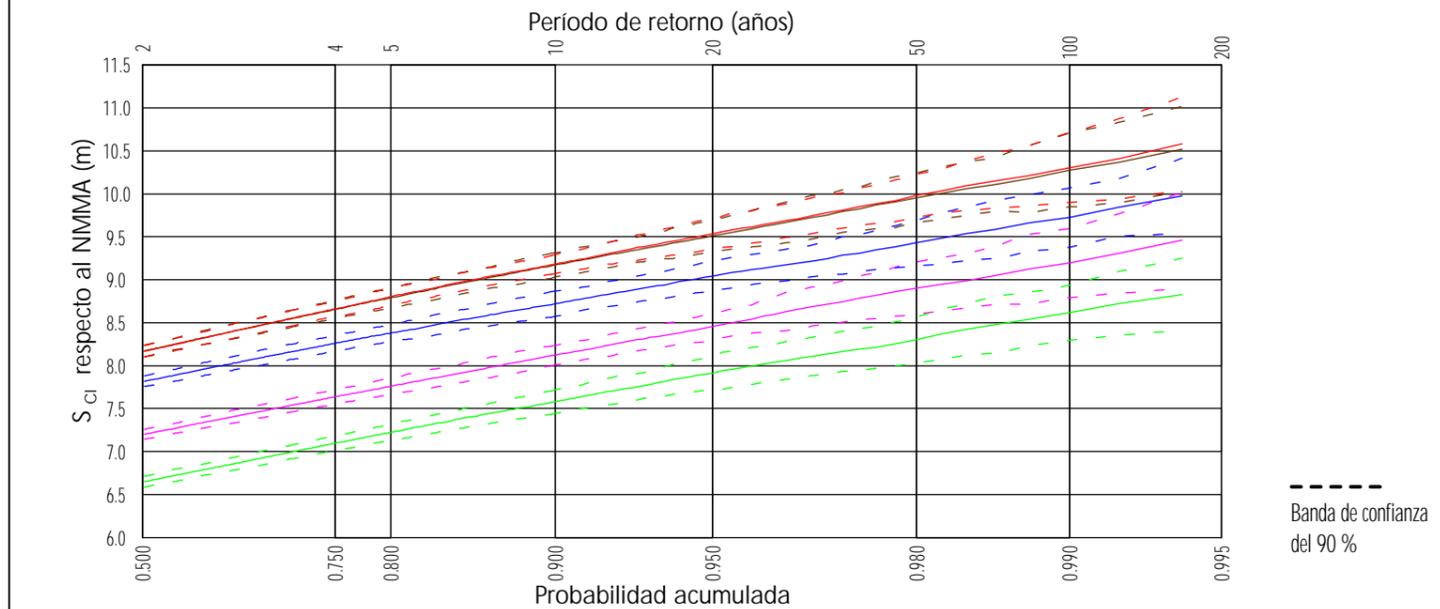
SANTANDER



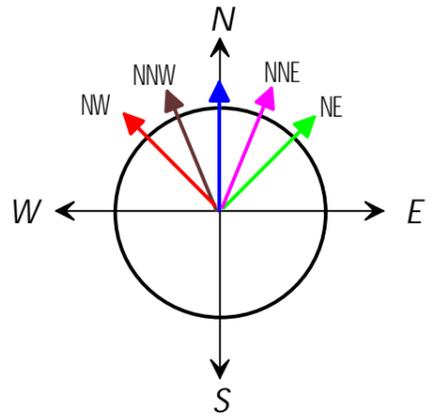
RÉGIMEN EXTREMAL DE NIVEL DE MAREA



RÉGIMEN EXTREMAL DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



ORIENTACIONES SIGNIFICATIVAS



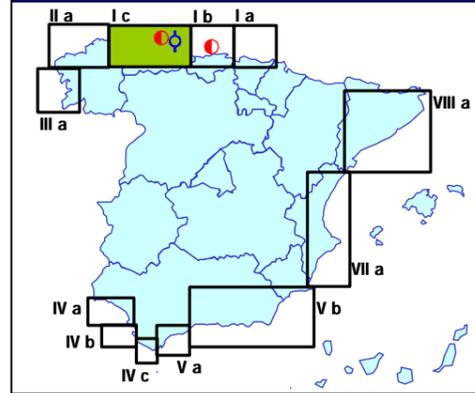
LOCALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN INSTRUMENTAL



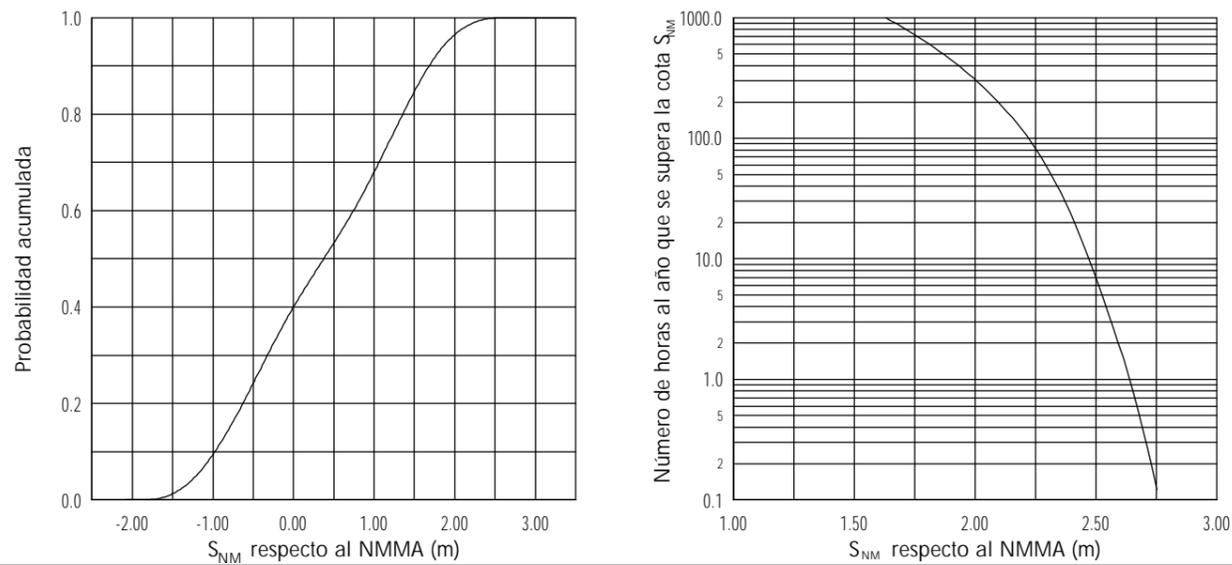
INFORMACIÓN ANALIZADA

MAREA ASTRONÓMICA		OLEAJE	
Mareógrafo	Gijón	Boya	Gijón
Situación	43°33'33" N 05°41'50" W	Situación	43°34' N 05°39' W
Período medida	1993	Profundidad	23 m
MAREA METEOROLÓGICA		OBSERVACIONES VISUALES	
Residuo Nivel del Mar del Mareógrafo de Santander		Cuadrícula: 43°N - 45°N 1.5°W - 7°W Período medida: 1950-1985	

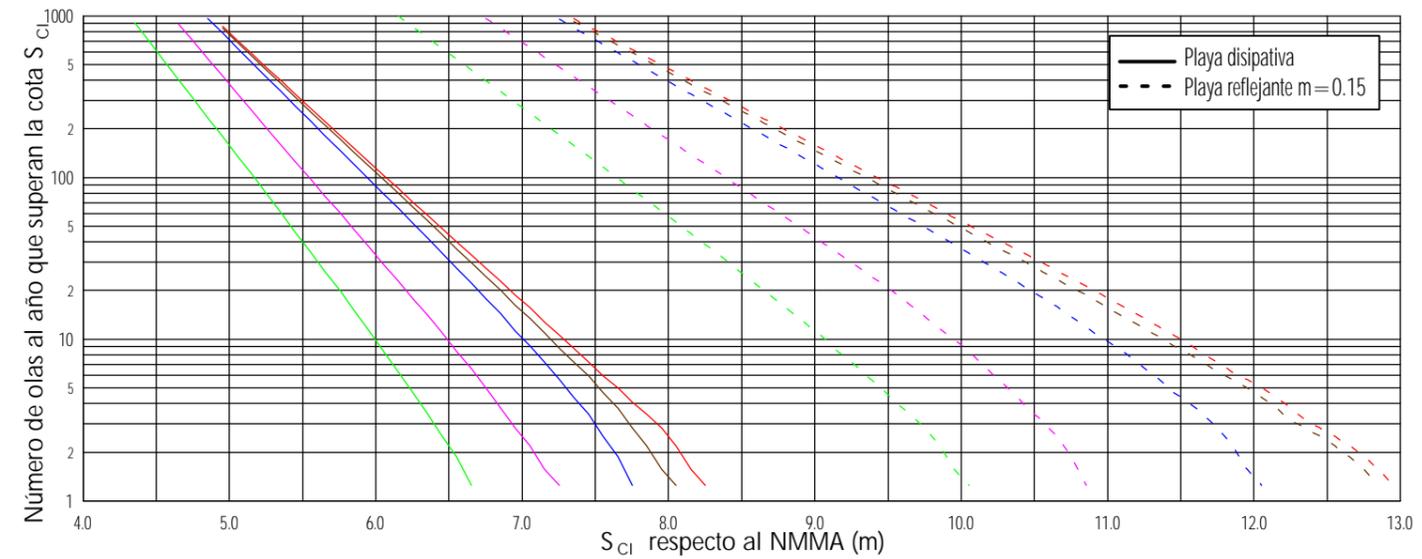
ÁREA - I Subzona - c



RÉGIMEN MEDIO DEL NIVEL DE MAREA

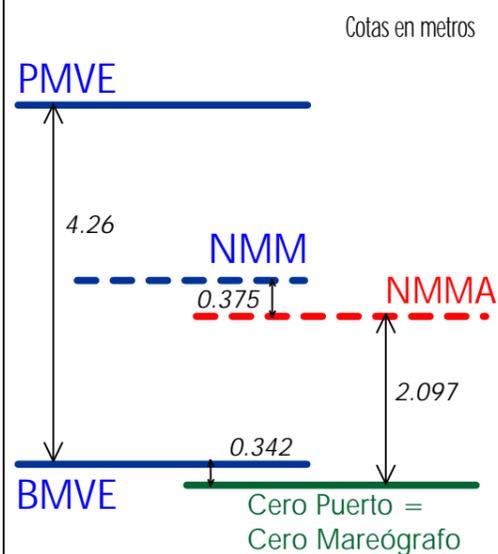


RÉGIMEN MEDIO DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA

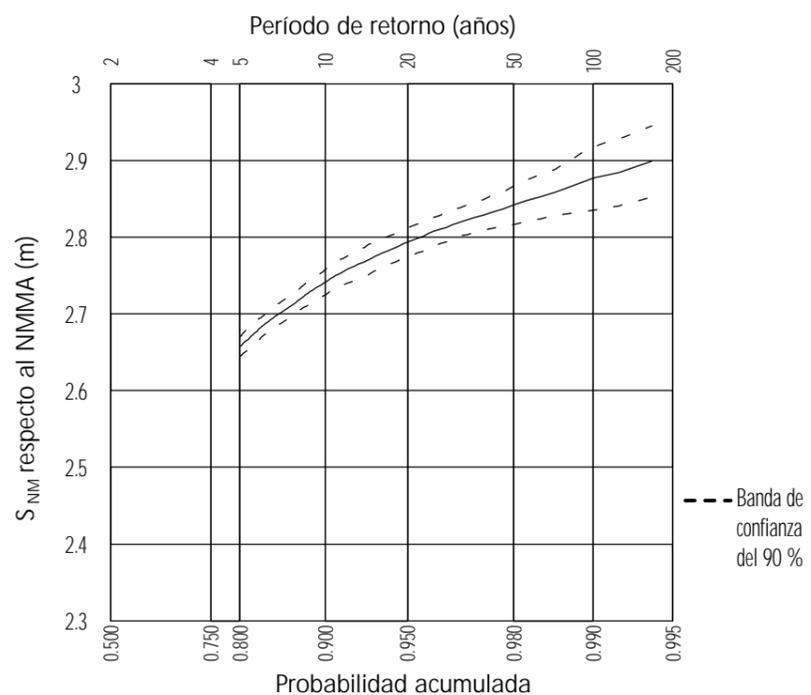


NIVELES DE REFERENCIA

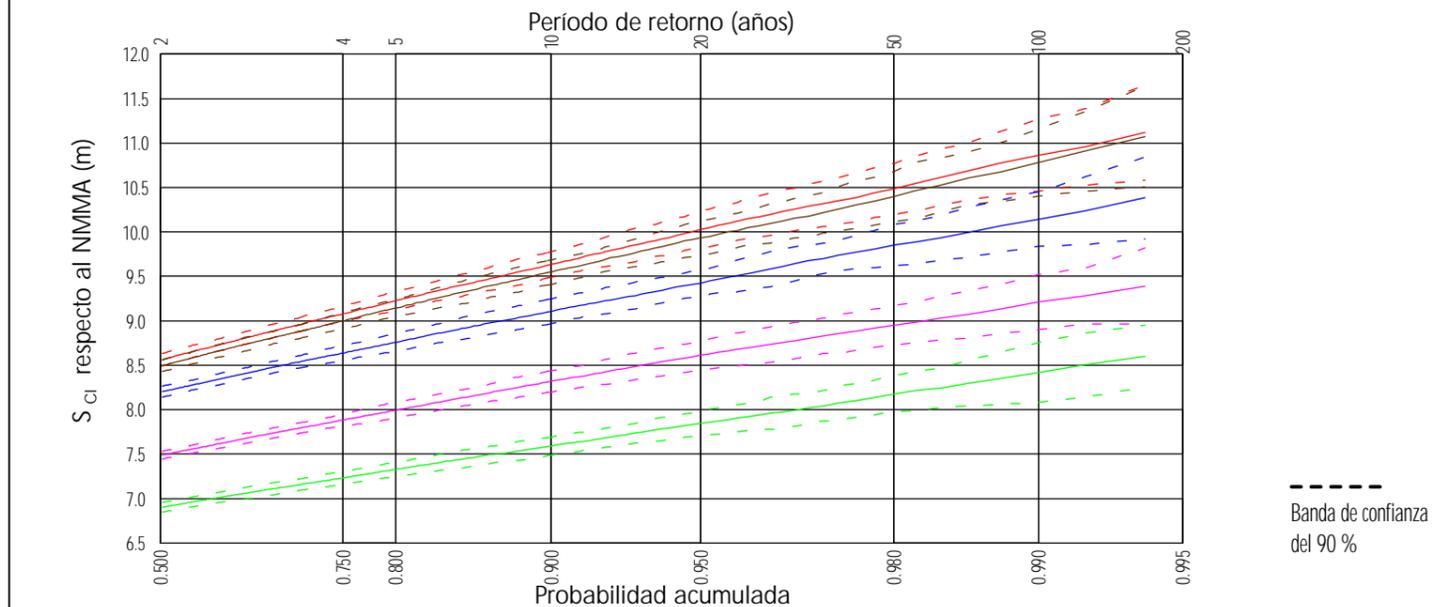
GIJÓN



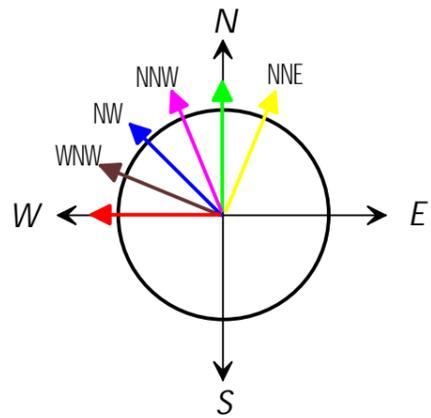
RÉGIMEN EXTREMAL DE NIVEL DE MAREA



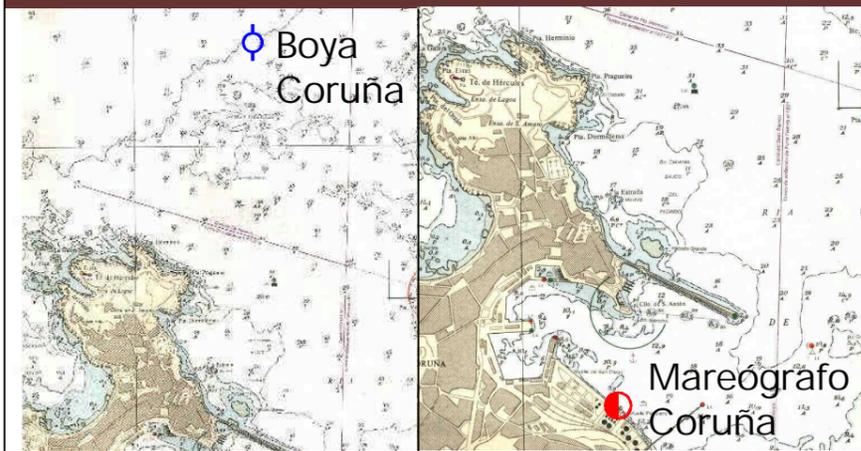
RÉGIMEN EXTREMAL DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



ORIENTACIONES SIGNIFICATIVAS



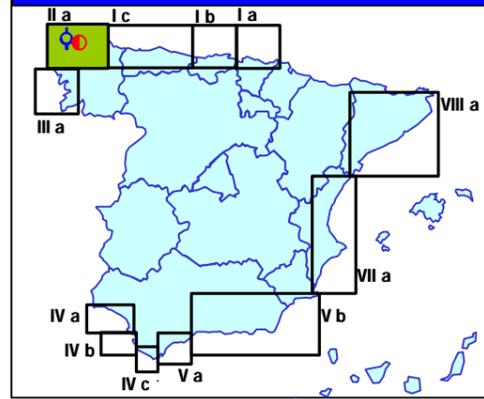
LOCALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN INSTRUMENTAL



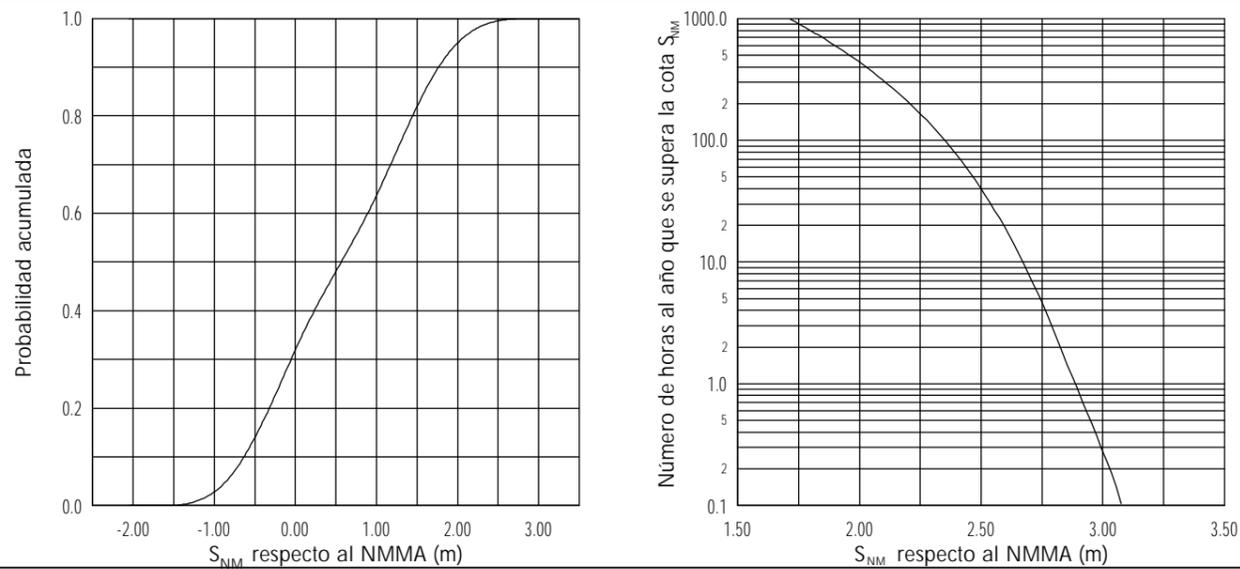
INFORMACIÓN ANALIZADA

MAREA ASTRONÓMICA		OLEAJE	
Mareógrafo	Coruña	Boya	Coruña
Situación	43°21'31" N 08°23'17" W	Situación	43°24'45" N 08°23' W
Período medida	1993 / 1996	Profundidad	50 m
MAREA METEOROLÓGICA		OBSERVACIONES VISUALES	
Residuo Nivel del Mar del Mareógrafo de Coruña		Cuadrícula: 43.2°N - 45°N 7°W - 11°W Período medida: 1950-1985	

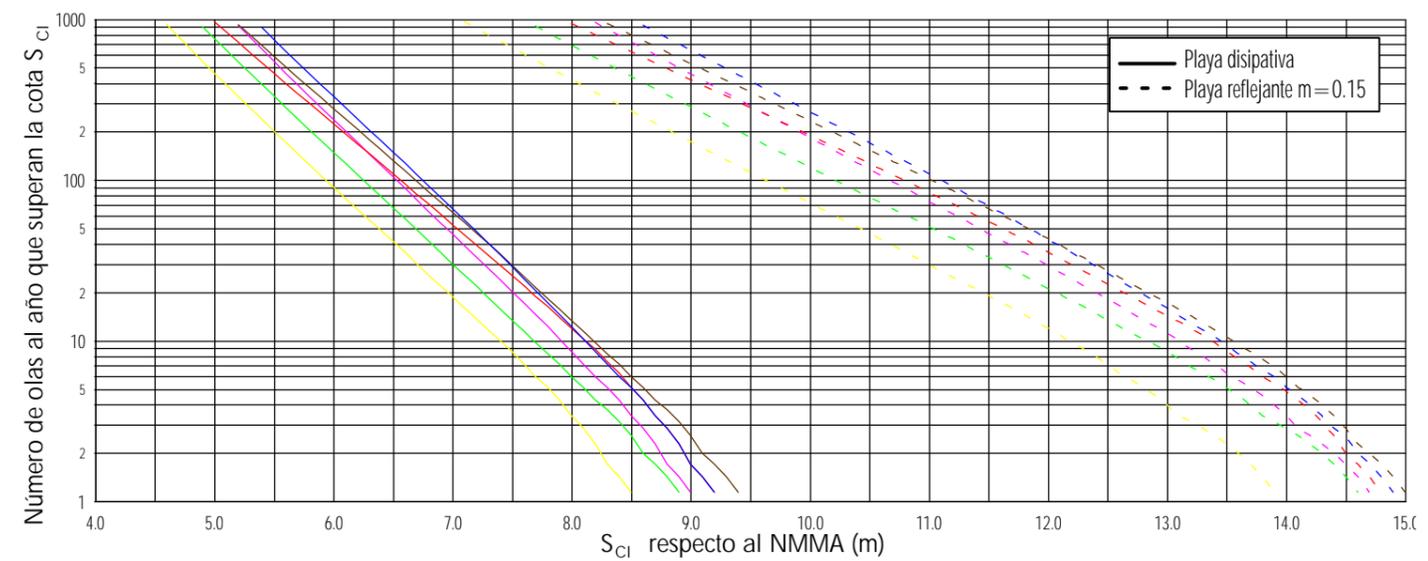
ÁREA - II Subzona - a



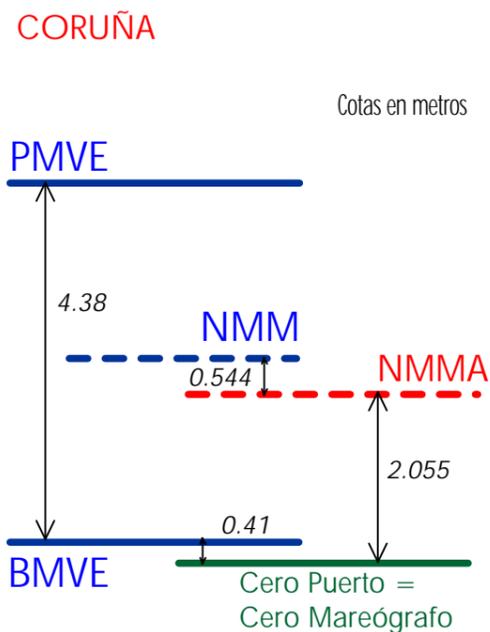
RÉGIMEN MEDIO DEL NIVEL DE MAREA



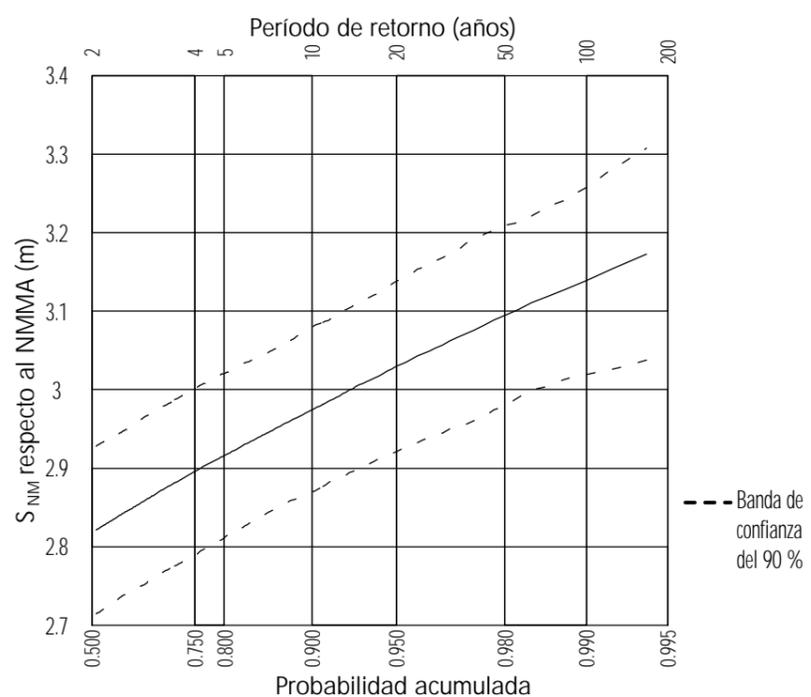
RÉGIMEN MEDIO DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



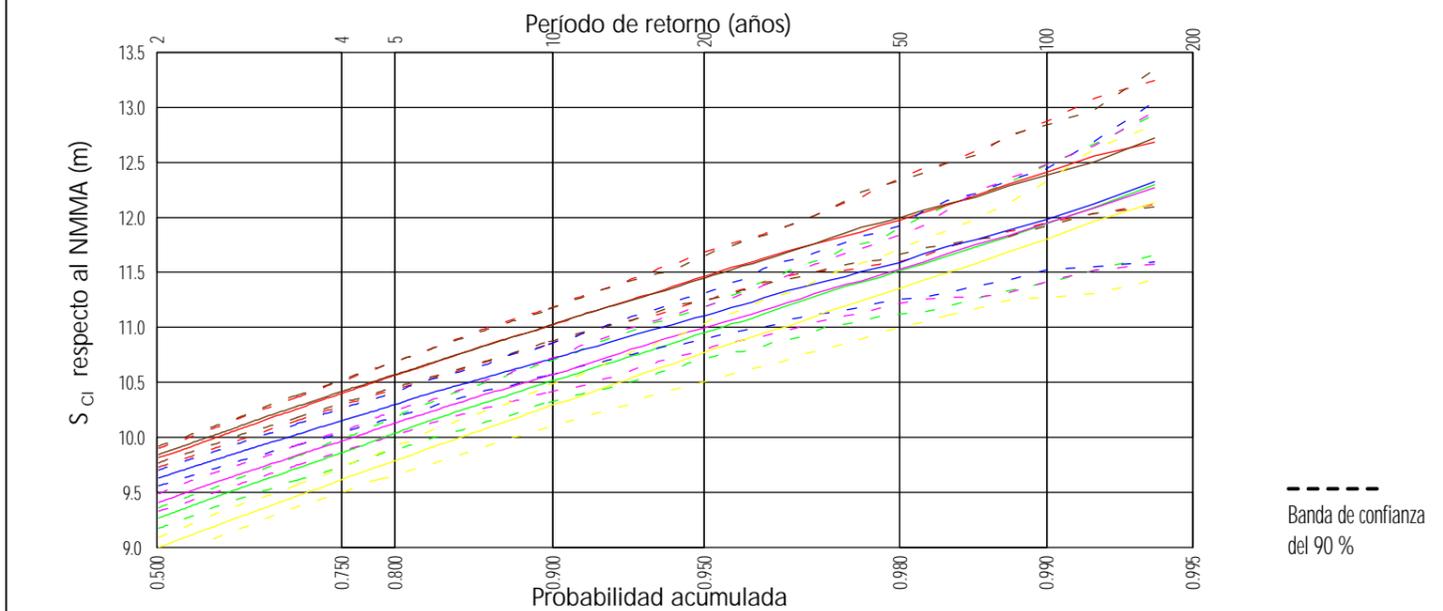
NIVELES DE REFERENCIA



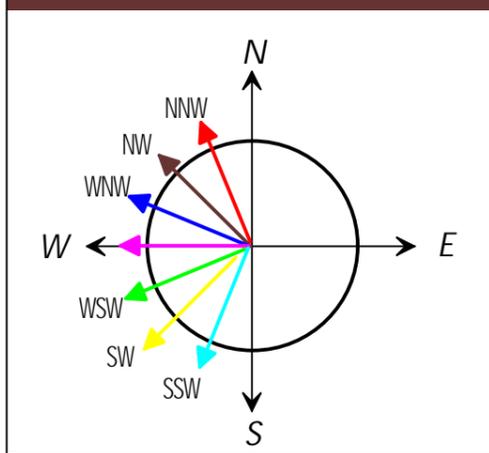
RÉGIMEN EXTREMAL DE NIVEL DE MAREA



RÉGIMEN EXTREMAL DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



ORIENTACIONES SIGNIFICATIVAS



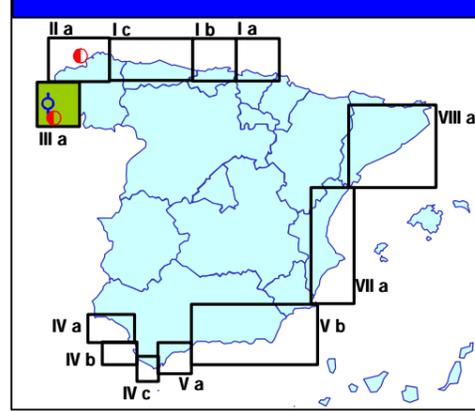
LOCALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN INSTRUMENTAL



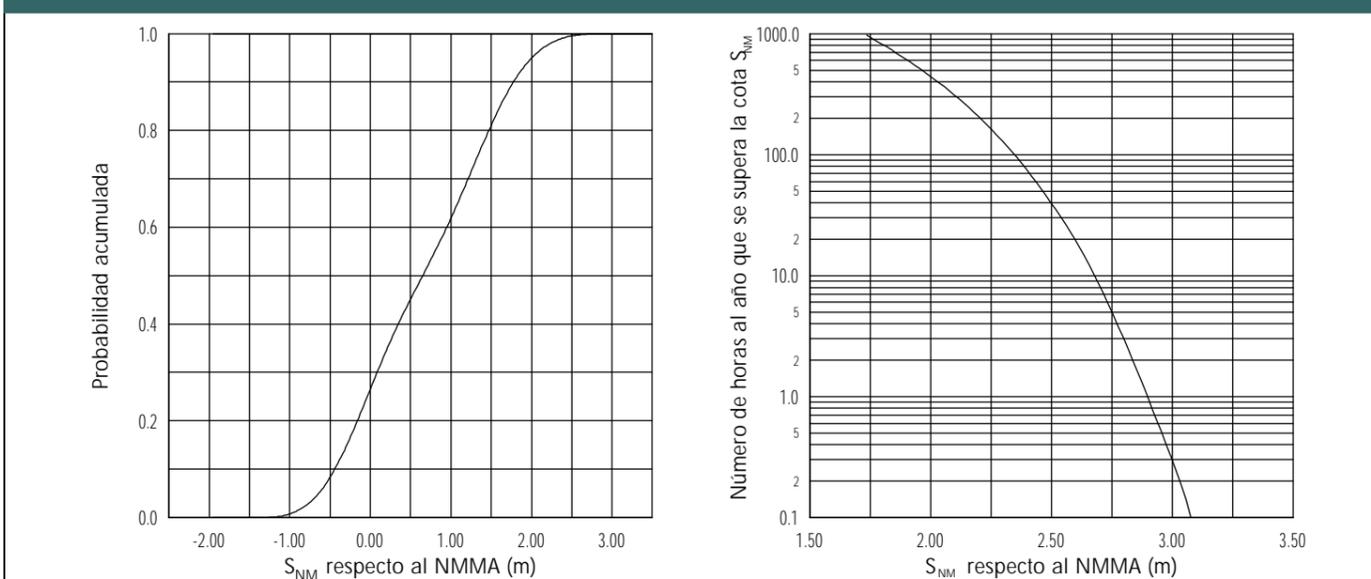
INFORMACIÓN ANALIZADA

MAREA ASTRONÓMICA		OLEAJE	
Mareógrafo	Vigo	Boya	Silleiro
Situación	42°14' N 08°44' W	Situación	42°05'48"N 08°55'48"W
Período medida	1993	Profundidad	75 m
MAREA METEOROLÓGICA		OBSERVACIONES VISUALES	
Residuo Nivel del Mar del Mareógrafo de Coruña		Cuadrícula: 41.5°N - 43.2°N 8°W - 11°W	
		Período medida: 1950-1985	

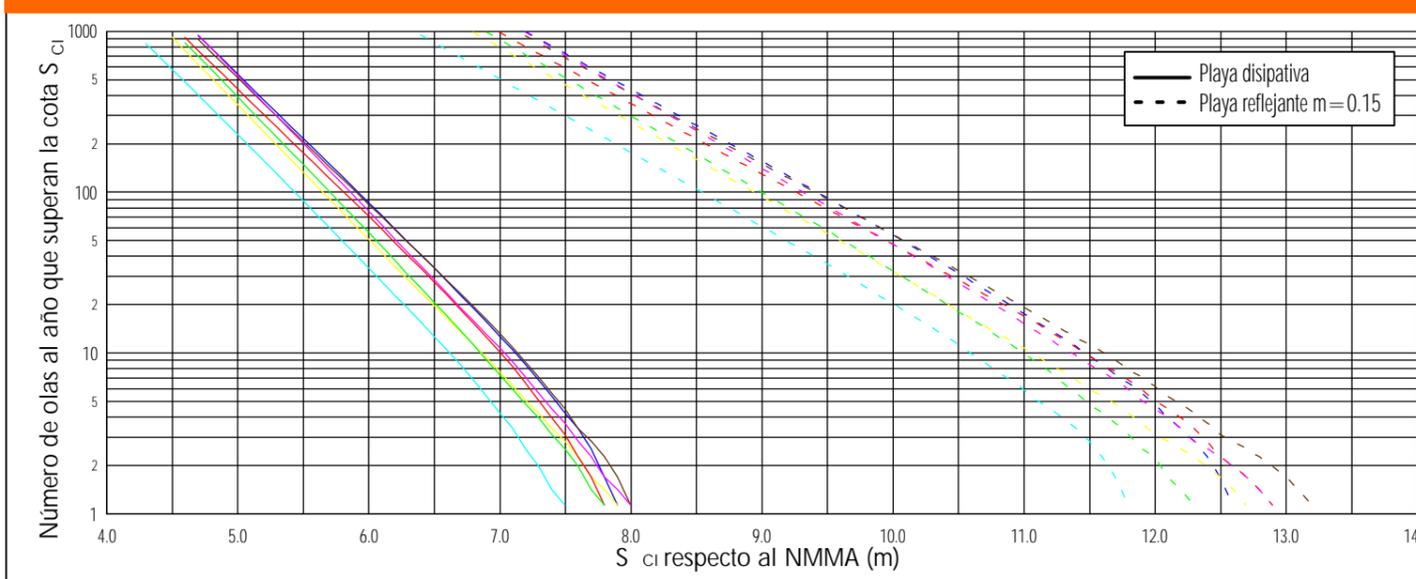
ÁREA - III Subzona - a



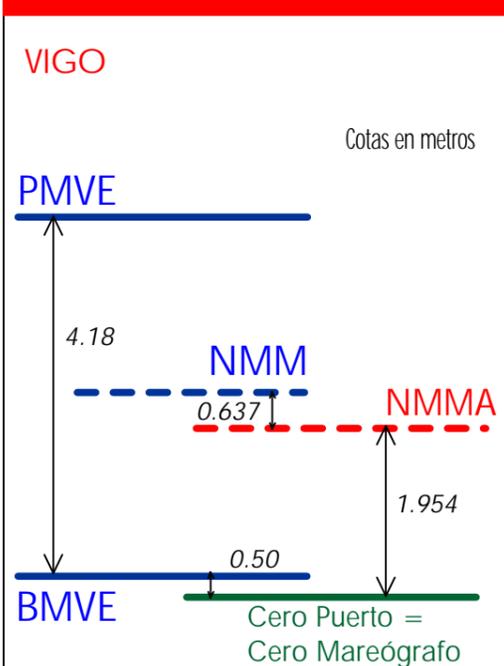
RÉGIMEN MEDIO DEL NIVEL DE MAREA



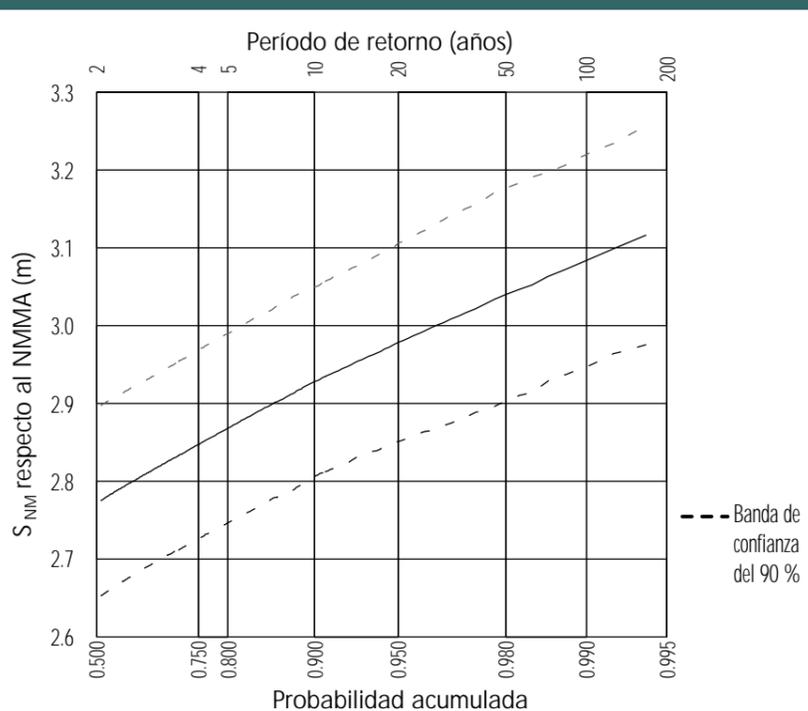
RÉGIMEN MEDIO DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



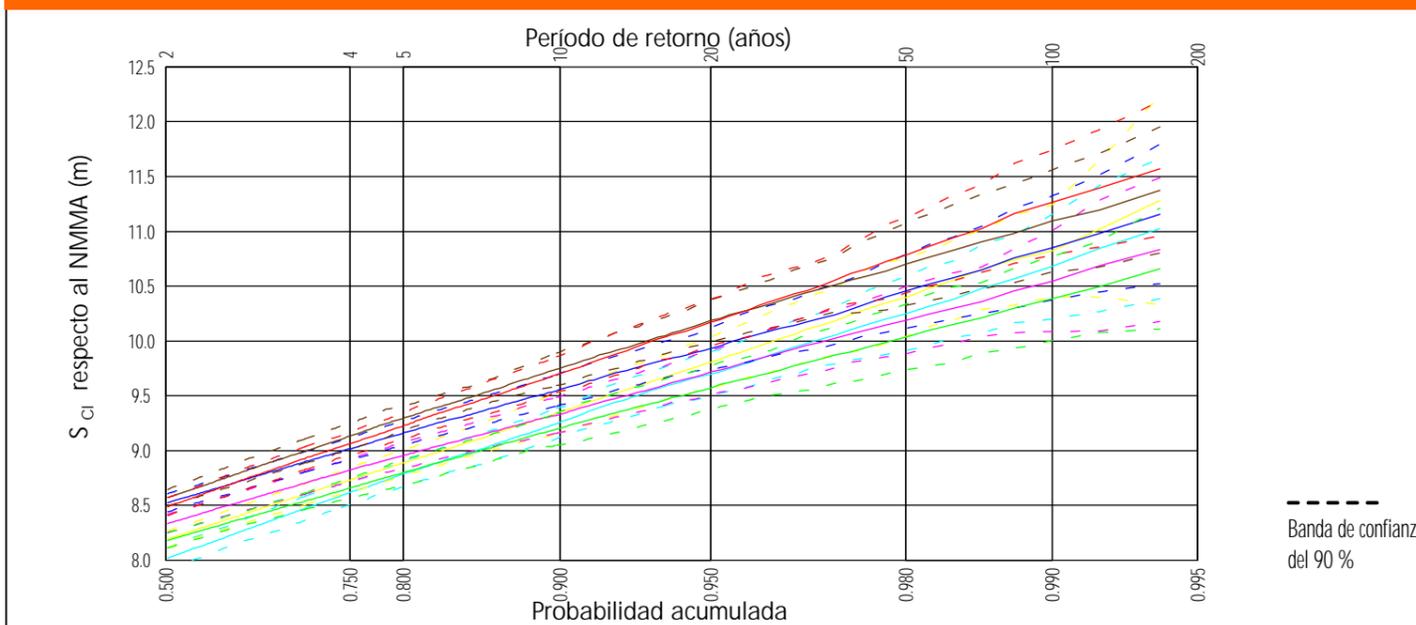
NIVELES DE REFERENCIA



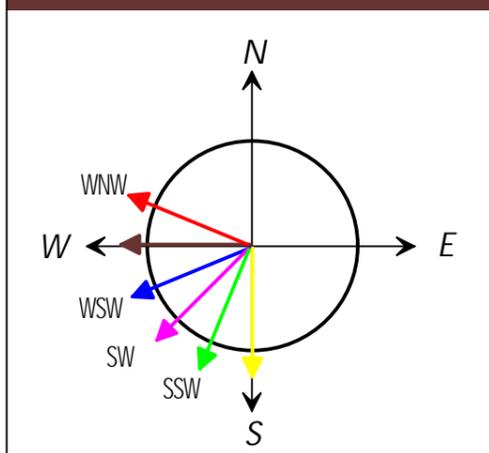
RÉGIMEN EXTREMAL DE NIVEL DE MAREA



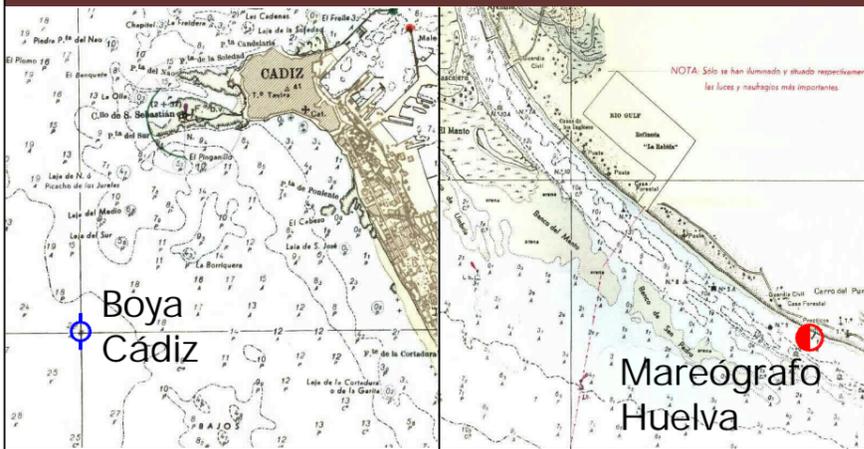
RÉGIMEN EXTREMAL DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



ORIENTACIONES SIGNIFICATIVAS



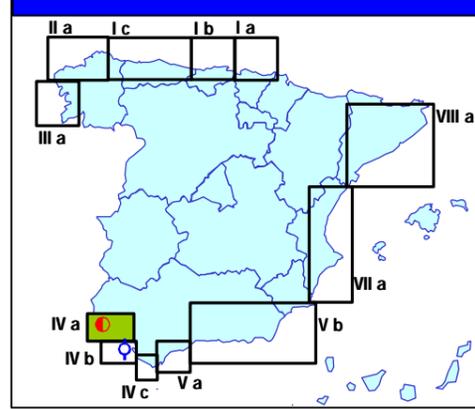
LOCALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN INSTRUMENTAL



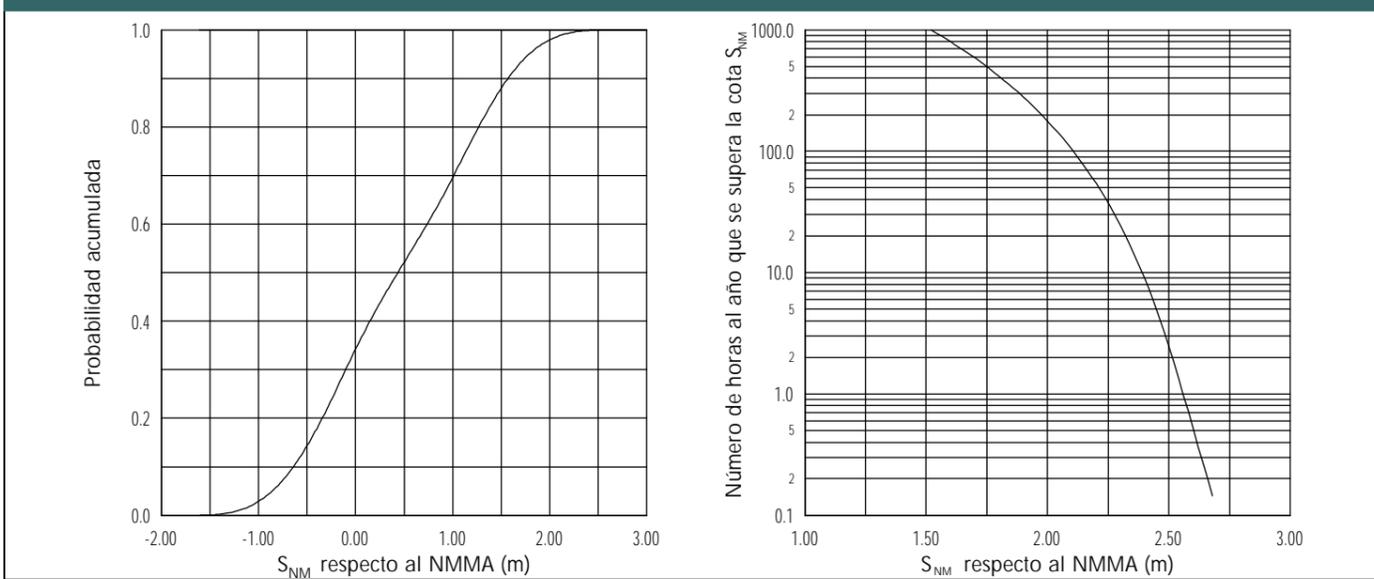
INFORMACIÓN ANALIZADA

MAREA ASTRONÓMICA		OLEAJE	
Mareógrafo	Huelva	Boya	Cádiz
Situación	37°08'34" N 06°51'35" W	Situación	36°30'20" N 06°20'10" W
Período medida	1992 / 1995	Profundidad	22 m
MAREA METEOROLÓGICA		OBSERVACIONES VISUALES	
Residuo Nivel del Mar del Mareógrafo de Huelva		Cuadrícula: 35°N - 37.1°N 5.6°W - 10°W Período medida: 1950-1985	

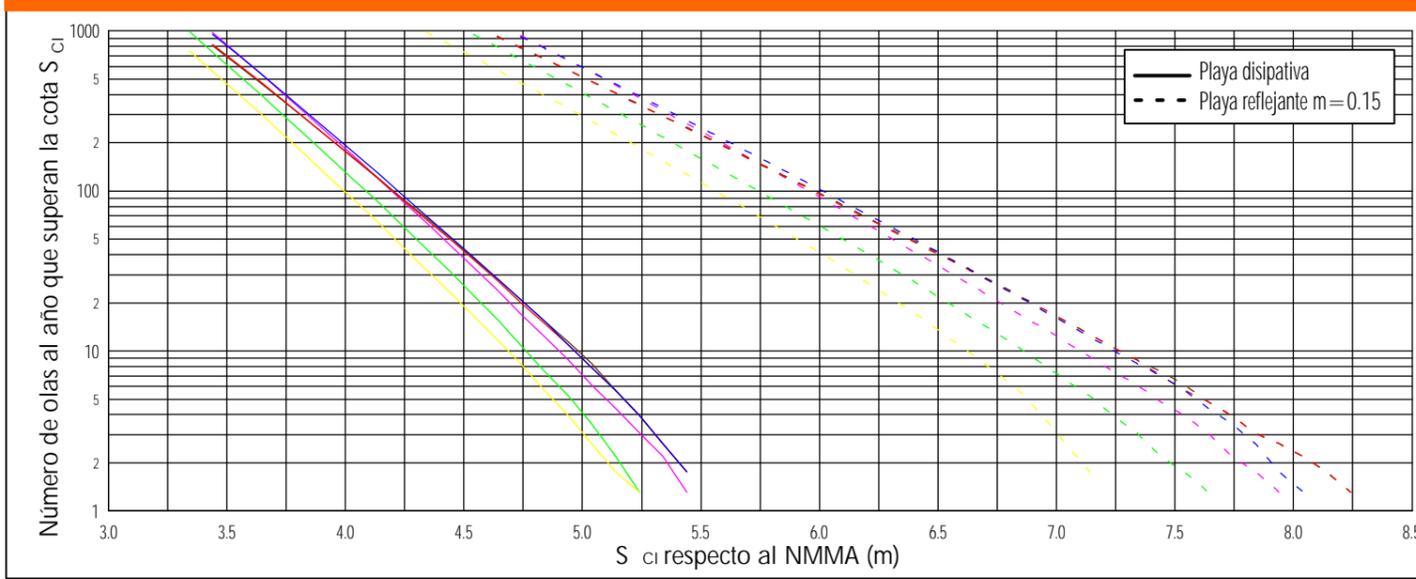
ÁREA - IV Subzona - a



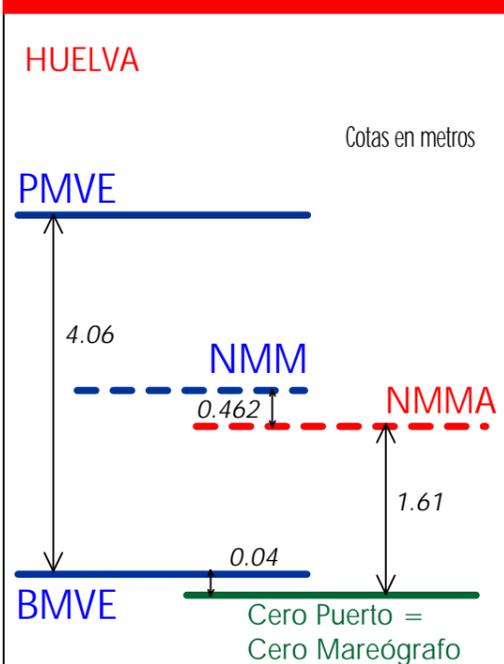
RÉGIMEN MEDIO DEL NIVEL DE MAREA



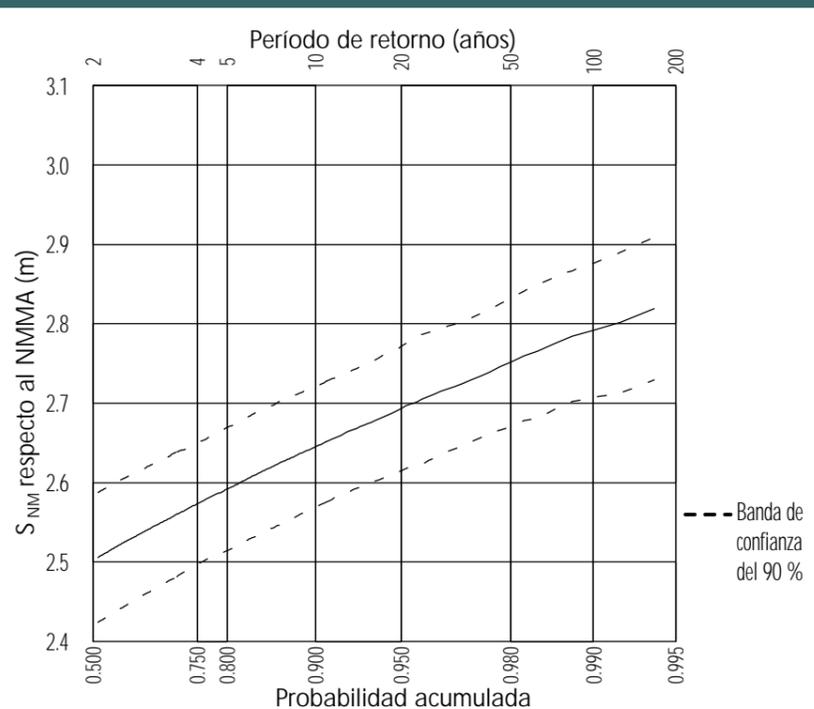
RÉGIMEN MEDIO DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



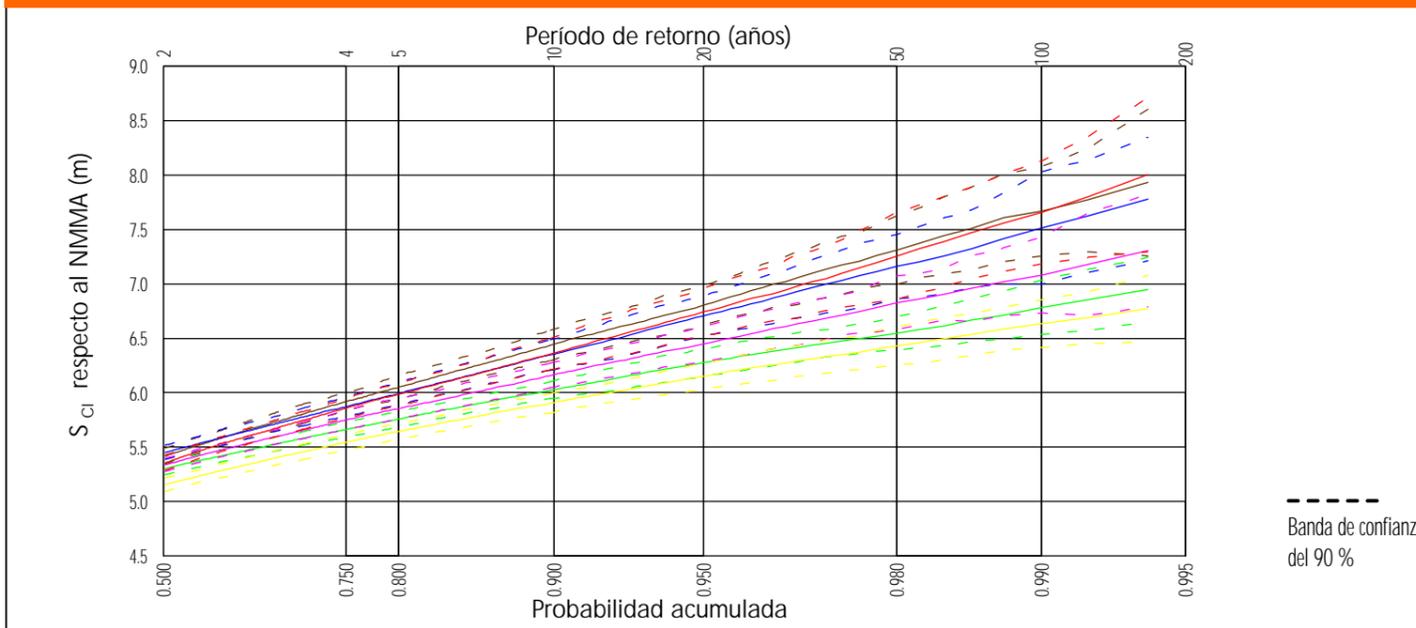
NIVELES DE REFERENCIA



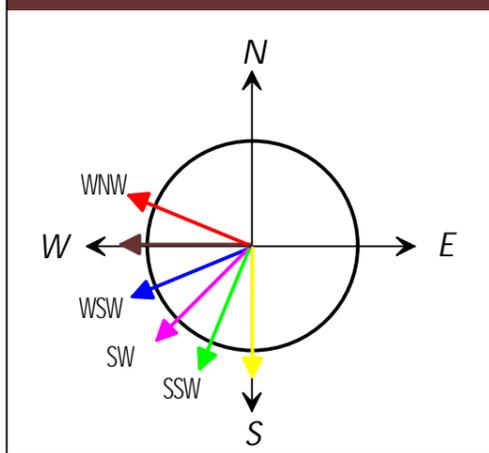
RÉGIMEN EXTREMAL DE NIVEL DE MAREA



RÉGIMEN EXTREMAL DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



ORIENTACIONES SIGNIFICATIVAS



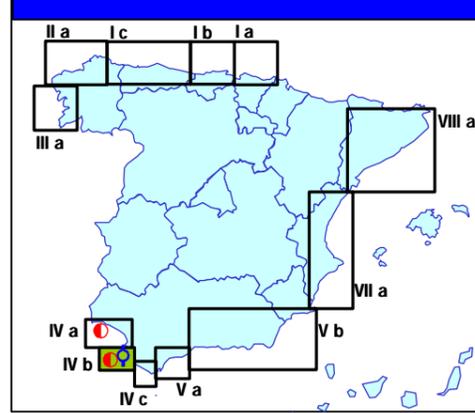
LOCALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN INSTRUMENTAL



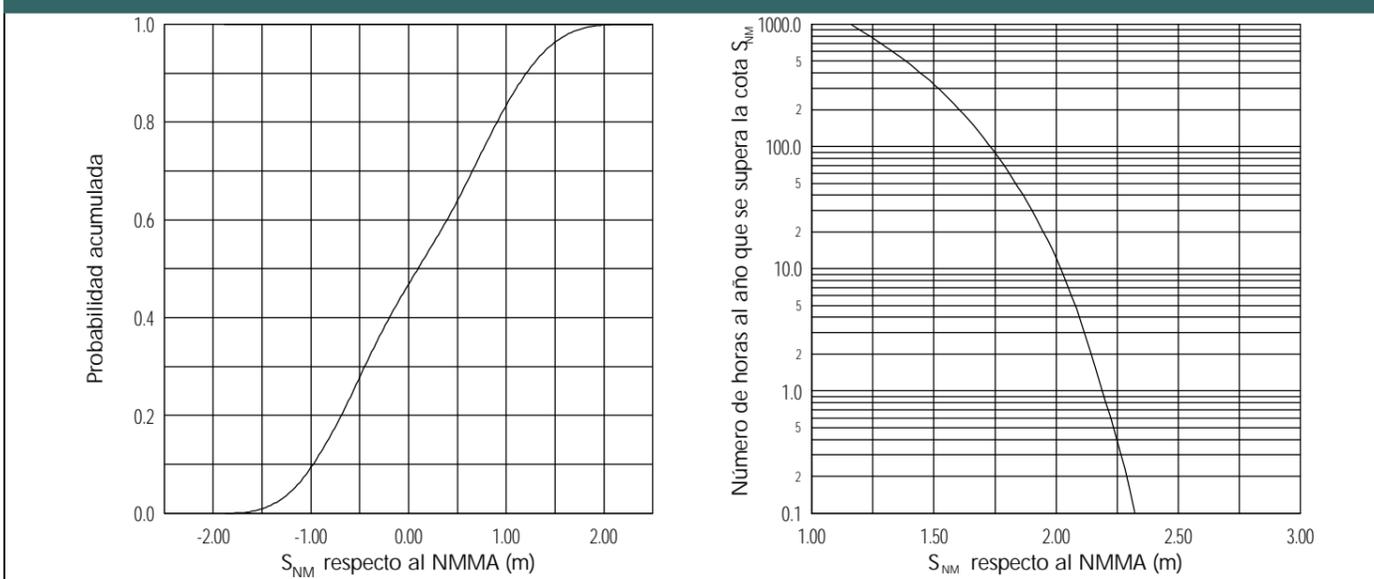
INFORMACIÓN ANALIZADA

MAREA ASTRONÓMICA		OLEAJE	
Mareógrafo	Cádiz	Boya	Cádiz
Situación	36°32' N 06°17' W	Situación	36°30'20"N 06°20'10"W
Período medida	1993	Profundidad	22 m
MAREA METEOROLÓGICA		OBSERVACIONES VISUALES	
Residuo Nivel del Mar del Mareógrafo de Huelva		Cuadrícula: 35°N - 37.1°N 5.6°W - 10°W Período medida: 1950-1985	

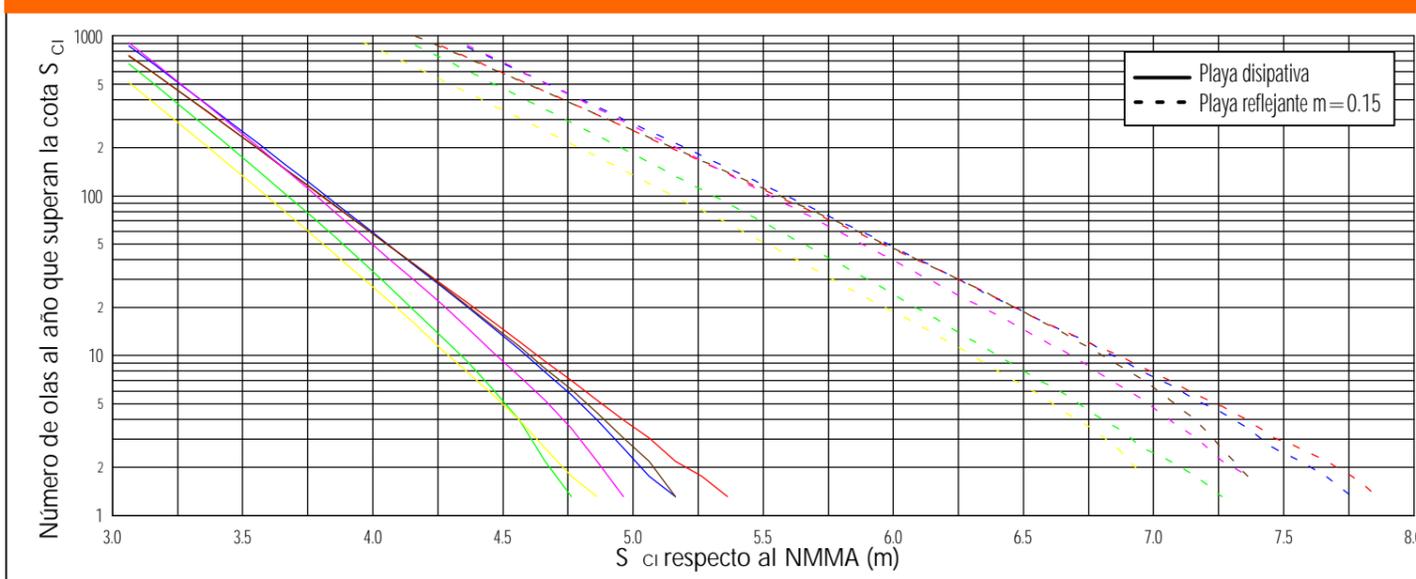
ÁREA - IV Subzona - b



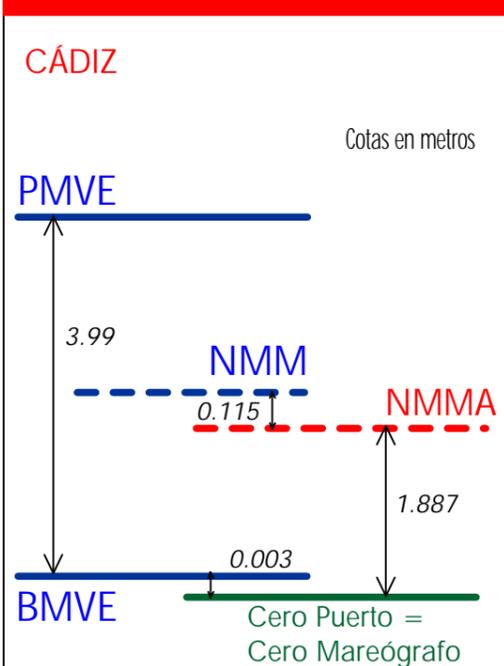
RÉGIMEN MEDIO DEL NIVEL DE MAREA



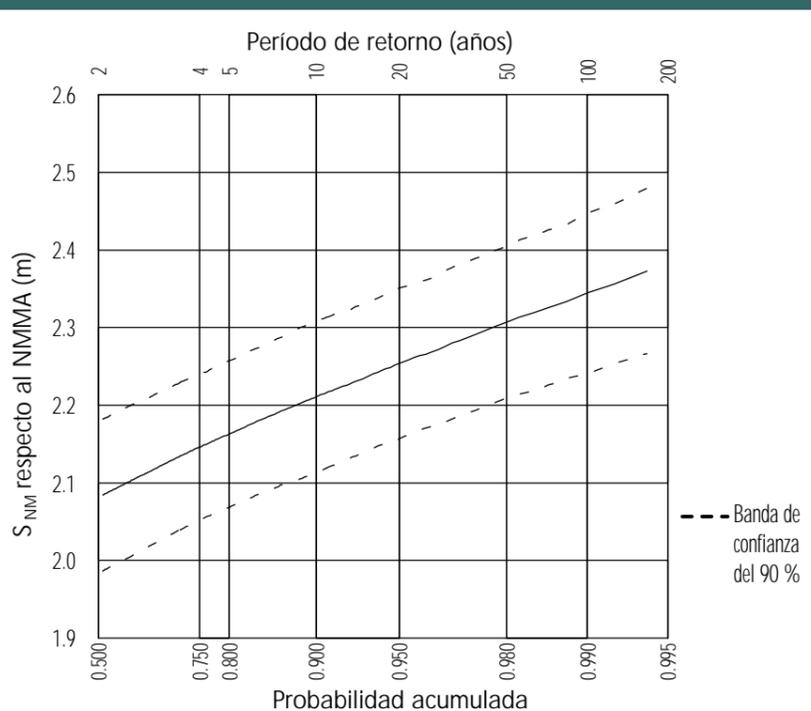
RÉGIMEN MEDIO DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



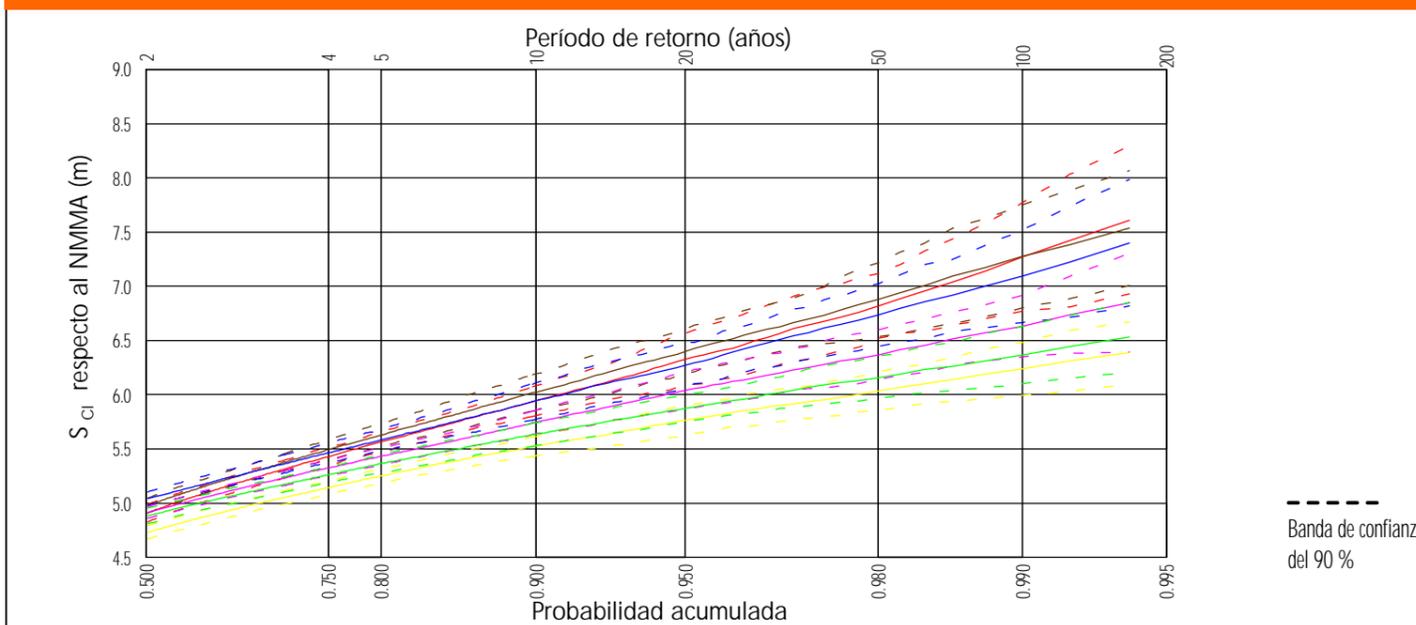
NIVELES DE REFERENCIA



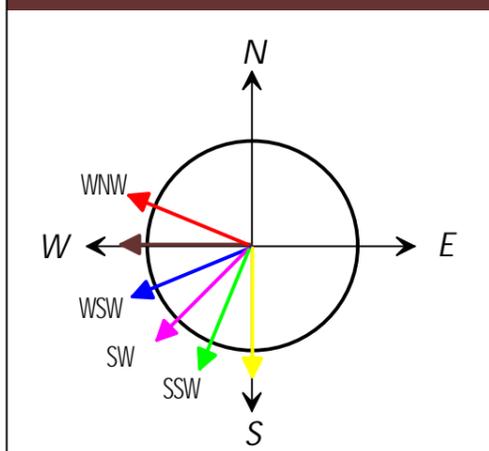
RÉGIMEN EXTREMAL DE NIVEL DE MAREA



RÉGIMEN EXTREMAL DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



ORIENTACIONES SIGNIFICATIVAS

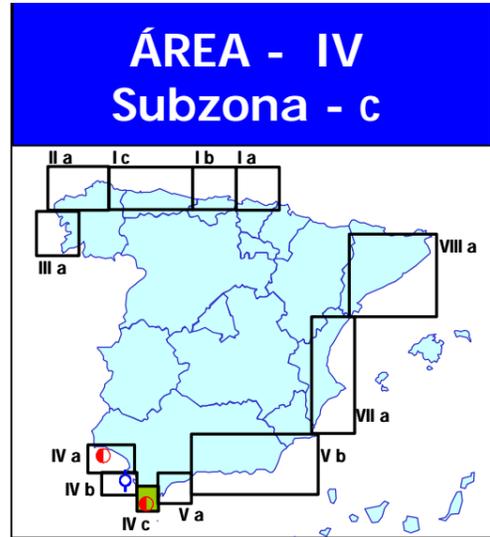


LOCALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN INSTRUMENTAL

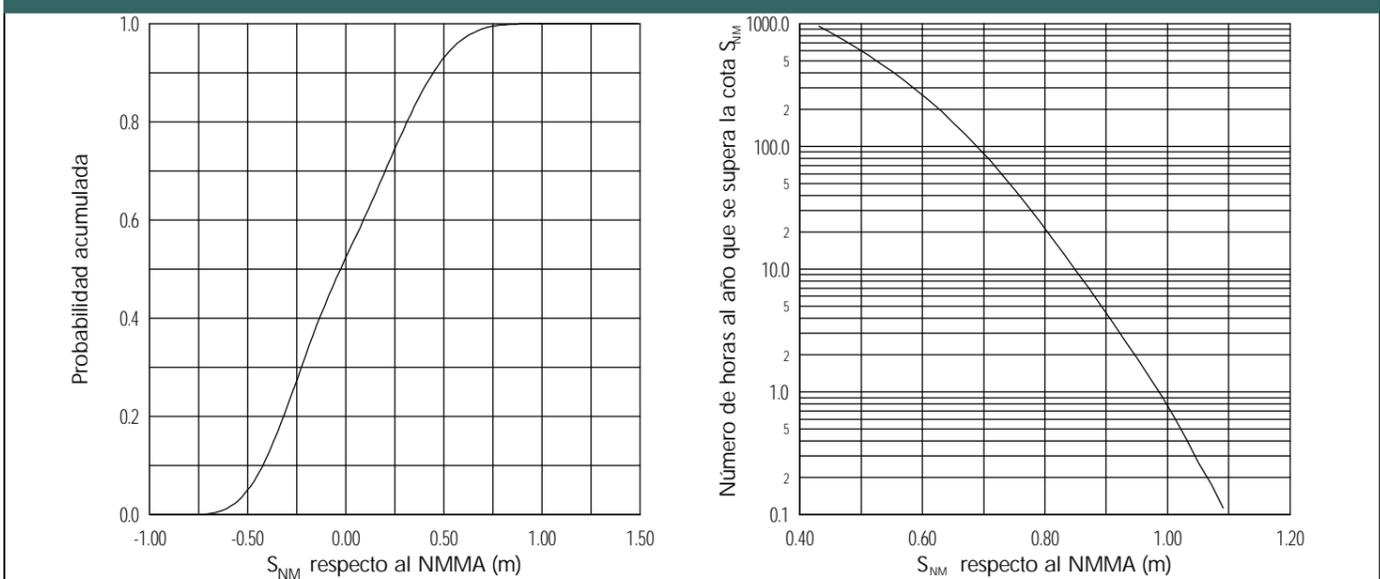


INFORMACIÓN ANALIZADA

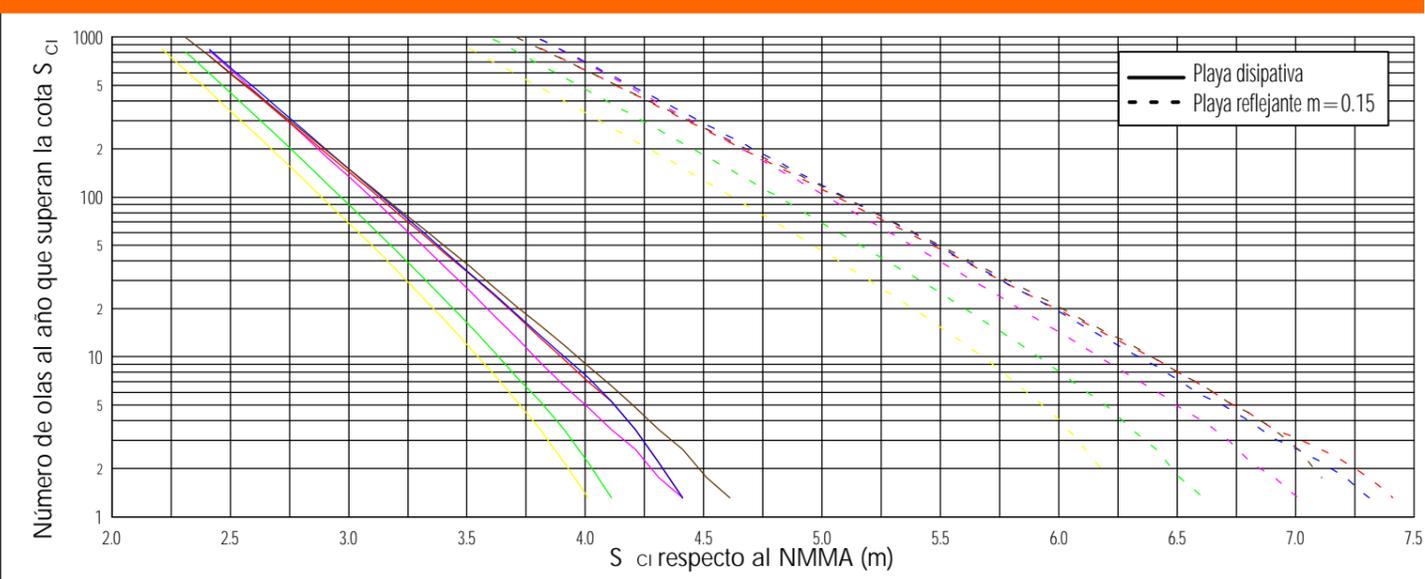
MAREA ASTRONÓMICA		OLEAJE	
Mareógrafo	Tarifa	Boya	Cádiz
Situación	36°00' N 05°36' W	Situación	36°30'20"N 06°20'10"W
Período medida	1993	Profundidad	22 m
MAREA METEOROLÓGICA		OBSERVACIONES VISUALES	
Residuo Nivel del Mar del Mareógrafo de Huelva		Cuadrícula: 35°N - 37.1°N 5.6°W - 10°W Período medida: 1950-1985	



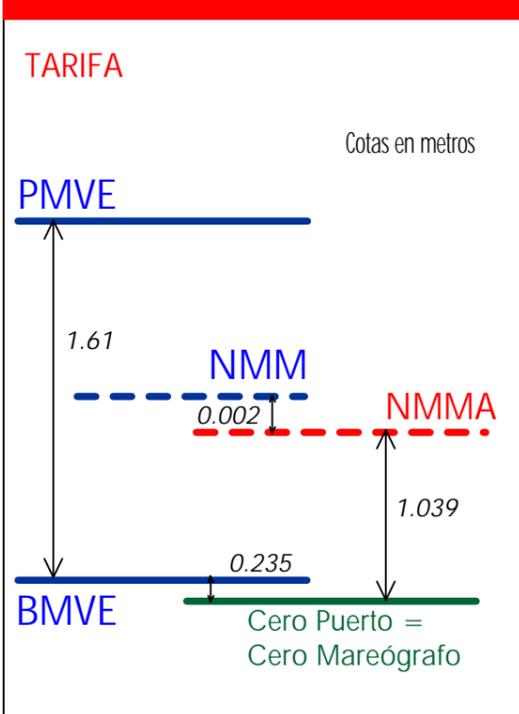
RÉGIMEN MEDIO DEL NIVEL DE MAREA



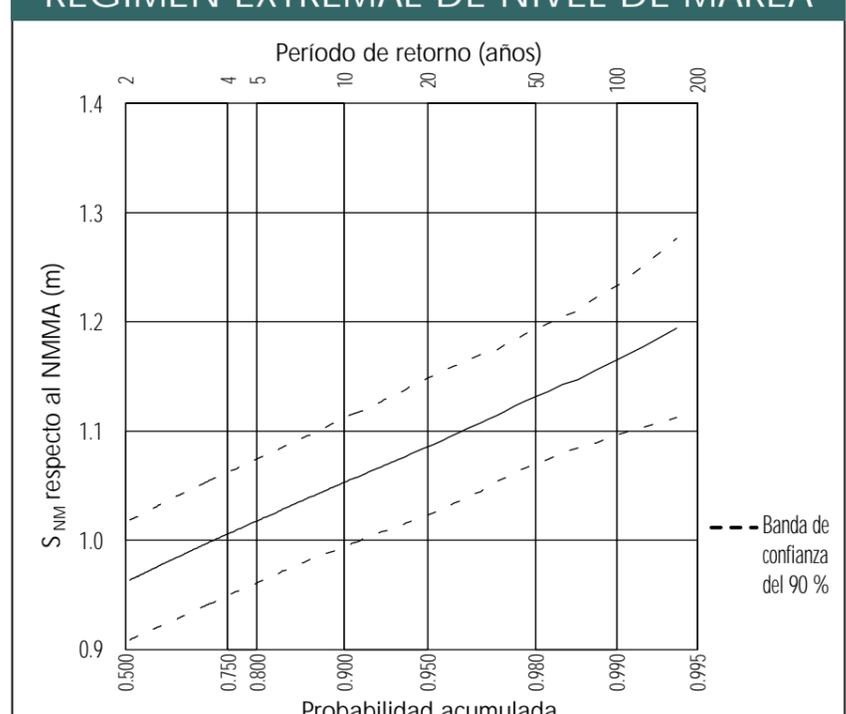
RÉGIMEN MEDIO DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



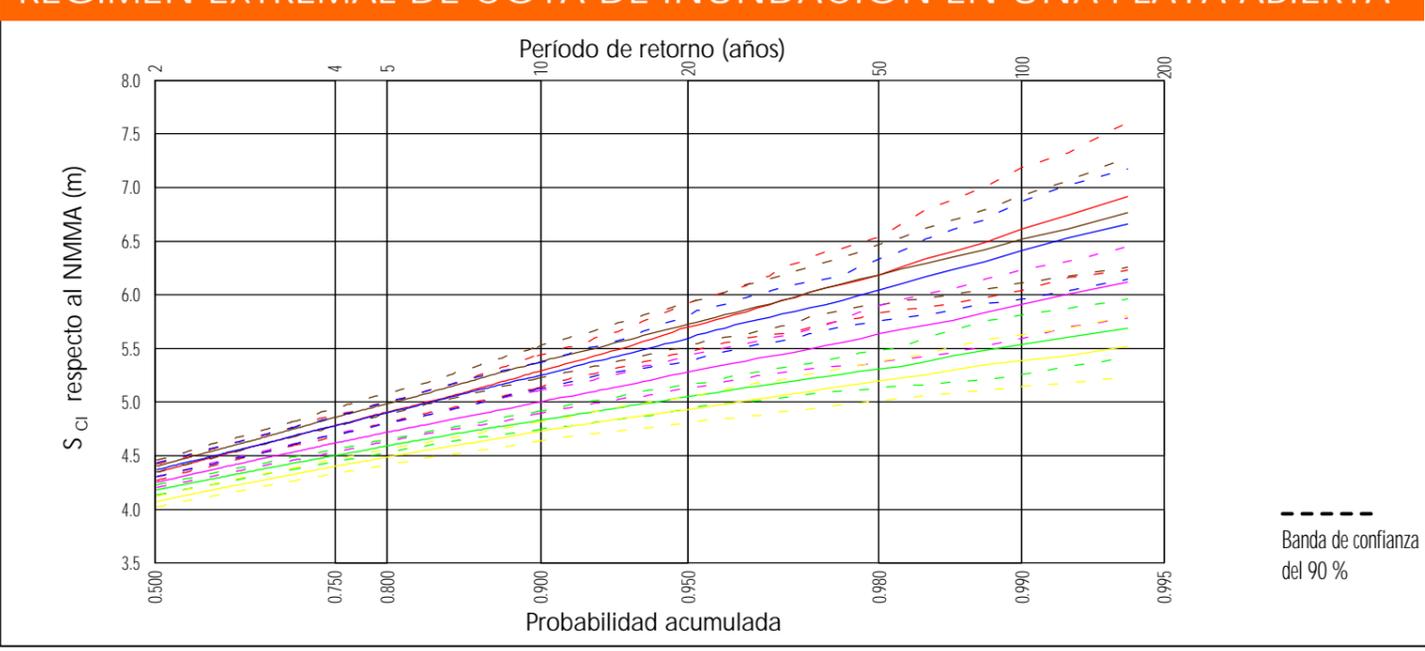
NIVELES DE REFERENCIA



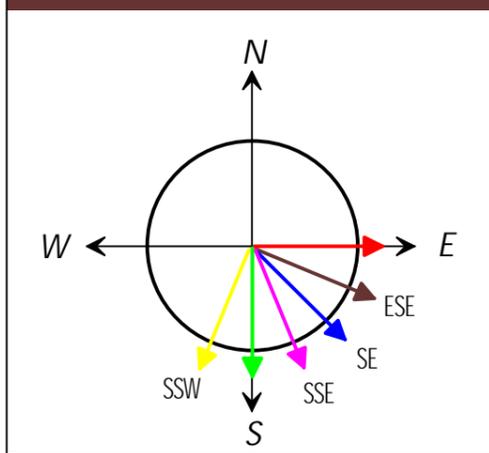
RÉGIMEN EXTREMAL DE NIVEL DE MAREA



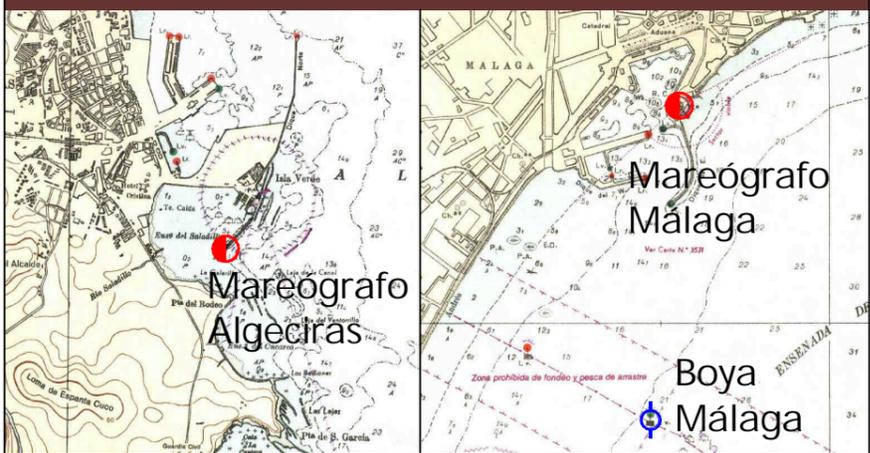
RÉGIMEN EXTREMAL DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



ORIENTACIONES SIGNIFICATIVAS

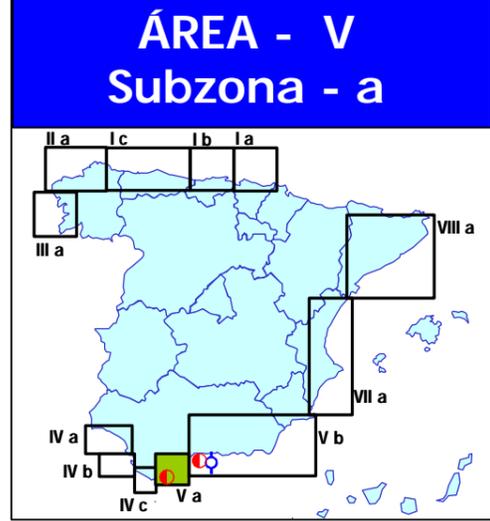


LOCALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN INSTRUMENTAL

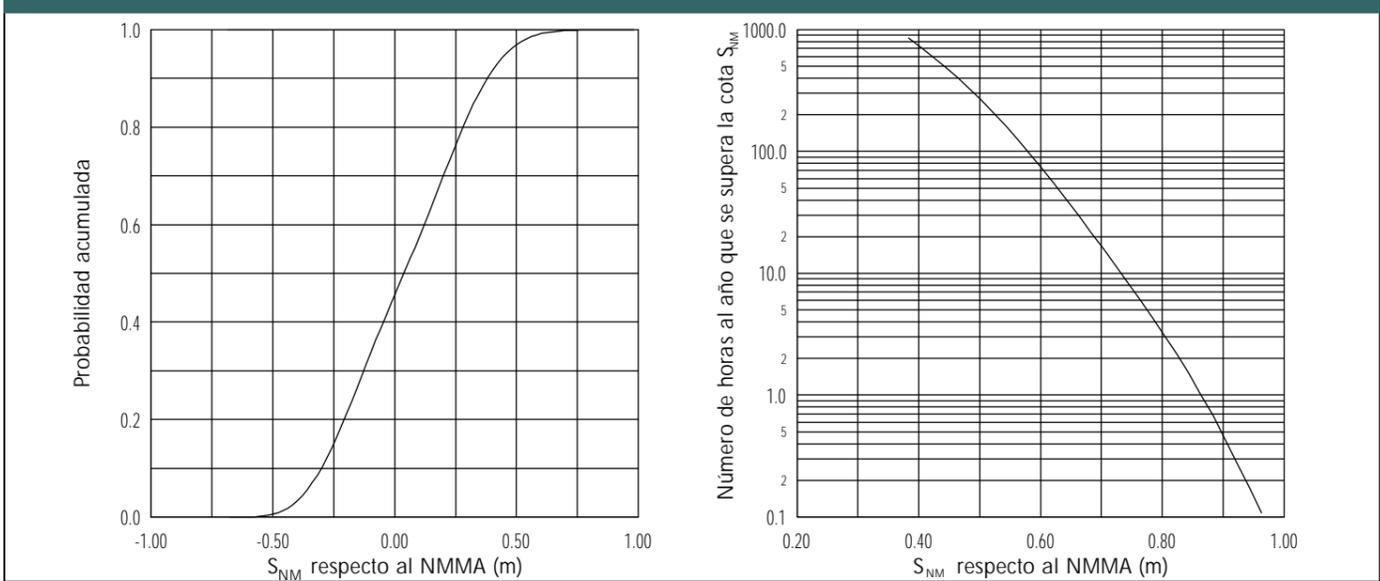


INFORMACIÓN ANALIZADA

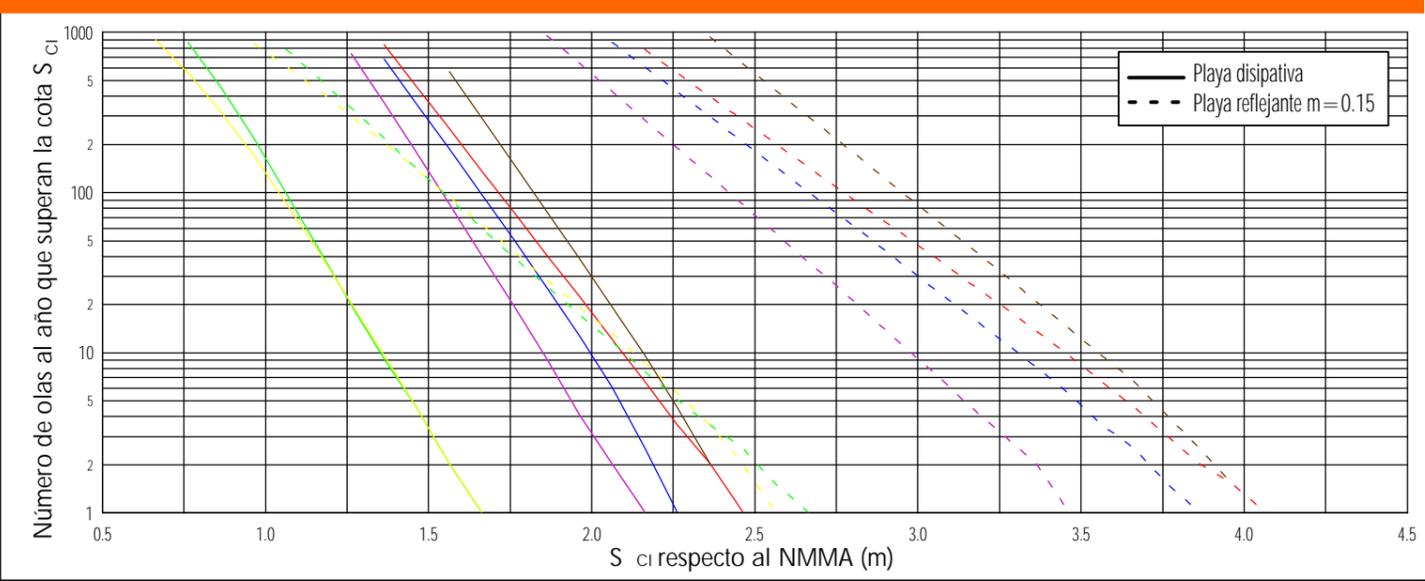
MAREA ASTRONÓMICA		OLEAJE	
Mareógrafo	Algeciras	Boya	Málaga
Situación	36°07' N 05°26' W	Situación	36°41'30"N 04°25'W
Período medida	1993	Profundidad	25 m
MAREA METEOROLÓGICA		OBSERVACIONES VISUALES	
Residuo Nivel del Mar del Mareógrafo de Málaga		Cuadrícula: 35°N - 37°N 2°W - 5.6°W Período medida: 1950-1985	



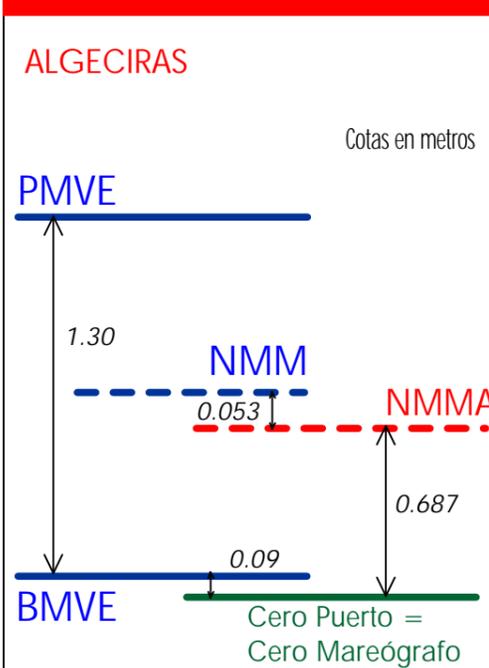
RÉGIMEN MEDIO DEL NIVEL DE MAREA



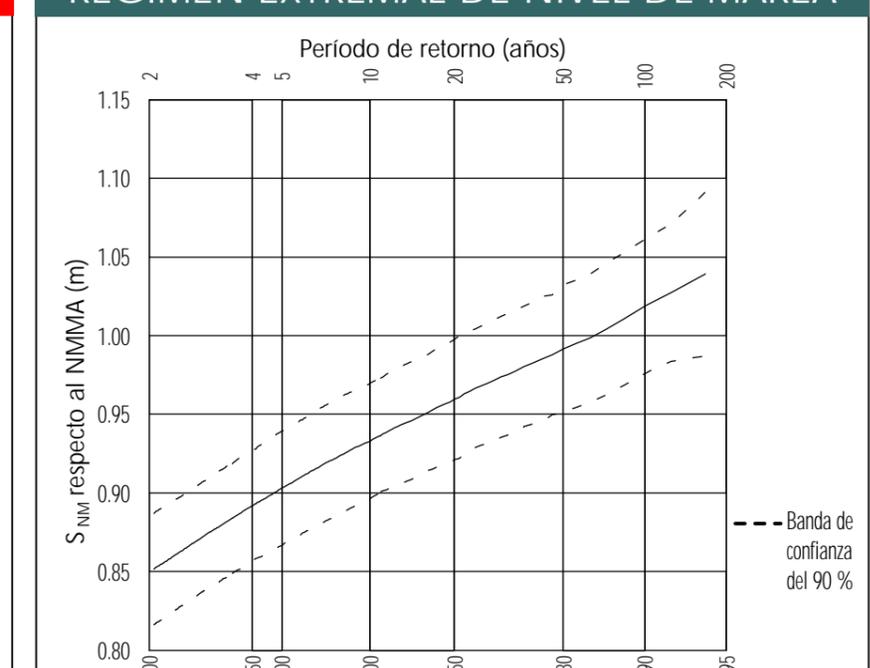
RÉGIMEN MEDIO DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



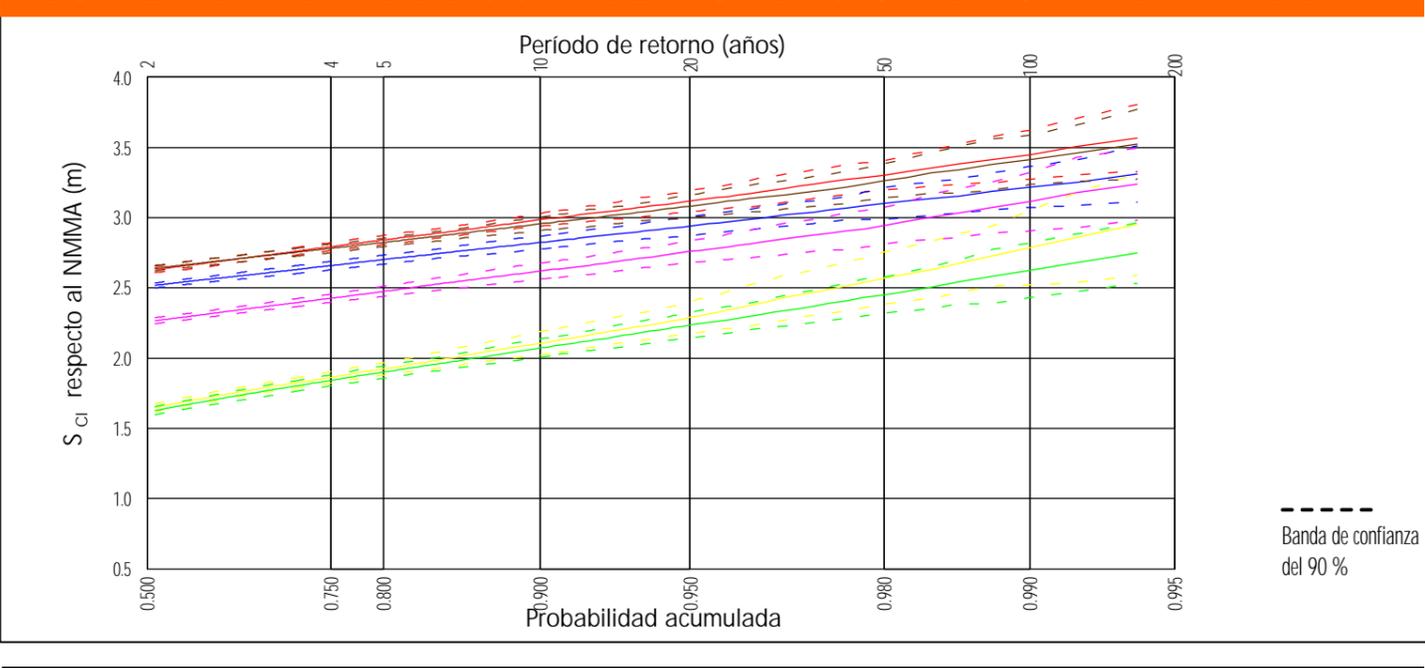
NIVELES DE REFERENCIA



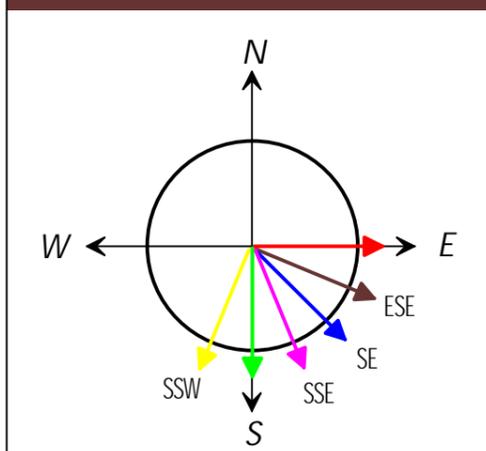
RÉGIMEN EXTREMAL DE NIVEL DE MAREA



RÉGIMEN EXTREMAL DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



ORIENTACIONES SIGNIFICATIVAS



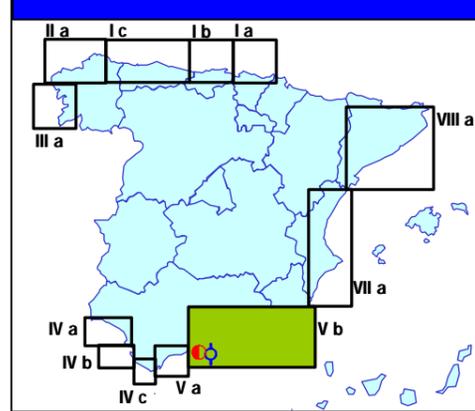
LOCALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN INSTRUMENTAL



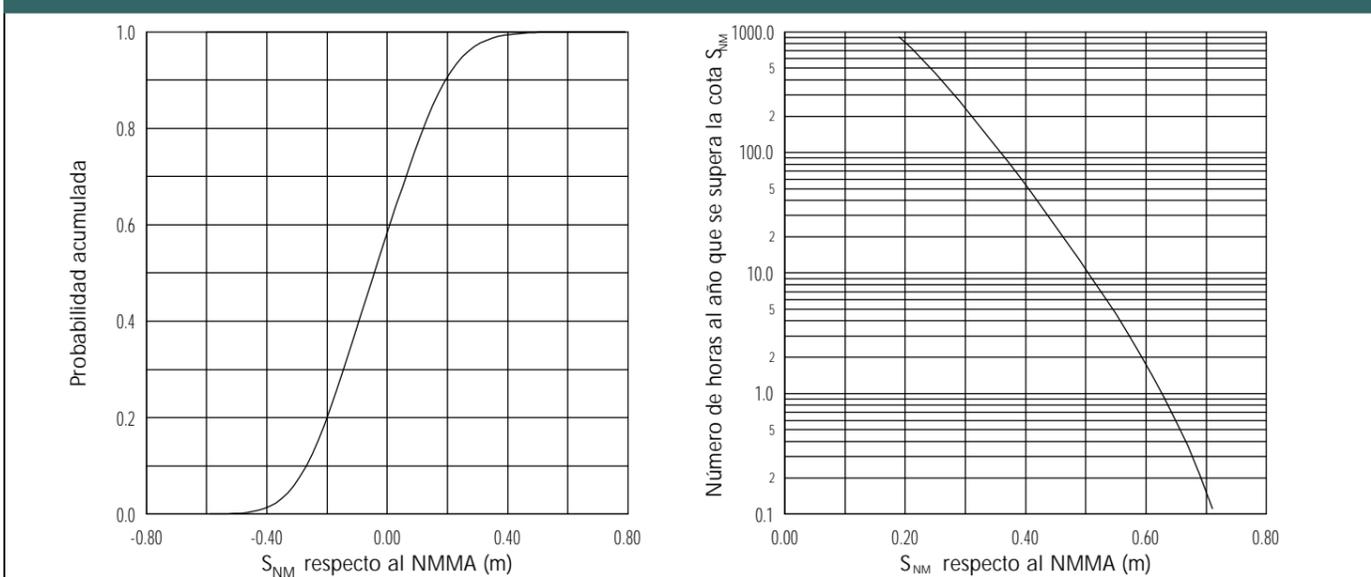
INFORMACIÓN ANALIZADA

MAREA ASTRONÓMICA		OLEAJE	
Mareógrafo	Málaga	Boya	Málaga
Situación	36°42'50" N 04°24'52" W	Situación	36°41'30"N 04°25'W
Período medida	1992 / 1996	Profundidad	25 m
MAREA METEOROLÓGICA		OBSERVACIONES VISUALES	
Residuo Nivel del Mar del Mareógrafo de Málaga		Cuadrícula: 35°N - 37°N 2°W - 5.6°W Período medida: 1950-1985	

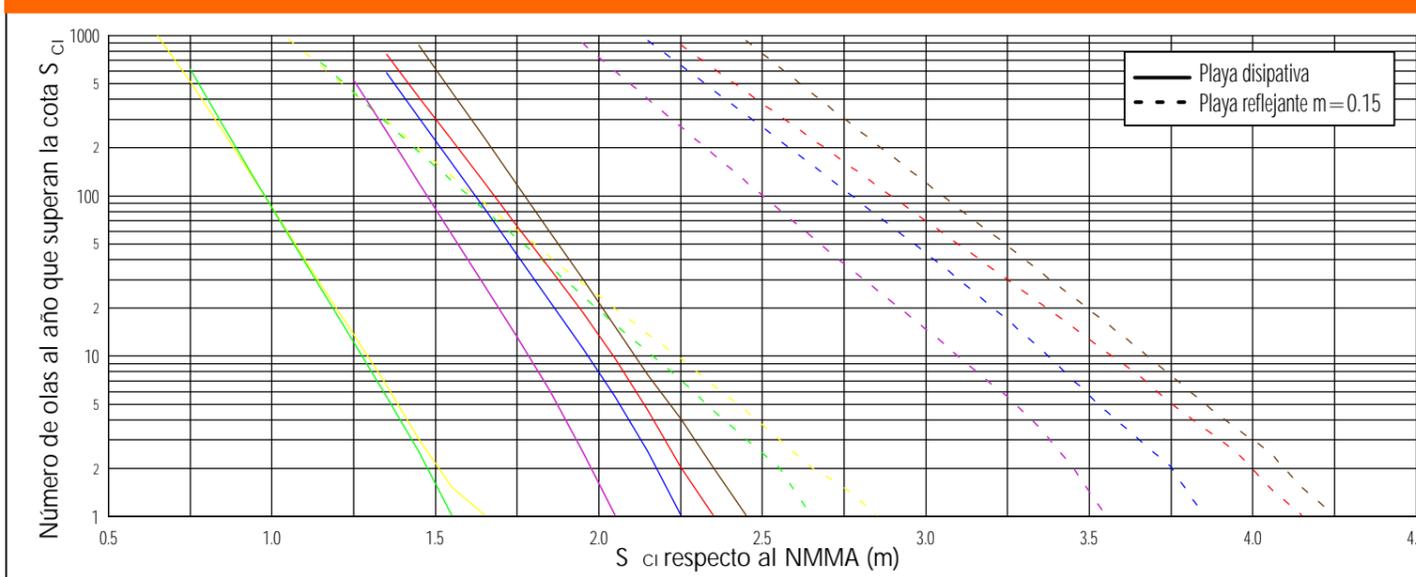
ÁREA - V Subzona - b



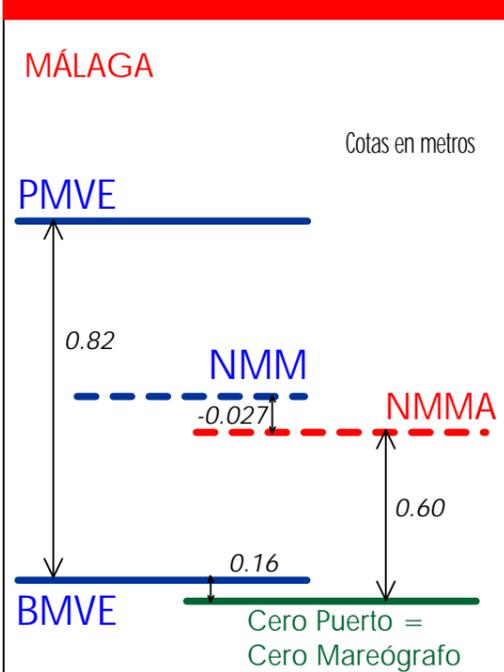
RÉGIMEN MEDIO DEL NIVEL DE MAREA



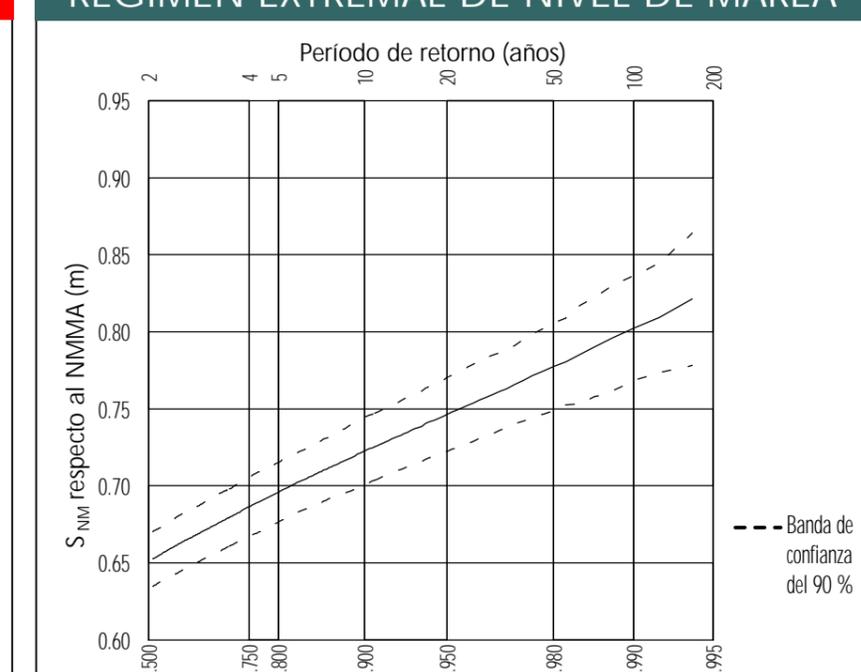
RÉGIMEN MEDIO DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



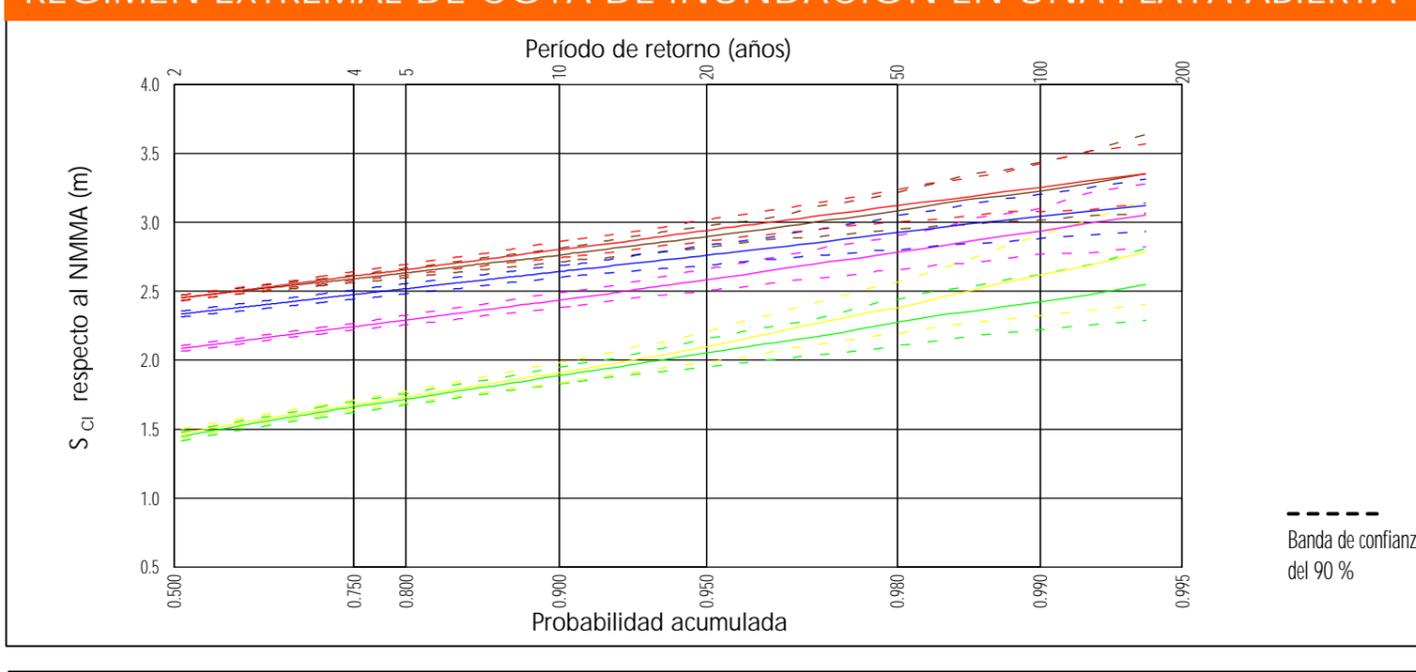
NIVELES DE REFERENCIA



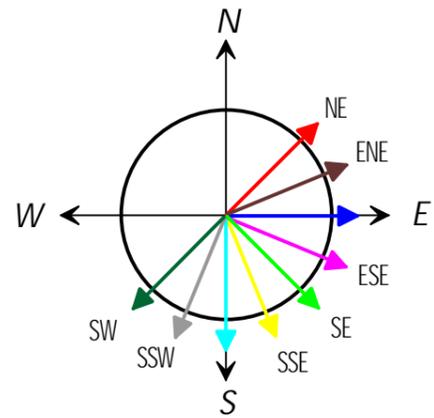
RÉGIMEN EXTREMAL DE NIVEL DE MAREA



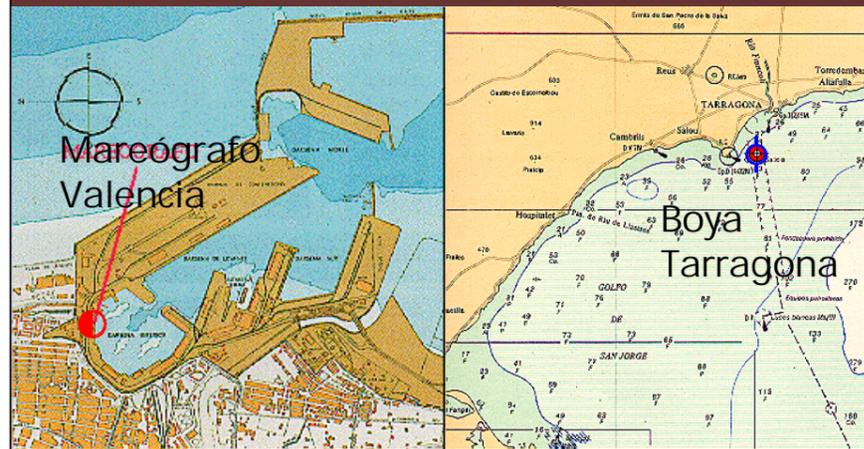
RÉGIMEN EXTREMAL DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



ORIENTACIONES SIGNIFICATIVAS



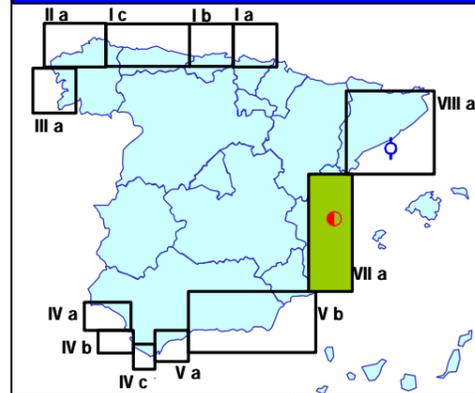
LOCALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN INSTRUMENTAL



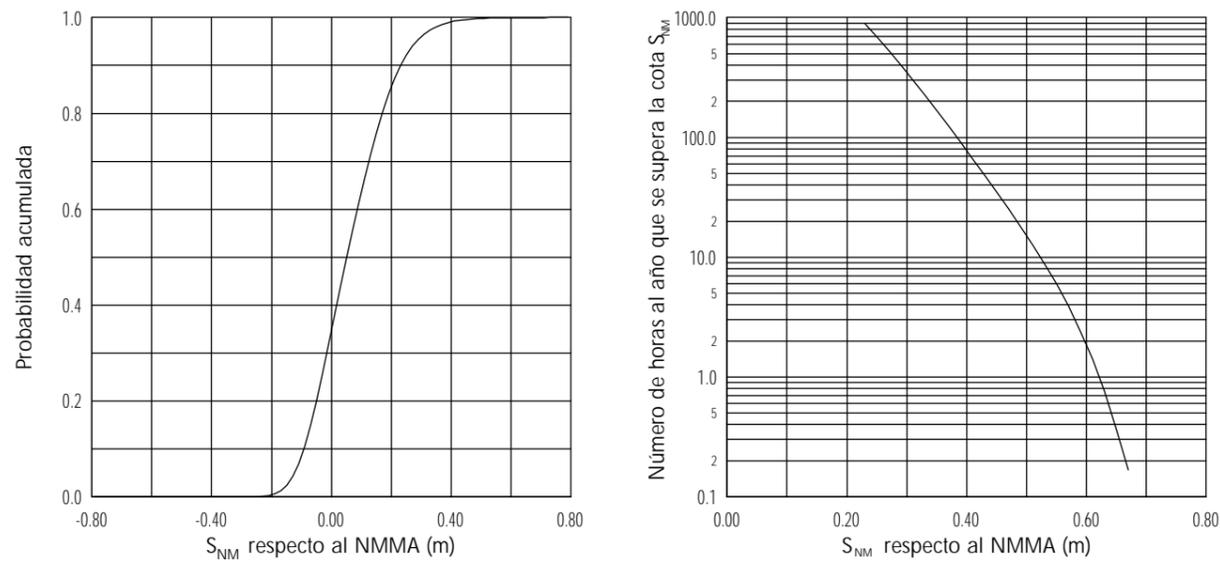
INFORMACIÓN ANALIZADA

MAREA ASTRONÓMICA		OLEAJE	
Mareógrafo	Valencia	Boya	Tarragona
Situación	39°27'42" N 00°19'33" W	Situación	41°03'48" N 01°12'36" E
Período medida	1995 / 1996	Profundidad	35 m
MAREA METEOROLÓGICA		OBSERVACIONES VISUALES	
Residuo Nivel del Mar del Mareógrafo de Valencia		Cuadrícula: 40.5°N - 42.5°N 0°W - 4.5°E Período medida: 1950-1985	

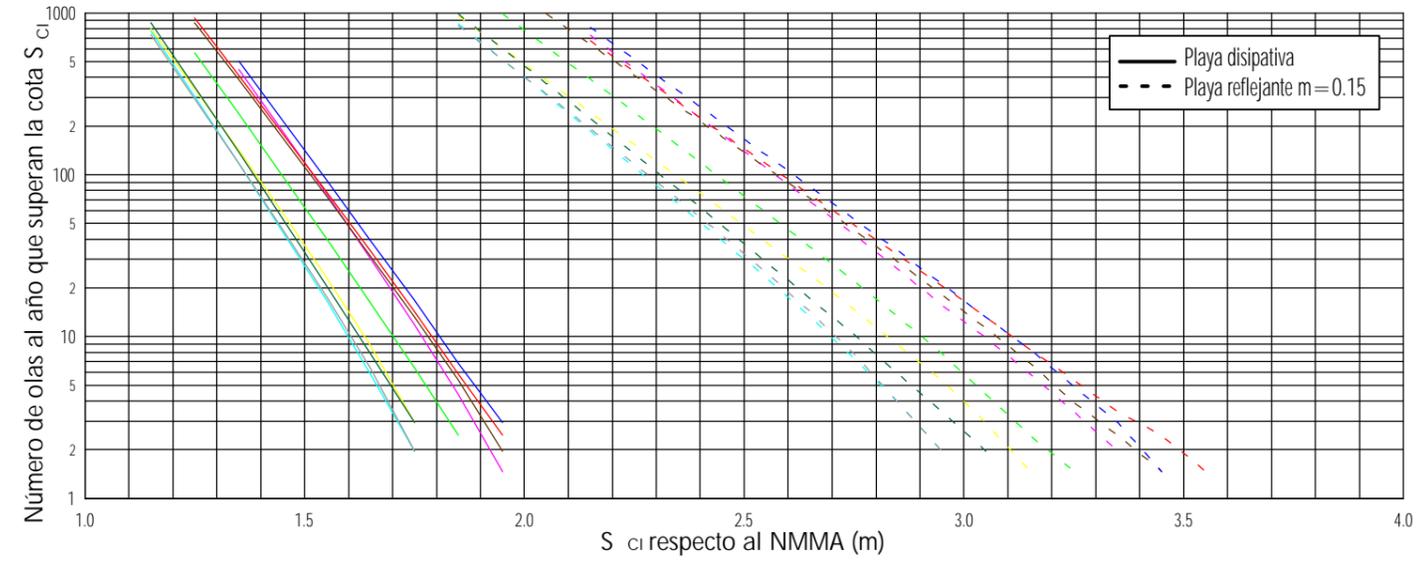
ÁREA - VII Subzona - a



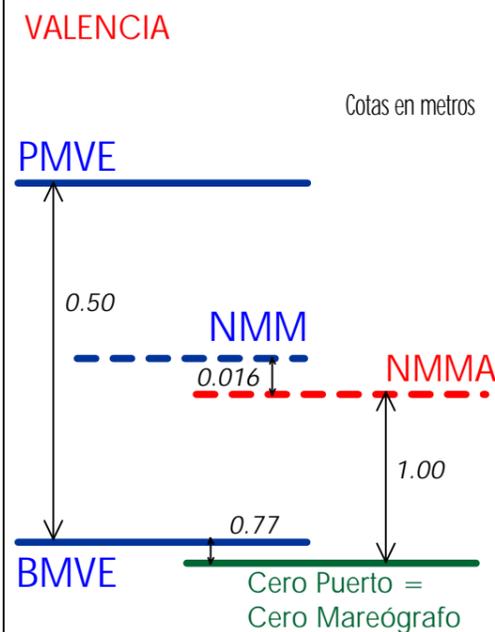
RÉGIMEN MEDIO DEL NIVEL DE MAREA



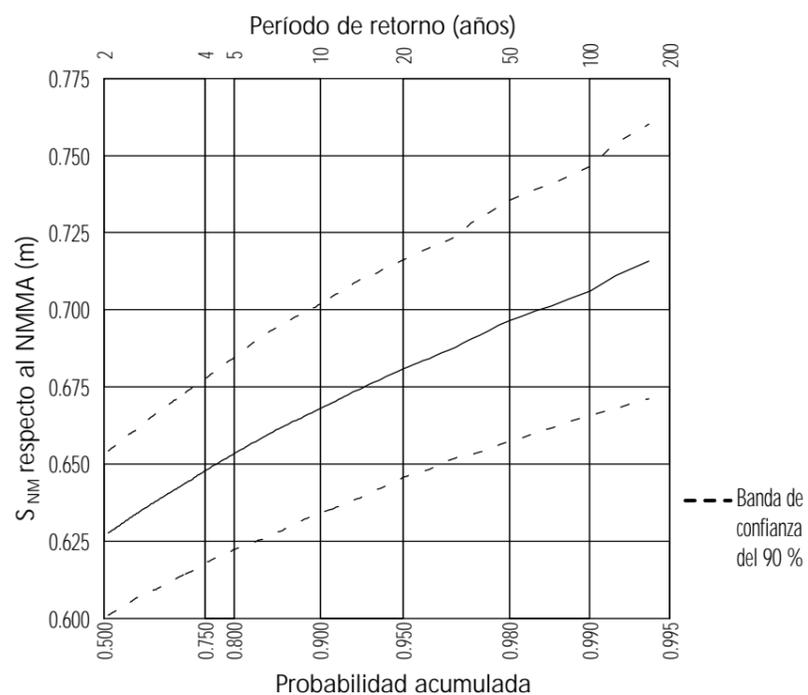
RÉGIMEN MEDIO DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



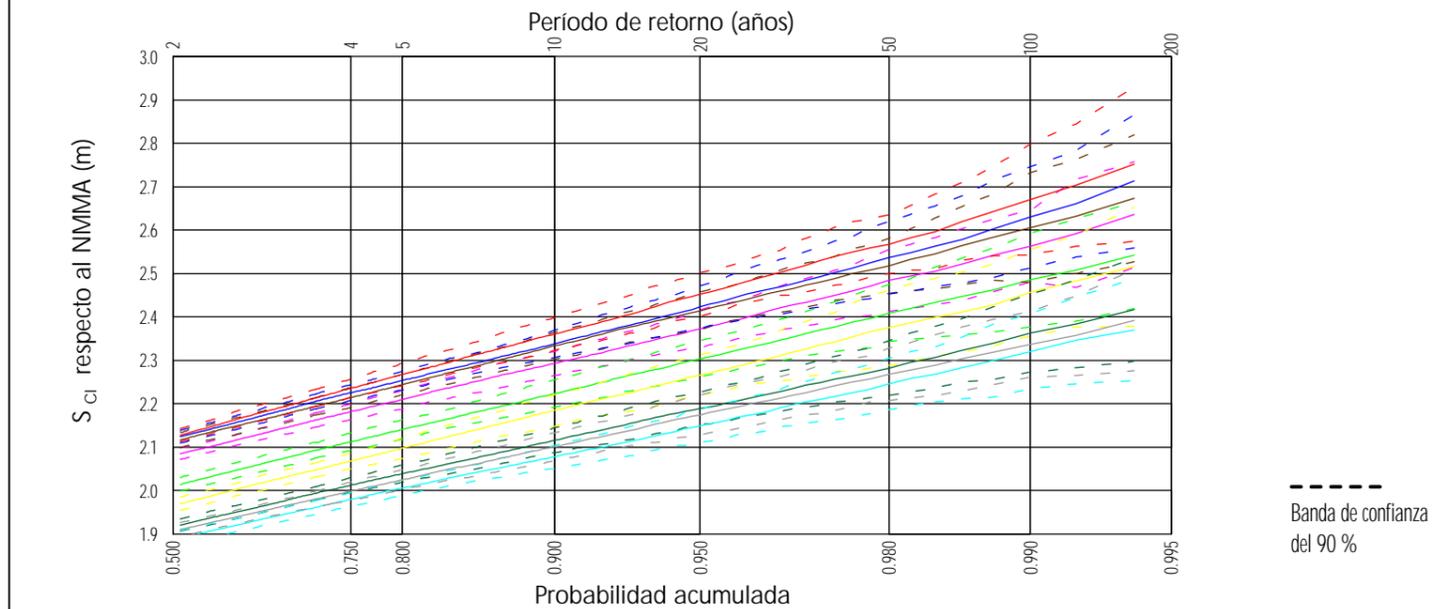
NIVELES DE REFERENCIA



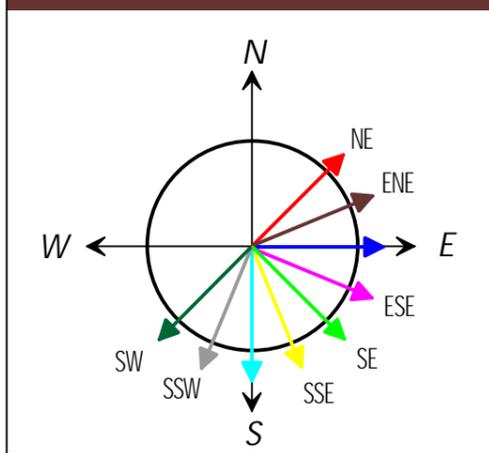
RÉGIMEN EXTREMAL DE NIVEL DE MAREA



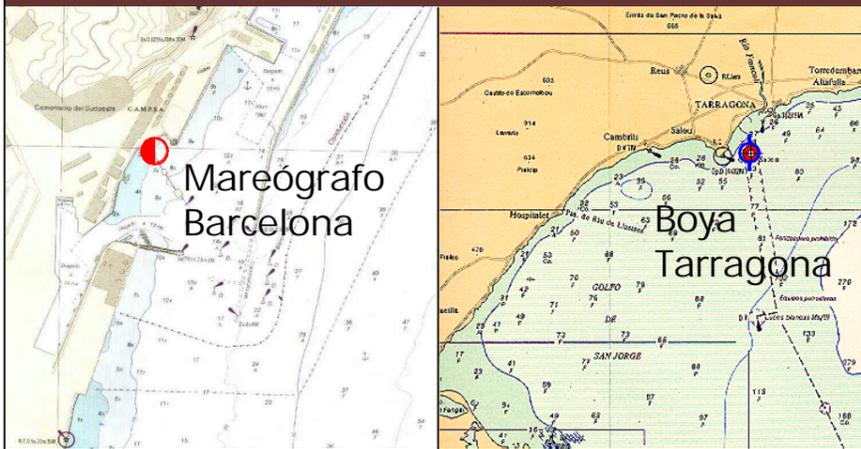
RÉGIMEN EXTREMAL DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



ORIENTACIONES SIGNIFICATIVAS



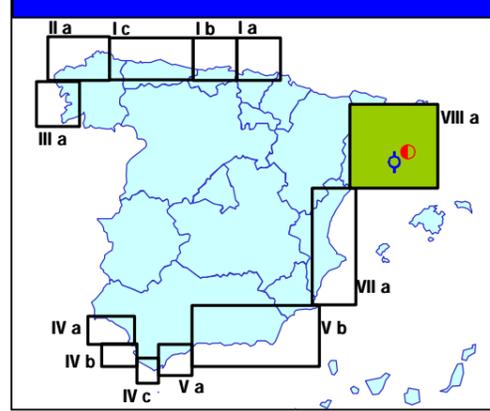
LOCALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN INSTRUMENTAL



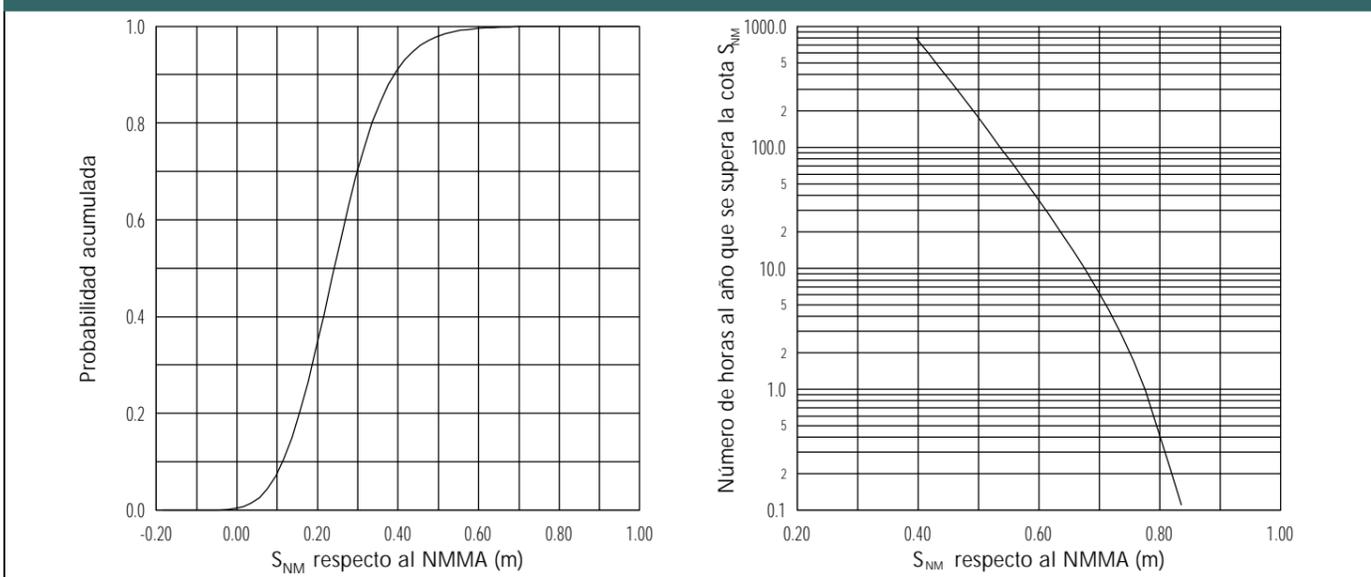
INFORMACIÓN ANALIZADA

MAREA ASTRONÓMICA		OLEAJE	
Mareógrafo	Barcelona	Boya	Tarragona
Situación	41°21'01" N 02°09'41" E	Situación	41°03'48"N 01°12'36"E
Período medida	1992 / 1996	Profundidad	35 m
MAREA METEOROLÓGICA		OBSERVACIONES VISUALES	
Residuo Nivel del Mar del Mareógrafo de Barcelona		Cuadrícula: 40.5°N - 42.5°N 0°W - 4.5°E Período medida: 1950-1985	

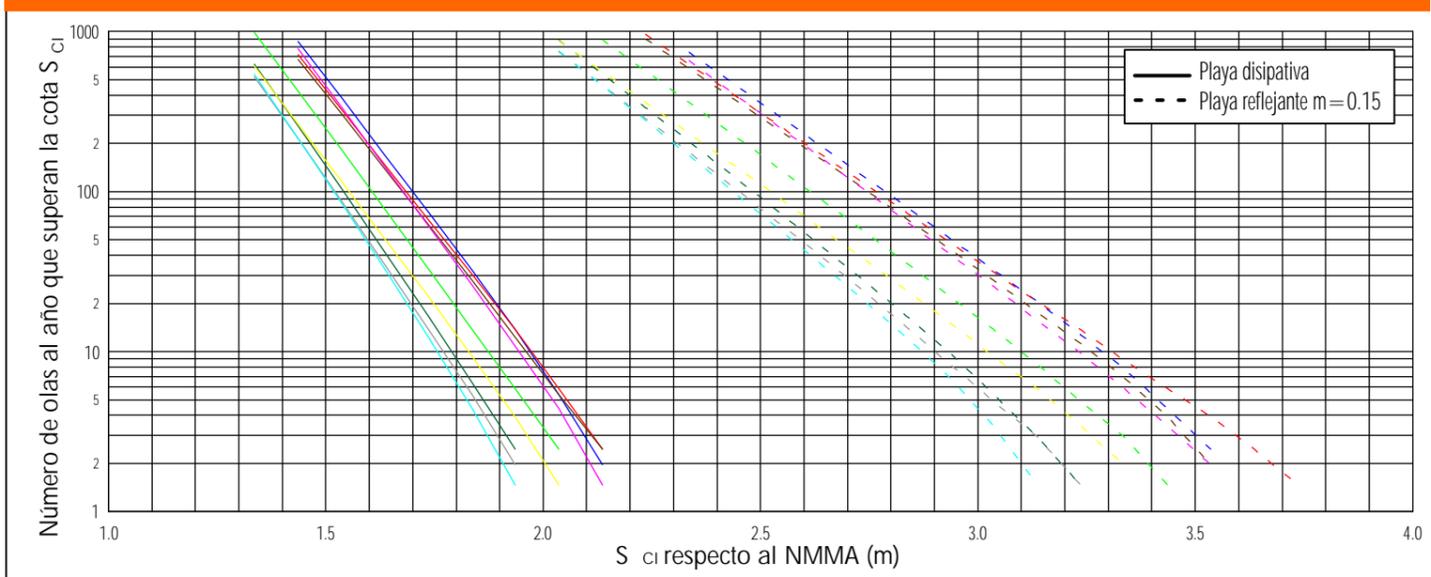
ÁREA - VIII Subzona - a



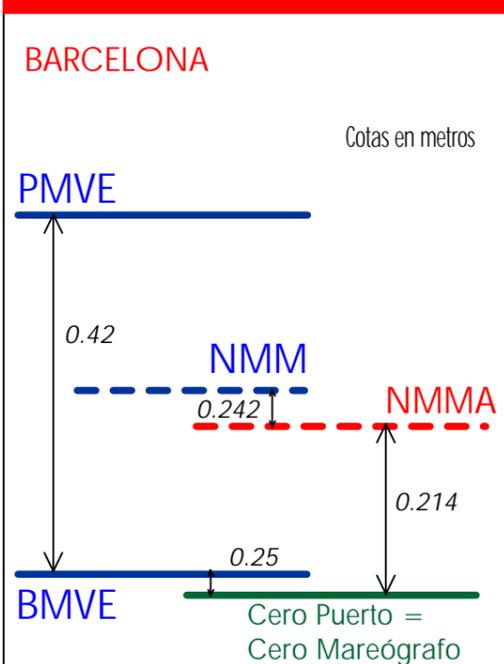
RÉGIMEN MEDIO DEL NIVEL DE MAREA



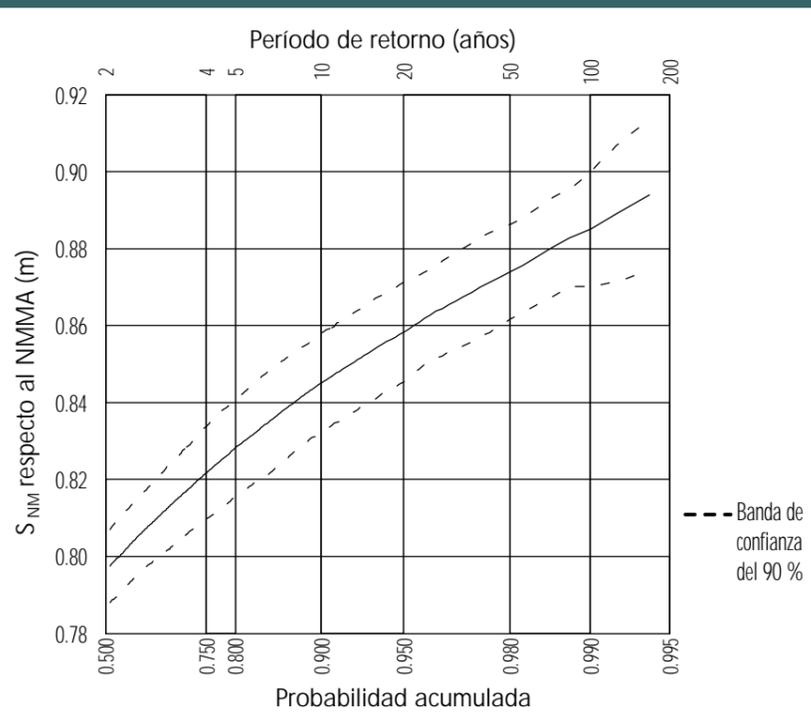
RÉGIMEN MEDIO DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



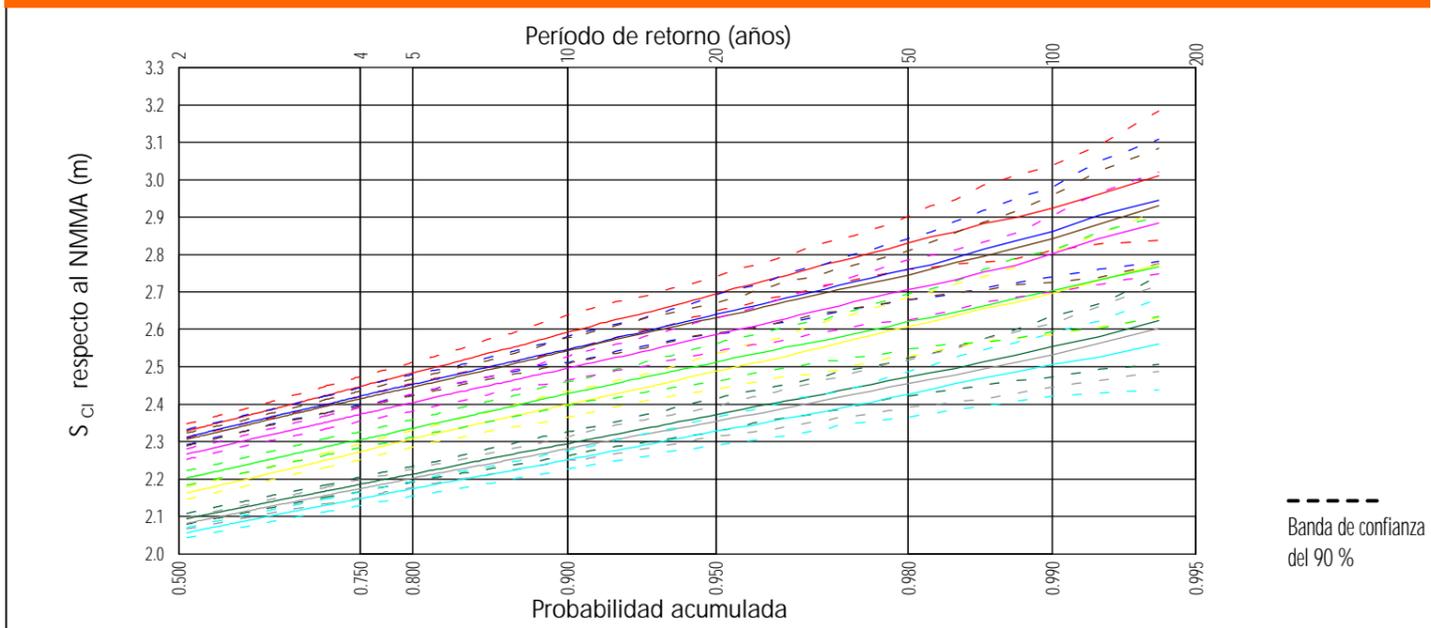
NIVELES DE REFERENCIA



RÉGIMEN EXTREMAL DE NIVEL DE MAREA



RÉGIMEN EXTREMAL DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA



ANEJOS



ANEJO I.

REFERENCIAS





AI.1 REFERENCIAS

Battjes, J.A. (1971). Run-up distributions of waves breaking on slopes. *Journal of the Waterways, Harbours and Coastal Eng. Div., ASCE*, Vol. 97, ww1, pp. 91-114.

Davidson, A.C. and R.L. Smith (1990). Models for exceedances over high thresholds. *J. Roy Statist. Soc. B.*, Vol. 52, pp. 339-442.

Dixon, M.J. and J.A. Tawn (1994). Extreme sea-levels at the UK A-class sites: Site-by-site analyses. Proudman Oceanographic Laboratory, internal document N° 65.

Graff, J. (1981). An investigation of the frequency distributions of annual sea level maxima at ports around Great Britain. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 18, pp. 389-449.

Gumbel, E.J. (1958). *Statistics of extremes*. New York: Columbia University Press.

Guza, R.T., and E.B. Thornton (1981). Wave set-up on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86 (C5), PP. 4133-4137.

Holman, R.A. (1986). Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach. *Coastal Eng.* Vol. 9, pp. 527-544.

Holland and R.A. Holman (1993). The statistical distribution of swash maxima on natural beaches. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 98. N° C6, pp. 10271-10278.

Lennon, G.W. (1963). A frequency investigation of abnormally high tidal levels at certain west coast ports. *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, Vol. 25, pp. 451-484.

Medina, R., F.J. Méndez y M.C. Castillo (1997). Determinación de la cota máxima de inundación en una playa. *Jornadas de Costas y Puertos, Cádiz*. Pp. 789-801.

Nielsen, P. and D.J. Hanslow (1991). Wave run-up distributions on natural beaches. *Journal of Coastal Research*. Vol. 7, N° 4, pp. 1139-1152.

Pérez, B. y O. Serrano (1997). Primeros resultados de análisis extremal del nivel del mar en la costa española. *Jornadas de Puertos y Costas, Cádiz*, pp. 101-115.

Pugh, D.T. and J.M. Vassie (1978). Extreme sea level from tide and surge probability. *Proc. 16th Coastal Eng. Conference, Hamburg. ASCE*, Vol. 1, pp. 911-930.



- Smith, R.L. (1989). Extreme value analysis of environmental time series: an application to trend detection in ground level ozone. *Statist. Sci.* Vol. 4, pp. 367-393.
- Sobey, R.J. (1996). Correlation between individual waves in a real sea state. *Coastal Engineering*, Vol. 27, pp. 223-242.
- Suthons, C.T. (1963). Frequency of occurrence of abnormally high sea levels on the east and south coast of England. *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, Vol. 25, pp. 443-449.
- Tawn, J.A. (1988). An extreme value theory model for dependent observations, *J. Hyd.* Vol. 101, pp. 227-250.
- Tawn, J.A. and J.M. Vassie (1989). Extreme sea-levels: the joint probabilities method revisited and revised. *Proc. Instn. Civ. Engr. Part. 2*, Vol. 87, pp. 429-442.
- Tawn, J.A. and J.M. Vassie (1991). Recent Improvements in the joint probability method for estimating extreme sea levels. In *tidal Hydrodynamics*. Ed. Bruce B. Parker John Wiley&Sons, Inc. pp. 813-828.
- Van der Meer, J.W. and J. Janssen (1995). Wave run-up and wave overtopping at dikes. Wave forces on inclined and vertical wall structures. ASCE. pp. 1-27.

ANEJO II.

**DEFINICIONES Y
LISTA DE SÍMBOLOS**



AII.1 DEFINICIONES

A continuación, se presentan las definiciones de algunos de los términos más utilizados en este informe:

- Marea astronómica: se entiende por marea astronómica el movimiento de ascenso-descenso del nivel del mar por efecto de la atracción gravitatoria de los astros.
- Marea meteorológica: se entiende por marea meteorológica el ascenso o descenso del nivel del mar por los efectos del clima.
- Run-up: se entiende por *run-up* el movimiento de ascenso de la lámina de agua sobre el talud de playa debido a rotura del oleaje en la costa.
- Nivel del mar: cota instantánea de la superficie del agua.
- Nivel medio del mar: cota media del nivel del mar en una serie de datos suficientemente larga.
- Nivel de marea: nivel del mar sin tener en cuenta la acción del oleaje. Es el nivel que resulta al considerar la marea astronómica y la marea meteorológica.
- Cota de inundación: en este documento la definición de cota de inundación es la misma que nivel del mar aplicado a playas. Es la suma de la acción conjunta de la marea astronómica, la marea meteorológica y el *run-up*.

AII.2 LISTA DE SÍMBOLOS

- NMM : nivel medio del mar.
- NM : variable nivel de marea.
- S_{NMM} : valor del nivel de marea en un instante dado.
- CI : variable cota de inundación.
- S_{CI} : valor de la cota de inundación en un instante dado.
- t : tiempo.



- MA : variable marea astronómica.
- S_{MA} : valor de la marea astronómica en un instante dado.
- MM : variable marea meteorológica.
- S_{MM} : valor de la marea meteorológica en un instante dado.
- MMP : variable marea meteorológica de presión.
- S_{MMP} : valor de la variable marea meteorológica de presión en un instante dado.
- a_0 : nivel medio de la marea astronómica.
- a_i : amplitud de la componente armónica
- j_i : desfase de la componente armónica.
- w_i : frecuencia de la componente armónica.
- R : residuo del análisis armónico.
- H_{v0} : altura de ola visual en profundidades indefinidas.
- H_{s0} : altura de ola significativa en profundidades indefinidas.
- H_{sb} : altura de ola significativa en la boya.
- H_{spp} : altura de ola significativa a pie de playa.
- R_u : *run-up*.
- $f_X(x)$: valor de la función de densidad de la variable X en $X = x$.
- $F_X(x)$: valor de la función de distribución de la variable X en $X = x$.
- R_{urms} : *run-up* cuadrático medio.
- K_a : coeficiente de reparto direccional (ROM 0.3-91).
- K_R : coeficiente de refracción-shoaling (ROM 0.3-91).
- a : término independiente en la relación $H_{s0} - H_{v0}$.
- b : valor de la pendiente en la relación $H_{s0} - H_{v0}$.



- c : exponente en la relación $H_{s0} - H_{v0}$.
- a_T : coeficiente que relaciona el período de pico y la altura de ola significativa (ROM 0.3-91).
- m : media de una distribución normal.
- s : desviación típica de una distribución normal.
- l : parámetro de localización en una distribución Gumbel.
- d : parámetro de escala en una distribución Gumbel.
- h : variable reducida en papeles probabilísticos.
- x : variable en el cambio de variable en los papeles probabilísticos.
- T_p : período de pico.
- q : ángulo de incidencia del oleaje.
- b : ángulo de orientación de la batimetría.
- k_r : coeficiente de refracción.
- k_s : coeficiente de asomeramiento.
- a_0 : ángulo que forma el rayo con la normal a la batimetría en profundidades indefinidas.
- a : ángulo que forma el rayo con la normal a la batimetría en la profundidad h .
- c_0 : celeridad de la onda en profundidades indefinidas.
- c : celeridad de la onda.
- L : longitud de onda.
- L_0 : longitud de onda en profundidades indefinidas
- c_g : celeridad de grupo.
- c_{g0} : celeridad de grupo en profundidades indefinidas.
- k : número de onda.



- K_p : coeficiente de propagación.
- H_{su} : altura de ola significativa umbral, que separa la rama media de la extremal.
- I_e : parámetro de localización de la distribución Gumbel de los valores extremales.
- I_m : parámetro de localización de la distribución Gumbel de máximos de los valores medios.
- d_e : parámetro de escala de la distribución Gumbel de máximos de los valores extremales.
- d_m : parámetro de escala de la distribución Gumbel de máximos de los valores medios.
- $E(k^2)$: integral elíptica jacobiana completa de segundo orden.
- $K(k^2)$: integral elíptica jacobiana completa de primer orden.
- $I_o(\)$: función modificada de Bessel I_o
- $f_{(X/Y=y)}(x)$: valor de la función de densidad de la variable X en $X = x$, condicionado a $Y = y$.
- r_{xy} : coeficiente de correlación entre dos variables cuantitativas.
- $NMMA$: nivel medio del mar en Alicante.
- $ARMA$: modelo autorregresivo de media móvil (Autoregressive Moving Average).
- m_{MM/H_s} : media de la distribución normal de la variable marea meteorológica condicionada a la variable altura de ola significativa.
- m_{I_p/H_s} : media de la distribución normal de la variable período de pico condicionada a la variable altura de ola significativa.
- s_{MM/H_s} : desviación típica de la distribución normal de la variable marea meteorológica condicionada a la variable altura de ola significativa.



- s_{T_p/H_s} : desviación típica de la distribución normal de la variable período de pico condicionada a la variable altura de ola significativa.
- $a_{\bar{T}/T_p}$: parámetro que relaciona el período de pico con el período medio.
- ROM: Recomendaciones para obras marítimas.
- REMRO: Red de Medida y registro del Oleaje.
- REDMAR: Red de Mareógrafos.
- PE(CM): Puertos del Estado (Clima Marítimo).
- IEO: Instituto Español de Oceanografía.
- BMVE: bajamar media viva equinoccial.
- PMVE: pleamar media viva equinoccial.