

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TÉCNICAS
DEL AGUA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

TESIS DOCTORAL

**METODOLOGÍAS DE CALIBRACIÓN DE BASES DE
DATOS DE REANÁLISIS DE CLIMA MARÍTIMO**

Presentada por: ANTONIO TOMÁS SAMPEDRO

**Dirigida por: FERNANDO J. MÉNDEZ INCERA
IÑIGO J. LOSADA RODRÍGUEZ**

Mayo, 2009

CAPÍTULO 11

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

11.1. Conclusiones.

En este apartado, a modo de resumen, se van a sintetizar una serie de conclusiones propias de la sección II (aportaciones de esta tesis). Primeramente se describen un conjunto de conclusiones generales para después presentar unas conclusiones particulares de diversos temas específicos de las metodologías de calibración.

11.1.1. Conclusiones generales.

Atendiendo a las metodologías de calibración de bases de datos de oleaje y los ejemplos de aplicación presentados en esta sección se han llegado a las siguientes conclusiones:

- Se ha clasificado los posibles tratamientos de los datos de oleaje disponibles para caracterizar el oleaje necesario para diseñar una obra marítima concreta, en función de las características de la información disponible (profundidad en la ubicación de los datos, clima marítimo en profundidades indefinidas,...) y de la información que se necesita caracterizar. Se ha clasificado de forma general las metodologías de calibración y particularizado dicha clasificación para las bases de datos de oleaje en España.
- Se ha definido y explicado una completa metodología de calibración que resuelve cualquier supuesto, adaptando técnicas clásicas de calibración o desarrollando otras completamente nuevas para abordar problemas no resueltos aún en la literatura.
- Se describen los distintos métodos de calibración puntual y espacial con los que se organiza metodológicamente la calibración de datos de oleaje en profundidades indefinidas. La calibración puntual es únicamente válida para los casos en los que los datos instrumentales tienen un clima marítimo similar, en profundidades indefinidas, a los datos que se calibran. La calibración espacial, en cambio, permite calibrar una base de datos utilizando datos instrumentales con distintos climas marítimos en profundidades indefinidas. También se define un método de calibración que calibra una base de datos en profundidades indefinidas con información instrumental en profundidades reducidas, la denominada calibración con retropropagación.
- En la clasificación de las metodologías de calibración de datos de oleaje para el diseño de obras marítimas se prioriza la utilización de unas técnicas frente a otras, cuando existe la posibilidad de utilizar varias alternativas. Debiendo ser utilizadas

sucesivamente (según la posibilidad de aplicación, de mejor a peor): la calibración puntual no paramétrica, la puntual paramétrica QQ , la puntual paramétrica *scatter*, la retropropagación y la espacial. Aunque hay que tener en cuenta para qué se necesita caracterizar el oleaje, ya que por ejemplo, si se necesita determinar el régimen extremal será preferible utilizar las calibraciones paramétricas, pues en general no es posible calibrar los datos más energéticos con la calibración no paramétrica (debido a la escasez de datos instrumentales coincidentes y muy energéticos).

- Todas y cada una de las metodologías de calibración se han aplicado al ámbito de las bases de datos de oleaje en España, calibrando las bases de datos SIMAR-44 con datos de boyas y satélites. Presentando diferentes ejemplos de calibración fundamentalmente de H_s y de T_m de SIMAR-44. Las diferentes técnicas de calibración pueden ser fácilmente aplicables a otros ámbitos costeros u otras variables geofísicas.
- Se ha comprobado la necesidad de verificar y validar siempre los resultados de la calibraciones realizadas, pues la calidad de los resultados no sólo depende del método de calibración utilizado, sino también de las características de los datos utilizados en cada aplicación.
- En la metodología de calibración desarrollada siempre se presenta la alternativa de la calibración direccional, que es la que se recomienda utilizar. Se han generalizado los métodos escalares para considerar la direccionalidad del oleaje o se han desarrollado otros nuevos, de forma que se han estandarizando ciertos procedimientos de calibración direccional (como la definición de ondas sinusoidales de variación de los parámetros de calibración, a lo largo del círculo de todas las direcciones posibles, en las metodologías paramétricas).
- En esta tesis se han utilizado profusamente los regímenes medios de oleaje, utilizando una serie de estándares tanto en su definición como en su ajuste a relaciones paramétricas de calibración o a funciones de distribución, como por ejemplo la utilización de cuantiles equiespaciados en $-\log[-\log(\text{Pr})]$, el ajuste de funciones potenciales del tipo $Y = bX^c$ (sin término independiente) o que para comparar distintos regímenes siempre deben definirse a partir de datos que recojan las mismas escalas hiperanuales de oleaje.
- Las distintas metodologías de calibración han tenido especial interés en la correcta caracterización del régimen medio-alto del oleaje. Cuando existan datos instrumentales suficientes para calibrar los oleajes más energéticos se corrigen dichos

oleajes, en cambio cuando no se tenga información para ello, se modifican dichos oleajes lo mínimo posible. Por ello, se incorporan ponderaciones y términos de mínima variación del régimen extremal (MVRExt) para ajustar las relaciones de calibración paramétricas, dichas relaciones son potenciales del tipo $Y = bX^c$, para permitir correcciones diferentes de las tendencias del régimen medio y medio-alto.

- La resolución de los distintos problemas de ajuste de las complicadas relaciones paramétricas no lineales implica la estimación de una numerosa cantidad de parámetros de difíciles funciones objetivo a minimizar. Para ello ha sido imprescindible la implementación de algoritmos de optimización de problemas de alta dimensionalidad como el SCE-UA o el SCEM-UA.
- Además de los ejemplos de los distintos métodos de calibración que se han incorporado en las explicaciones de dichas técnicas de calibración, también se han aplicado a un ejemplo concreto de gran relevancia: la calibración de los regímenes extremales en profundidades indefinidas a lo largo del litoral español. Con dicha aplicación se demuestra la necesidad de calibrar las bases de datos de reanálisis previamente a su utilización.
- La caracterización de los regímenes extremales en aguas abiertas a lo largo del litoral español se ha realizado utilizando los datos de H_s de SIMAR-44, siguiendo la metodología de calibración desarrollada, y aplicándola a las posiciones de las boyas de la red exterior del OPPE. Por ello se ha aplicado la calibración puntual direccional QQ ponderada y con MVRExt a las posiciones coincidentes de SIMAR-44 con las boyas. Tras la calibración y definición de los regímenes extremales se ha comprobado las grandes diferencias que se pueden llegar a encontrar entre utilizar los datos de reanálisis sin calibrar o correctamente calibrados, lo que repercute directamente en el diseño de las obras marítimas y en su optimización estructural y económica.

11.1.2. Conclusiones sobre las metodologías de calibración.

A continuación se presenta esquemáticamente un resumen de las conclusiones a las que se ha llegado tras el estudio de cada una de las metodologías de calibración de bases de datos de oleaje:

- La metodología de calibración puntual paramétrica tradicional de diagramas de dispersión, o *scatter plot*, es con la que se obtienen los peores resultados. Se define a partir de pares de datos coincidentes, pudiendo estimar el intervalo de confianza de los

parámetros de la calibración. Se ha implementado relaciones paramétricas lineales y no lineales, de forma escalar para todos los datos o introduciendo la variación de θ para definir la calibración direccional.

- Fundamentalmente el problema que afecta intrínsecamente a la calibración puntual *scatter*, es el hecho de que no permite corregir la rama medio-alta del régimen del oleaje si tiene una tendencia distinta a la de los valores medios, pues las regresiones se ajustan mejor dónde se acumula la mayor cantidad de información. Por eso, en general, se recomienda utilizar otra metodología de calibración puntual, pues siempre va a ser posible, salvo que se tengan pocos datos coincidentes (menos de 100), siendo en este caso más conveniente utilizar regresiones lineales.
- La calibración puntual paramétrica *QQ* define la relación potencial de calibración a partir de comparaciones entre los cuantiles de datos instrumentales y de datos de reanálisis. Ésta es la metodología de calibración puntual con la que se obtienen los mejores resultados. Debido a que esta metodología de calibración agrega la información para definir los cuantiles, es la única metodología de calibración puntual con la que no es necesario que los datos sean coincidentes, aunque sí muy conveniente, sobre todo si se tienen pocos datos. Con esta metodología de calibración se consigue corregir los regímenes medios (intensidad del oleaje), pero si las series temporales de oleaje no están sincronizadas o en fase, no es posible corregir el desfase entre las series. Con esta metodología de calibración es con la que mejor se puede calibrar los regímenes extremales, pues introduce la tendencia de corrección del régimen medio-alto para calibrar los datos más extremos. Para esta metodología no se ha definido el intervalo de confianza de los datos calibrados, por lo que no se evalúa la incertidumbre que se comete en la calibración de cada dato.
- La metodología de calibración puntual paramétrica *QQ* se ha aplicado en su versión tradicional, definiendo los cuantiles con todos los datos o sólo con los coincidentes, de forma que se calibra escalarmente la base de datos. También se ha desarrollado una metodología direccional que agrega los datos por direcciones para definir unas relaciones paramétricas direccionales y continuas en θ . Se ha estandarizado la definición de los sectores direccionales de agregación, tomando sectores de amplitudes de 22.5° centrados cada 11.25°, siendo válidos para todas las bases de datos del ámbito costero español analizadas (SIMAR-44, boyas y satélites).
- Para definir la metodología de calibración puntual *QQ* se han definido una serie de estándares de aplicación, como por ejemplo, la elección de 30 cuantiles

equiespaciados en $-\log[-\log(\text{Pr})]$ desde la probabilidad del 15% a la del 99.999%, utilizando únicamente los que verifican $\text{Pr} < 1 - 5/n$. Se han ajustado siempre relaciones paramétricas potenciales del tipo $Y = bX^c$, utilizando ponderaciones de los cuantiles con pesos del tipo $W = \sqrt{n \text{Pr}(1 - \text{Pr})}$ e introduciendo un término de MVRExt que minimiza la variación del mayor cuantil (régimen extremal) de la base de datos sin calibrar. También, para la calibración direccional, se ha utilizado una parametrización continua en θ de los parámetros de la relación potencial, $b(\theta)$ y $c(\theta)$, que superpone 6 ondas sinusoidales sobre sus valores medios. De hecho, debido a la rigurosidad y robustez de la completa metodología *QQ* se aplica como parte de otras metodologías de calibración más complicadas como la retropropagación o la espacial.

- El método de calibración puntual paramétrico *QQ*, al igual que el *scatter*, no es capaz de corregir la fase de las series de oleaje, por lo que es necesario calibrarlo previamente. Pero en el caso de la calibración *scatter*, además, como se compara dato a dato, si no son coincidentes y sincronizadas, se pueden obtener relaciones de calibración incorrectas.
- Ambas metodologías de calibración puntual paramétricas, *scatter* y *QQ*, se han aplicado con los datos de H_s de la boya de Mahón, validando con datos de satélites. Gracias a los resultados de estas calibraciones se han podido comparar todas las metodologías de calibración escalar y direccional, tanto para las puntuales como para las espaciales. Las metodologías presentadas son bastante generales como para poder ser fácilmente aplicables a cualquier variable geofísica.
- Cuando existen datos instrumentales que no están en profundidades indefinidas, para calibrar el oleaje del reanálisis en profundidades indefinidas, se define el método de calibración con retropropagación, que es una metodología de calibración puntual paramétrica que conjuga la calibración *QQ* con la propagación del oleaje de manera iterativa hasta la convergencia del oleaje de reanálisis calibrado y propagado con el oleaje instrumental.
- La metodología de calibración con retropropagación se han definido tanto escalarmente como direccionalmente, utilizando siempre la calibración puntual *QQ* ponderada y con MVRExt para definir las relaciones finales de calibración. Se ha aplicado para el caso de la boya costera de Tarragona, utilizando una metodología clásica de propagación con el modelo OLUCA-SP.

- La calibración puntual no paramétrica es la metodología con la que se obtienen los mejores resultados de calibración del régimen medio y medio-alto, calibrando cada dato con la corrección media de los datos instrumentales análogos. Por lo que los datos más energéticos, si no tienen datos instrumentales análogos, no se corrigen, en cuyo caso el régimen extremal no se calibra. Con esta metodología de calibración se puede definir el intervalo de confianza de cada dato calibrado y no es necesario que las series de oleaje estén perfectamente en fase, aunque si es necesario que exista una suficiente cantidad de datos coincidentes.
- A partir del método de calibración no paramétrico escalar original de Caires y Ferreira (2005) se ha desarrollado la metodología de calibración puntual escalar, implementándola para el ámbito costero español; desarrollando a partir de ella una nueva metodología de calibración puntual direccional no paramétrica, que permite calibrar el oleaje manteniendo la distribución conjunta direccional (H_s , T_m y θ).
- El mayor problema que presentan los métodos de calibración puntual no paramétricos es que si la información instrumental no es muy homogénea y presenta saltos o quiebros en la serie temporal, pueden ser introducidos en la serie temporal calibrada (esto no se produce cuando se definen expresiones paramétricas de calibración). Este problema ha sido resuelto, en la metodología presentada, con la introducción de filtros de media móvil en el residuo que debe sumarse a la serie original para calibrarla.
- La metodología de calibración puntual no paramétrica (escalar y direccional) se ha aplicado exhaustivamente a los datos H_s , T_m y θ de SIMAR-44 del Atlántico y Mediterráneo para calibrarlos con datos de boyas y/o satélites, validando los resultados de distintas formas. También se ha estudiado la influencia en los resultados de la cantidad de datos utilizados para calibrar, definiendo unos criterios o recomendaciones para utilizar $R = 0.5^\circ$ (distancia entre cada dato de satélite y la posición SIMAR-44 a calibrar) para satélites y un mínimo de 4 años de datos para boyas, aunque siempre se debe verificar estos supuestos en función de los requisitos concretos de cada calibración.
- Para poder calibrar el oleaje en una posición utilizando información instrumental que tiene climas marítimos en profundidades indefinidas distintos a los de la posición de interés, se desarrolla una compleja metodología de calibración espacial, aprovechando las relaciones espaciales de los datos de reanálisis. De hecho, esta metodología consigue calibrar los regímenes medios de toda una zona, determinando una relación de calibración final para cada nodo del reanálisis. En función de si se definen

regímenes medios mensuales o regímenes medios direccionales se propone la metodología espacial escalar o la direccional.

- La metodología de calibración espacial, escalar y direccional, se ha aplicado a la H_s de SIMAR-44 de una zona del mar Mediterráneo que cubre Valencia y las Islas Baleares, utilizando siempre, entre otros, los datos de la boya de Mahón para calibrar. Se puede comprobar que los resultados son peores que los de la calibración puntual, por lo que para el diseño de obras marítimas es preferible utilizar, cuando se pueda, la calibración puntual. Pero para aplicaciones en caracterización de climatología, con grandes bases de datos de reanálisis que abarcan zonas extensas, para producir calibraciones eficientes y homogéneas espacialmente, se propone utilizar mejor las calibraciones espaciales frente a las globales o puntuales. La metodología de calibración espacial presentada puede extenderse a cualquier base de datos de variables geofísicas obtenidas mediante modelos de reanálisis.
- La metodología de calibración espacial, tras el ajuste de los regímenes medios de toda la zona de estudio a funciones de distribución dadas, descompone los parámetros de dichas funciones de distribución en modos, utilizando la técnica clásica de descomposición de variables bidimensionales en EOFs. Con la parametrización de dichos modos se permite la distorsión de los regímenes medios para que se aproximen a los de los datos instrumentales, consiguiendo calibrar toda la base de datos.
- En la metodología de calibración espacial escalar se ha utilizado la información de 5 boyas para calibrar, Mahón y cuatro boyas en profundidades intermedias retropropagadas hasta profundidades indefinidas, validando los resultados con datos de satélites. Se ha utilizado la función de distribución Lognormal para ajustar los regímenes medios mensuales y, tras la calibración de dichos regímenes, se ha utilizado el método de Monte Carlo para definir los regímenes medios escalares con los que ajustar las relaciones finales de calibración en cada punto, mediante calibraciones puntuales QQ escalares ponderadas y MVRExt. Finalmente, los resultados obtenidos con la calibración espacial escalar no llegan a las calidades logradas con la calibración puntual escalar QQ .
- En la metodología de calibración espacial direccional se ha utilizado sólo información instrumental en profundidades indefinidas, por eso únicamente se procesa la información de la boya de Mahón y el 40% de los datos de satélites para calibrar, dejando el 60% de los datos de satélites para validar. Se ha utilizado de manera novedosa la función de distribución GEV para ajustar los regímenes medios

direccionales y, tras la calibración de dichos regímenes, se han ajustado las relaciones finales de calibración en cada punto, mediante calibraciones puntuales QQ direccionales ponderadas y MVRExt. Finalmente, los resultados obtenidos con la calibración espacial direccional tienen una calidad similar a la lograda con la calibración puntual direccional QQ .

- En cuanto a las funciones de distribución utilizadas, se ha comprobado que la Lognormal presenta algunas deficiencias para la correcta determinación del régimen medio-alto de H_s . En cambio, la GEV, utilizada para ajustar el régimen medio, representa mejor todo el intervalo de probabilidades. De hecho, de forma general, se obtienen mejores resultados para el ajuste de los regímenes medios de H_s y T_m en el Mediterráneo con la función de distribución GEV que con otras clásicas como la Lognormal, Gumbel de máximos o Weibull de mínimos.

11.2. Futuras líneas de investigación.

Con esta tesis se ha contribuido a racionalizar la incorporación de los datos de reanálisis al diseño de obras marítimas y actuación en la costa mediante una completa metodología de calibración. Sin embargo, aún se podría investigar en varias líneas de trabajo que se plantean a continuación:

- La metodología de calibración de bases de datos de reanálisis presentada en esta tesis está basada fundamentalmente en técnicas de regresión (para las calibraciones paramétricas) pero existen otras técnicas como redes neuronales y probabilísticas a partir de las cuales es posible resolver regresiones no lineales complejas, con las que se podría definir otros métodos de calibración puntuales no paramétricos. También podrían estudiarse los modelos autoregresivos o las cadenas de Markov para definir métodos de calibración en series temporales.
- Todas las metodologías de calibración deberían poder estimar la incertidumbre de la variable calibrada. Esto se incorpora en los métodos paramétricos por datos coincidentes o *scatter* y en los no paramétricos, pero no en los paramétricos basados en comparación de cuantiles o QQ . Para estimar el error en la calibración QQ se podría incorporar el error cometido en la determinación de los cuantiles, añadiendo dicho error al cometido en la estimación de la relación de calibración. Esto es posible mediante la utilización de técnicas bayesianas para resolver las relaciones de calibración (por ejemplo, SCEM-UA, Vrugt *et al.*, 2003), pues pueden introducir no sólo los valores de referencia para calibrar, sino también sus funciones de distribución.

Con ello se podría estimar el intervalo de confianza de los datos calibrados incorporando el error cometido por el ajuste a la relación de calibración y el error introducido por la estimación de los cuantiles de referencia utilizados para calibrar. Otra alternativa sería utilizar la calibración paramétrica *scatter* (que estima el error cometido con la calibración), pero introduciendo ciertas ponderaciones para calibrar correctamente la rama alta del régimen medio.

- Como se ha explicado, el método de calibración no paramétrico presentado no permite corregir el régimen extremal cuando no existen datos de referencia suficientes, también se detectaron ciertas deficiencias en la calibración de los valores menos energéticos. Ambos problemas podrían solucionarse con la modificación de los criterios de semejanza a satisfacer para seleccionar datos análogos, haciéndolos variar en función del valor de la variable a calibrar (en lugar de que permanezcan constantes como en la versión actual). Se han probado relaciones del tipo logarítmico, sin obtener mejoras significativas, aunque con un análisis más exhaustivo tal vez se podrían obtener mejores resultados.
- A la hora de seleccionar datos de satélites con un clima marítimo similar a una posición dada, se ha decidido utilizar los datos que disten menos de 0.5° de dicha posición, sea cual sea la ubicación de éste. Pero esto podría hacerse de una forma más rigurosa, variando la forma (no circular) y dimensiones (no $R = 0.5^\circ$) para cada posición, definiendo criterios de comparación de los coeficientes de correlación entre las variables que definen el clima marítimo del reanálisis en las diversas posiciones, como por ejemplo los diagramas de Taylor (Taylor, 2001) o coeficientes de correlación vectorial (Crosby *et al.*, 1993).
- Finalmente, los distintos métodos de calibración paramétricos presentados corrigen independientemente los distintos parámetros escalares o direccionales del estado de mar. Sería deseable corregir conjuntamente todos los parámetros que definen un estado de mar, obligando a mantener sus correlaciones cruzadas. Así por ejemplo, para la calibración espacial se podría recurrir a alguna función de distribución conjunta direccional para representar los regímenes medios del oleaje, aunque aumentaría notablemente la complejidad del método de calibración.

