

El vapor de agua integrado obtenido mediante instrumentos satelitales: evaluación con medidas de GPS en la Península Ibérica

Vaquero-Martínez, J.^(1,2), Antón, M.^(1,2), Ortiz de Galisteo, J.P.^(3,4), Cachorro, V.E.⁽⁴⁾, Álvarez-Zapatero, P.⁽⁴⁾, Román, R.⁽⁴⁾, Loyola, D.⁽⁵⁾, Costa, M.J.⁽⁶⁾, Wang, H.⁽⁷⁾, González-Abad, G.⁽⁷⁾, Noël, S.⁽⁸⁾, Montero-Martín, J.^(1,2)

⁽¹⁾ Departamento de Física, Universidad de Extremadura, Badajoz, España. javier_vm@unex.es

⁽²⁾ Instituto Universitario de Investigación del Agua, Cambio Climático y Sostenibilidad (IACYS), Universidad de Extremadura, Badajoz, España.

⁽³⁾ Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Valladolid, España.

⁽⁴⁾ Grupo de Óptica Atmosférica, Universidad de Valladolid, Valladolid, España.

⁽⁵⁾ German Aerospace Center (DLR), Oberpfaffenhofen, Alemania.

⁽⁶⁾ Departamento de Física, Universidade de Évora, Évora, Portugal.

⁽⁷⁾ Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos.

⁽⁸⁾ Institute of Environmental Physics, University of Bremen, Bremen, Alemania.

Resumen: Este trabajo se centra en comparar los productos de vapor de agua integrado (IWV) de varios satélites respecto a un conjunto de datos en tierra obtenidos de GPS en nueve estaciones de la Península Ibérica. Los instrumentos satelitales son: *Global Ozone Monitoring Instrument (GOME-2)*, *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)*, *Ozone Monitoring Instrument (OMI)*, *Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager (SEVIRI)*, *Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)*, y *Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography (SCIAMACHY)*. Los productos de estos satélites muestran una buena correlación con respecto al producto de GPS ($R^2 \sim 0.7$). Todos los satélites muestran cierta tendencia a sobrestimar los valores bajos de vapor de agua y a subestimar los altos. Además, la precisión, medida mediante el rango intercuartílico (IQR) también disminuye rápidamente al aumentar el IWV. Por otro lado, otro factor importante es el ángulo solar zenital (SZA) que influye en el rendimiento de los instrumentos satelitales, especialmente aquellos que dependen de la radiación solar. Al aumentar el SZA acercándose a 90° , los instrumentos pierden rendimiento aumentando la sobrestimación y el IQR. Sin embargo, a valores de SZA mayores de 90° (esto es, la noche) los índices calculados no tienen grandes dependencias con el SZA.

Palabras clave: vapor de agua integrado, comparativa, GPS, Península Ibérica.

Integrated water vapor obtained by satellite-borne instruments: evaluation with GPS measurements in the Iberian Peninsula

Abstract: This work focuses in the comparison of several integrated water vapor (IWV) from several satellites with respect to a dataset from ground-based GPS IWV, in nine stations at the Iberian Peninsula. The satellite instruments are *Global Ozone Monitoring Instrument (GOME-2)*, *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)*, *Ozone Monitoring Instrument (OMI)*, *Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager (SEVIRI)*, *Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)*, and *Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography (SCIAMACHY)*. The products of this instruments show a fair correlation with respect to GPS product ($R^2 \sim 0.7$). All satellites show a certain tendency to overestimation of low IWV values, while underestimating large IWV values. Moreover, the precision is studied using the inter-quartile range (IQR), which also decreases quickly when IWV increases. Another important factor is the solar zenith angle (SZA), which affects the performance of satellite instruments, especially those that are dependent on solar radiation. When SZA increases, going closer to 90° , the instruments had worse performance, increasing overestimation and IQR. Nevertheless, for SZA larger than 90° (that is to say, the night), the indexes do not show large dependencies on SZA.

Keywords: integrated water vapor, comparison, GPS, Iberian Peninsula.

1. INTRODUCCIÓN

El vapor de agua es bien conocido como el gas invernadero más potente. Su presencia es fundamental en el sistema climático, en el que ejerce, según los modelos de circulación general (Colman, 2003), un efecto de retroalimentación positiva.

Es por tanto necesario disponer de datos de calidad de vapor de agua. Sin embargo, monitorear el vapor de agua es complicado, debido a su altísima variabilidad tanto espacial como temporal. También es un problema obtener

medidas bajo un gran abanico de condiciones atmosféricas distintas.

El vapor de agua habitualmente se mide como vapor de agua integrado (IWV), que corresponde al equivalente de condensar todo el vapor en la columna atmosférica y medir la altura que tomaría en un recipiente de sección unidad. Así, puede medirse como longitud (milímetros).

Existen numerosas técnicas para la medida de vapor de agua, tanto desde tierra como desde el espacio. Entre las técnicas terrestres tenemos los radiómetros de microondas, los fotómetros (solares, lunares o estelares),

Lidar, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y el radio-sondeo. Las medidas desde el espacio se llevan a cabo mediante técnicas de teledetección utilizando datos de instrumentos montados sobre plataformas satelitales. Estos instrumentos pueden recoger información de varias zonas del espectro electromagnético, ya sean las microondas, el visible (VIS), el infrarrojo cercano (NIR), o el infrarrojo (IR).

El GPS ha demostrado ser una técnica fiable, comparada con el radiosondeo. Además, su resolución temporal mejora enormemente la de este último, llegando a tener datos horarios cuando en el caso del radiosondeo lo habitual es tener una o dos medidas diarias.

Sin embargo, las redes de estaciones de GPS no son los suficientemente densas ni están bien distribuidas para ciertas aplicaciones. Por ello es necesario el uso de datos satelitales, ya que estos cubren todo el planeta.

Este trabajo consiste en una evaluación detallada de varios satélites con respecto a GPS en el contexto de la Península Ibérica. Para ello se han tomado 9 estaciones en el periodo 2007 a 2015. Los instrumentos satelitales que se han estudiado son: *Global Ozone Monitoring Instrument (GOME-2)*, *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)*, *Ozone Monitoring Instrument (OMI)*, *Spining Enhanced Visible and InfraRed Imager (SEVIRI)*, *Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)*, y *Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography (SCIAMACHY)*. El objetivo principal del trabajo es analizar las diferencias y similitudes de los distintos satélites para mejorar la comprensión de la calidad de las medidas satelitales de IWV.

2. DATOS

2.1. Estaciones GPS

El método de obtención del IWV a través de estaciones GPS se encuentra detallado en (Bevis *et al.*, 1992). Para llevar a cabo este método, es necesario el retraso troposférico que sufre la señal GPS, que se obtuvo del Instituto Geográfico Nacional, que es un centro local de análisis del Marco Europeo de Referencia (EUREF). Además, son necesarias la temperatura y presión en superficie, obtenidas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Las nueve estaciones de GPS utilizadas se muestran en la Figura 1. El periodo en el que se realiza la comparativa se extiende desde 2007 hasta 2015.

2.2. Instrumentos satelitales y sus productos

Los instrumentos satelitales que se consideran en este trabajo son: GOME-2, MODIS Aqua y Terra, OMI, SEVIRI, SCIAMACHY y AIRS.

GOME-2 es un espectrómetro de mediana resolución, de UV-VIS-NIR. Aunque su producto principal se centra en el ozono, también se obtienen de él otros gases traza de la atmósfera, entre ellos el vapor de agua. Su método de obtención del vapor de agua se basa en la técnica *Differential Optical Absorption Spectrography (DOAS)*, utilizando bandas del visible. El algoritmo se describe de forma detallada en (Wagner *et al.*, 2006, 2003).

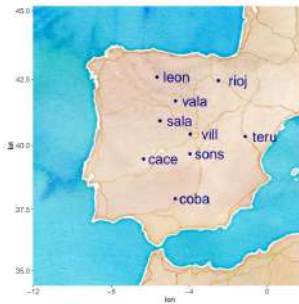


Figura 1. Estaciones GPS del interior de la península.

MODIS se encuentra a bordo de los satélites Terra y Aqua. Estos satélites pasan por cada punto de la Tierra entre una y dos veces al día. Para el producto de vapor de agua se utilizan bandas del NIR para las medidas de día y del IR para las de noche (Chang *et al.*, 2015; Gao y Kaufman, 1992). El producto concreto utilizado es el MOD05_L2 y el MYD05_L2, Colección 6.

OMI (Levelt *et al.*, 2006) es un instrumento a bordo de la plataforma Aura de la NASA. Aura es un satélite que circula por una órbita polar sincronizada con el sol, de modo que todas las medidas se producen a las 13:30 hora local. Este trabajo utiliza el producto desarrollado por el Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO), el producto OMH2O de nivel 2, presentado en (Wang *et al.*, 2014). Este producto utiliza bandas del visible.

SEVIRI es un espectrorradiómetro que cuenta con 7 bandas en el espectro IR. El algoritmo para obtener el IWV pasa por obtener el perfil de temperatura y humedad de la temperatura de brillo en el infrarrojo, y utiliza una técnica de inversión. Este algoritmo no permite la presencia de nubes, por lo que se utiliza una *quality flag* que indica la calidad del dato. El satélite sobre el que está montado SEVIRI es Meteosat, que es estacionario, de modo que la resolución temporal es grande. La resolución de SEVIRI para el IWV es de unos 0,58 mm.

SCIAMACHY (Bovensmann *et al.*, 1999) es un instrumento a bordo del satélite Envisat. Estuvo operativo entre marzo de 2002 y abril de 2012. Por tanto nuestro periodo de estudio abarca desde 2007 hasta 2012 para este instrumento. Envisat sobrepasaba el ecuador a las 10:00 hora local cada día, en una órbita polar en sincronía con el sol. El algoritmo de obtención del IWV se basa en la técnica *Air Mass Corrected Differential Absorption Spectroscopy (AMC-DOAS)*, Noël *et al.*, 2004).

AIRS se encuentra a bordo de la sonda Aqua y es un espectrómetro infrarrojo de alta resolución espectral. Pasa una o dos veces al día por la Península Ibérica. El producto de AIRS utilizado en este trabajo es el *AIRS/Aqua L2 Standard Physical Retrieval (AIRS-only) V6*. El algoritmo utilizado (Barnet *et al.*, 2007) se ha diseñado de forma que todo los productos satisfagan simultáneamente las medidas en el sentido de mínimos cuadrados. Este producto tiene también una *quality flag*, con los valores 0, 1 y 2 de mayor a menor calidad. Aunque lo recomendado para comparativas con datos tomados *in situ* es utilizar solamente los datos de *quality flag* 0, en este trabajo se toman los de valor 0 y 1 para tener una cantidad de datos más representativa.

3. METODOLOGÍA

3.1. Criterio de colocación y comparación

Se han seguido dos criterios para la colocación espacial. El primero consistió en tomar el píxel cuyo centro fuera el más cercano a la estación GPS. El segundo criterio era promediar los píxeles próximos (aquellos dentro de un cuadrado de $0,25 \times 0,25^\circ$ a la estación GPS). Para los instrumentos GOME-2, MODIS, y SEVIRI se utilizó el primer criterio, mientras que para el resto se utilizó el segundo.

El criterio temporal, por otro lado, fue el de unir aquellos valores de GPS y satélite que estuvieran más cercanos en el tiempo, siempre con una diferencia temporal menor de 30 min.

Se han descartado aquellos datos de satélite bajo condiciones nubosas (fracción nubosa, CF, mayor que 0).

3.2. Análisis estadístico

Una vez se ha realizado la unión entre los datos de satélite y GPS, podemos establecer la diferencia relativa entre el dato de IWV de satélite y el de GPS.

$$\delta_{i,s} = 100\% \frac{w_{i,s}^{sat} - w_{i,s}^{GPS}}{w_{i,s}^{GPS}} \quad (1)$$

donde el índice s denota el satélite, y el i una localización y tiempo fijos, y w es el IWV medido por el satélite (sat) o por GPS.

Se utilizan algunos índices para caracterizar la distribución de diferencias. Los índices son la pseudomediana (pM, Wilcoxon, 1945), y el rango intercuartílico (IQR). En este trabajo se analiza la dependencia con ciertas variables (IWV, SZA) dividiendo los datos en n cajas con un valor similar de la variable cuya dependencia se analiza. Para el IWV la dependencia es 5 mm y para el SZA 5° .

4. RESULTADOS

4.1. Análisis estadístico

La Tabla 1 muestra los resultados del análisis estadístico de los datos. Se observa que GOME-2, SCIAMACHY y AIRS sobreestiman el IWV, mientras que MODIS y SEVIRI tienen una ligera subestimación respecto a los valores de GPS. El IQR está en torno al 30-40%. Los

Tabla 1. Análisis de las diferencias relativas entre satélite (sat) y GPS. Se muestran la pseudomediana ($pMedian$) y el IQR de la distribución de diferencias relativas, y el número de datos, N . También se muestran los resultados de la regresión lineal entre los datos de satélite y de GPS, siendo y_0 la ordenada en el origen, b la pendiente y R^2 el coeficiente de correlación.

| Sat | pMedian (%) | IQR (%) | N | y_0 (mm) | b | R^2 |
|-------------|-------------|---------|--------|------------|-------|-------|
| OMI | -0.7 | 40.80 | 3895 | 2.65 | 0.78 | 0.63 |
| SEVIRI | -5.2 | 33.31 | 187375 | 2.89 | 0.690 | 0.67 |
| SCIAMACHY | 6.6 | 45.72 | 2629 | 0.92 | 0.96 | 0.70 |
| GOME-2 | 16.7 | 32.58 | 4317 | 3.40 | 0.88 | 0.83 |
| MODIS-Aqua | -0.9 | 34.58 | 13651 | 1.01 | 0.91 | 0.74 |
| MODIS-Terra | -3.4 | 33.24 | 13581 | 0.99 | 0.89 | 0.71 |
| AIRS | 2.0 | 47.84 | 1832 | 3.05 | 0.73 | 0.56 |

resultados de las regresiones muestran que la y_0 siempre es positiva y las pendientes siempre menores que la unidad. Esto sugiere que los datos de menor IWV quedan sobrestimados mientras que los de mayor IWV son subestimados en promedio. El coeficiente de correlación muestra un buen acuerdo.

4.2. Dependencia con IWV

La Figura 2 muestra el valor de la pMedian y el IQR según el valor de IWV en cajas de 5 mm de IWV. Como se puede observar, hay una tendencia a la sobrestimación (pMedian positivo) para valores bajos de IWV, mientras que los valores altos tienden a ser subestimados. El IQR disminuye a medida que el valor del IWV aumenta en todos los satélites.

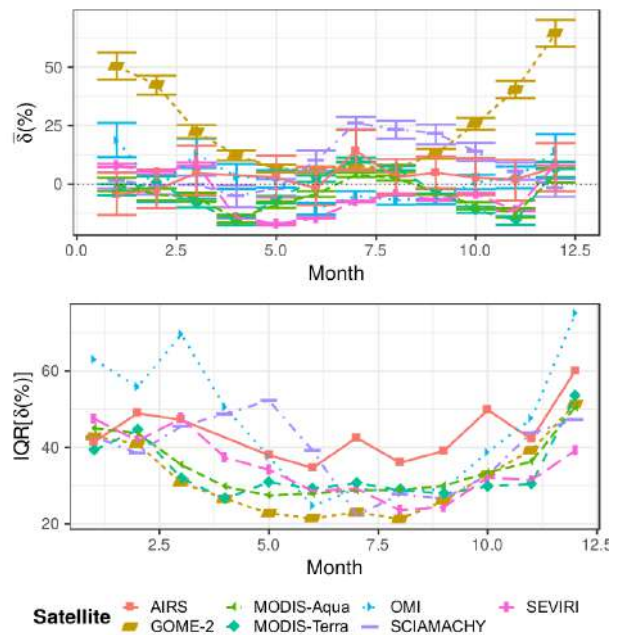


Figura 2. Pseudomediana (arriba) e IQR (abajo) según el valor del IWV de GPS.

4.3. Dependencia con SZA

La Figura 3 muestra la pMedian y el IQR según el valor de SZA en cajas de 5° de SZA. Se puede observar que en general y especialmente en aquellos productos que dependen de la radiación solar (como OMI o GOME-2) que cuando el SZA se acerca a 90° la pMedian y el IQR aumentan mucho. La dependencia en los valores nocturnos no es muy marcada. Además, los valores de MODIS diurnos tienden a la sobrestimación mientras que los nocturnos tienden a la subestimación.

5. CONCLUSIONES

Los valores de IWV de satélite concuerdan adecuadamente con los de GPS, sin embargo, es necesario mejorar los algoritmos para que las dependencias observadas se minimicen y así los productos de vapor de agua de estos satélites sean más fiables, especialmente bajo condiciones de bajo vapor de agua y alto SZA en el caso de las medidas diurnas de instrumentos que precisan de la radiación solar porque miden en VIS, NIR o UV.

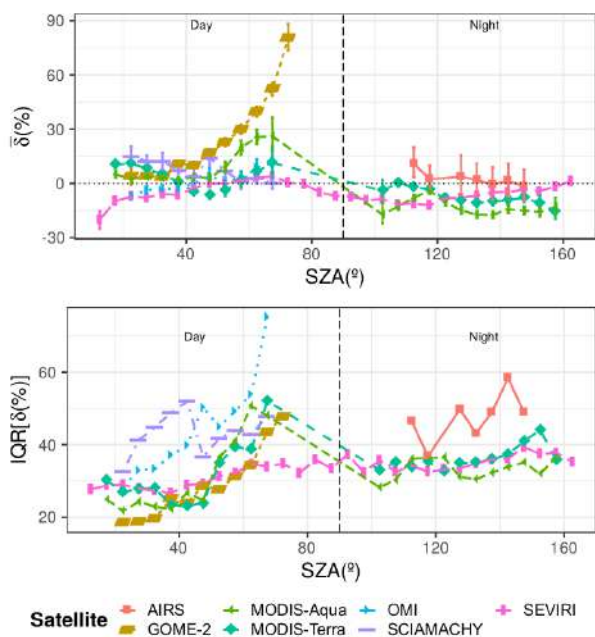


Figura 3. Pseudomediana (arriba) e IQR (abajo) según el valor del SZA de GPS.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Barnet, C., Manning, E., Rosenkranz, P.W., Strow, L., Susskind, J., 2007. Airs-Team Retrieval for Core Products and Geophysical Parameters.
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T.A., Rocken, C., Anthes, R.A., Ware, R.H., 1992. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research* 97, 15787–15801. <https://doi.org/10.1029/92JD01517>
- Bovensmann, H., Burrows, J.P., Buchwitz, M., Frerick, J., Noël, S., Rozanov, V.V., Chance, K.V., Goede, A.P.H., 1999. SCIAMACHY: Mission Objectives and Measurement Modes. *Journal of the Atmospheric Sciences* 56, 127–150. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<0127:SMOAMM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<0127:SMOAMM>2.0.CO;2)
- Chang, L., Gao, G., Jin, S., He, X., Xiao, R., Guo, L., 2015. Calibration and Evaluation of Precipitable Water Vapor From MODIS Infrared Observations at Night. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 53, 2612–2620. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2363089>
- Gao, B.C., Kaufman, Y.J., 1992. The MODIS Near-IR Water Vapor Algorithm Product ID : MOD05 - Total Precipitable Water. Algorithm Technical Background Document 1–25.
- Levelt, P.F., van den Oord, G.H.J., Dobber, M.R., Malkki, A., Huib Visser, Johan de Vries, Stammes, P., Lundell, J.O.V., Saari, H., 2006. The ozone monitoring instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44, 1093–1101. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872333>
- Noël, S., Buchwitz, M., Burrows, J.P., 2004. First retrieval of global water vapour column amounts from SCIAMACHY measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics* 4, 111–125. <https://doi.org/10.5194/acp-4-111-2004>

Wagner, T., Heland, J., Zöger, M., Platt, U., 2003. A fast H₂O total column density product from GOME-validation with in-situ aircraft measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 3, 323–353. <https://doi.org/10.5194/acpd-3-323-2003>

Wagner, T., Beirle, S., Grzegorski, M., Platt, U., 2006. Global trends (1996–2003) of total column precipitable water observed by Global Ozone Monitoring Experiment (GOME) on ERS-2 and their relation to near-surface temperature. *Journal of Geophysical Research* 111, D12102. <https://doi.org/10.1029/2005JD006523>

Wang, H., Liu, X., Chance, K., González-Abad, G., Chan Miller, C., 2014. Water vapor retrieval from OMI visible spectra. *Atmospheric Measurement Techniques* 7, 1901–1913. <https://doi.org/10.5194/amt-7-1901-2014>

Wilcoxon, F., 1945. Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin* 1, 80. <https://doi.org/10.2307/3001968>