

Estudio comparativo del vapor de agua en columna en varias estaciones de la Península Ibérica usando diferentes técnicas

J. P. Ortiz de Galisteo^{1,2}, Y.S. Bennouna¹, V. E. Cachorro¹, C. Toledano¹, A. Berjón¹, D. Fuertes¹, R. Gonzalez¹, B. Torres¹, J.L. Marcos³, L. Martín¹ y A. M. de Frutos¹

¹ Grupo de Óptica Atmosférica (GOA), Universidad de Valladolid, Prado de la Magdalena s/n, 47071 Valladolid (Castilla y León, España). Tel: 983-423-608, Fax: 983-423-013, E-mail: jportiz@goa.uva.es.

² Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Delegación Territorial de Castilla y León, C/ Orión 1, 47014 Valladolid (Castilla y León, España).

³ Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Universidad de Valladolid (Palencia), Av. De Madrid 57, 34007 Palencia (Castilla y León, España).

RESUMEN

Este estudio presenta una caracterización del contenido en columna de vapor de agua o agua precipitable (PWV) en 18 localizaciones de la Península Ibérica con 7 años de datos, obtenidos de sondeos, receptores GPS, y fotómetros solares. El PWV medio ha sido de 18.06 ± 2.62 mm. En general, el PWV es mayor en las costas, especialmente en la mediterránea, que en el interior. El PWV presenta un claro ciclo anual, con un mínimo en invierno, y un máximo hacia el final del verano. La amplitud media del ciclo es de 13.2 mm, y la razón entre el valor mensual máximo del verano y el mínimo del invierno es aproximadamente 2 en todos los emplazamientos. Las mayores amplitudes del ciclo se registran en la costa mediterránea y los más bajos en el interior. El ciclo anual del PWV sigue al de la temperatura, excepto por el mínimo relativo de PWV que tiene lugar en julio en los emplazamientos del suroeste.

Palabras clave: vapor de agua, agua precipitable, ciclo anual, GPS, fotómetros solares, sondeos.

ABSTRACT

This study reports a characterization of column integrated water vapor content or precipitable water vapor (PWV) at 18 sites over the Iberian Peninsula with 7-year data from GPS receivers, soundings, and sun photometers. The average PWV obtained was 18.06 ± 2.62 mm. In general, the PWV is higher at the stations on the coast, especially on the Mediterranean coast, than at the inland stations. The PWV presents a clear annual cycle, with a minimum in winter and a maximum at the end of the summer. The mean amplitude of the cycle is 13.2 mm, and the ratio between the maximum and minimum values of the monthly averages is approximately 2 at all sites. The largest amplitudes are registered on the Mediterranean coastal sites and the lowest ones at inland sites. The annual cycle of PWV follows the one of the temperature, except for a relative minimum of PWV in July at the southwestern sites.

Keywords: water vapor, precipitable water vapor, annual cycle, GPS, sun photometers, soundings.

INTRODUCCIÓN

El agua precipitable (PWV) se define como la altura que tendría la capa de agua si todo el vapor de agua contenido en una columna atmosférica de área unidad se condensase sobre la superficie. El PWV juega un papel crucial en muchos procesos atmosféricos, tales como el transporte meridional de energía, el efecto invernadero, el balance radiativo, etc.

Históricamente los Servicios Meteorológicos

han utilizado los sondeos aerológicos para medir el vapor de agua. Estas medidas, si bien proporcionan un perfil vertical de la distribución de este componente, son escasas por su alto coste. Datos adicionales son deseables para tener una adecuada cobertura. El sistema GPS (*Global Position System*), diseñado para fines de posicionamiento, se ha revelado como una técnica muy útil para la determinación del PWV.

Aunque hay estudios en la literatura sobre el PWV, ninguno de ellos está centrado en la

Península Ibérica. Es por ello, que el objeto del presente estudio será el análisis y la caracterización del PWV sobre la Península Ibérica a partir de las medidas proporcionadas por receptores GPS, radiosondeos y fotómetros solares. Estas son las tres técnicas con un mayor número de estaciones en la Península.

METODOLOGÍA Y DATOS

En el caso de las radiosondas una serie de sensores, embarcados en un globo relleno de helio, van tomando medidas *in situ* a distintas altitudes de la atmósfera conforme el globo asciende. El PWV se obtiene por integración de la humedad absoluta a lo largo de la trayectoria seguida por el globo.

La determinación del PWV con fotómetros solares se basa en la medida de la transmitancia de la atmósfera mediante la comparación entre la irradiancia solar directa en el exterior de la atmósfera y la medida en la superficie terrestre en un canal de fuerte absorción del vapor de agua (Cachorro et al., 1998).



Figura 1: Mapa de estaciones.

La determinación del PWV con el sistema GPS se basa en el retraso que experimenta la señal de estos satélites al atravesar la atmósfera (Bevis et al., 1992). El retraso total (ZTD) se puede descomponer en: retraso hidrostático (ZHD) y húmedo (ZWD) (Saastamoinen 1972). El ZHD se puede obtener de la presión en superficie, y el ZWD se puede transformar en PWV conociendo el dato de la temperatura al nivel de la superficie. Estos equipos pueden medir de día y de noche y en todas las condiciones de tiempo atmosférico.

Se han utilizado 7 años de datos, desde el año 2002 a 2008 ambos inclusive. Los datos de los sondeos se han descargado de la página Web de la Universidad de Wyoming. Las medidas de los

fotómetros se han obtenidos de la página Web de AERONET (*Aerosol Robotic Network*). Se han seleccionado los datos procesados con la Versión 2 y con el nivel de calidad 1.5. Para los receptores GPS se han utilizado los datos de ZTD de las estaciones de EUREF (*European Reference Frame*) generados por el IGN (Instituto Geográfico Nacional).

RESULTADOS

La media anual del PWV varía de 12 a 17 mm en las estaciones del interior, y de 17 a 21 mm en las de la costa, siendo el PWV medio de 18.06 ± 2.62 mm. El PWV presenta un ciclo anual, con un mínimo en invierno, incrementando durante la primavera hasta alcanzar el valor máximo hacia finales del verano, y disminuyendo durante el otoño, de una manera más pronunciada que el ascenso de la primavera (Figura 2). En las estaciones ubicadas hacia el norte, el mínimo valor del PWV se registra en febrero, mientras que en el resto lo hace en enero. Por su parte, el máximo de PWV se registra principalmente en el mes de agosto, retrasándose a septiembre para las estaciones más al sur. Solamente se observa un comportamiento singular en las estaciones del cuadrante suroeste, que consiste en la presencia de un mínimo relativo en el mes de julio.

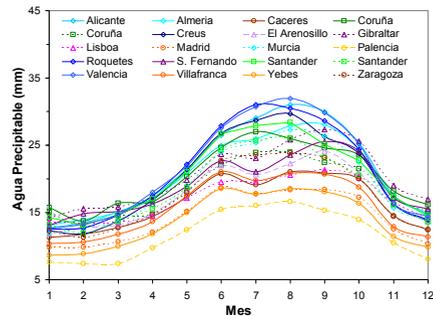


Figura 2: Ciclo anual del PWV.

Los valores máximos del ciclo oscilan entre los 16.6 y 32 mm, registrándose los más bajos en las estaciones del interior, y siendo normalmente más bajos cuanto mayor es la altitud de la estación, mientras que los más altos se dan en las estaciones costeras, y especialmente en las de la costa mediterránea, destacando los 32 mm de Valencia, y los 31 mm de Roquetes y Alicante. Respecto a los valores mínimos, estos oscilan entre los 7.4 y los 14.3 mm. Los más bajos aparecen en el interior peninsular, en las mismas

estaciones que registraban los máximos más bajos, destacando Palencia con 7.4 mm. Sin embargo, los mínimos más altos no se registran en la costa mediterránea, sino en la costa atlántica y en el área del estrecho, destacando Gibraltar con 14.2 mm. Los valores máximos del verano son del orden del doble de los mínimos del invierno. La razón entre ambos valores varía entre 1.9 y 2.5, excepto en Lisboa donde es 1.6.

La amplitud del ciclo anual, diferencia entre el valor mensual máximo y mínimo, es máxima para las estaciones mediterráneas, con valores en torno a los 18-19 mm, y es mínima en las del interior, con valores entre los 8 y 10 mm, aunque el menor valor se da en Lisboa con 7.9 mm.

La zona mediterránea se caracteriza por un ciclo anual con un elevado valor medio del PWV y un amplio rango de variación. En la zona interior se dan los valores más bajos tanto del valor medio como de la amplitud, sin embargo la razón entre el máximo y mínimo es ligeramente superior a la de la zona cantábrica o atlántica. Por su parte, en las zonas cantábrica y atlántica la media y la amplitud del ciclo toman valores intermedios entre los de las otras dos zonas, pero mientras que el mínimo toma un valor similar en ambas, el máximo y la amplitud es mayor en la cantábrica que en la atlántica.

Gaffen et al. (1992) clasificaron los ciclos del PWV para todo el globo en cinco tipos: continental de latitudes medias y altas, oceánico de latitudes medias y altas, monzón de latitudes medias, tropical oceánico, y monzón tropical. El régimen continental se caracteriza por un pronunciado ciclo anual con un máximo al final del verano de 3 a 10 veces mayor del mínimo del invierno, y un bajo valor medio entre 2 y 15 mm. Mientras que el régimen oceánico se caracteriza por un ciclo anual menos pronunciado con un máximo en verano en fase con la temperatura, una razón entre máximo y mínimo de 1.5 a 3, y un valor medio entre 5 y 20 mm. Los resultados obtenidos en este estudio, indican que el régimen predominante sobre la Península es el oceánico de latitudes medias y altas.

Con la excepción del mínimo relativo del mes de julio, el ciclo anual del PWV se ajusta bastante bien al de la temperatura (Figura 3). Solamente se observa un pequeño desfase en el valor máximo, alcanzándose el del PWV con posterioridad al de la temperatura. Este desfase es más patente en las estaciones de la costa mediterránea, mientras la temperatura media mensual suele alcanzar su

valor máximo en el mes de julio, el PWV lo hace en el mes de agosto.

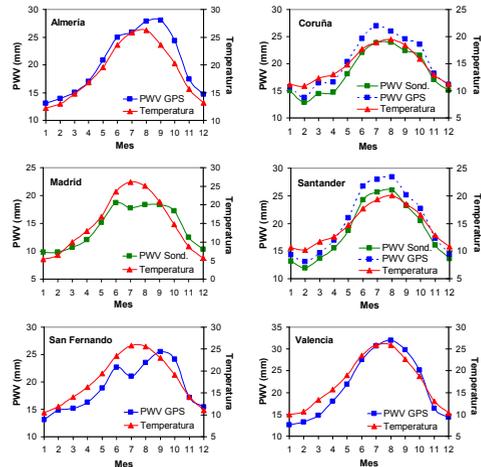


Figura 3: Ciclo anual del PWV y de la temperatura para algunos emplazamientos.

En término medio cuanto mayor es la temperatura mayor es el PWV. Pero esto es sólo cierto para cada emplazamiento de forma individual, cuando comparamos distintos emplazamientos entran en juego las características geográficas de las ubicaciones, que juegan un papel determinante. En el interior peninsular los valores medios de la temperatura máxima son similares a los de la costa mediterránea, pero mayores que los de las costas cantábrica y atlántica, sin embargo el PWV máximo es el más bajo de todos. Es decir, en las estaciones del interior por mucho que en verano aumente la temperatura el PWV no aumenta en la misma proporción. Por el contrario, los valores mínimos si están correlacionados, mientras menor es la temperatura menor es el PWV.

Tampoco la amplitud del ciclo del PWV guarda una proporcionalidad directa con el de la temperatura, sino que depende del carácter continental o marítimo de la estación y de la latitud. La variación de temperatura entre el invierno y el verano es máxima para las estaciones del centro peninsular, pero la del PWV es mínima, mientras que en las estaciones costeras ocurre a la inversa.

El ciclo anual de la anomalía del PWV (diferencia respecto del PWV anual medio) se descompuso en armónicos simples. Así, el PWV del mes m vendría dado por la expresión:

$$PWV(m) = PWV_0 + \sum_{n=1}^4 S_n(m) + R \quad (1)$$

siendo S_n ,

$$S_n(m) = A_n \cdot \sin(n \cdot m + \sigma_n) \quad (2)$$

donde PWV_0 es el valor medio anual, R el residuo, S_n , $n=1,2,3,4$ denota los armónicos de periodo 12, 6, 4 y 3 meses respectivamente, A_n la amplitud, y σ_n el desfase.

El primer armónico (periodo 12 meses) es el dominante en todas las estaciones, con una amplitud media de 6.63 mm y un desfase de ocho meses (máximo valor respecto del origen). Este armónico explica en término medio el 96% de la varianza, mientras que los otros tres armónicos explican menos del 1%. Sólo en alguna estación en particular alguno de ellos es significativo, siendo especialmente relevante la varianza explicada (4 a 5%) por el segundo armónico (periodo 6 meses) en las estaciones próximas al estrecho de Gibraltar.

La comparación del ciclo anual en las ubicaciones en las que existen estaciones con dos técnicas de medida (Figura 4) muestra como la forma del ciclo anual obtenido con distintas técnicas es muy similar, con unos coeficientes de correlación altísimos, mayores de 0.99. Aunque la correlación es alta aparece un desplazamiento vertical entre ambos ciclos, con unas *bias* entre 1.5 y 2 mm. Los receptores GPS sobrevaloran siempre el PWV respecto de los sondeos, en torno a un 10%.

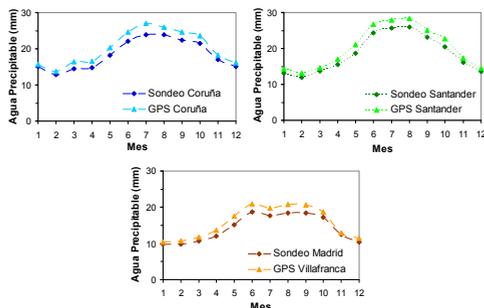


Figura 4: Comparativa del ciclo anual del PWV con distintas técnicas.

CONCLUSIONES

Este estudio presenta la primera caracterización del PWV sobre la península Ibérica, a partir de siete años de datos de sondeos, fotómetros y

receptores GPS en dieciocho emplazamientos. El PWV medio fue de 18.06 ± 2.62 mm. Las estaciones situadas en el interior registran los valores más bajos y las de la costa los más altos. El PWV presenta un claro ciclo anual, con los menores valores en invierno y los mayores en verano, siendo estos el doble que los del invierno. La costa mediterránea se caracteriza por tener la mayor amplitud del ciclo anual del PWV. El ciclo anual del PWV sigue aproximadamente al de la temperatura, excepto por un ligero desfase en la hora del máximo en la costa mediterránea y un mínimo relativo de PWV en julio en el suroeste. El análisis de armónicos muestra que el primer armónico de periodo 12 meses explica el 96 % de la varianza, mientras que los tres siguientes explican menos del 1 %.

BIBLIOGRAFÍA

BEVIS, M. et al., 1992. *GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor using the Global Positioning System*. J. Geophys. R., 97, 15787-15801.

CACHORRO, V.E., UTRILLAS, P., VERGAZ, R., DURAN, P., DE FRUTOS, A.M., y MARTINEZ-LOZANO, J.A., 1998. *Determination of the atmospheric-water-vapor content in the 940-nm absorption band by use of moderate spectral-resolution measurements of direct solar irradiance*. Applied Optics, 37(21), 4678-4689.

GAFFEN, D.J., ROBOCK, A., and ELLIOT, W.P., 1992. *Annual cycle of tropospheric water vapor*. J. Geophysical R., vol. 97, pag. 18185-18193.

SAASTAMOINEN, J., 1972. *Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, in The Use of Artificial Satellites for Geodesy*. Geophys. Monogr. Ser., vol. 15, edited by S. W. Henriksen, et al., pp. 247-251, AGU, Washington, D.C.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación al MICIIN de los proyectos de referencias CGL2008-05939-CO3-01/CLI and CGL 2009-09740 y a la acción complementaria CGL2010-09480-E. También se agradece al ITACyL para la financiación del proyecto EVACyL.