



40. NIVELACIÓN HIDROSTÁTICA ENTRE DOS MAREÓGRAFOS SITUADOS EN EL PUERTO DE BARCELONA

AUTORES:
ANA TAPIAA, ROGELIO LÓPEZ, JOSÉ A. GILI, VICENÇ PALAU, FRANCESC PROS

RESUMEN.

Este estudio pretende relacionar los registros (marzo de 2013 a febrero de 2014) de dos mareógrafos situados en el Puerto de Barcelona y que se han denominado BCN2 y BCN3. El mareógrafo BCN2 pertenece a la RED de MAREógrafos de Puertos del Estado (REDMAR) y refiere los datos al NMMA1995 mientras que BCN3, propiedad de la Autoridad Portuaria de Barcelona, los refiere a la Red Topográfica del Puerto de Barcelona observada mediante técnicas GNSS. Ambos mareógrafos están separados unos 3Km. en línea recta y unos 8Km. por tierra. El objetivo ha sido determinar la diferencia existente entre los ceros de referencia de los dos mareógrafos. El nivel de mar observado por los mareógrafos, sin tener en cuenta la acción del oleaje, está afectado por la marea astronómica y la marea meteorológica. La marea meteorológica es de tipo aleatorio, por el contrario la marea astronómica es de carácter determinista y se puede resolver realizando el análisis de armónicos. Para ello, una vez realizado el control de calidad de los datos brutos, se utilizó la aplicación T_TIDE en MATLAB obteniendo como resultado para cada mareógrafo tres gráficas y dos ficheros.

Las gráficas representan respectivamente el nivel del mar observado, la marea astronómica y la meteorológica o residuo y de los dos ficheros, uno corresponde al cálculo de los componentes armónicos, del que nos interesa la componente Z0 (nivel medio del mar) y el segundo contiene la componente meteorológica. Se puede concluir en que el cero de referencia de BCN3 está situado 0,096 metros por encima del NMMA 1995.

INTRODUCCIÓN

La hidrostática estudia los fluidos en estado de reposo, sin que existan fuerzas que alteren su movimiento. Sin embargo, el nivel de mar observado por los mareógrafos, sin tener en cuenta la acción del oleaje, está afectado por la marea astronómica y la llamada marea meteorológica provocada sobre todo por la presión atmosférica y el viento pero también por otros parámetros como la temperatura del agua. La marea meteorológica por tanto es de tipo aleatorio, por el contrario la marea astronómica es de carácter determinista y se puede resolver realizando el análisis de armónicos.

La medición del nivel del mar en tiempo real es fundamental para garantizar la seguridad de la navegación en el interior de los puertos. Además, las series históricas proporcionadas por los mareógrafos permiten realizar estudios como el de la evolución de extremos de nivel, el seguimiento del cero del puerto o del nivel de referencia, la obtención de constantes armónicas precisas que permitan predecir la marea astronómica, el conocimiento de la marea meteorológica y la evolución del nivel medio del mar entre otros. En obra civil, el estudio de evolución del nivel del mar es importante en proyectos de puertos y paseos marítimos. Toda esta información obtenida a partir del análisis de los registros mareográficos también se asocia claramente al estudio del cambio climático así como al de los sistemas ecológicos costeros. La importancia de la correcta medición del nivel del mar es clara y en este sentido en el Puerto de Barcelona se realizan controles de la estabilidad de los mareógrafos y otros sensores mediante nivelación geométrica y otras técnicas (Tapia, 2013; López, 2012).

El mareógrafo BCN2 perteneciente a la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado (REDMAR) está situado en un duque de alba de la empresa ENAGAS dentro de la zona denominada Muelle de la Energía (figura 1) y refiere los datos al NMMA1995. Es del tipo radar de onda continua (FMCW radar) y entró en funcionamiento en mayo de 2007. El puerto de Barcelona dispone de serie histórica desde enero de 1993. El mareógrafo BCN3 pertenece a la Autoridad Portuaria de Barcelona y está situado en el estribo Este del puente Puerta de Europa que da acceso al Dique del Este. Refiere sus datos a la Red Topográfica del Puerto de Barcelona observada mediante técnicas GNSS. Es del tipo acústico (SONAR), mide directamente a la superficie del mar y es de utilidad para el Servicio de Topografía e Hidrografía del Puerto de Barcelona. Está operativo desde el año 2013. Ambos mareógrafos están separados unos 3 km en línea recta y unos 8 km por tierra.



Figura 1. Situación mareógrafos en el Puerto de Barcelona. Mapa base: ICGC.

NIVELACIÓN HIDROSTÁTICA

El análisis de armónicos de la marea astronómica se basa en la teoría de que la marea observada está compuesta por un conjunto finito de sinusoides a frecuencias específicas relacionadas con parámetros astronómicos. Para calcular dichos componentes se ha utilizado el conjunto de programas T_TIDE mediante MATLAB, basados en el análisis de Fourier (1807), que afirma que cualquier señal continua y periódica se puede representar como la adición de una serie de ondas sinusoidales simples. La marea astronómica se puede definir por tanto con la siguiente expresión:

$$\xi_{MA}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \times \cos(\omega_i * t + \alpha_i)$$

siendo a_0 el nivel medio del mar, a_i la amplitud de la onda de componente i , ω_i la frecuencia de la onda de componente i , α_i el desfase de la misma, N el número de componentes y t el instante del dato del nivel del mar.

El valor a_0 es el que se busca en este estudio.

La herramienta T_TIDE para MATLAB

T_TIDE es un conjunto de rutinas para MATLAB que puede ser utilizado libremente para realizar el análisis de armónicos de la marea astronómica. La descripción detallada de los fundamentos teóricos del mismo se puede encontrar en Pawlowicz et al. (2002). La principal aplicación para la que fue creada es la obtención de la marea meteorológica, como residuo o diferencia entre los datos de partida y los calculados, aunque mencionan que también se puede hacer la predicción de la marea astronómica utilizando los constituyentes analizados. En nuestro caso se utilizará para determinar la componente a_0 a partir de los datos mareográficos tanto de BCN2 como de BCN3.



40. NIVELACIÓN HIDROSTÁTICA ENTRE DOS MAREÓGRAFOS SITUADOS EN EL PUERTO DE BARCELONA

El algoritmo del análisis armónico es el mismo que el utilizado por otros autores, Godin (1972) y Foreman (1978) y se basa en las frecuencias armónicas fundamentales que son seis: la del día lunar (1/24,41667 h), la del movimiento de traslación de la Luna alrededor de la Tierra (1/27,32 días), la de traslación de la Tierra alrededor del Sol (1/365,24 días), la del movimiento de rotación que describe el perigeo en el plano de traslación de la Luna alrededor de la Tierra (1/8,85 años), la del movimiento rotatorio de la línea intersección del plano de rotación de la Luna alrededor de la Tierra y el plano de traslación de la Tierra alrededor del Sol (1/18,6 años) y la del movimiento de rotación que describe el perihelio en el plano de traslación de la Tierra alrededor del Sol (1/20942 años), esta última se omite. La combinación de estas fundamentales las estudió Doodson (1921) estableciendo los llamados números Doodson que dan lugar a 388 frecuencias de marea astronómica. A efectos prácticos se agrupan las coincidentes en los tres primeros números Doodson y de estos grupos se considera como componente principal la de mayor amplitud y el resto reciben el nombre de componentes satélite. Los componentes satélites no se incluyen en el análisis de armónicos pero si se tienen en cuenta en el proceso posterior de determinación de amplitudes y desfase de las principales.

Por otro lado, en el caso de aguas poco profundas, como lo son las de los puertos, se produce la distorsión de los armónicos astronómicos, la frecuencia resultante es combinación de las componentes principales de las que deriva. Se suelen considerar 24 componentes armónicas en aguas someras.

Un aspecto importante es que los componentes se pueden elegir de un listado o bien aplicar la selección automática mediante un algoritmo. Otra innovación de T_TIDE es la conversión del algoritmo de armónicos clásico a álgebra compleja e implementarlo en MATLAB lo que permite la realización de la representación de los datos y resultados y también la realización de gráficos de dispersión y otros.

Una vez seleccionados los componentes, T_TIDE realiza el ajuste mínimo cuadrático, es decir, minimiza el cuadrado de la diferencia entre los niveles observados y los estimados en el método y se calculan intervalos de confianza para los parámetros de marea estimados utilizando distintos algoritmos que pueden ser seleccionados por el usuario.

Datos de partida

Este estudio se ha realizado con datos mareográficos desde marzo de 2013 a febrero de 2014.

Los registros del mareógrafo BCN2 fueron facilitados por Puertos del Estado en un fichero en el que se indica que son datos recibidos en tiempo real sobre los que se ha realizado un control de calidad que elimina valores fuera de rango, saltos y estabilizaciones anómalas. En el listado de parámetros se indica fecha GMT (año, mes, día, hora y minuto) y nivel del mar en milímetros. El dato nulo es representado por -9999.

Los registros mareográficos de BCN3 fueron facilitados por el Servicio de Topografía e Hidrografía del Puerto de Barcelona y en el listado de parámetros se indica fecha GMT (mes/día/año hh:mm:s0) y nivel del mar expresado en metros y de precisión el centímetro. Son datos brutos.

Control de calidad de los datos

Como en cualquier medición, antes de procesar los datos estos deben someterse a un control de calidad. Para realizarlo se ha procurado seguir las pautas indicadas por REDMAR en sus informes anuales. Los pasos en el control de calidad empleado con los datos brutos son los siguientes:

- Comprobación de la exacta correspondencia entre el número de observaciones y el número que debería haber.
- Interpolación de los datos carentes si el periodo sin datos no supera normalmente 25 minutos, en caso contrario se considera dato nulo representándolo con el valor -9999 para su interpretación correcta en el T_TIDE.
- Comprobación de la existencia de picos, datos dudosos (como podrían ser en el mareógrafo acústico la no detección de blanco en cada medida) y estabilización de la serie, considerando valor nulo aquellos registros cuyo valor se mantiene constante durante una hora y media o más.

Una vez depurados los datos se promedian a valores cada 5 minutos, el intervalo predeterminado en el T_TIDE.



Control de calidad datos BCN2

El número de minutos que debe haber es de 525.600, en el fichero facilitado faltan 457 observaciones. Una vez localizados los periodos con falta de datos, se observa que en la mayoría de los casos es de un solo minuto, varios entre 3 y 5 minutos y un intervalo de 1 hora 18 minutos. En este último caso se considera el intervalo con valor nulo, en el resto se interpolan valores de nivel de mar.

Para la localización de la estabilización de la serie se resta cada observación con la anterior y se localizan los periodos cuyo valor es cero siendo el mayor de 30 minutos. Se decide considerar los datos como válidos en todos los casos.

Para decidir cuál es el límite en el que se debe considerar un valor como pico se consulta la página de Puertos del Estado <http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx> en la que se puede obtener la altura significativa del oleaje (máximos mensuales) para el periodo de estudio con datos del mareógrafo BCN2 y que en nuestro caso es de unos 40 centímetros. Con esta premisa, una vez calculadas las diferencias entre las observaciones adyacentes, se detectan un porcentaje medio de valores fuera de rango de 0,06%. A sabiendas que en el fichero se indica que han sido eliminados los valores fuera de rango, se prefiere considerar no válidos este pequeño porcentaje de datos.

Control de calidad datos brutos BCN3

El volumen de datos es mucho mayor que en BCN2 ya que se registra el nivel del mar cada 10 segundos. Deberían haberse registrado 3.153.600 datos. Se buscará la ausencia de datos mensualmente. Se detectan 5 meses con falta de datos, el periodo máximo sin datos es de 14,75 días en febrero de 2014 seguido de 7,68 días el primer mes (marzo de 2013) 2,54 días en enero de 2014 y 12,92 horas en mayo de 2013, sólo faltan 7 observaciones en abril de 2013. Se interpolan en este último caso y se consideran como valores nulos los anteriores.

No se detecta estabilización de la serie. En cuanto a los valores dudosos no se dispone de información sobre la detección del blanco en cada medida.

Para el estudio de los valores fuera de rango se ha considerado la misma premisa que en BCN2. Su situación es junto a la bocana norte del puerto, algo más resguardado de la acción del oleaje exterior pero con una gran densidad de tráfico de ferrys y otros barcos de menor eslora; adicionalmente BCN3 está próximo al helipuerto.

El porcentaje de valores fuera del rango de 40 centímetros es de 0.02%. Se promedian datos cada minuto.

Finalmente se promedian los datos al intervalo definitivo de 5 minutos para realizar los cálculos en T_TIDE.

Análisis armónico de la marea con T_TIDE

Se debe realizar un script de pre y pos proceso para analizar los resultados. En el de pre proceso se calcula la fecha en tiempo juliano y se expresa el nivel del mar en metros; también calcula el nivel medio del mar de la serie que será el valor aproximado para el cálculo mínimo cuadrático y referencia los niveles del mar a este nivel medio aproximado. El de pos proceso es para calcular la marea meteorológica y representar gráficamente el nivel del mar, la marea astronómica y la meteorológica, también para seleccionar los componentes más significativos que serán los de mayor amplitud.

El paso intermedio es el análisis de armónicos con T_TIDE. Una vez cargada la serie y realizado el pre proceso, el algoritmo de selección de componentes utiliza y selecciona 35 componentes astronómicos y 24 de los componentes más importantes de aguas someras. A continuación realiza el ajuste mínimo cuadrático para obtener las constantes amplitud (a_i) y desfase (α_i) de cada componente. Este ajuste consiste en minimizar la diferencia al cuadrado entre el modelo armónico y los valores de la serie. Si partimos de la ecuación fundamental de las series de Fourier considerando un intervalo de tiempo $[T, -T]$, en el proceso mínimo cuadrático obtenemos:

$$\sum_{t=-T}^T \left[\left(Z(t) - Z_0 - \sum_k a_k \cos(\sigma_k t - \alpha_k) \right)^2 \right]$$



40. NIVELACIÓN HIDROSTÁTICA ENTRE DOS MAREÓGRAFOS SITUADOS EN EL PUERTO DE BARCELONA

Podemos linealizar la ecuación si consideramos:

$$\begin{aligned} X_k &= a_k \cos \alpha_k \\ Y_k &= a_k \sin \alpha_k \end{aligned}$$

De manera que:

$$\epsilon(X_k, Y_k) = \sum_{t=-T}^T \left[\left(Z(t) - Z_0 - \sum_k X_k \cos \sigma_k t + Y_k \times \sin \sigma_k t \right)^2 \right]$$

Z_0 (nivel medio del mar) también es una incógnita y se considera como armónico de frecuencia cero y amplitud $Z_0 = X_0$, entonces:

$$\epsilon(X_k, Y_k) = \sum_{t=-T}^T \left[\left(Z(t) - \sum_{k=0}^n (X_k \cos \sigma_k t) - \sum_{k=1}^n (Y_k \times \sin \sigma_k t) \right)^2 \right]$$

Las condiciones mínimo cuadráticas serán:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial X_{k'}} = 0 \quad \frac{\partial \epsilon}{\partial Y_{k'}} = 0 \quad \text{siendo } k' \text{ variable de } 0 \text{ a } n.$$

T_TIDE utiliza álgebra compleja directamente, en lugar de tratar con seno y coseno, con la ventaja de poder escalar la presión atmosférica y tratar como un vector las corrientes horizontales, parámetros de gran interés en oceanografía. Estos valores complejos son convertidos posteriormente a los parámetros estándar.

También calcula el parámetro llamado SNR (relación potencia de señal respecto al ruido) basándose en el cuadrado de la relación de la amplitud respecto del error de amplitud. Considera el procedimiento adecuado cuando la SNR es mayor de 10 y probablemente adecuado para SNR 2 o 3. En el listado de resultados los componentes con SNR mayor de 2 aparecen marcados con un asterisco.

T_TIDE en MATLAB obtiene como resultado para cada mareógrafo tres gráficas que representan respectivamente el nivel del mar observado, la marea astronómica y la meteorológica o residuo y dos ficheros, que corresponden al cálculo de los componentes armónicos, del que nos interesa la componente Z_0 (nivel medio del mar) y el segundo con la componente meteorológica.

Análisis serie BCN2

Los resultados obtenidos con los datos del mareógrafo BCN2 son las tres gráficas que se presentan a continuación (figura 2) en las que en el eje X se representa el tiempo juliano y en el eje Y el nivel medio del mar en metros.

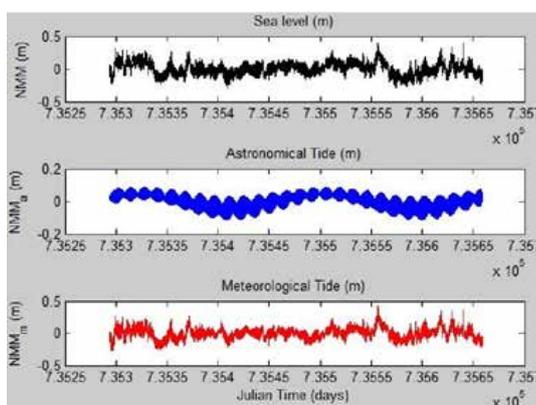


Figura 2. Gráficas correspondientes a los datos del mareógrafo BCN2



Del fichero resultante del cálculo de los componentes armónicos, 59 en total, se ha realizado una selección. En la selección de las componentes armónicas se han considerado las de mayor amplitud y de ellas las que el parámetro SRN sea mayor de 2. Además se incluye la componente Z0, el valor que se busca en este estudio. El resultado se presenta en la Tabla 1.

Componente	Frecuencia (s ⁻¹)	Amplitud (m)	Fase (°)	SNR
Z0		0,344	0,00	
*SSA	0,0002282	0,0450	48,39	2,50
*O1	0,0387307	0,0165	346,02	27,00
*P1	0,0415526	0,0109	147,80	15,00
*K1	0,0417807	0,0297	28,52	91,00
*M2	0,0805114	0,0184	296,08	7,80
*MKS2	0,0807396	0,0080	162,29	2,30

Tabla 1. Componentes seleccionados marea astronómica BCN2

Todos los componentes son astronómicos salvo el MKS2 que es un componente de aguas someras.

Análisis serie BCN3

De la misma manera se procede con los datos de BCN3. Los resultados son los mismos gráficos (Figura 3) y una nueva Tabla 2 con los componentes seleccionados siguiendo el mismo criterio.

Con las mismas premisas que las definidas para BCN2 se obtienen en la serie de BCN3 tres armónicos astronómicos más y el componente de aguas someras MKS2.

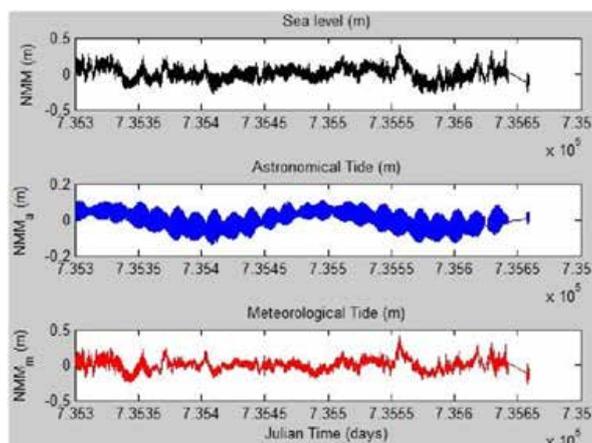


Figura 3. Gráfica correspondiente a los datos del mareógrafo BCN3

Componente	Frecuencia (s ⁻¹)	Amplitud (m)	Fase (°)	SNR
Z0		0,248	0,00	
*SSA	0,0002282	0,0492	53,75	3,00
*O1	0,0387307	0,0102	269,09	9,40
*TAU1	0,0389588	0,0073	187,06	4,60
*P1	0,0415526	0,0165	241,58	17,00
*K1	0,0417807	0,0219	103,37	35,00
*N2	0,0789992	0,0089	74,32	5,30
*M2	0,0805114	0,0341	349,51	69,00
*MKS2	0,0807396	0,0074	165,02	4,80
*S2	0,0833333	0,0100	277,05	5,70

Tabla 2. Componentes seleccionados marea astronómica BCN3



40. NIVELACIÓN HIDROSTÁTICA ENTRE DOS MAREÓGRAFOS SITUADOS EN EL PUERTO DE BARCELONA

El programa presenta los resultados de la componente Z_0 expresados en milímetros. Esa es la precisión en la medida del nivel del mar en el mareógrafo BCN2, sin embargo en BCN3 la precisión de los datos brutos que se registran cada 10 segundos es de 1 centímetro según el fabricante y en el proceso de preparación de los datos para la aplicación T_TIDE se promedian a 5 minutos, es decir, 30 valores brutos del nivel del mar que se han expresado en milímetros considerándolo como el valor más probable del nivel del mar en ese periodo.

CONCLUSIONES

Como ha quedado demostrado, T_TIDE es una excelente ayuda para el procesado de datos mareográficos. Consigue identificar los componentes de marea astronómica, siendo el resto cambios asociados a situación meteorológica.

Es importante tener en cuenta la precisión de los datos para discriminar los componentes que tienen una amplitud significativa. En nuestro caso, tanto en BCN2 como en BCN3 la amplitud menor es de 7,3 milímetros, prácticamente el centímetro.

Tras la depuración de datos y errores, quedan identificados diversos componentes de la serie de datos, siendo el más importante el nivel medio del mar es cada uno de los dos mareógrafos (Z_0).

Según los resultados obtenidos el nivel medio de mar en BCN2 es de 0,344 metros y en BCN3 de 0,248 metros. La situación relativa del nivel medio del mar según lo observado en ambos mareógrafos se ha plasmado en la figura 4. Como el mareógrafo BCN2 tiene su cero referido al NMMA, se puede concluir en que el cero de referencia de BCN3 está situado 0,096 metros por encima del NMMA 1995. Este valor permitirá una mejor interpretación de las lecturas instantáneas que se registran en BCN3 y que sirven para diversas tareas de gestión del puerto.

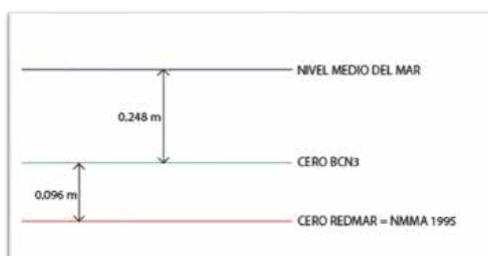


Figura 4 .Esquema en el que se representa la nivelación hidrostática entre BCN2 y BCN3.

Se debe resaltar la conveniencia de contar con series de datos mareográficos largas, mínimo un año (periodo de traslación de la Tierra alrededor del Sol), para poder llevar a cabo la nivelación hidrostática. La comparación directa entre observaciones y el posterior promedio no es recomendable y si se realiza debe ser con series anuales (un año o múltiplos del año) y asumiendo que es una muestra suficiente de situaciones que permite filtrar por compensación las diferentes anomalías meteorológicas que se suceden en las cuatro estaciones del año. Pruebas de comparación realizadas con periodos de tiempo menores arrojan valores distintos para el nivel medio del mar. Por ejemplo, una comparación entre BCN2 y BCN3 realizada con 8 meses dio un resultado 8 mm menor para el cero de BCN3.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a todo el equipo del Servicio de Topografía e Hidrografía del Puerto de Barcelona por su disponibilidad continua.

A Jordi Garrido Lirio, autor del Proyecto Fin de Grado en Ingeniería en Geomática y Topografía, titulado Análisis de armónicos de la marea astronómica en el Puerto de Barcelona, de la EPSEB (UPC) por su aportación.

Gracias a Juan José Martínez Benjamín, Director del proyecto TAPBIE (Técnicas de Teledetección in-situ, altimétricas Radar y óptica en las áreas de calibración de los puertos de Barcelona, Ibiza y Estartit) que dio lugar a otras contribuciones de las que derivan la que se presenta.



REFERENCIAS

Doodson, A. T., 1921. The Harmonic Development of the Tide-Generating Potential. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Vol. 100, No. 704 (Dec. 1, 1921), pp. 305-329.

Foreman, M. G. G., 1996. Manual for tidal currents analysis and prediction (revised edition). Pacific Marine Science Report, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney, British Columbia.

Garrido, J., Tapia, A., 2015. Análisis de armónicos de la marea con datos obtenidos por dos mareógrafos situados dentro del Puerto de Barcelona. Trabajo Final de Grado en Ingeniería en Geomática y Topografía, EPSEB, UPC.

Godin, G., 1988. Tides. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California, Mexico.

Grobas, M., 2003. Variaciones del Nivel del Mar en el Mediterráneo Occidental a partir de los Datos Suministrados por los Mareógrafos. Tesis de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, ETSECCPB, UPC.

Jalón, I., 2012. Fluyendo Libremente [en línea]. Disponible en: http://fluyendolibremente.wordpress.com/2013/01/11/analisis-de-armonicos-de-marea-astronomica-con-t_tide/.

López, R., 2012. Nivelación de la Estación GPS de la Torre de Control y del mareógrafo de la Autoridad Portuaria de Barcelona. TopCart 2012. Madrid España.

Ministerio de Fomento. Puertos del Estado. Área del Medio Físico, 2015. Conjunto de datos: REDMAR.

Ministerio de Fomento. Puertos del Estado. Área del Medio Físico. REDMAR: Informe Anual 2013.

Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S., 2002. Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB Using T_TIDE. Computers & Geosciences, 28: 929 – 937. Programa disponible en: http://www.eos.ubc.ca/~rich/t_tide/t_tide_v1.1.zip

SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine). REFMAR. Recommandations des bonnes pratiques pour les mesures du niveau de la mer. Disponible en: <http://refmar.shom.fr/fr/documentation/recommandations>

Tapia A. et al. 2013. Deformation monitoring of the Control Tower, Port of Barcelona (Spain). 2nd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM). Nottingham. Inglaterra.