DETERMINACIÓN DEL VAPOR DE AGUA TROPOSFÉRICO A TRAVÉS DE OBSERVACIONES GPS: PRIMEROS ENSAYOS EN VENEZUELA

VÍCTOR CIOCE, MELVIN HOYER, EUGEN WILDERMANN, GIOVANNI ROYERO y ALTAMIRA DÍAZ

RESUMEN

La implementación de técnicas geodésicas satelitales ha hecho posible la determinación y análisis de información sobre la atmósfera terrestre. Ejemplo de ello es la cuantificación y seguimiento del vapor de agua troposférico, variable de gran interés para el estudio del clima, meteorología y química atmosférica, y considerado el principal gas de efecto invernadero. Este trabajo describe las primeras experiencias en Venezuela sobre la aplicación del GPS para su obtención, lo que fue posible al diseñar una estrategia de procesamiento con el Bernese GPS Software v5.0, orientada a la estimación del retardo zenital no hidrostático de la señal satelital captada desde una estación fija ubicada en el occidente del país y en la que fueron considerados datos meteorológicos in situ. Solo se procesaron 46 días de datos, alcanzando valores medios en el retardo zenital húmedo de 0,34m. A partir de dicha estimación y ante la estrecha relación con el vapor de agua en la atmósfera neutra, se realizó la correspondiente conversión a vapor de agua integrado, con el auxilio del TROPOSWASSER v1.0, aplicación desarrollada con dicho fin. Las series de tiempo generadas revelaron en promedio la presencia mínima y máxima de 46kg·m⁻² y 65kg·m⁻², respectivamente, de agua gaseosa. Además de caracterizar ambas variables, será posible iniciar la monitorización continua de las mismas, favoreciendo así al desarrollo de investigaciones en el ámbito de la geodesia y ciencias de la atmósfera.

or más de 30 años el sistema de posicionamiento global (GPS) ha sido utilizado como herramienta para la obtención precisa de coordenadas tridimensionales referidas a un sistema geocéntrico global, convirtiéndose en la principal técnica para la resolución de problemas geodésicos en la actualidad. Su versatilidad y características permiten además su aplicación en tareas propias de otras disciplinas vinculadas o no con las geociencias y con el fortalecimiento del Sistema Global de Navegación Satelital (GNSS), la intervención de técnicas de este tipo en la vida cotidiana tiende a incrementarse.

Entre las disciplinas beneficiadas con los productos del GPS, se distinguen las ciencias de la atmósfera. Desde hace casi dos décadas investigaciones relacionadas con su aplicación en estudios atmosféricos han sido extensamente discutidas y reportadas por numerosos autores. En todas ellas resalta el éxito ofrecido por ésta técnica satelital en la recuperación de información relacionada con la ionosfera y troposfera terrestre. Las exactitudes obtenidas son estrechamente cercanas a aquellas correspondientes a las técnicas convencionales para el estudio de la atmósfera (Bevis *et al.*,

PALABRAS CLAVE / Cambio Climático / GPS / Retardo Troposférico / SIRGAS / Vapor de Agua /

Recibido: 22/07/2011. Modificado: 06/09/2011. Aceptado: 08/09/2011.

Víctor Cioce. Ingeniero Geodesta y M.Sc. en Ingeniería Ambiental, la Universidad del Zulia (LUZ), Venezuela. Profesor, LUZ, Venezuela. Dirección: Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS (CPAGS-LUZ), Departamento de Geodesia Superior, Facultad de Ingeniería, LUZ. Maracaibo, Venezuela. e-mail: vcioce@facing.luz.edu.ve

Melvin Hoyer. Ingeniero Geodesta, LUZ, Venezuela. Doctor en Ingeniería, Leibniz Universität Hannover (LUH), Alemania. Profesor, LUZ. Venezuela. e-mail: mhoyer@fing.luz.edu.ve

Eugen Wildermann. Ingeniero Geodesta y Doctor en Ingeniería, LUH, Alemania. Profesor, LUZ, Venezuela. e-mail: ewildermann@fing.luz.edu.ve

Giovanni Royero. Ingeniero Geodesta y M.Sc. en Ingeniería Geodésica, LUZ, Venezuela. Profesor, LUZ, Venezuela. e-mail: groyero@fing.luz.edu.ve

Altamira Díaz. Ingeniera Civil y M.Sc. en Ingeniería Ambiental, LUZ, Venezuela. Doctora en Ingeniería de Procesos del Ambiente, Institut National des Sciences Appliquées (INSA), Francia. Profesora, LUZ, Venezuela. e--mail: adiaz@fing.luz.edu.ve

1994; Hagemann *et al.*, 2002; Cioce, 2009a). Las ventajas del GPS aplicado a estudios atmosféricos se resumen en el mejoramiento de la cobertura espacial y temporal; por otra parte, su funcionamiento ininterrumpido y bajo cualquier condición meteorológica, conlleva a la posibilidad de ofrecer un monitoreo de ciertas variables atmosféricas sumamente útiles para complementar otras técnicas existentes.

Con el desarrollo actual de las plataformas observacionales y de procesamiento GPS, debe sumarse a estas ventajas el hecho de ofrecer resultados sobre variables atmosféricas de interés en tiempo real, lo que beneficia a la generación de modelos de predicción del clima y otros. En general, además de los productos geodésicos obtenidos con GPS, información confiable y útil para la meteorología, climatología y ciencias ambientales puede ser derivada aprovechando una misma infraestructura observacional.

Aquí se describen las primeras experiencias en Venezuela acerca de la aplicación del GPS para la obtención de información relacionada con la troposfera, específicamente sobre el contenido de vapor de agua, utilizando para ello mediciones satelitales de alta precisión. La metodología aplicada pretende definir las bases que permitan inicialmente demostrar la viabilidad de este tipo de estudios en el país, para luego dar respuestas que contribuyan con el desarrollo de la geodesia nacional y el conocimiento de las ciencias de la atmósfera desde una perspectiva geodésica.

El Vapor de Agua Troposférico y su Rol en la Atmósfera Terrestre

El vapor de agua, como constituyente primario de la atmósfera terrestre, cumple diversas funciones jugando un papel predominante en la ocurrencia de fenómenos propios de este componente del Sistema Tierra; el mismo no es más que agua en fase gaseosa y su presencia en la atmósfera se debe a la ocurrencia de procesos físicos y químicos propios de nuestro planeta. En líneas generales, el vapor de agua surge por la evaporación presente en los grandes reservorios (océanos, lagos y mares) y además por cambios de su fase a nivel de los suelos y vegetación. Es la energía proveniente del sol y su posterior transformación lo que promueve todas las reacciones involucradas en el proceso. En la troposfera se encuentra casi la totalidad

del agua atmosférica estando en su fase gaseosa.

Desde un punto de vista ambiental, el vapor de agua puede ser considerado como causa y consecuencia de las alteraciones en el balance energético del planeta, al presentar un comportamiento dual debido a las propiedades físico-químicas que lo caracterizan. Cuando la energía solar hace contacto con el vapor de agua o bien con las nubes formadas a partir de éste, una parte de ella es reflejada hacia el espacio atravesando las demás capas de la atmósfera, otra porción es absorbida por dicho gas y el resto llega a la superficie terrestre tras ser refractada, en donde es aprovechada, transformada y re-emitida en forma de energía térmica. Este flujo se considera normal y es el responsable de mantener la temperatura del planeta estable, lo que incide en el óptimo desarrollo de toda actividad física, química y biológica dentro del Sistema Tierra. De estar presente a nivel de la troposfera concentraciones de vapor de agua (o agua líquida si fuere el caso) suficientes como para retener la energía térmica (infrarroja) emitida desde la superficie, el incremento en la temperatura planetaria se haría evidente.

Tomando en cuenta la importancia del vapor de agua como constituyente primordial de la atmósfera terrestre, la necesidad de cuantificar su presencia resulta evidente. Aunque la determinación de este gas a nivel troposférico ha sido realizada durante muchos años a través de diversos métodos, una completa caracterización no está disponible hasta la fecha. El Intergovernment Panel on Climate Change (IPCC) ha manifestado en reiteradas ocasiones su preocupación por mejorar la calidad de los datos observados así como su accesibilidad, lo que permitiría conocer más a fondo los cambios que están sucediendo en el Sistema Tierra y mejorar su modelado (Bates et al., 2008).

Entre los motivos por los cuales es necesaria la estimación del vapor de agua troposférico pueden citarse la comprensión del balance energético del planeta y de la interacción tierra-atmósfera-océano, el seguimiento y modelado del calentamiento global y efecto invernadero inducido, el estudio de las nubes y aerosoles, la interpretación de procesos hidrológicos y especialmente del ciclo del agua, el mejoramiento de los modelos para el tiempo meteorológico y clima, el estudio de la química atmosférica que controla la aparición de poluentes y, en

general, las tendencias del vapor de agua pueden ser usadas como trazadores para varios problemas climáticos y ambientales.

Estas razones justifican plenamente la estimación y entendimiento del vapor de agua como constituyente de la atmósfera y en tal sentido, diversos procedimientos han sido empleados. Los métodos convencionales se basan en la obtención de la humedad absoluta en una determinada ubicación, pero estas determinaciones se ven afectadas por errores asociados con las condiciones meteorológicas (Sapucci, 2001). Por su parte, las técnicas de vanguardia están basadas en observaciones realizadas sobre, en o por encima de la atmósfera terrestre, que de forma independiente, ofrecen resolución espacial (horizontal, vertical o ambos inclusive) y temporal. Vale destacar que no se dispone actualmente de una plataforma observacional que satisfaga todas las necesidades espacio-temporales, siendo necesaria la integración de las diversas herramientas existentes.

Al ser un constituyente gaseoso de presencia global y por contar con propiedades radiativas especiales, el vapor de agua es considerado como el gas de efecto invernadero más importante (Heise et al., 2009), contribuvendo en un 62% con dicho fenómeno, más que cualquier otro componente atmosférico. El vapor de agua absorbe radiación infrarroja en mayor cantidad con respecto al CO₂, lo que influencia enormemente el balance energético terrestre. De acuerdo con el IPCC, el contenido de este gas en la troposfera ha aumentado en las últimas décadas en concordancia con el calentamiento global (Bates et al., 2008).

Por otra parte, la calidad del aire se ve afectada ante la presencia de agua cuando ésta se condensa o evapora, liberando o absorbiendo calor, respectivamente. La formación de la niebla es un ejemplo de ello; cuando el aire húmedo se enfría y la humedad se condensa, ésta surge e interactúa con el material particulado presente en la atmósfera, reduciendo la visibilidad a niveles no deseados (Weiner y Matthews, 2003). Este tipo de fenómenos resulta de interés para la química atmosférica, ya que los productos de la interacción del vapor de agua con otras especies químicas podrían ser perjudiciales para el ambiente.

El aumento en la temperatura del planeta y la intervención del agua gaseosa en procesos de polución del aire, tienen un impacto negativo no solo a escala global, sino continental, regional y local. En el caso específico de las principales ciudades, es necesario un análisis que abarque un intervalo de observación de varios años, sobre variables meteorológicas y climáticas junto con información sobre gases de efecto invernadero como el vapor de agua, si se desea determinar los rasgos que definan la ocurrencia de fenómenos asociados con el cambio climático, pues es sabido que el entorno urbano ha comenzado a presentar evidencias al respecto. Las técnicas de observación satelital ofrecen ventajas significativas en este sentido.

El Estudio de la Troposfera Mediante GPS

Para comprender la manera en la cual el GPS puede ser utilizado en el estudio de la tropósfera, es necesario entender la naturaleza, características y composición de la señal emitida por los satélites de la constelación, la cual es de tipo electromagnética y se ubica en la banda L del espectro. Explicaciones detalladas son ofrecidas por Seeber (2003) y por Misra y Enge (2006). Cuando la señal comienza su recorrido desde la antena del satélite atraviesa el espacio vacío sin sufrir alteraciones en su travectoria. Es durante su paso por la atmósfera terrestre que la señal se ve afectada en cuanto a su propagación se refiere.

La refracción atmosférica de la señal GPS ocurre debido a su interacción con las partículas cargadas eléctricamente que se encuentran en la ionosfera (refracción ionosférica), o bien con los átomos y moléculas neutras de la troposfera (refracción troposférica). Su influencia sobre la estimación de coordenadas es negativa, siendo considerada como una de las principales causas de error en el posicionamiento geodésico basado en ésta técnica satelital; no obstante, los efectos de la refracción en las observaciones GPS introducen información útil, acumulada durante la trayectoria de la señal. Particularmente, la refracción troposférica se interpreta como el retardo en el paso de la señal causado por la parte neutra o no ionizada de la atmósfera, afectando tanto a códigos como a portadoras GPS, y es asumida como una variable de sumo interés para las ciencias de la atmósfera en el estudio de la refractividad y la distribución del vapor de agua en la troposfera, lo que permite la aplicación de la técnica en áreas propias de la meteorología, climatología, ciencias del ambiente y similares.

En este caso, los retardos ionosféricos y troposféricos son considerados como datos observables o medibles, vinculados naturalmente con parámetros atmosféricos diversos. A partir de ésta idea es posible su recuperación mediante el adecuado tratamiento y análisis de mediciones GPS (Teunissen y Kleusberg, 1998). Numerosas investigaciones orientadas al estudio de ambas capas de la atmósfera terrestre han sido desarrolladas desde comienzos de la década de los 90, siendo Bevis *et al.* (1992) sus precursores.

A diferencia de la ionosfera, la troposfera es un medio no dispersivo para las señales de radio, lo que implica que su efecto refractivo es independiente de la frecuencia. De esta manera, el retardo de la señal GPS debido a la atmósfera neutra puede ser determinado al calcular la refractividad N a lo largo de su trayectoria de propagación, que a su vez es una función de parámetros meteorológicos tales como temperatura, presión y humedad. Siendo el índice de refracción n quien describe la variabilidad de la atmósfera neutra, se recurre a la refractividad para un escalado adecuado, pues su valor es ligeramente mayor que la unidad (Seeber, 2003).

El retardo o refracción troposférica viene dado por la expresión (Dach *et al.*, 2007)

$$\Delta \rho = \int (\mathbf{n} - 1) \mathbf{d}_{\mathrm{s}} = 10^{-6} \int \mathrm{N} \mathbf{d}_{\mathrm{s}} \tag{1}$$

cuya integración se hace a lo largo de la trayectoria de la señal S, el término de refractividad puede descomponerse en una parte seca (o hidrostática, N_H) y otra húmeda (o no hidrostática, $N_{\rm NH}$), que dependen de la presencia del aire seco y vapor de agua respectivamente, tal que

$$\Delta \rho = \Delta \rho_{\rm H} + \Delta \rho_{\rm NH} = 10^{-6} \int N_{\rm H} d_{\rm S} + 10^{-6} \int N_{\rm NH} d_{\rm S}$$
(2)

La componente hidrostática del retardo troposférico contribuye en un 90% con la refracción total; el 10% restante corresponde a la componente no hidrostática, pero su variabilidad es mucho mayor, dificultando su determinación. En la práctica, diferentes modelos son aplicados para el cálculo de la refractividad en base a la Eq. 2. Una representación rigurosa y de mayor aceptación según Bevis *et al.* (1992) es

$$N = k_1 \frac{p_d}{T} Z_d^{-1} + k_2 \frac{e}{T} Z_{wv}^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_{wv}^{-1}$$
(3)

donde P_d : presión parcial del aire seco, Z_d y Z_{wv} : factores de compresibilidad, k_1 , k_2 , k_3 : constantes físicas de refractividad, T: temperatura, y e: presión parcial del vapor de agua. Debido a que el retardo troposférico guarda dependencia con la distancia recorrida por la señal dentro de la troposfera, existe también relación con la distancia zenital z del satélite, que es establecida por la función de mapeo que en forma general corresponde a la Eq. 4

$$f(z) = \frac{1}{\cos z} \tag{4}$$

la cual permite evaluar el retardo experimentado a un ángulo de elevación determinado al ser introducida al modelo troposférico *a priori* que se seleccione.

Si la intención es utilizar observaciones GPS realizadas sobre la superficie terrestre (caso más común), entonces las Eqs. 2 y 3 son consideradas como fundamentales para el cálculo del retardo troposférico. El resto de los factores que intervienen en la estimación son generalizados en la Eq. 5, siendo éstos los vectores de estado del satélite y del receptor (X_s, X_r), errores de sincronización de relojes tanto de los satélites como del receptor (δt_s , δt_r), la refracción ionosférica (δ_{ion}), efectos de marea (δ_{tide}), efectos relativísticos (δ_{rel}), ambigüedades (N_i^k) y otros sesgos implícitos denotados (ε) .

$$O = f(X_s, X_r, \delta t_s, \delta t_r, \delta_{tro}, \delta_{ion}, \delta_{tide}, \delta_{rel}, N_i^k, \epsilon)$$
(5)

A partir de mediciones GPS cualquiera de estos componentes puede ser derivado a fin de satisfacer las necesidades del usuario, i.e. coordenadas, velocidades, órbitas, tiempo, parámetros atmosféricos, funciones del campo gravitatorio terrestre, y muchos más. Una deducción detallada de los modelos matemáticos puede ser revisada en la literatura especializada, como por ejemplo Teunissen y Kleusberg (1998), Seeber (2003), Leick (2004) y Xu (2007), entre otros.

El retardo zenital hidrostático (ZHD) puede ser estimado de manera precisa (a nivel de mm) si se dispone de datos meteorológicos de superficie (presión, temperatura y humedad relativa) de calidad adecuada para tal fin (Bevis *et al.*, 1992). Por su parte, la estimación y modelado del retardo zenital húmedo (ZWD) es realmente difícil, ya que el vapor de agua no se encuentra bien mezclado y su distribución espacial y temporal no es homogénea. El procedimiento común para su estimación forma parte de las estrategias de procesamiento GPS. Al ser el ZWD muy sensible a la información *a priori* que se considere para el cálculo, debe prestarse especial interés a la bondad de las mediciones meteorológicas, modelos troposféricos y funciones de mapeo.

La troposfera terrestre también puede estudiarse en base a observaciones GPS, a través de una técnica conocida como radio-ocultación, con la que se logra estimar la refractividad atmosférica a partir de la influencia que ejerce la atmósfera terrestre sobre la señal recibida a bordo de un satélite de órbita baja cuando los satélites GPS son 'ocultados' al darse su orto y ocaso. Para mayores detalles sobre los fundamentos y resultados de ésta técnica, ver Kuo *et al.*

(2000), Heise *et al.* (2006) y Leandro (2007).

Obtención del Vapor de Agua Troposférico a Través de Observaciones GPS

La metodología aplicada para la recuperación del vapor de agua troposférico, parte del cálculo del retardo zenital de la señal GPS, parámetro que resulta de fundamental importancia para la cuantificación de dicho gas, que fue calculado a partir de las mediciones realizadas por la estación SIRGAS-CON Maracaibo (MARA), que también conforma la red activa nacional REMOS. Además, la disponibilidad de datos meteorológicos a nivel de superficie resultó indispensable, pues tanto la temperatura como la presión guardan relación con el flujo gaseoso de la atmósfera neutra y su equilibrio hidrostático, y la humedad relativa permite inferir sobre la presencia de agua y los procesos de mezcla que en ella tienen lugar.

La medición de los datos meteorológicos debe ser realizada preferiblemente en el mismo lugar de observación GPS y con altos niveles de precisión para así garantizar una estimación adecuada de la refracción troposférica sin el impacto de los sesgos inherentes a causas instrumentales o por representaciones de atmósferas estándar. En tal sentido, se emplearon registros *in situ* de temperatura, presión atmosférica y humedad relativa, captados por una estación meteorológica MET3 que ofrece, de acuerdo a las especificaciones del fabricante (Paro-



Figura 1. Configuración geométrica de la red geodésica procesada.

scientific Inc., 2001), precisión de ± 0.08 mbar, $\pm 0.5^{\circ}$ C y 2% respectivamente. El instrumento funciona a escasos metros de la estación de observación permanente GPS.

Tanto los datos GPS como los meteorológicos corresponden a los meses de mayo y junio 2009 (semanas 1530 a 1537 del calendario GPS). Se utilizó como plataforma de cálculo el Bernese GPS Software v5.0 (Beutler et al., 2004), cuya calidad ofrece la robustez necesaria en el tratamiento de observaciones como las empleadas, proporcionando resultados de la precisión requerida en este trabajo. Una característica específica del software es la posibilidad de ofrecer diversos modelos a priori y sus correspondientes funciones de mapeo para el tratamiento y determinación de la refracción troposférica partiendo de ecuaciones de observación GPS.

Los parámetros troposféricos de la estación MARA fueron estimados para cada sesión de observación mediante un procesamiento de tipo diferencial, resolviendo líneas bases formadas a partir de las estaciones Saint Croix (CRO1), Cúcuta (CUCU) y Santiago de Cuba (SCUB), pertenecientes a la red SIRGAS-CON. La selección de las mismas se debió principalmente a su estabilidad, continuidad, disponibilidad de mediciones y la relativa cercanía respecto a MARA. La configuración de la red geodésica se muestra en la Figura 1.

Ante la rigurosidad que ameritó la estimación de parámetros, fue necesaria la consideración de órbitas precisas para los satélites GPS observados, así como parámetros de rotación terrestre y movimiento del polo, suministradas por el International GNSS Service (IGS). Por otra parte, se incluyó el modelo de centros de fase de antenas GPS por calibración absoluta (NGS, 2009) y el FES2004 (Letellier, 2004) ofrecido por Bos y Scherneck (2009) para el tratamiento de la carga oceánica. La ionosfera fue tratada a través de modelos globales calculados por el Center for Orbit Determination in Europe (CODE) para cada día procesado. Estos elementos permiten garantizar un elevado nivel de calidad en las determinaciones con el Bernese GPS Software, pues reducen e inclusive suprimen los posibles errores debidos a los fenómenos asociados con cada uno de ellos, en especial cuando se tratan las

dobles diferencias de las fases portadoras como observables derivadas (Sánchez, 2006).

La estrategia aplicada estuvo compuesta por tres etapas (Cioce, 2009a). En la primera se calcularon coordenadas refinadas para la estación MARA referidas al ITRF05, materializado por las estaciones CRO1, CUCU y SCUB, lo que permitió luego determinar v remover del retardo zenital total (ZTD), y la respectiva componente hidrostática o ZHD, para ello se aplicó como modelo a priori el de Saastamoinen (1973) con su respectiva función de mapeo y los datos meteorológicos de la estación. La segunda etapa se orientó hacia la resolución de ambigüedades GPS a través del algoritmo QIF, siendo el apropiado de acuerdo a la configuración de la red (Dach et al., 2007). Por último, se procedió a la estimación final de los parámetros representativos del retardo troposférico, correspondiendo éstos a la componente húmeda o ZWD; en este caso las coordenadas de MARA resultantes de la primera etapa entraron como variables conocidas dentro del proceso de ajuste por cuadrados mínimos.

Al respecto, el ZWD se estimó a partir de las observaciones GPS y del modelo *Wet-Niell* (Niell, 1996), calculando los parámetros troposféricos específicos del lugar de observación con una resolución temporal de 30min. Las determinaciones corresponden a un total de 46 días. Conviene aclarar: a) El uso de parámetros meteorológicos de superficie solo aplicó para la estación MARA; en el resto de las estaciones de la red fueron utiliza-



Figura 2. Retardo zenital húmedo (ZWD) para la estación MARA correspondiente a la semana 1535.



Figura 3. Retardo zenital húmedo (ZWD) para la estación MARA para mayo y junio de 2009.

dos valores obtenidos de una atmósfera estándar interpolados en función de la altura. b) La configuración geométrica de la red no permitió el cálculo de los gradientes horizontales del retardo troposférico, tanto su extensión como el ángulo de elevación empleado para las observaciones, puede introducir singularidades en el sistema de ecuaciones que afectarían negativamente la obtención de resultados.

En la Figura 2 se presenta la serie de tiempo que revela el comportamiento del ZWD de la estación MARA para un período de una semana cualquiera del ensayo, y la Figura 3 representa la misma variable obtenida para los meses de duración del estudio; en ellas se aprecia como el ZWD



oscila entre 0,23 y 0,45m, tal que puede afirmarse que el retardo húmedo medio para la estación de observación es de 0,34m. Estas figuras ponen de manifiesto la alta variabilidad del retardo zenital húmedo en función del tiempo. Teóricamente, ésta obedece a los cambios en la distribución del vapor de agua troposférico.

La estrategia de cálculo implementada bien puede ser sometida a variantes con el fin de optimizar y refinar los resultados o simplemente para efectuar controles. No obstante, se obtuvieron valores del ZWD con una consistencia interna altamente satisfactoria, el RMS de las estimaciones troposféricas alcanzó una media de ±3mm para todas las sesiones procesadas y el ajuste general, tanto de observaciones como de las coordenadas, parámetros troposféricos y otros, arrojó un factor de varianza a posteriori medio de ±1,6mm, sustentando así el análisis de confiabilidad realizado sobre los resultados.

La recuperación del vapor de agua troposférico vía GPS puede ser vista de dos formas (Bevis *et al.*, 1992): como vapor de agua integrado (IWV), es decir, masa de vapor de agua presente por unidad de área expresado en kg·m⁻², o bien como vapor de agua precipitable (PW), siendo éste la altura de la columna de agua equivalente, expresado en mm. En am-

bos casos, se parte del hecho de que el ZWD es cercanamente proporcional al contenido de vapor de agua existente sobre la estación de observación para un instante específico. Tanto el IWV como el PW quedan referidos a la vertical del lugar, pero en condiciones meteorológicas estables el contenido de H₂O_(g) presenta una alta correlación regional sobre distancias horizontales de hasta ~50km (Seeber, 2003).

Aunque pudiera asumirse que esta transformación es sencilla, en realidad es delicada debido al factor de conversión entre ambos parámetros, dado por algunas variables definidas universalmente, como por ejemplo densidad del

S Figura 4. Retardo zenital húmedo (ZWD) y vapor de agua integrado (IWV) para la semana GPS 1536.



Figura 5. Vapor de agua integrado (IWV) para mayo y junio de 2009.

agua, la constante específica de los gases propia del $H_2O_{(g)}$ y su masa molar, y la constante universal de los gases, pero también por variables termodinámicas altamente cambiantes en función de la latitud, estación del año, condiciones hidrostáticas de la troposfera y otros, como lo son las constantes de refractividad atmosférica y la temperatura media de la troposfera. Éstas han sido determinadas experimentalmente en diversas partes del mundo con el fin de ofrecer representaciones adecuadas para un lugar específico (Bevis et. al., 1994; Schüler, 2001, Hagemann et al., 2002; Sapucci, 2005; Leandro et al., 2008).

Las constantes de refractividad para las radioseñales han sido determinadas desde los años 60 con base en mediciones de mi-

croondas y análisis estadístico; en consecuencia, la bibliografía especializada puede proveer diversos valores. Para los efectos del presente estudio se utilizaron los valores ofrecidos por Bevis et al. (1994), que se consideran estándar. La temperatura media de la troposfera, la cual tiene mayor influencia en la recuperación del vapor de agua vía GPS, suele ser estimada a partir de registros de radiosondas y procedimientos matemáticos específicos, ajustados a un lugar y estación en particular. Un modelo matemático alternativo y dependiente de la temperatura en superficie fue ofrecido por Bevis et al. (1992) y luego por Schüler (2001) validó la misma, siendo posible su utilización globalmente. Esto, sin duda, ha favorecido el uso del

GPS en este tipo de estudios ante la dificultad y limitaciones que implican las radiosondas.

De esta forma, una vez estimado el ZWD para la estación MARA, se llevó a cabo la conversión a vapor de agua optimizando el proceso de cálculo a través del diseño e implementación del programa *TRO-POSWASSER v1.0* (Cioce, 2009b). Mediante la posterior confección de series de tiempo, fue posible la evaluación de las variaciones interdiarias de este gas de efecto invernadero, así como las propias para todo el período del ensayo.

La Figura 4 muestra el ZWD y el IWV estimado para la semana 1536, mientras que la Figura 5 corresponde al IWV para los meses



Figura 6. Efecto de la variación en el ZWD sobre la estimación del IWV (17/05/2009).

de mayo y junio 2009, ofreciendo una visión generalizada del comportamiento propio del vapor de agua en estos intervalos. Se observa una variabilidad cíclica entre las horas del día y la noche, caracterizándose por oscilaciones de gran amplitud en cortos períodos de tiempo. Los valores medios máximos y mínimos alcanzados fueron 46 y 65kg·m⁻² respectivamente, con algunos valores pico que se atribuyen a posibles alteraciones meteorológicas, ruido instrumental y a efectos sistemáticos remanentes luego de la estimación de parámetros. La cuantificación

del vapor de agua a través del GPS está influenciada por dos errores:

aquellos inherentes a la observación en sí con impacto directo en la estimación del ZWD, y los asociados con las condiciones y representaciones termodinámicas y meteorológicas que inciden en la obtención del factor de conversión entre el ZWD y el IWV, factor que se entiende como un modelado matemático de variables altamente dinámicas como las existentes en la troposfera, especialmente cuando en él interviene la denominada 'temperatura media'. Estos errores determinan en buena medida la calidad final del vapor de agua integrado.

Así, por ejemplo, pudo inferirse en este estudio como 1mm de desviación en el ZWD ocasiona una incertidumbre de ± 0.17 kg·m⁻² en el IWV, dando una idea del nivel de precisión requerido por las observa-

ciones GPS y la rigurosidad del procesamiento. La Figura 6 ofrece una representación de esto. La curva gris indica el vapor de agua obtenido al aplicar la estrategia descrita, mientras que la curva en negro representa la misma variable calculada al introducir intencionalmente condiciones que desmejoraran el ajuste, como lo es el aumento de la cantidad de incógnitas.

Otra situación evaluada fue el impacto de la precisión en la temperatura superficial, tal que una discrepancia de $\pm 2^{\circ}$ C, ocasionó un error medio de $\pm 0,30$ kg·m⁻² en el IWV. Si bien las fuentes de error GPS han sido minimizadas eficientemente a partir de la estrategia de procesa-

miento y los datos meteorológicos cuentan con una calidad adecuada, esto permite asumir que la estimación del IWV es confiable en un orden nominal de ± 0.88 kg·m⁻², valor aceptable si se toma en cuenta la variabilidad característica de este gas atmosférico y que fue derivado a partir de los ensayos de Sapucci (2001). En este caso, al no disponer de controles externos que indiquen lo contrario (medidas de radiosondas o radiómetros), la incertidumbre permanece abierta. Sin embargo, las series de tiempo del IWV fueron contrastadas con las correspondientes para la humedad relativa y temperatura en MARA, mostrando una alta correlación, tal y como se aprecia en la Figura 7.

Un segundo control se basó en el uso de la denominada fórmula de Hann (Vianello y Alves, 1992) como modelo matemático empírico (utilizado clásicamente en la meteorología) para determinar el IWV. Aunque este tipo de modelo no resulta conveniente por su naturaleza, pues depende de variables medidas únicamente en superficie y que pu-

dieran estar afectadas por condiciones del entorno y errores instrumentales, la comparación entre resultados se asumió como una primera aproximación; arrojando diferencias absolutas medias de 7,8kg·m-2, que si bien pudieran verse elevadas se consideran satisfactorias ante las limitaciones de un modelado empírico. La Figura 8 ilustra dicha comparación. El IWV calculado al aplicar el modelo matemático no manifiesta la alta variabili-

 \leq

dad que caracteriza al vapor de agua, lo que pudo verificarse a partir de la recuperación vía GPS. la cual es más realista debido a la interacción directa de la señal con el estrato atmosférico, la que es medida.

En base a las comparaciones y controles implementados, puede confiarse en el grado de representatividad alcanzada en la cuantificación del



Figura 7. Vapor de agua integrado, temperatura y humedad relativa para el 10/06/2009.

vapor de agua troposférico mediante observaciones GPS. Naturalmente, al tratarse de los primeros ensayos sobre esta materia, es necesario profundizar más en el tema, a fin de alcanzar un mayor entendimiento de los procesos vinculados con este predominante gas de efecto invernadero.

Al lograr la obtención de información sobre el contenido de vapor de agua troposférico y expresarla en forma de series de tiempo, fue

posible evaluar su relación con otras variables meteorológicas y climáticas (temperatura, humedad, índice temperatura-humedad, temperatura de punto de rocío, y otras) registradas en locaciones cercanas. Se espera que a largo plazo sea posible identificar trazas del cambio climático en la localidad. La idea en un futuro próximo es hacer el seguimiento de las variables involucradas sobre una escala temporal continua y así poder ofrecer respuestas concretas sobre la ocurrencia de dicho fenómeno. basándose en observaciones geodésicas satelitales. A su vez, esta fase del estudio se convirtió en otro tipo de control externo de las estimaciones

Cabe señalar que no se pretende emitir juicio sobre la ocurrencia o no del cambio climático o del efecto invernadero inducido, pues la información derivada a partir de dos meses de registros no son suficientes para ello y, además, no se han considerado otros factores de importancia que permitan un estudio más robusto y confiable, como por ejemplo el im-

pacto de la carga de contaminantes sobre la atmósfera, entre otros.

La relación entre el IWV, temperatura y humedad relativa para un mes de estimaciones está representada en la Figura 9. Dos hechos resaltan: se observa directamente que el aumento y descenso de la temperatura diaria se correlaciona inversamente con la variación en el contenido de vapor de agua (coeficiente de correlación de -0,6); y por otra parte, en las

épocas para las cuales la humedad relativa alcanzó 100%, lo que implica precipitaciones (verificadas también gracias а registros existentes), el IWV alcanzó sus valores máximos, tal V como era esperado. En general, la alta correspondencia entre las tres variables es evidente.

Otro parámetro con el que también se estableció relación fue el índi-



Figura 8. Diferencias absolutas entre el IWV empírico (gris) e IWV-GPS (negro), 05/05/2009.

ce temperatura-humedad (ITH), definido como una medida de la sensación térmica basada en valores de temperatura y humedad para un sitio y momento específico, siendo cómoda con un ITH en el orden de 70 e incómoda si es >75. La variabilidad del vapor de agua integrado guarda estrecha relación con la del ITH para los meses considerados, lo que se ejemplifica en la Fi-10 mostrándose gura además su correspondiente tendencia. Para el período completo del ensavo, dicha sensación estuvo en todo momento por encima de 70.

La temperatura de punto de rocío también fue asociada; en la Figura 11 se muestra la serie de tiempo de dicho parámetro junto con su tencomparándola dencia, con el IWV para mayo y junio 2009. Ambas series describen un comportamiento similar, lo que permite asumir que la temperatura de si punto de rocío asciende



tal y como indica su tendencia e independientemente de su variabilidad diurna, se tendrá en la atmósfera baja mayor humedad, implicando ésto mayor presencia de vapor de agua. En tal sentido, puede ser considerado como un indicador, pues de forma implícita intervienen variaciones tanto en presión como en temperatura del agua y del aire. Un ambiente húmedo y en aumento, junto al clima tropical de la región, conducirían a cambios térmicos a lo largo del tiempo (Cioce, 2009a).

A partir de comparaciones y análisis cualitativos de las diferentes variables climáticas consideradas y del vapor de agua estimado en la estación MARA vía GPS, se ha logrado establecer el grado de interrelación entre ellas para el periodo del ensayo, lo que motiva darle continuidad tanto a la adquisición de dichos datos como a la estimación del IWV con el fin de definir tendencias mayormente sustentables función en del tiempo.

Figura 9. Temperatura, humedad relativa y vapor de agua integrado para junio de 2009.



Figura 10. IWV e ITH para junio de 2009.



Figura 11. Vapor de agua integrado y temperatura de punto de rocío para mayo y junio de 2009.

Conclusiones

Se ha implementado una metodología para la cuantificación del vapor de agua troposférico en el área de la ciudad de Maracaibo, basada en el uso del GPS, herramienta ampliamente utilizada en estudios atmosféricos a nivel mundial y que por primera vez se emplea en el contexto nacional. La misma consistió en la determinación del ZWD con una consistencia interna de ± 3 mm, sobre la estación MARA, luego de un procesamiento riguroso de observaciones GPS de alta precisión, tomando en cuenta variables meteorológicas.

La conversión del ZWD a IWV vino dada por la dependencia existente entre ambas magnitudes, de manera que se estimó la cantidad de vapor de agua a intervalos de 30min durante 46 días. La calidad interna de la estimación se asumió en un valor nominal de ± 0.88 kg·m⁻². A partir de patrones de calidad externos, se obtuvieron diferencias medias en el orden de ± 8 kg·m⁻², lo que se considera aceptable ante la naturaleza del modelo empírico usado como patrón y las características de la estimación vía GPS. No obstante, los ensavos a nivel mundial han demostrado que la recuperación del vapor de agua troposférico de las observaciones GPS es efectiva, confiable y exacta, en comparación con las técnicas clásicas de la meteorología. Además, una comparación con registros de radiosondas lanzadas en el país aportaría un control efectivo de los resultados derivados a partir de ésta investigación.

Es necesario evaluar otros modelos para la conversión del retardo húmedo a vapor de agua integrado, especialmente en lo inherente a la predicción de la temperatura media de la troposfera, parámetro de gran relevancia en su estimación. Esto permitirá un adecuado análisis de la integridad de las estimaciones en relación con la ubicación y la época del año.

La metodología implementada en este trabajo para la cuantificación del IWV vía GPS resultó altamente efectiva y aplicable en cualquier lugar, siempre y cuando se disponga de los requerimientos mínimos para tal fin, lográndose establecer una plataforma observacional de vanguardia, con ventajas significativas respecto a técnicas convencionales, lo que permitirá desarrollar estudios de interés para la geodesia y ciencias de la atmósfera. Para que los métodos empleados en este estudio puedan ser aplicados en otras locaciones de interés en el país, es necesario adecuar las demás estaciones de observación GPS actualmente en funcionamiento, y aquellas que llegaren a instalarse y formar parte de REMOS, con instrumental meteorológico de alta precisión. Ello permitiría un seguimiento del vapor de agua troposférico a escala nacional, mediante una infraestructura geodésica.

De esta manera, la contribución con el estudio del cambio climático en la región y su cuantificación, resultará a partir de la obligatoria derivación, correlación y análisis de series de tiempo con extensiones multianuales, una vez que la obtención del vapor de agua como principal gas de efecto invernadero, ha sido posible mediante la técnica GPS.

Finalmente, el desarrollo y consolidación de una nueva línea de investigación referente al seguimiento y evaluación del cambio global mediante técnicas geodésicas, resulta conveniente y sostenible en el tiempo, lo que abre múltiples posibilidades para el desarrollo de estudios multidisciplinarios sobre tópicos ambientales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración prestada por el Laboratorio de Química Ambiental de la Facultad Experimental de Ciencias-LUZ y el Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño-LUZ, en el suministro de datos e información de interés.

REFERENCIAS

- Bates B, Kundzewicz Z, Wu S, Palutikof J (2008) *El Cambio Climático y el Agua*. Documento Técnico VI del IPCC. Secretaría del IPCC. Ginebra, Suiza. pp. 15-19.
- Beutler G, Bock H, Dach R, Fridez P, Gäde A, Hugentobler U, Jäggi A, Meindl L, Mervart L, Prange L, Schaer S, Springer T, Urschl C, Walser P (2004) Bernese GPS Software v 5.0. Astronomical Institute. University of Bern. Berna, Suiza.
- Bevis M, Businger S, Herring T, Rocken C, Anthes R, Ware R (1992) GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. J. Geophys. Res. 97 (D14): 15787-15801.
- Bevis M, Businger S, Chiswell S, Herring T, Anthes R, Rocken C, Ware R (1994) GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water. J. Appl. Meteorol. 33: 379-386.

- Bos M, Scherneck H (2009) Ocean Tide Loading Provider. Onsala Space Observatory. Onsala, Suecia. www.oso.chalmers. se.
- Cioce V (2009a) Aplicación de Observaciones GPS para la Cuantificación del Vapor de Agua Troposférico en la Ciudad de Maracaibo. Tesis. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. pp. 57, 68.
- Cioce V (2009b) TROPOSWASSER v 1.0: Aplicación Automatizada para el Cálculo del Vapor de Agua en la Troposfera a Partir de Observaciones Satelitales GPS. Laboratorio de Geodesia Física y Satelital. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. pp. 1-5.
- Dach R, Hugentobler U, Fridez P, Meindl M (2007) Bernese GPS Software Version 5.0: User Manual. Astronomical Institute. University of Bern. Berna, Suiza. pp. 180-182.
- Hagemann S, Bengtsson L, Gendt G (2002) On the Determination of Atmospheric Water Vapour from GPS Measurements. Report N° 340. Max-Planck Institut für Meteorologie. Hamburgo, Alemania. pp. 6-22.
- Heise S, Wickert J, Beyerle G, Schmidt T, Reigber C (2006) Global monitoring of tropospheric water vapor with GPS radio occultation aboard CHAMP. *Adv. Space Res.* 37: 2222-2227.
- Heise S, Dick G, Gendt G, Schmidt T, Wickert J (2009) Integrated water vapor from IGS ground-based GPS observations: initials results from global 5-min data set. Ann. Geophys. 27: 2851-2859.
- Kuo Y, Sokolovskiy S, Anthes R, Vandenberghe F (2000) Assimilation of GPS radio occultation data for numerical weather prediction. *Terr. Atm. Ocean. Sci. 11*: 157-186.
- Leandro M (2007) Recuperação de Perfis Atmosféricos a Partir de Ocultação GPS: Fundamentos, Implementação e Análise de Resultados. Tesis. Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, Brasil. pp. 5-82.
- Leandro R, Langley R, Santos M (2008) UN-B3m_pack: a neutral atmosphere delay package for radiometric space techniques. *GPS Solut.* 12: 65-70
- Leick A (2004) GPS Satellite Surveying. 3^a ed. Wiley. Hoboken, NJ, EEUU. pp. 228-291.
- Letellier T (2004) Etude des Ondes de Marée sur les Plateux Continentaux. Tesis. Université de Toulouse. Francia. XXX pp.
- Misra P, Enge P (2006) GPS: Signals, Measurements and Performance. 2^a ed. Ganga-Jamuna Press. Lincoln, MA, EEUU. pp. 199-224.
- NGS (2009) GPS Antenna Calibration. National Geodetic Survey. www.ngs.noaa.gov.
- Niell A (1996) Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelength. J. Geophys. Res. 101: 3227-3246.
- Paroscientific (2001) Meteorological Measurement Systems. Paroscientific Inc. www. paroscientific.com.

- Saastamoinen J (1973) Contribution to the theory of atmospheric refraction. Part II: Refraction corrections in satellite geodesy. *Bull. Géod.* 107: 13-34.
- Sánchez L (2006) Fundamentos Teóricos para el Procesamiento de Información GNSS Utilizando el Software Científico Bernese. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut. Münich, Alemania. pp. 110-154.
- Sapucci L (2001) Estimativa do Vapor d'Agua Atmosférico e Avaliação da Modelagem do Atraso Zenital Troposférico Utilizando GPS. Tesis. Universidade Estadual Paulis-

ta. Presidente Prudente, Brasil. pp. 11-19, 78-81.

- Sapucci L (2005) Estimativa do IWV Utilizando Receptores GPS em Bases Terrestres no Brasil: Sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia. Tesis. Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, Brasil. pp. 46-63.
- Schüler T (2001) On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation. Tesis. Universität der Bundeswehr München. Münich, Alemania. pp. 129-189.
- Seeber G (2003) Satellite Geodesy. 2^a ed. Gruyter. Berlín, Alemania. 61 pp.

- Teunissen P, Kleusberg A Eds. (1998) GPS for Geodesy. 2^a ed. Springer. Berlin, Alemania. pp. 599-622.
- Vianello R, Alves A (1992) Meteorologia Basica e Aplicações. Universidade Federal de Viçosa. Brasil. pp. 449
- Weiner R, Matthews R (2003) Environmental Engineering. 4^a ed. Butterworth-Heinemann. Burlington, MA, EEUU. 361 pp.
- Xu G (2007) GPS Theory, Algorithms and Applications. 2^a ed. Springer. Berlin, Alemania. pp. 87-131.

DETERMINING TROPOSPHERIC WATER VAPOR BY GPS OBSERVATIONS: FIRST EXPERIMENTS IN VENEZUELA Víctor Cioce, Melvin Hoyer, Eugen Wildermann, Giovanni Royero and Altamira Díaz

SUMMARY

Satellite geodetic techniques implementation has made it possible to retrieve and analyze information about the terrestrial atmosphere. An example is the quantification and monitoring of tropospheric water vapor, a variable of great interest for weather, meteorology and atmospheric chemistry studies, considered as the most important greenhouse gas. This paper describes the first experiences in Venezuela to retrieve information by GPS, based on a processing strategy through Bernese GPS Software v5.0, designed to estimate the non-hydrostatic zenith delay of satellite signal recorded on a permanent station located in the west of the country, where in situ meteorological data was considered. Only 46 days of data were processed, reaching mean values in the humid zenithal delay of 0.34m. Taking into account the close dependence respective to neutral atmosphere water vapor, this estimation and the subsequent conversion to integrated water vapor was carried out by TROPOSWAS-SER v1.0, a software developed for this purpose. Generation of time series revealed gaseous water mean presence of $46kg \cdot m^{-2}$ as minimum and $65kg \cdot m^{-2}$ as maximum. Besides the characterization of both variables, it will be possible to begin their continuous monitoring, contributing with geodesy and atmospheric sciences research.

DETERMINAÇÃO DO VAPOR DE AGUA TROPOSFÉRICO A TRAVÉS DE OBSERVAÇÕES GPS: PRIMEIROS ENSAIOS NA VENEZUELA

Víctor Cioce, Melvin Hoyer, Eugen Wildermann, Giovanni Royero e Altamira Díaz

RESUMO

A implementação de técnicas geodésicas satelitais tem feito possível a determinação e análise de informação sobre a atmosfera terrestre. Exemplo disto é a quantificação e acompanhamento do vapor de agua troposférico, variável de grande interesse para o estudo do clima, meteorologia e química atmosférica, e considerado o principal gás de efeito estufa. Este trabalho descreve as primeiras experiências na Venezuela sobre a aplicação do GPS para sua obtenção, o que foi possível ao desenhar uma estratégia de processamento com o Bernese GPS Software v5.0, orientada à estimativa do retardo zenital no hidrostático do sinal satelital captado desde uma estação fixa situada no ocidente do país e na que foram considerados dados meteorológicos in situ. Somente se processaram 46 dias de dados, atingindo valores médios de 0,34m no retardo zenital úmido. A partir de dita estimativa e diante da estreita relação com o vapor de agua na atmosfera neutra, se realizou a correspondente conversão a vapor de agua integrado, com o auxilio do TROPOSWASSER v1.0, aplicação desenvolvida para esta finalidade. As séries de tempo geradas revelaram em média a presença mínima e máxima de 46kg·m⁻² e 65kg·m⁻², respectivamente, de agua gasosa. Além de caracterizar ambas as variáveis, será possível iniciar a monitorização contínua das mesmas, favorecendo assim ao desenvolvimento de investigações no âmbito da geodésia e ciências da atmosfera.