

GNSS y meteorología

Enric Terradellas
I.N.M., Barcelona

Señal GNSS y estado de la atmósfera

Los sistemas globales de posicionamiento por satélite, conocidos habitualmente por sus siglas en inglés (GNSS), se utilizan para determinar las coordenadas geográficas de un lugar. La localización se realiza a partir de la recepción de las señales emitidas por un conjunto de satélites artificiales en órbita alrededor de la Tierra. Durante los últimos años, estos sistemas se han utilizado cada vez más en campos tan diversos como el transporte, la agricultura, la construcción o la geofísica. Existen actualmente dos conjuntos de satélites funcionando de forma operativa: el estadounidense NAVSTAR GPS y el ruso GLONASS, y otro en fase de desarrollo: el europeo GALILEO.

La señal electromagnética (microondas) emitida por los satélites GNSS se propaga a través de la atmósfera. En su trayecto sufre una curvatura, debida a la refracción, y un retraso en comparación con una propagación en el vacío. Este efecto constituye una fuente de error para el posicionamiento preciso: el error en la dirección cenital es del orden de 2.4 metros. Distintos autores han desarrollado métodos para modelizar el fenómeno y poder eliminar el error, por ejemplo, Saastamoinen (1972) o Davis et al. (1985). Efectivamente, con las correcciones propuestas se consigue una mayor precisión en el cálculo de la posición. Posteriormente, sobre todo a partir del trabajo de Bevis et al. (1992), siguiendo un razonamiento inverso, se ha trabajado en el aprovechamiento de este efecto para el análisis del estado de la atmósfera.

La magnitud inicialmente observada es el retraso en la señal, es decir, la diferencia entre el tiempo que tarda la misma desde el satélite hasta el receptor y la que tardaría si se propagara en el vacío. Este retraso suele transformarse a unidades de longitud por medio de la velocidad de la luz en el vacío. Sin embargo, el producto más común que se usa en meteorología es el retraso cenital total (ZTD). Se trata de una estimación del retraso que sufriría la señal si atravesara la atmósfera desde un satélite hasta el receptor en dirección cenital. Para obtener el ZTD, se proyecta el retraso observado en la señal sobre la dirección cenital. Ello se realiza por medio de unas funciones específicas, generalmente las propuestas por Neill (1996).

El ZTD puede descomponerse en una componente hidrostática, que es el retraso provocado por los componentes secos de la atmósfera, y una componente no-hidrostática, que es casi proporcional al contenido de vapor de agua de la columna, y que se denomina retraso cenital húmedo. El retraso hidrostático puede calcularse a partir de la presión en superficie y de las coordenadas del receptor por medio de la fórmula propuesta por Saastamoinen (1972). El retraso cenital húmedo, que se obtiene restando el retraso hidrostático del ZTD, es el que tiene auténtico interés en meteorología, puesto que de él puede estimarse el contenido de vapor de agua de la columna (IWV).



Figura 1. Satélite NAVSTAR GPS. Foto: Fuerza Aérea de los Estados Unidos.

Para estimar el IWV a partir del retraso cenital húmedo (ZWD) se han propuesto distintas expresiones, siendo la de Askne y Nordius (1987) una de las más utilizadas.

$$IWV = \frac{ZWD}{0.461 \left(\frac{3700}{T_m} + 0.22 \right)} \quad (1)$$

En ella, T_m (en °K) es una temperatura media ponderada de la columna que se suele estimar a partir de la temperatura en superficie T_0 por medio de la fórmula deducida empíricamente por Bevis et al. (1992):

$$T_m = 70.2 + 0.72 T_0 \quad (2)$$

Es decir, el retraso provocado por la atmósfera en la señal emitida por los satélites GNSS puede utilizarse para obtener una estimación del contenido total de vapor de agua en una columna de la atmósfera.

Uso de GNSS para el análisis de la humedad atmosférica

El vapor de agua desempeña un papel fundamental en la dinámica del tiempo y del clima: es la materia prima de la precipitación, transporta enormes cantidades de energía a causa de su elevado calor latente y contribuye en gran medida al efecto invernadero. Por ello, el conocimiento preciso de su distribución espacio-temporal es fundamental tanto para predicción del tiempo como para estudios climatológicos.



Fig. 2. Antena de un receptor GNSS.

Foto: David Monniaux.

La humedad es una magnitud muy variable en la atmósfera, tanto desde el punto de vista espacial como temporal.

La principal fuente de observación ha sido hasta ahora, al menos desde un punto de vista operativo, la red de radiosondeos. Sin embargo, la escasa densidad de la red no permite analizar la distribución horizontal fina del vapor de agua en los sistemas meteorológicos. Además, el elevado coste operativo limita el número de lanzamientos y, por tanto, la posibilidad de observar con precisión la evolución temporal de la humedad.

Se han utilizado otros sistemas para observar la humedad atmosférica: radiómetros de microondas, lidar Raman o combinaciones de imágenes de satélite de distintos canales radiométricos. Aunque algunos de estos sistemas han aportado resultados interesantes, su uso operativo ha estado limitado por diversos motivos: su alto coste, su dependencia del estado del tiempo, la imposibilidad de operar durante la noche o la necesidad de continuos ajustes y calibraciones muy complejas.

Los retrasos en la señal GNSS como observaciones de la humedad atmosférica presentan, en cambio, grandes posibilidades para su uso en aplicaciones meteorológicas como la predicción numérica y la predicción a muy corto plazo (nowcasting). Esta técnica presenta numerosas ventajas:

Los retrasos en la señal GNSS como observaciones de la humedad atmosférica presentan, en cambio, grandes posibilidades para su uso en aplicaciones meteorológicas como la predicción numérica y la predicción a muy corto plazo (nowcasting). Esta técnica presenta numerosas ventajas:

- Pueden crearse y mantenerse redes de receptores con un coste relativamente bajo
- La calidad de los datos procesados no depende del estado del tiempo: pueden obtenerse con cielo cubierto y con lluvia, a diferencia de las observaciones realizadas mediante radiómetros o las estimaciones obtenidas a partir de combinaciones de imágenes de satélite.
- La resolución temporal de las observaciones puede ser muy alta, especialmente si se compara con las observaciones realizadas mediante radiosondas que se realizan dos, o como máximo cuatro, veces al día.

Por otra parte, el uso de datos GNSS en la inicialización de modelos numéricos presenta aún algunos problemas, como el manejo de los errores sistemáticos en las observaciones o de las complejas correlaciones espacio-temporales de estos mismos errores, consecuencia muchas veces de los métodos usados para el procesado de los datos.

Su uso en nowcasting presenta aún mayores dificultades. Los principales problemas radican en el excesivo tiempo transcurrido desde la observación hasta la disponibilidad del dato procesado y, en zonas de orografía compleja, en la dificultad de comparar observaciones realizadas a distinta altitud.

Evolución desde la investigación hacia al uso operativo

Durante la década de 1990 distintos grupos estaban investigando las posibilidades de obtener datos meteorológicos de utilidad a partir de receptores GNSS en tierra, especialmente para la asimilación y verificación de modelos de predicción numérica: Kuo et al.

(1993, 1996), Emardson et al. (1998), pero también para estudios climáticos: Yuan et al. (1993). Se había logrado ya calcular la distancia entre el satélite y el receptor con una precisión de 1 cm lo que suponía que se podía determinar el IWV con una precisión del orden de 1 mm. Esta precisión se considera aceptable para la mayoría de aplicaciones meteorológicas. De hecho, se estima que es del orden de la que ofrecen otros sistemas de observación como los radiosondeos o los radiómetros. Sin embargo, quedaban por resolver numerosos puntos, tanto en el ámbito del proceso de los datos como en su aplicación práctica.

Tres importantes proyectos: MAGIC (1998-2001), COST Action 716 (1999-2004) y TOUGH (2003-2006), en los que han participado tanto meteorólogos como geodestas, han supuesto un fuerte impulso a la investigación en Europa sobre el uso de datos GNSS en meteorología. El Instituto Nacional de Meteorología (INM) ha participado en algunos de estos proyectos con trabajos sobre el uso de datos GNSS en modelos de predicción numérica, para inicialización o validación: Cucurull et al. (1999, 2000), Gustafsson et al. (2001), Sánchez-Arriola et al., 2004.

A partir de los trabajos realizados en los mencionados proyectos, en el año 2005 se disponía de datos de casi 500 receptores instalados en Europa. Los datos brutos eran procesados por 10 institutos, la mayoría relacionados con la geofísica, la geodesia o la cartografía. Finalmente, los datos de ZTD eran enviados cada hora a un banco de datos creado y mantenido por el servicio meteorológico del Reino Unido (U.K. Met Office). Estos datos se utilizaban sobre todo en tareas de investigación. Bajo estas circunstancias, EUMETNET, consorcio de servicios meteorológicos europeos, lanzó el proyecto E-GVAP. Su objetivo es alcanzar gradualmente los requisitos de calidad, homogeneidad, estabilidad y disponibilidad en las medidas y en los datos procesados para poder explotar esta información de manera plenamente operativa.

Para reducir el coste de las observaciones, en muchos países se han firmado acuerdos entre servicios meteorológicos y otras instituciones interesadas en medidas GNSS, que en muchas ocasiones son las que han establecido y están manteniendo las redes de observación y los centros de proceso de datos. A escala europea, en 2007 se ha firmado un acuerdo para intercambio de datos entre EUMETNET y EUREF, la comisión para Europa de la Asociación Geodésica Internacional.

En junio de 2007 llegan al banco de datos del UK Met Office datos procesados por 11 centros procedentes de unos 700 receptores, la mayoría menos de 90 minutos después de la hora nominal de la observación, que es el objetivo fijado actualmente. Esta información está ya siendo utilizada por los servicios meteorológicos de Francia y Reino Unido en la inicialización operativa de sus respectivos modelos de predicción numérica.

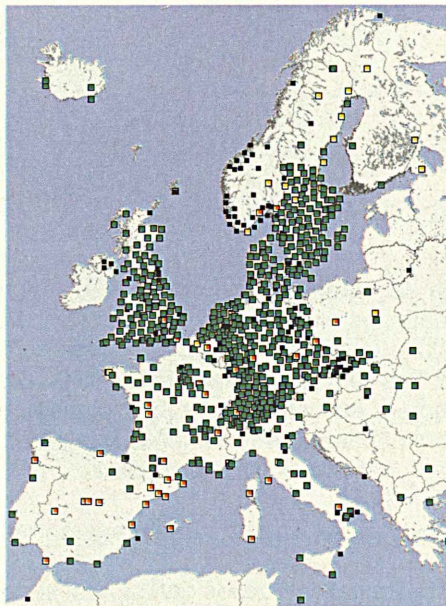


Fig. 3. Observaciones GNSS en Europa en junio de 2007.

En España existen distintas redes de receptores. La red del Instituto Geográfico Nacional es la que posee un mayor número de estaciones (21) abarcando gran parte del territorio. El Institut d'Estudis Espacials de Catalunya está procesando datos a tiempo casi real para su uso en meteorología. El INM ingesta de forma rutinaria los datos en la cadena operativa del modelo HIRLAM. Hasta el momento estos datos se utilizan para probar los controles de calidad y para compararlos con los valores de humedad del modelo, un paso previo necesario para su uso efectivo. Se espera que en unos meses los datos GNSS puedan ser utilizados en la inicialización del modelo.

GPS IWV 2007062906 UTC - 2km winds

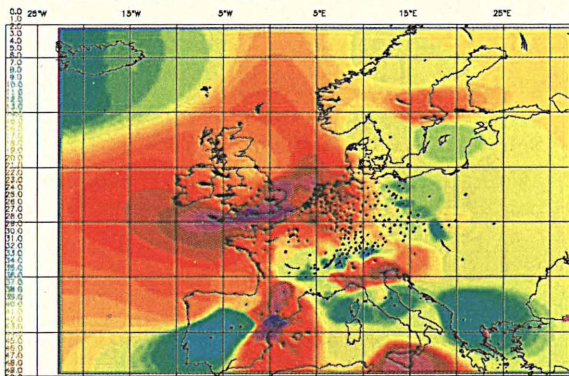


Fig. 4. Distribución espacial del contenido total de vapor de agua en la columna obtenida a partir de datos GPS

Nuevos desarrollos y proyectos futuros

Durante los últimos años se ha visto el potencial que ofrece la tomografía, una técnica empleada en campos como la medicina, la arqueología o la física de materiales, para el análisis tridimensional del contenido de vapor de agua de la atmósfera (Flores, 2001). Para el análisis tomográfico, los retrasos en la señal no se proyectan ya sobre la dirección cenital. Se consideran de manera individual los retrasos desde cada satélite hasta los distintos receptores de una red local. El principal problema que presenta la aplicación de esta técnica para el análisis de la humedad atmosférica es la disposición geométrica de satélites y receptores, los primeros encima de la atmósfera y los segundos debajo de la misma, al contrario de otras aplicaciones de la tomografía donde las líneas de observación pueden seleccionarse con mayor libertad. Esta disposición dificulta la determinación de los perfiles verticales.

Otra técnica muy prometedora es la basada en la radio-ocultación de la señal GNSS recibida por sensores a bordo de satélites de órbita baja (Hardy et al., 1992). Una radio-ocultación de la señal GNSS se produce cuando un satélite de órbita baja ve salir o ponerse el satélite GNSS detrás del disco de la Tierra. Durante la radio-ocultación, la señal GNSS sufre un retraso y una curvatura que dependen del perfil vertical del índice de refracción. Observaciones sucesivas permiten obtener una estimación de los perfiles verticales de presión, humedad y temperatura. El sensor GRAS, instalado a bordo del satélite polar europeo MetOp-A que se lanzó en octubre de 2006, ha sido diseñado específicamente para obtener estos perfiles. Se espera que esté plenamente operativo en octubre de 2007.

Referencias

ASKNE, J. AND H. NORDIUS, 1987: Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Sci.*, **22**, 379-386.

- BEVIS, M., S. BUSINGER, T. A. HERRING, C. ROCKEN, A. ANTHES Y R. WARE, 1992: GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *J. Geophys. Res.*, **97**, 15787–15801.
- CUCURULL, L., F. VANDENBERGHE, G. RUFFINI, A. FLORES, A. RIUS Y B. NAVASCUES, 1999: The GPS system as a tool to validate NWP models, *XXIV General Assembly of the European Geophysical Society*, La Haya, Holanda.
- CUCURULL, L., B. NAVASCUES, G. RUFFINI, P. ELÓSEGUI, A. RIUS Y J. VILA, 2000. The use of GPS to validate NWP systems: The HIRLAM model, *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **17**, 774–787.
- DAVIS, J. L., T. A. HERRING, I. I. SHAPIRO, A. E. ROGERS Y G. ELGERED, 1985: Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Sci.*, **20**, 1593–1607.
- EMARDSON, T.R., G. ELGERED Y J. M. JOHANSSON, 1998: Three months of continuous monitoring of atmospheric water vapor with a network of Global Positioning System receivers, *J. Geophys. Res.*, **103**, 1807–1820.
- FLORES, A., J.VILA-GUERAU, L.P. GRADINARSKY Y A. RIUS, 2001: Tomography of the lower troposphere using a small dense network of GPS receivers, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **39**, 439–447.
- GUSTAFSSON, N., L. BERRE, S. HOERNQUIST, X-Y. HUANG, M. LINDSKOG, B NAVASCUES, K. S. MOGENSEN Y S. THORSTEINSSON, 2001: Three-dimensional variational data assimilation for a limited area model, *Tellus*, **53A**, 425.
- HARDY, K.R., D.P. HINSON, G.L. TYLER Y E.R. KURSINSKI, 1992: Atmospheric profiles from active space-based radio measurements, *Preprints of the Sixth Conference on Satellite Meteorology and Oceanography*, Atlanta, GA, Amer. Meteor. Soc., 420-423.
- KUO, Y.-K., Y.-R. GUO Y E. R. WESTWATER, 1993: Assimilation of Precipitable Water Measurements into a Mesoscale Numerical Model. *Mon. Weather Rev.*, **121**, 1215–1238.
- KUO, Y.-K., X. ZOU Y Y.-R. GUO, 1996: Variational assimilation of precipitable water using a nonhydrostatic mesoscale adjoint model. *Mon. Weather Rev.*, **124**, 122–147.
- NEILL, A.E., 1996: Global mapping functions for the atmospheric delay at radio wavelengths. *J. Geophys. Res.*, **101**, 3227-3246.
- SAASTAMOINEN, J., 1972: Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, S. W. Henriksen et al., Eds., Amer. Geophys. Union, 247–251.
- SÁNCHEZ-ARRIOLA, J., B. NAVASCUÉS Y J. A.-GARCÍA-MOYA, 2004: Asimilación de datos GPS por los modelos de predicción numérica, *XXVIII Jornadas Científicas de la A.M.E.*, Badajoz.
- YUAN, L., R. ANTHES, R. WARE, C. ROCKEN, W. BONNER, M. BEVIS Y S. BUSINGER, S., 1993: Sensing global climate change using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, **98**, 14925-14937.