



Estudio y evaluación, con fines geodésicos, de la serie temporal de datos mareográficos del Laboratorio de Geodinámica de Lanzarote

Study and evaluation, with geodetic purposes, of the tide gauge data in the Laboratory of Geodynamics of Lanzarote

Emilio Vélez⁽¹⁾, Ricardo Vieira⁽²⁾ y Angel Venedikov⁽³⁾

⁽¹⁾ Instituto de Astronomía y Geodesia (CSIC-UCM) Facultad de Matemáticas. Plaza de Ciencias, 3. 28040 Madrid. España. evelez@iag.csic.es

⁽²⁾ Instituto de Astronomía y Geodesia (CSIC-UCM) Facultad de Matemáticas. Plaza de Ciencias, 3. 28040 Madrid. España. ricardo_vieira@mat.ucm.es

⁽³⁾ Geophysical Institute. Bulgarian Academy of Sciences. Acad. G.Bonchev str., bl.3. Sofia 1000. Bulgaria. vened@geophys.bas.bg

SUMMARY

One of the main purposes in Geodesy is the determination of the sea level, because the Geoid is the reference surface, not only for the geodetic works, but also for practically all the related disciplines, and it's defined from the oceans mean level. Moreover, the continuous determination of the mean sea level, and its possible variations, is one of the best tools that allow to us to understand and evaluate the Global Change.

The Observation Module of the Jameos del Agua, in the Laboratory of Geodynamic of Lanzarote (LGL) is specially dedicated to the precise observation of the sea level variations and deformations, combining space techniques, as geodetic GPS, with tide gauges, deformation measurements, physical and chemical parameters of the sea water, and meteorological parameters. Its geodetic use now is, mainly, as reference and scale station in the determination of the local Geoid CANGEO. To obtain the absolute variations of the sea level in a global reference frame, to study the geodesical, geodynamical, meteorological and oceanographical perturbations presents in the sea level observations, to study the correlation between its relative variations and the vertical movements of the crust, and to compare the results with the measurements made with satellite, are, between others, some of the scientific goals planned. In this communication we present the study and evaluation of one serie of tidal gauge data using the VAV program for the time series analysis.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos fundamentales en Geodesia es la determinación del nivel del mar, ya que el Geoide, superficie de referencia, no solo para los trabajos geodésicos, sino para casi todas las disciplinas afines, se define a partir del nivel medio de los océanos. Además, la determinación continua del nivel medio del mar, y de sus posibles variaciones, es una de las herramientas que mejor nos ayudarán a entender y evaluar el Cambio Global.

El Módulo de Observación de los Jameos del Agua del Laboratorio de Geodinámica de Lanzarote (LGL) está especialmente dedicado a la observación precisa de las variaciones del nivel del mar y deformaciones, combinando técnicas espaciales, como GPS geodésico, con mareógrafos, medidas de deformación, medidas de las propiedades físico-químicas del agua del mar, y parámetros meteorológicos. Su utilización geodésica actual es, principalmente, como estación de referencia y de escala en la determinación del geoid local CANGEO (Sevilla, 2008). Obtener las variaciones absolutas del nivel del mar en un sistema de referencia global, estudiar las perturbaciones de carácter geodésico, geodinámico, meteorológico y oceanográfico que pudieran afectar a las observaciones del nivel del mar, estudiar la correlación entre sus variaciones relativas y los movimientos verticales de la corteza y comparar los resultados obtenidos con medidas de satélites altimétricos son, entre otros, algunos de los objetivos científicos planteados.

En esta comunicación presentamos la metodología empleada para el estudio y evaluación del nivel del mar a partir del análisis de una serie de datos mareográficos de siete años observada en uno de los lagos de los Jameos del Agua. Para el análisis de la serie hemos utilizado la versión oceanográfica del programa VAV (Venedikov et al., 2005, 2003)



Figura 1 – Localización de los Jameos del Agua. (Location of Jameos del Agua)

2. LOCALIZACIÓN

El Laboratorio de Geodinámica de Lanzarote es una instalación científica dependiente del Instituto de Astronomía y Geodesia (CSIC-UCM), consecuencia

de la colaboración establecida con el Cabildo de Lanzarote y que se ha desarrollado a partir de los diferentes proyectos de investigación, nacionales e internacionales, que se han realizado. Está principalmente dedicado a la aplicación de técnicas y métodos geodésicos en una zona de especial interés geodinámico como es Lanzarote. Su organización, estructura y las líneas de investigación establecidas nos permite considerar el Laboratorio como extendido a toda la isla, con tres módulos de observación permanente y diversas redes geodésicas de control (Vieira et al, 2006)

Los Jameos del Agua se localizan al norte de Lanzarote (figura 1), en el tramo final del túnel lávico del volcán La Corona. En el último kilómetro de recorrido en superficie del tubo, antes de introducirse definitivamente en el océano en lo que se conoce como túnel de Atlántida, este desciende varias veces por debajo del nivel del mar formándose pequeños lagos (Araña, 1997) Su singular emplazamiento y las condiciones presentes lo convierten en un lugar idóneo para realizar estudios en relación con la marea oceánica y el nivel del mar.

3. SITUACIÓN ACTUAL

Desde el año 1988 se están realizando observaciones de las variaciones del nivel del mar. Además de los objetivos antes indicados, estas observaciones resultan ser un complemento fundamental para los registros de deformación o variación de la gravedad que se realizan en los otros módulos del Laboratorio.

En la actualidad el módulo cuenta con tres puntos de observación permanente, dos situados en los dos últimos lagos formados en la intersección del túnel con

el océano, y el tercero frente a la costa de Jameos, en mar abierto, a unos 200 metros de la playa y 8 metros de profundidad. Dentro del proyecto de investigación "VULCMAC", de la convocatoria INTERREG IIIB, se mejoraron los sensores de medida con el fin de garantizar la calidad y precisión de las observaciones (Vélez et al., 2006) Para independizar las variaciones del nivel del mar con los movimientos verticales de la corteza y estudiar la estabilidad del lugar, tenemos una estación de referencia GPS permanente y una red de control geodésico local, compuesta por 13 puntos alrededor de la estación. La marca de referencia de los mareógrafos está enlazada con la señal GPS con nivelación de precisión.

4. ESTUDIO DE LAS VARIACIONES DEL NIVEL DEL MAR: METODOLOGÍA

Para el estudio del nivel medio del mar hemos aplicado a los datos mareográficos un modelo teniendo en cuenta los siguientes elementos:

- i. Señal de marea
- ii. Señales periódicas de origen meteorológico
- iii. Señal residual libre de señales periódicas

En el proceso de la determinación del nivel medio del mar primero vamos a eliminar, del registro observado, aquellas señales periódicas que son debidas a fenómenos conocidos, como la marea oceánica o componentes periódicas, principalmente, de origen meteorológico. El residual que finalmente obtenemos está libre de señales periódicas y representa las oscilaciones del nivel del medio mar en el punto de observación a lo largo del tiempo.

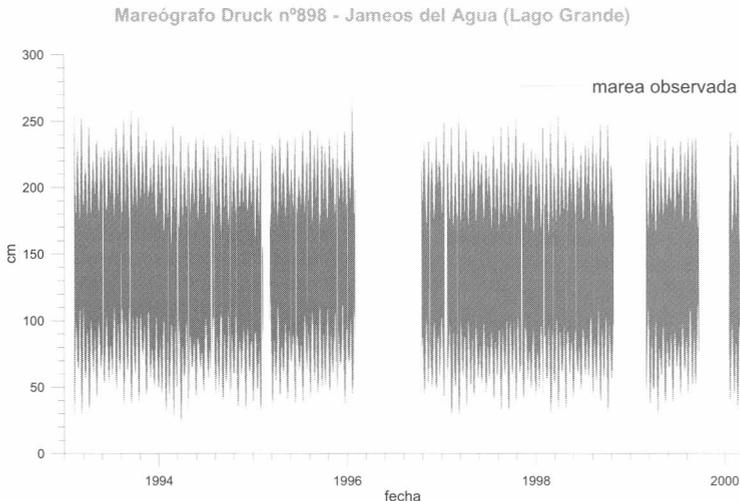


Figura 2 – Registro de marea observada (1993/02/08-2000/03/13)
(2589.292 días, 47408 datos, 76,29%)

Para este trabajo hemos seleccionado una serie de datos de un mareógrafo de presión DRUCK, modelo PDCR940, instalado en el Lago Grande de los Jameos del Agua (Lat: 29.1571, Lon: -13.4312) entre los años 1993 y 2000 (figura 2)

5. ANÁLISIS DE MAREA

Como se observa en la figura 2, la señal de marea prevalece en los datos originales, por lo que se hace necesario realizar una buena determinación de la señal de marea para, así, eliminarla de las observaciones. El modelo de marea oceánica se ha obtenido a partir del análisis de la señal observada con el programa VAV. Como resultado del análisis obtenemos la amplitud y fase de las ondas del modelo de marea.

Los pasos seguidos en el proceso de análisis han sido los siguientes:

1.- Eliminación automática de anomalías en los datos.

El programa VAV permite eliminar del análisis los datos anómalos a partir del residual (módulo) de los datos filtrados a las frecuencias $\Omega = 1, 2, \dots, 6$ cpd. Para cada frecuencia se establece como umbral el valor de 3σ , donde σ es el error medio cuadrático estimado para los residuales a la frecuencia Ω . Aquellos datos cuyo residual supere el umbral serán eliminados del análisis.

En la figura 2 vemos como en nuestro análisis, para las frecuencias $\Omega = 1$ y 2 cpd, a partir de la iteración 4, todos los residuales se mantienen por debajo del umbral establecido. Si observamos también el error obtenido en la determinación del factor de amplitud δ de las principales ondas Q1, K1, N2 y M2 (tabla 1) no hay mejora en su determinación a partir de la iteración 4.

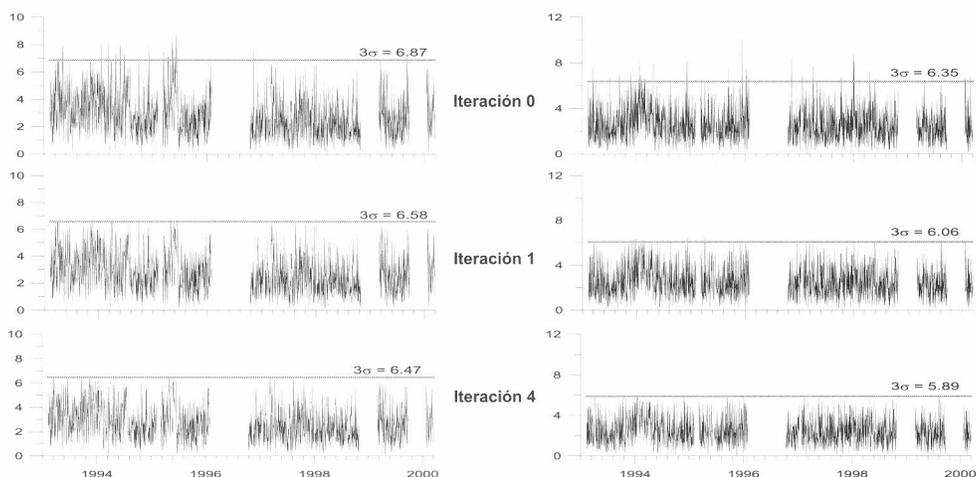


Figura 2- Residuales a 1 y 2 cpd
(Residuals at 1 & 2 cpd)

Tabla 1- Eliminación de datos en función de δ
(Elimination using the amplitud δ factor)

RUN_NR	Q1	K1	N2	M2
RUN_01	0.83224	0.44770	3.52448	3.26307
MSD	0.00990	0.00124	0.00424	0.00078
RUN_01/1	0.82504	0.44725	3.52461	3.26300
MSD	0.00960	0.00120	0.00413	0.00076
RUN_01/2	0.82406	0.44692	3.52437	3.26273
MSD	0.00951	0.00119	0.00411	0.00075
RUN_01/3	0.82228	0.44661	3.52469	3.26252
MSD	0.00945	0.00118	0.00411	0.00075
RUN_01/4	0.82166	0.44645	3.52426	3.26234
MSD	0.00944	0.00118	0.00410	0.00075
RUN_01/5	0.82098	0.44637	3.52386	3.26229
MSD	0.00944	0.00118	0.00410	0.00075
RUN_01/6	0.82209	0.44628	3.52311	3.26224
MSD	0.00944	0.00118	0.00409	0.00075

2.- Selección del modelo.



El segundo paso en el análisis consiste en la elección del modelo que mejor se ajusta a los datos observados. El programa nos permite variar el grupo de ondas seleccionado para el análisis, el tamaño de la ventana de aplicación de los filtros y el polinomio de deriva considerado. En nuestro caso hemos probado con diferentes modelos y hemos impuesto como criterio de selección del modelo óptimo aquel que nos determine con mayor precisión, menor error medio cuadrático, el factor de amplitud de las principales ondas. Hemos seleccionado este criterio frente a otros ya que nuestro interés es obtener el mejor modelo de marea posible. Bajo estas condiciones, seleccionamos el uso de la variante con una separación de 50 ondas

diurnas y semidiurnas, tamaño de la ventana de 48 h y grado del polinomio de deriva 1.

3.- *Análisis multicanal.*

El programa VAV permite, en paralelo, determinar el coeficiente de regresión de la señal de marea con respecto al efecto de la presión atmosférica. En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos por frecuencias en ciclos por día. Realizando un ajuste para toda la banda de frecuencia obtenemos un coeficiente de -0.908 cm/mbar, próximo al valor teórico estándar de -1 cm/mbar. Una vez eliminada la marea del registro, en la figura 3 vemos cual es el efecto de la presión atmosférica sobre la señal residual. Esta curva residual representa el nivel medio del océano a lo largo del periodo observado.

Tabla 2- Efecto de la presión sobre la marea oceánica.
(Effect of the atmospheric pressure on the ocean tides)

Freq(cpd)	B (cm/mbar)	B_inf	B_sup
1	-0.803	-0.834	-0.771
2	-0.785	-0.855	-0.715
3	-0.820	-0.855	-0.785
4	-0.708	-0.797	-0.620
5	-0.775	-0.812	-0.738

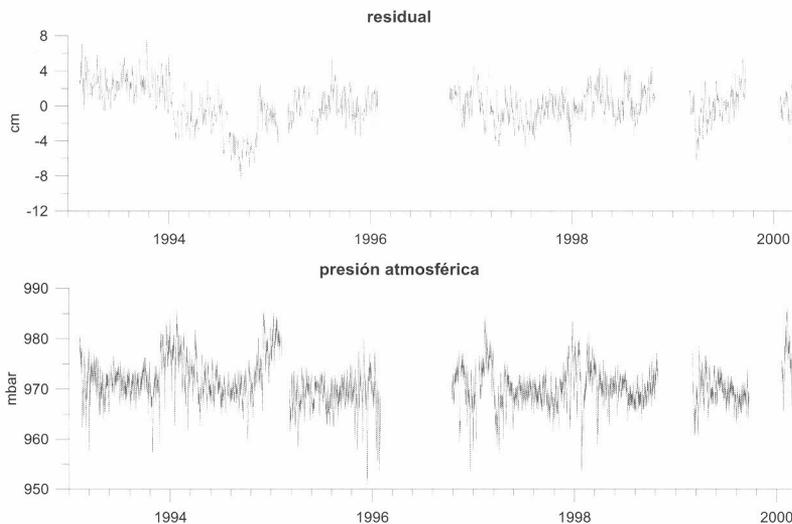


Figura 3- Registro del residual de marea y la presión atmosférica
(Residuals at 2 cpd)

El resultado del análisis de marea, determinación de la amplitud y fase, para las principales ondas diurnas y semidiurnas se muestra en la tabla 3.

6. ESTUDIO DEL NIVEL MEDIO DEL MAR Y SUS VARIACIONES

Para el estudio del nivel medio del mar partimos de la señal residual obtenida a partir de la eliminación de la señal observada del modelo de marea obtenido. Esta señal $Y(t)$, libre de marea, la aproximamos por:

$$Y(t) = C(t) + P_k(t) + \epsilon$$

donde $C(t)$ es una componente periódica, principalmente de origen meteorológico, $P_k(t)$ es un polinomio de grado k carente de componentes periódicas y ϵ es ruido (Ducarme et al, 2007) Este modelo, aplicado para los puntos de observación $T=t_1, t_2, \dots, t_N$, se puede tratar como un sistema de N ecuaciones por el método de mínimos cuadrados.



Tabla 3– Resultado del análisis
(Result of the tidal analysis)

Onda	Amplitud (cm)	emc	Fase (°)	emc
Q ₁	1.3493	0.0155	262.016	0.658
O ₁	4.2226	0.0151	313.747	0.205
K ₁	5.3849	0.0143	57.942	0.152
P ₁	1.5398	0.0130	51.802	0.484
M ₂	60.8641	0.0140	59.523	0.013
S ₂	21.6106	0.0211	83.104	0.040
N ₂	12.5887	0.0146	45.406	0.067
K ₂	6.1147	0.0186	80.958	0.174

La componente periódica $C(t)$ es la suma de una serie de ondas armónicas con amplitud y fase desconocida. En nuestro caso hemos fijado la frecuencia de estas ondas $\omega = 1, 2, 3$ y 4 cpy (cpy = ciclos por año de 365.25 días), principales componentes de origen meteorológico. Una vez eliminado de la señal $Y(t)$ la componente periódica, la señal que nos queda será una buena aproximación del nivel medio del mar libre de señales periódicas. Si

aproximamos por un polinomio de grado k , $P_k(T)=b_0+b_1T+b_2T^2+\dots+b_kT^k$, para el caso de $k = 0$, el término b_0 del polinomio representa el nivel medio del mar constante durante el periodo estudiado.

En este trabajo hemos aplicado diferentes supuestos para el estudio del nivel medio del mar. En primer lugar hemos obtenido el término b_0 suponiendo $k=0$ para todo el periodo considerado (fig. 4) En segundo lugar hemos ido suponiendo $k=0$ por periodos, que vienen determinados por las interrupciones que tenemos en la serie de datos (fig. 5) La primera conclusión que obtenemos es que resulta difícil suponer un concepto de estabilidad del nivel medio del mar a lo largo del tiempo, teniendo una gran dependencia del origen de tiempo que estemos considerando o de la elección del cero de la instrumentación.

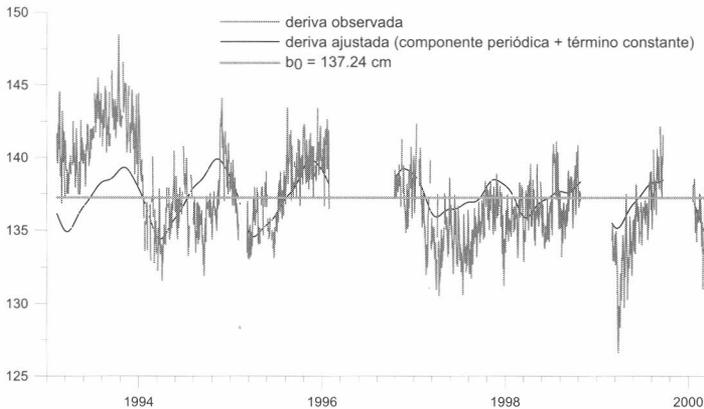


Figura 4– Aproximación del nivel medio del mar por una constante
(Approximation of the mean sea level for a constant)

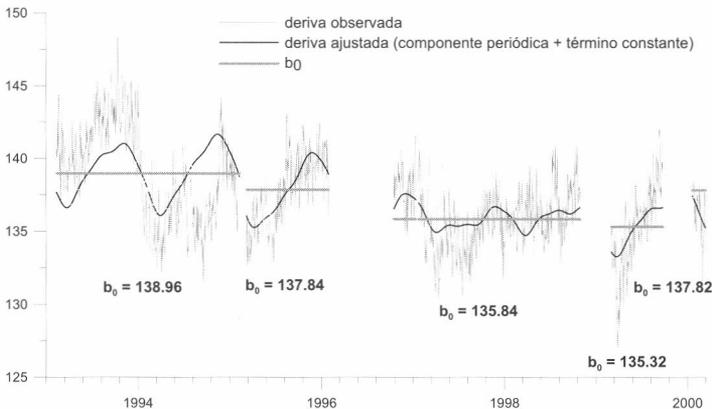


Figura 5– Aproximación del nivel medio del mar, analizando por segmentos, por una constante
(Approximation of the mean sea level, by segments, for a constant)



Para el caso de suponer $k=1$, $P_1(T) = b_0 + b_1T$, el coeficiente b_1 representa una estimación de la velocidad de variación del nivel medio del mar a lo largo del tiempo. Hemos aplicado este supuesto también por periodos, obteniendo diferentes valores de b_1 para cada periodo, que están representados en la figura 6. En este caso, también la discontinuidad de la

serie resulta ser un grave inconveniente. Además, la variación del término b_1 a lo largo de todo el periodo estudiado, podría deberse a alguna componente periódica de más largo periodo que no ha sido tenida en cuenta, y por tanto, no ha sido eliminada de la señal.

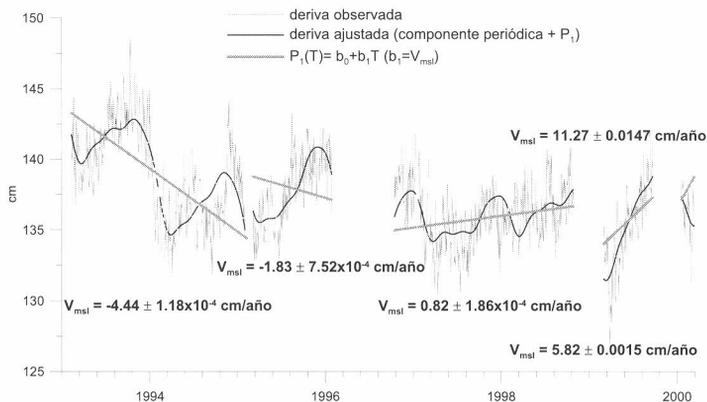


Figura 6 – Velocidad de la variación del nivel medio del mar analizando por segmentos. (Velocity of the mean sea level by segments)

7. CONCLUSIONES

La primera consideración que queremos hacer es que creemos que el módulo de observación de los Jameos del Agua, del Laboratorio de Geodinámica de Lanzarote, es un excelente lugar para el estudio del nivel del mar y sus variaciones.

A partir de este trabajo podemos concluir:

- Es importante poder determinar, con la mayor precisión posible, el modelo de marea oceánica.
- El programa VAV ofrece muchas posibilidades para el estudio de series mareográficas (predicción de señal, determinación del nivel medio y sus variaciones, estudios de aguas someras, búsqueda de nuevas ondas,...)
- La determinación del nivel medio tiene una gran dependencia del origen de tiempo considerado y de la continuidad de la señal.
- En el caso concreto de la serie utilizada, resulta necesario determinar las posibles anomalías presentes (interrupciones, posibles cambios en el cero de referencia del mareógrafo,...) para poder obtener un nivel medio local y estudiar su variación temporal.

A partir de este trabajo nos planteamos, como acciones de futuro, tratar de enlazar esta serie con la serie de observación obtenida en los últimos años con los nuevos sensores, comparar los resultados obtenidos con otras técnicas, como por ejemplo la altimetría de satélite, y realizar estudios similares con series de otros mareógrafos en Canarias, para poder observar si se confirma algún tipo de tendencia global.

8. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos 03/MAC/2.3/A4 de la convocatoria INTERREG IIIB, por el proyecto CGL2007-65110 de la convocatoria de Proyectos Nacionales I+D 2007 y el proyecto conjunto Hispano-Búlgaro 2007BG0012.

Lamentablemente, durante la realización de este trabajo, falleció el Prof. Dr. Angel Venedikov (1936 – 2007) Los autores queremos expresar nuestro pesar y reconocimiento a la figura, tanto personal como profesional, del Dr. Venedikov (DEP)

9. REFERENCIAS

- Araña, V. (1997): "LANZAROTE: Guía". Serie Casa de los Volcanes, 6, 128 pp.
- Ducarme, B., Venedikov, A., Vieira, R. (2007): "Study of the mean sea level and its time variations". *XXIV General Assembly of IUGG*. Perugia (Italia)
- Sevilla, M. J., Catalao, J., Quirós, R. (2008): "CANGEO_2007. Nuevo Geode gravimétrico de Canarias". *6ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. Tomar (Portugal)
- Vélez, E., Vieira, R. (2006): "Nuevos resultados en las observaciones del nivel del mar en el Laboratorio de Geodinámica de Lanzarote". *5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. Sevilla (España)
- Venedikov, A., Arnos, J. Vieira, R. (2003): "VAV: A program for tidal data processing". *Computer and Geosciences*, 29, 487-502.
- Venedikov, A., Arnos, J. Vieira, R. (2005): "New version of the program VAV for tidal data processing". *Computer and Geosciences*, 31, 5, 667-669.
- Vieira, R., Vélez, E. (2006): "Guía del Laboratorio de Geodinámica de Lanzarote". *Publicaciones del Instituto de Astronomía y Geodesia*, 201, 60 pp.