

## DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE VAPOR DE AGUA PRECIPITABLE (PWV) A PARTIR DE MEDICIONES GPS: PRIMEROS RESULTADOS EN ARGENTINA.

*Fernández L.I., Meza A.M., Natali M.P*

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias. Astronómicas y Geofísicas. Univ. Nac. de La Plata. (FCAGLP-UNLP).  
Paseo del Bosque s/n, B1900FWA, La Plata, Argentina.

Email: lauraf@fcaglp.unlp.edu.ar, ameza@fcaglp.unlp.edu.ar, paula@fcaglp.unlp.edu.ar

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Argentina.

### RESUMEN

La propuesta de este trabajo consiste en el uso de GPS (Global Positioning System) para determinar el contenido de vapor de agua precipitable sobre Argentina, aprovechando las ventajas del sistema: bajo costo, medición continua en todos los puntos del planeta y en cualquier condición climática; proveyendo precisiones y exactitudes comparables a las de las técnicas clásicas. La estimación del PWV (vapor de agua precipitable) integrado en la dirección cenital de la estación a partir de mediciones GPS constituye la primera y más elemental de las determinaciones realizadas por la Meteorología GPS. Con este nombre se alude al conjunto de trabajos interdisciplinarios llevados a cabo por científicos de las ciencias atmosféricas junto a geodestas, principalmente. Esta novedosa disciplina nacida a principios de la década de los 90 (Bevis et al., 1992) ha avanzado hasta posibilitar la tomografía del vapor de agua en una dada región (Bi et al., 2006). Sin embargo, su aplicación más conocida consiste en la asimilación del dato de vapor de agua, obtenido a tiempo casi real, en modelos numéricos de predicción del clima. La aplicación de esta metodología es novedosa en Argentina. En este trabajo se plantea la generación de valores de PWV como un subproducto del procesamiento geodésico preciso, utilizando las observaciones GPS disponibles para las estaciones de la Red Argentina de Estaciones Permanentes GPS (RADEP), que además poseen una estación meteorológica asociada. Luego de explicar detalladamente la obtención del dato, se explican las ventajas y diferencias de esta metodología con respecto a las determinaciones clásicas hechas con radiómetros o radiosondas. La técnica se ejemplifica presentando los resultados de PWV calculados para las estaciones GPS permanentes LPGS (La Plata, Buenos Aires) y RIOG (Río Grande, Tierra del Fuego). Finalmente se discute el estado del arte de la Meteorología GPS en el contexto internacional, se describen algunas aplicaciones previas en Argentina, y se plantean las potencialidades y posibilidades de abordar trabajos interdisciplinarios en Argentina en un futuro cercano.

**Palabras clave:** Retraso cenital troposférico, Vapor de Agua Precipitable, GPS, Red Argentina de Estaciones Permanentes GPS (RADEP).

### ABSTRACT

The proposal of this work consists of the usage of GPS (Global Positioning System) to determine the precipitable water vapor content over our country, taking advantage of the benefits of the GPS: lower costs, possibility of measurements at any point of the planet and under any climatic condition; providing precisions and accuracies comparable to those of the classic technologies. The estimation of PWV (Precipitable Water Vapor) integrated at the zenithal direction of the station from GPS measurements constitutes the first one and more elementary of the determinations realized by the GPS Meteorology. With this name one refers to the set of interdisciplinary works carried out by scientists of the atmospheric sciences along with geodesists and geophysicists, principally. This new discipline was born at the beginning of the decade of the 90 (Bevis et al., 1992). It has advanced up to making the tomography of the water vapor possible in a given region (Bi et al., 2006). Nevertheless, its best known application consists of the assimilation of the water vapor data, obtained in almost real time, in numerical weather models. The application of this methodology is new in Argentina. In this work we present the generation of PWV values as a sub product of the precise geodetic processing. The last must be done by using the GPS observations from the stations belonging to the RADEP (Argentinean network of permanent GPS stations) but they must have a meteorological station co-located. After

explaining how to obtain the information, the advantages and differences of this methodology are explained with regard to the classic determinations from radiometers or radiosondes. The application is exemplified presenting PWV's results calculated for the GPS permanent stations LPGS (La Plata, Buenos Aires) and RIOG (Río Grande, Tierra del Fuego). Finally, the state of the art of the GPS Meteorology is discussed in the international context and some previous applications in Argentina are also described. Concluding, we discuss the potentials and possibilities of establishing interdisciplinary works in this field in Argentina in a nearby future.

**Keywords:** Tropospheric zenith delay, Precipitable Water Vapor (PWV), GPS, Red Argentina de Estaciones Permanentes GPS (RAdeP).

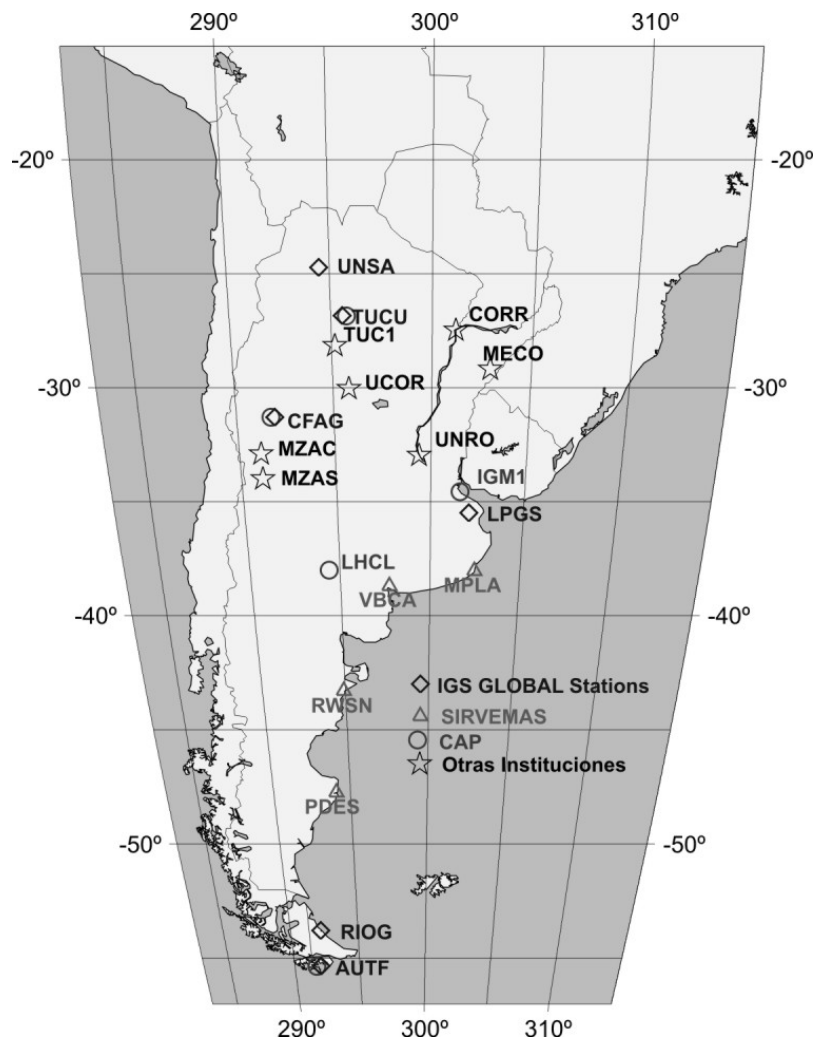
## INTRODUCCIÓN

Actualmente, y además de las aplicaciones puramente geodésicas, nos hemos acostumbrado a oír acerca de las múltiples aplicaciones comerciales del sistema de posicionamiento global GPS: rastreo y/o posicionamiento de vehículos en ruta, barcos, complemento de los sistemas precisos de aeronavegación, etc. Todas estas aplicaciones generalmente están vinculadas al fin mismo por el cual el sistema fue creado, esto es, brindar posiciones (y/o velocidades) de alta precisión y confiabilidad.

Hoy día Argentina posee una red geodésica constituida por varias estaciones GPS operando de manera continua, muchas de las cuales poseen estaciones meteorológicas. Dicha red (Red Argentina de Estaciones Permanentes GPS, RAdeP), esta formada por 19 Estaciones receptoras de las radio señales GPS, establecidas de modo permanente con el fin de cumplir con un claro objetivo geodésico: la materialización del Marco de Referencia Terrestre Internacional (International Terrestrial Reference Frame, ITRF) en Argentina, a través de la determinación de coordenadas y velocidades de desplazamiento tectónico de las estaciones con precisión milimétrica. Las estaciones de la RAdeP (ver Tabla 1 y Figura 1) trabajan dentro de un proyecto internacional con el objetivo de crear un centro regional del IGS (Internacional GNSS Service) en Sudamérica.

**Tabla 1.** Estaciones que componen la RAdeP (Red Argentina de Estaciones Permanentes) GPS.

COD	LUGAR	LAT (S)	LON (O)	ENTIDAD
AUTF	Ushuaia	54.8	68.3	Centro Austral de Investigaciones Científicas (CADIC)/Instituto Geográfico Militar (IGM)/Univ. Memphis y Hawaii (UMH)
CFAG	San Juan	31.6	68.2	Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES)/IGM/ UMH
CORR	Corrientes	27.46	58.95	Catastro de Corrientes (CC)
IGM1	IGM Cabildo	34.5	58.4	IGM/ UMH
LHCL	Lihue Calel	38.0	65.5	Administración Parques Nacionales (APN)/IGM/ UMH
LPGS	La Plata	34.9	57.9	Fac. Cs. Astronómicas y Geofísicas La Plata (FCAGLP)/ GeoForschungsZentrum, Potsdam (GFZ)
MECO	Mercedes	29.18	58.98	CC
MPLA	Mar del Plata	38.0	57.5	FCAGLP/ Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI)/Serv. Hidrografía Naval (SHN)
MZAC	Mendoza	32.89	68.87	Centro Regional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Mendoza (CRICYT)
MZAS	San Rafael	34.61	68.46	Dirección Provincial de Catastro de Mendoza/CRICYT
PDES	Puerto Deseado	47.75	65.91	FCAGLP/DGFI/SHN
RIOG	Río Grande	53.8	67.8	FCAGLP/GFZ
RWSN	Rawson	43.3	65.1	Dirección Provincial de Catastro e Información Territorial, Neuquén (DPCeIT)/FCAGLP/DGFI
TUC1	Tucumán	26.83	65.19	Dirección Gral. de Catastro de la Pcia. de Tucumán
TUCU	Tucumán	26.8	65.2	Univ. Nac. de Tucumán/ IGM/ UMH
UCOR	Córdoba	31.4	64.2	Univ. Nac. de Córdoba
UNRO	Rosario	32.95	60.62	Univ. Nac. de Rosario
UNSA	Salta	24.7	65.4	Univ. Nac. de Salta/ UMH
VBCA	Bahía Blanca	38.7	62.3	Univ. Nac. del Sur/FCAGLP/DGFI



**Figura 1.** Mapa de la ubicación para las distintas estaciones que componen la RAdeP (Red Argentina de Estaciones Permanentes) GPS. Los distintos símbolos refieren a las diferentes campañas a las cuales dichas estaciones están afectadas.

Los datos son recibidos y almacenados por las estaciones de la RAdeP y se utilizan como entrada a un software científico de procesamiento preciso. Los detalles de dicho procesamiento se desarrollarán extensamente en las secciones siguientes.

Los principales productos de este proceso son las coordenadas y velocidades de las estaciones. Dicho cálculo está a cargo del Centro de Procesamiento La Plata (CPLAT). Este último es parte del grupo Geodesia Espacial y Aeronomía (GESA) y pertenece a la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata. CPLAT es un centro que se especializa en elaborar productos derivados de las Estaciones Permanentes (EP) ubicadas en América del Sur. Fue creado en 2004 y cuenta entre sus objetivos: la materialización y mantenimiento de un marco de referencia para la República Argentina y la generación de mapas de contenido total electrónico vertical (VTEC) para América del Sur, así como del cálculo del contenido de vapor de agua integrado en la dirección vertical. Aunque esta última actividad se desarrolló solo para algunas estaciones de la red y no se realizan de manera rutinaria. Asimismo, CPLAT se encarga de realizar notas informativas periódicas sobre el estado de las EP y los productos derivados de ellas, así como de participar en la organización y el dictado de talleres nacionales y regionales de las estaciones GPS permanentes.

El propósito de este trabajo consiste en mostrar los resultados de la determinación del PWV (del inglés, Precipitable Water Vapor, vapor de agua precipitable) integrado sobre el cenit del observador

usando observaciones GPS. Este valor también se lo conoce como IPWV (Integrated Precipitable Water Vapor).

Según su definición, el IPWV en la dirección cenital del observador es la altura de agua equivalente resultante de la condensación del vapor de agua presente en la columna troposférica.

A principio de los '90 comienza a usarse el sistema GPS para medir el vapor de agua precipitable que es proporcional al retardo de vapor de agua integrado (Bevis et al., 1992). La atmósfera terrestre causa un retardo en el tiempo de viaje de la señal de radio GPS desde el satélite al receptor. Este retraso se modela como la suma de dos contribuciones (seca y húmeda), cada una de ellas calculada como el producto de un retardo en la dirección cenital multiplicado por una función de mapeo dependiente del ángulo de elevación de la señal recibida.

La aplicación que describimos a continuación es inédita en Argentina. Sin embargo esta muy bien probado que la determinación de PWV derivada a partir de la determinación de retrasos cenitales troposféricos usando GPS producen una determinación coherente de las variaciones del vapor de agua precipitable (Elgered et al., 1997).

El observable GPS (pseudorange) no es otra cosa más que una señal en ondas de radio que viaja desde un satélite activo emitiendo a 20000 Km. de altura hasta a un receptor en tierra.

En su camino la señal atraviesa la ionosfera, pero por ser este un medio dispersivo puede aplicarse una combinación lineal de las dos frecuencias de la onda portadora y de tal suerte se elimina el efecto ionosférico. No sucede lo mismo con la troposfera. Este es un medio no dispersivo que altera a la señal, provocando retrasos en el tiempo de viaje respecto del tiempo que tardaría en recorrer esa misma distancia en el vacío.

La troposfera constituye así una fuente de error para el observable GPS que normalmente se utiliza en el relevamiento geodésico. Usualmente con el objetivo de minimizar el efecto troposférico, se utilizan modelos (Hopfield, 1969; Saastamoinen, 1973). Estos modelos dividen la influencia de la troposfera en una contribución seca y una componente húmeda. Esta última se modela en función de la humedad relativa, y por lo tanto del PWV.

De este modo, el retraso cenital troposférico total a la señal GPS hará las veces de dato para el presente trabajo.

El PWV es uno de los principales gases que pueden participar en el calentamiento global. Este gas es tanto un síntoma como una causa del efecto invernadero. El agua continuamente se evapora y condensa transportando calor alrededor de la Tierra y entre la superficie y la atmósfera. De aquí que el vapor de agua es un constituyente atmosférico altamente variable tanto temporal como espacialmente. Además, entender el comportamiento del vapor de agua es de vital importancia para la formulación de modelos climáticos realistas. Por lo anterior es necesario enfatizar en la importancia de la asimilación de todos los datos PWV confiables y disponibles para una dada región, tales como los provenientes de las estaciones GPS de la RAdeEP.

Describiremos sencillamente la obtención del dato PWV GPS a partir del reproceso de una red geodésica de alta precisión. A continuación se reseñarán ventajas y diferencias del valor obtenido con GPS y su equivalente determinado a partir de radiosondas o radiómetros de vapor de agua. Luego presentaremos como ejemplo una aplicación del método a la determinación el PWV sobre las estaciones de La Plata y Río Grande.

Para finalizar, analizaremos el estado del arte de la técnica en Argentina, su evolución inmediata y sus posibilidades futuras. Asimismo, se proponen algunos campos de aplicación interdisciplinarios que involucran a la Astronomía, la Climatología y la Meteorología.

## MODELO MATEMATICO DE LAS OBSERVACIONES GPS

La ecuación de observación básica GPS plantea la distancia que separa el satélite emisor de radio ondas con el receptor en Tierra.

$$\Phi_i = \rho + c (\Delta t^S - \Delta t_R) + N\lambda_i + IONO_i + TD + \varepsilon \quad (1)$$

donde el superíndice S refiere al satélite, el subíndice i refiere a la estación. El vector  $\rho$  alude a la distancia geométrica entre el satélite y la estación, expresado en términos de las coordenadas de ambos. Se añade una corrección por refracción debido al cruce de la señal por la ionosfera (IONO) y

otra corrección por refracción debido al cruce de la señal por la troposfera (Tropospheric Delay, TD). Finalmente, deben considerarse dos correcciones debidas a la diferencia de marcha entre el reloj del receptor ( $\Delta t_R$ ) y el reloj del satélite ( $\Delta t^S$ ), además de la corrección por ambigüedades (N). (Hofmann-Wellenhof et al., 1992; Kleusberg et al, 1996).

Como ya se indicó precedentemente, el efecto de la ionosfera se elimina con el uso de dobles frecuencias. Sin embargo, dado que la troposfera constituye un medio no dispersivo con respecto a las ondas de radio, la corrección troposférica es independiente de las frecuencias, y no puede removerse a través de algoritmos numéricos que involucren frecuencias como en el caso de la ionosfera.

La ecuación 1 representa el dato crudo GPS. Para un dado lugar (mismo  $i$ ) se acumulan tantas ecuaciones 1 como satélites sobre el horizonte de ese lugar sean visibles en ese momento. Típicamente los datos se registran cada 30 segundos y se acumulan en archivos diarios. Este gran volumen de datos debe someterse a un riguroso y cuidado proceso de análisis antes de brindarnos un valor aceptable del retraso troposférico total a partir del cual deduciremos la cantidad de vapor de agua precipitable integrado sobre el cenit del observador.

### **PROCESAMIENTO GEODÉSICO PRECISO DE LAS OBSERVACIONES GPS: OBTENCIÓN DE LAS COORDENADAS**

La metodología utilizada para obtener el retardo troposférico total exige procesar dos veces el paquete de datos GPS siguiendo el procedimiento que se detallará en las próximas dos sesiones.

Durante el primer procesamiento (o proceso primario) descrito a continuación, se obtendrán las coordenadas de las estaciones. Posteriormente, en el reproceso, se estimarán los retrasos troposféricos para cada una de las estaciones involucradas en la red. En este segundo paso, las coordenadas de las estaciones ya no serán una incógnita del problema sino un dato.

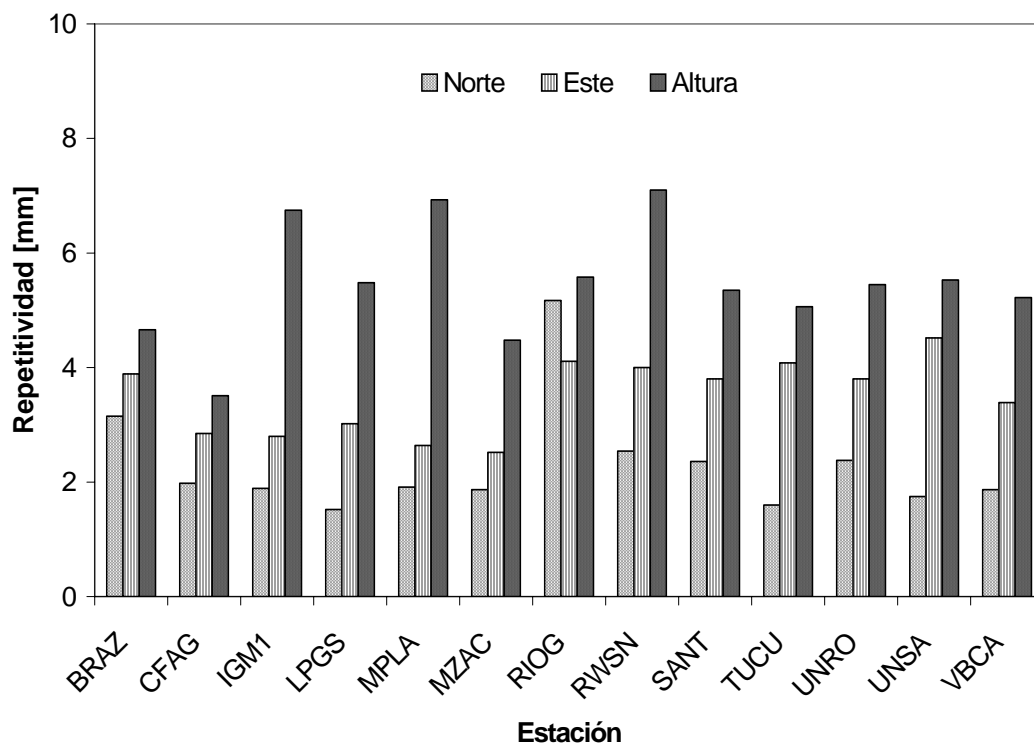
El cálculo de las observaciones fue realizado con el paquete de procesamiento científico Bernese GPS V5.0 (BSW) (Dach et al., 2007). Este conjunto de programas viene siendo desarrollado desde mediados de los años 80 en el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna, por M. Rothacher, G. Beutler, W. Gurtner, E. Brockmann y L. Mervart, y constituye aún en la actualidad un producto en continuo desarrollo. En esta sección se describirán las características principales del procesamiento de las observaciones GPS, para mayores detalles sobre la metodología aplicada en el cálculo se puede consultar: (Moirano, 2000; Natali, 2000).

El software utilizado emplea dobles diferencias de fase. Esto permite, por un lado, eliminar el efecto de los errores en los relojes de los receptores y, por otro, hacer despreciables las consecuencias de los errores de los relojes de los satélites

Se utilizaron efemérides precisas combinadas del IGS. Para conocer la posición del satélite en todos los instantes de observación, se obtuvo un arco de órbita diario para cada satélite, caracterizado por los 6 parámetros keplerianos y nueve parámetros utilizados para modelar el efecto de presión de radiación solar. Las efemérides precisas también proveen las correcciones a los relojes de los satélites. Estas correcciones fueron ajustadas para cada satélite mediante un polinomio de segundo grado cada doce horas. Los efectos periódicos debidos a desplazamientos en los sitios causados por la carga oceánica se modelaron usando los coeficientes provistos por el modelo FES95.2 (<http://www.oso.chalmers.se/%7Eloading/tidemodels.html> ). Se modelaron las dobles diferencias de fase de la combinación libre de ionosfera.

En la etapa de obtención de las coordenadas precisas, se calculó el retardo troposférico utilizando el modelo de Saastamoinen (Saastamoinen, 1973) y se usó la función de mapeo de Niell (Niell, 1996). Este modelo a priori fue evaluado en superficie y extrapolado a partir de la atmósfera estándar. A la estimación del retardo cenital calculado a priori se le sumó una corrección para cada estación. Estas correcciones se estimaron cada dos horas (Kaniuth et al., 1998) a partir de las mismas observaciones GPS. En el pre-procesamiento, la tarea más delicada y laboriosa fue la detección y reparación de ciclos perdidos, ya que a pesar de que el software posee un módulo especializado para realizar esta tarea en forma automática, la obtención de resultados de la máxima calidad requiere un control manual de los valores vector por vector, lo que en muchos casos resulta en la revisión y modificación de lo realizado en el pre-procesamiento (Natali 2006; Natali et al., 2002). Para estimar las ambigüedades se utilizó la estrategia QIF (Quasi Inosphere Free) siguiendo las recomendaciones de (Dach et al., 2007; Natali, 2000). Luego del pre-procesamiento de fase, se realizaron ajustes diarios casi libres, esto es,

aplicando pesos bajos a los puntos de control. En esta etapa se eliminaron las ambigüedades antes de la inversión de la matriz normal. En un segundo paso se realizó un ajuste casi libre de toda la red de modo que el marco de referencia quedó definido por las efemérides. Esta solución combinada fue utilizada para controlar la consistencia de los resultados obtenidos analizando los residuos de transformaciones de similitud entre la solución combinada y las sesiones diarias. Tanto las soluciones individuales de las sesiones como su comparación con la combinación libre constituyen el control último del pre-procesamiento de fase. En consecuencia, en varios casos se debió revisar el pre-procesamiento a fin de corregir problemas detectados en las comparaciones. Las cantidades de interés en este análisis de repetitividad son los residuos de la transformación estimada para cada estación y en cada dirección: Norte, Este y Altura. Esto se realizó para estimar la exactitud que se tiene en la determinación de las componentes de la posición. En el caso de las coordenadas horizontales, la repetitividad diaria presenta una desviación estándar que es mejor que 3 mm., mientras que la componente vertical, es mejor que 5.5 mm, como se puede apreciar en la figura 2.



**Figura 2.** Repetitividad en las tres componentes para el periodo 25 de julio de 2004 al 18 de septiembre de 2004.

### Marco de Referencia

Esta etapa es delicada. Se debe asegurar la consistencia de las coordenadas de los puntos de control elegidos y su compatibilidad con las órbitas utilizadas en el cálculo de las observaciones. Para ello se introducen en la red una serie de puntos de control. En el experimento en estudio los puntos de control fueron LPGS, RIOG y SANT. Dichos puntos corresponden a las estaciones GPS permanentes ubicadas en La Plata, provincia de Buenos Aires, Río Grande en Tierra del Fuego y Santiago de Chile. El marco de referencia se introduce aplicando pesos a las coordenadas de los puntos de control. El factor de peso fue determinado a partir de varias pruebas que se pueden describir en dos pasos: El primer paso consiste en analizar las deformaciones causadas al aplicar distintos pesos en los ajustes finales. Esto se realiza analizando los residuos de una transformación de similitud entre las soluciones con distintos pesos y la solución libre. El segundo paso es controlar el cambio que sufren las coordenadas de los puntos de control con respecto a sus valores a priori, en el resultado de cada ajuste.

El peso óptimo se elige de manera que los residuos de la transformación de similaridad entre las soluciones pesadas y las diferencias entre las coordenadas a priori y las ajustadas de los puntos de control no fueran mayores que la desviación estándar de las coordenadas individuales obtenidas del análisis de repetitividad descrito más arriba.

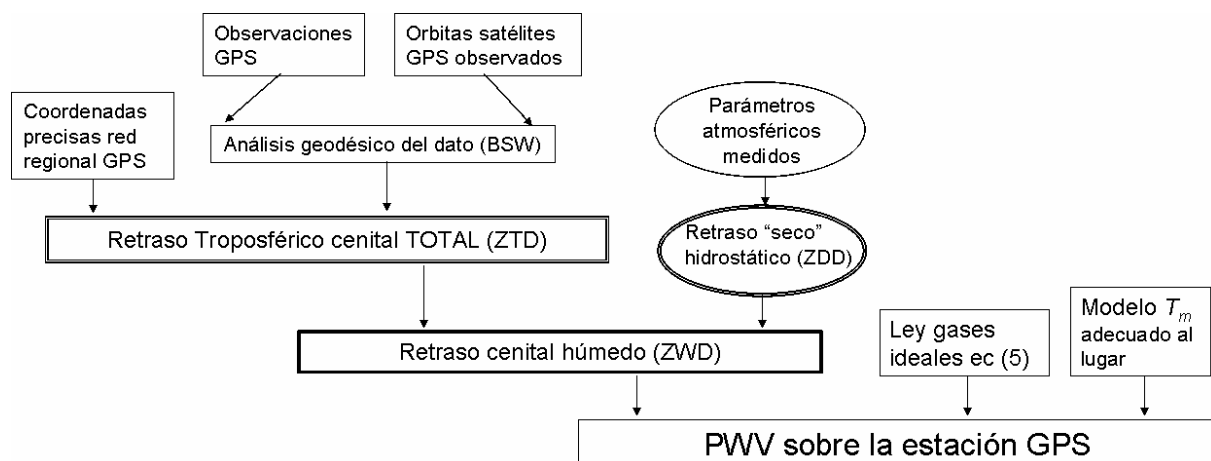
Por último se controla que el cambio que experimentan las coordenadas de los puntos de control luego del ajuste no superen los errores publicados por la solución del ITRF 2000.

De esta manera se obtienen las coordenadas precisas de las estaciones con una exactitud menor que el centímetro para las tres componentes (Norte, Este y Altura). El siguiente paso es introducir este resultado en un nuevo procesamiento para obtener valores directamente vinculados al vapor de agua precipitable.

### REPROCESAMIENTO GEODÉSICO PRECISO DE LAS OBSERVACIONES GPS: OBTENCIÓN DEL PWV

A continuación describiremos las características del reproceso de las observaciones GPS hasta la obtención de los valores de vapor de agua precipitable (PWV). Si bien en el proceso primario (el de los datos crudos GPS) se obtuvieron correcciones a los parámetros troposféricos cada 2 horas, puesto que está resolución en tiempo es suficiente para la estimación de coordenadas, ahora los retrasos troposféricos totales pueden estimarse cada 30 o 15 minutos.

La etapa de reproceso también se realiza con el software BSW. Esquemáticamente, esta etapa puede resumirse a través del diagrama de flujo mostrado en la figura 3.



**Figura 3.** Esquema del reproceso a los observables GPS realizado con el BSW. Esta etapa es posterior al procesamiento geodésico preciso (primario) y arroja como resultados los valores de IPWV para la estación.

En el reproceso, tanto las coordenadas de las estaciones (resultados del procesamiento primario) así como las orbitas de los satélites, se asumen conocidas. A la salida, BSW nos provee de una corrección troposférica cenital total (Zenit Total Delay, ZTD) para todas y cada una de las estaciones que forman la red geodésica analizada.

Las características del reprocesamiento aplicado sigue las normas sugeridas por (Duan et al., 1996) para deducir la cantidad de vapor de agua precipitable integrado a partir de observaciones GPS procesadas con el software Bernese (BSW).

Tradicionalmente la influencia de la troposfera (Zenit Total Delay, ZTD) sobre la determinación de la posición usando GPS alcanza hasta los 2.5 metros y puede dividirse en la contribución de una troposfera hidrostática o seca (Zenit Dry Delay, ZDD), asimilable a un modelo hidrostático que explica el 90% del efecto con muy buena exactitud, y una componente húmeda (Zenit Wet Delay, ZWD) relacionada al PWV, fuertemente variable e impredecible, que explica el 10% del efecto total.

$$ZTD = ZDD + ZWD \quad (2)$$

Caracterizando y cuantificando las contribuciones de las componentes a la corrección troposférica total (ZTD), podemos afirmar lo siguiente:

Componente seca (ZDD): Alude al retardo en la radio señal GPS debido al cruce de la misma a través de las moléculas de gas que constituyen la troposfera. Asume que este gas se encuentra en equilibrio hidrostático. La denominación de componente seca obedece a que la mayor contribución al retraso hidrostático proviene del aire seco. Sin embargo, esta componente también incluye una contribución del vapor de agua (Bevis et al., 1992). Su valor es del orden de 2 metros. Según (Elgered et al., 1991; Bevis et al., 1992) este efecto admite expresarse matemáticamente como:

$$ZDD = (2.2779 \pm 0.0024) P_s [1 - 0.00266 \cos(2\phi) - 0.00028 h]^{-1} \quad (3)$$

donde el retraso troposférico seco resultará en metros, si la presión atmosférica superficial ( $P_s$ ) se expresa en milibares, con  $\phi$  y  $h$  son la latitud y la altura sobre el elipsoide de referencia en kilómetros.

Componente húmeda (ZWD) Representa el retardo en la señal GPS debido a que esta se ve afectada por el momento dipolar de las moléculas de agua contenidas en la troposfera en su camino al receptor. Esta componente es errática y casi impredecible, los modelos existentes son muy imprecisos. Su valor está comprendido entre 0 y 0.5 metros.

De lo anterior, es claro que utilizando los datos meteorológicos reales de la estación, puede calcularse la componente seca usando la ecuación 3. Luego, sustrayendo la componente seca modelada del retraso troposférico total, obtendremos la componente húmeda, o dicho de otro modo, el retraso troposférico cenital húmedo.

Puesto que la corrección troposférica total se calcula cada 30 minutos, obtendremos una corrección troposférica húmeda con el mismo intervalo temporal.

Expresaremos la cantidad de vapor de agua verticalmente integrado sobre el receptor en términos de agua precipitable, esto es, como la longitud de una columna de agua líquida equivalente. Entonces el PWV puede relacionarse al ZWD en el receptor a través de la expresión:

$$PWV = \Pi ZWD \quad (4)$$

donde el ZWD tiene unidades de longitud y  $\Pi$  es una constante de proporcionalidad adimensional (Bevis et al., 1994). En particular la constante  $\Pi$  puede escribirse como (Bevis et al., 1992)

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho R_v [(k_3/T_m) + k_2]} \quad (5)$$

donde  $\rho$  es la densidad del agua líquida,  $R_v$  es la constante específica del gas para el vapor de agua en milibares ( $R_v = 461.5181 \text{ kg K}^{-1}$ ; Monico y Sapucci, 2003);  $k_2' = k_2 - m k_1$  con  $k_1$ ,  $k_2$  y  $k_3$  las bien conocidas constantes utilizadas en el cálculo de la refractividad atmosférica (Bevis et al., 1992);  $m = M_w/M_d$  es el cociente entre las masas molares del vapor de agua ( $M_w$ ) y el aire seco ( $M_d$ ). En esta experiencia utilizaremos el valor  $k_2' = 22.1 \text{ K / mb}$  calculado por (Monico y Sapucci, 2003). Finalmente,  $T_m$  alude al valor de la temperatura media pesada de la atmósfera en grados Kelvin. Esta última cantidad se define como: (Bevis et al., 1992; Bevis et al., 1994; Duan et al., 1996)

$$T_m = \frac{\int (P_v/T) dz}{\int (P_v/T^2) dz} \quad (6)$$

donde  $P_v$  es la presión parcial de vapor de agua,  $T$  es la temperatura y las integrales de línea se calculan a lo largo de una trayectoria vertical que atraviesa la atmósfera. Así,  $T_m$  varía con el tiempo y



puede estimarse usando medidas de la temperatura superficial (Bevis et al., 1992) o a través del uso de modelos numéricos de clima (Bevis et al., 1994).

En particular, (Bevis et al., 1992) han verificado empíricamente que  $T_m$  puede aproximarse a la temperatura superficial ( $T_s$ ) introduciendo un error inferior al 4% en la estimación del contenido de vapor de agua precipitable a partir de mediciones GPS y deducidos por la formula (4). Sin embargo, la estimación de los valores de  $T_m$  usando datos de  $T_s$  se deduce a partir de un modelo que debe “ajustarse” según la época del año y área geográfica de interés.

En general estos modelos se han desarrollado para el hemisferio norte (Sapucci et al., 2004). La deducción de un valor de  $T_m$  adecuado a la región de estudio es muy importante a la hora de evaluar la calidad de las estimaciones PWR usando GPS. Es por esto que para la presente aplicación en territorio Sudamericano usaremos un valor determinado empíricamente por (Sapucci et al., 2004) usando cerca de 90000 radiosondeos a partir de 12 estaciones en distintas regiones de Brasil. En particular usaremos la expresión (Sapucci et al., 2004)

$$T_m = 0.613901T_s + 0.020243 HR + 102.815 \quad (7)$$

donde  $T_s$  es la temperatura superficial en grados Kelvin y  $HR$  refiere a la humedad relativa. Esta expresión fue originalmente estimada para la región sur de Brasil y resulta por lo tanto, una estimación aceptable para la zona de La Plata (Sapucci, 2008; comunicación personal), sin embargo no es la más adecuada para la región de Río Grande, donde el clima es completamente diferente.

La estación de Río Grande, cerca de Ushuaia, esta afectada por un clima frío continental. Por lo tanto, adoptamos el modelo mixto que también involucra a la temperatura superficial estimado por (Schueler et al., 2001). Los autores proponen distintos modelos para el calculo de la temperatura troposférica media teniendo en cuenta la variación de esta con las latitudes, las variaciones estacionales e incorporando coeficientes de conversión locales.

Según (Schueler et al., 2001) la expresión para  $T_m$  que mejor se adapta a regiones críticas ubicadas grandes latitudes (como Canadá y Siberia) es:

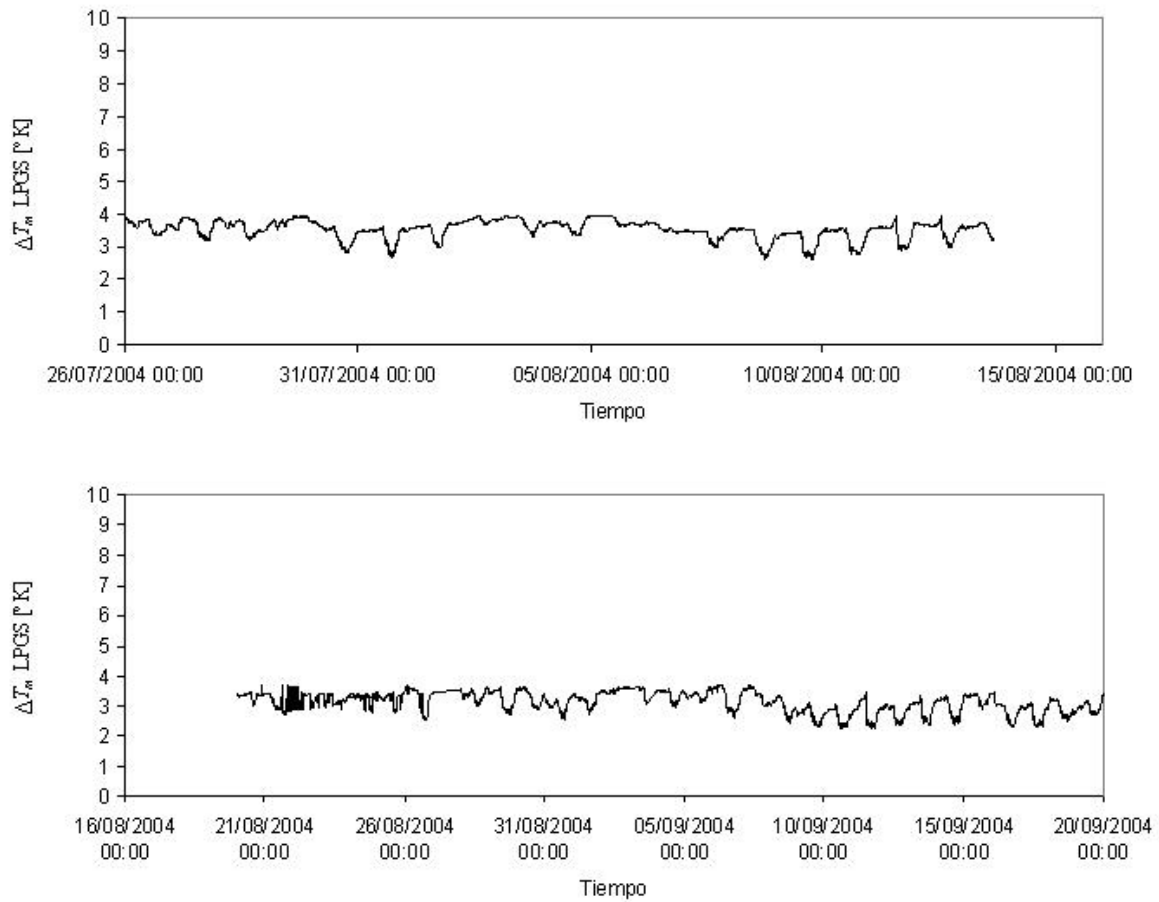
$$T_m = \bar{T}_m + \tilde{T}_m \cos\left(2\pi \frac{Doy - Doy_w}{365.25[\text{días}]}\right) + q_T T_s \quad (8)$$

donde  $\bar{T}_m$  es la temperatura media atmosférica promedio,  $\tilde{T}_m$  refiere a la amplitud de la temperatura media,  $Doy$  es el día del año para el cual se quiere estimar el valor de  $T_m$ ,  $Doy_w$  es el día 211 del año para el hemisferio sur,  $q_T$  es el parámetro amplificador de temperatura y  $T_s$  la temperatura superficial. La desviación estándar del valor  $\bar{T}_m$  obtenido a partir de esta formula se estima por debajo de los 4° C. Este modelo provee coeficientes dependientes de la estación para 334 estaciones la mayoría de las cuales pertenece al International GNSS Service (IGS).

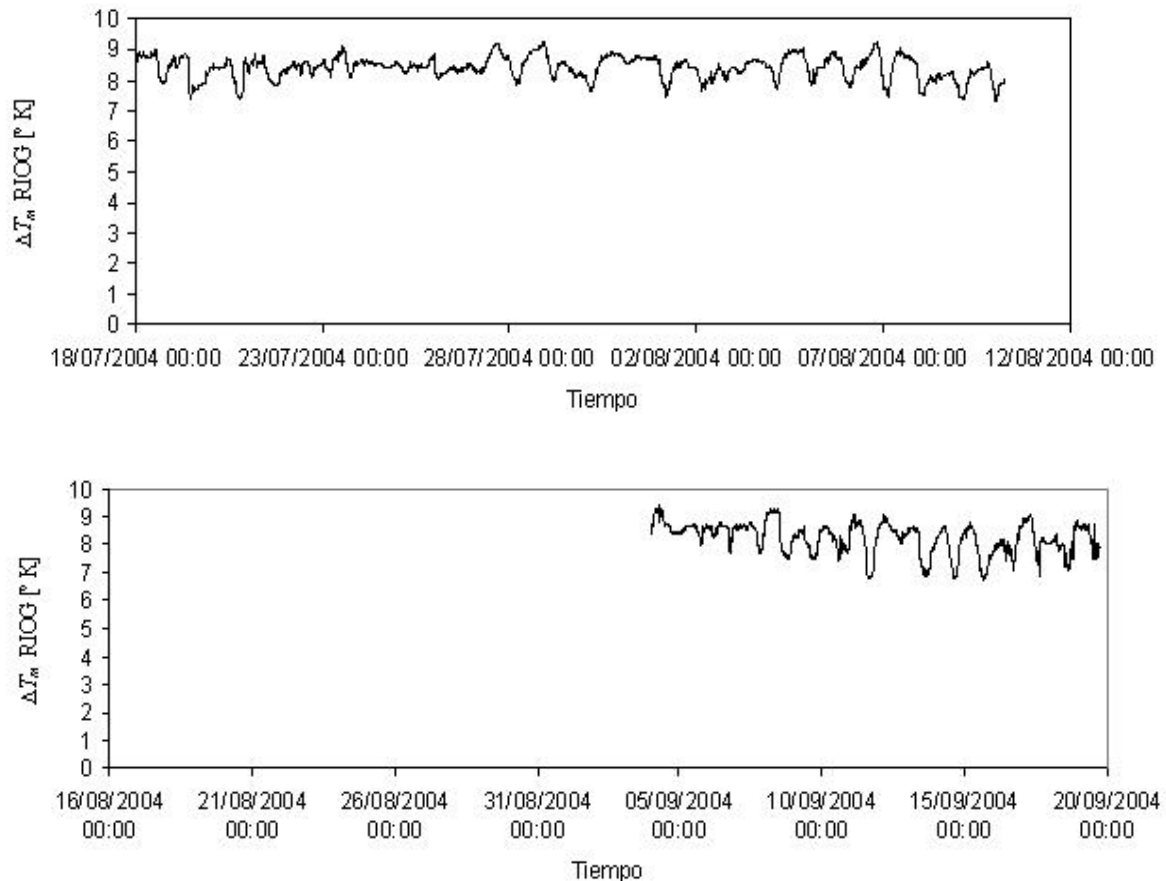
Los respectivos valores para Río Grande (Riog) son:  $\bar{T}_m = -9.7^\circ \text{ C}$ ;  $\tilde{T}_m = 0.1^\circ \text{ C}$ ;  $q_T = 0.709$ . No debe realizarse corrección adicional por altura dado que esta estación se encuentra en una región aproximadamente plana, condiciones estándar utilizadas en la deducción de las formulas involucradas. Sin embargo, es importante destacar que la exactitud prevista para el valor  $T_m$  obtenido a partir de la Ecuación (8) podría degradarse si la temperatura superficial cae por encima o por debajo de ciertos valores limites previstos para cada estación por el modelo.

En el caso de Riog, la  $T_s$  no debería ser mayor a  $20.4^\circ \text{ C}$  ni menor a  $-2.8^\circ \text{ C}$ . Dado que el periodo de estudio abarca parte del invierno en el hemisferio sur, las temperaturas mínimas caen ocasionalmente por debajo del limite impuesto. Sin embargo, estas excepciones constituyen solo el 2.67% del total de

medidas realizadas. Por lo anterior, consideramos aceptable el valor provisto por la ecuación (8) para  $T_m$  en la estación Riog.



**Figura 4.** Diferencia de los valores de temperatura media de la atmósfera para la estación La Plata ( $\Delta T_{m \text{ LPGS}}$ ) estimados según el modelo de (Sapucci et al., 2004) para la región sur de Brasil y según el modelo mixto de (Schueler et al., 2001). El cálculo se desarrolla durante el periodo 25 de julio de 2004 al 18 de septiembre de 2004.



**Figura 5.** Diferencia de los valores de temperatura media de la atmósfera para la estación Río Grande ( $\Delta T_{m\_RIOG}$ ) estimados según el modelo de (Sapucci et al., 2004) para la región sur de Brasil y según el modelo mixto de (Schueler et al., 2001). El cálculo se desarrolla durante el periodo 25 de julio de 2004 al 18 de septiembre de 2004.

Las figuras 4 y 5 nos muestran las diferencias en temperatura media pesada de la atmósfera ( $\Delta T_m$ ) estimadas según el modelo brasileño (ecuación 7) con respecto al modelo mixto de Schueler (ecuación 8), para las estaciones de La Plata y Río Grande, respectivamente. El valor medio de estas diferencias es de  $3.27^\circ$  para La Plata y  $8.33^\circ$  para Río Grande, mostrando que el modelo brasileño (Sapucci et al., 2004) estima valores mas grandes de  $T_m$  en ambos casos. Sin embargo, las diferencias son significativas en Río Grande y justifican la elección del modelo de (Schueler et al., 2001), mejor adaptado para regiones frías a bajas latitudes.

Una vez determinados los valores de la temperatura atmosférica media para cada estación ( $T_m$ ) durante el intervalo de interés, es posible calcular un valor  $\Pi$  usando la ecuación (5). Luego podremos determinar el contenido de vapor de agua precipitable integrado sobre la estación (PWV) a partir de la expresión (4).

#### **DETERMINACION DEL VAPOR DE AGUA PRECIPITABLE: RADIÓMETROS Y RADIOSONDAS Ó GPS**

Dado que la metodología para la determinación de la cantidad de vapor de agua precipitable propuesta en este trabajo no es la usualmente adoptada por los climatólogos y/o meteorólogos, creemos necesario discutir las diferencias y ventajas del método propuesto.

Como ya se mencionó previamente, el vapor de agua no está bien mezclado en la troposfera y su distribución no es homogénea ni en el espacio ni en el tiempo.

Las mediciones clásicas de contenido de vapor de agua precipitable se realizan mediante Radiómetros de Vapor de Agua (WVR) o Radiosondas (RS). Los WVRs fueron desarrollados para medir la cantidad de vapor de agua a lo largo de la trayectoria de la señal. Un WVR mide en forma continua la radiación atmosférica de cuerpo negro, la cual está afectada por la presencia de las moléculas de agua (Kleusberg y Teunissen, 1996). Los radiómetros de vapor de agua miden la emisión de temperatura de brillo del cielo en dos frecuencias características 22 Ghz. y 31.4 Ghz. que dependen de la radiación cósmica de fondo, las cantidades de vapor de agua, el agua líquida y el oxígeno presentes en la atmósfera (Gradinarsky et al., 1999). Además, estos dispositivos también se construyen en 183 GHz. tal y como se desarrolló en el observatorio de Mauna Kea (Wiedner, 1998). En general, todos los WVR son afectados por lluvias y/o densa nubosidad, produciendo estimaciones inciertas o incluso erróneas (Gradinarsky et al., 1999).

Las radiosondas refieren a un conjunto de sensores y transmisores de radio llevados a través de la atmósfera, hasta una altura de 30 Km., por medio de un globo. Estos nos permiten medir in-situ, la temperatura del aire, humedad y presión atmosférica en función de la altura. Las observaciones se transmiten inmediatamente a una estación en tierra. Sin embargo, las radiosondas tienen algunas desventajas en la resolución y la variabilidad de las cantidades de vapor de agua atmosférico. Generalmente, las estaciones de radiosondeo suelen estar separadas por varias decenas o inclusive cientos de kilómetros entre sí. Además, el envío de radiosondas se considera prescindible y por lo tanto se restringe a dos por día, típicamente a las 0:00 UT y a las 12:00 UT, en la mayoría de las estaciones (Bi et al., 2006).

Finalmente, entre los métodos clásicos también encontramos las determinaciones de los radiómetros a bordo de satélites. Estos trabajan en la frecuencia de infrarrojo y microondas, midiendo el vapor de agua atmosférico sobre su nadir (ejemplo: GOES). Los primeros sistemas satelitales proveían valiosas medidas de vapor de agua sobre los océanos, pero los datos sobre el resto de la superficie terrestre eran escasos (Ware et al., 2001). Esta dificultad se supera posteriormente con el Microwave Humidity Sounder (MHS) uno de los instrumentos europeos a bordo del MetOp-A. Esta última misión refiere al primer satélite meteorológico europeo en órbita polar, operativo desde mayo de 2007. El MHS es un radiómetro de microondas de cinco canales diseñado para explorar la humedad de la atmósfera (hielo, nubes, lluvia y nieve) en bandas de frecuencia específicas, a través de atenuación en la radiación en microondas emitida desde la superficie terrestre (<http://wdc.dlr.de/sensors/mhs/>).

Existen limitaciones comunes a todos los sistemas de determinación de vapor de agua en la atmósfera mencionados hasta aquí: elevados costos, escasa resolución espacial y temporal en áreas densamente nubladas o con precipitaciones, allí se vuelven menos exactos y hasta inoperables (Coster et al., 1996; Ware et al., 2000, 2001; Rocken et al., 2003).

Por otra parte y como ya se indicó precedentemente, a comienzos de la década de los '90 GPS comienza a utilizarse para la determinación del vapor de agua precipitable (Bevis, et al., 1992). Sin embargo, ninguna de las técnicas citadas hasta aquí puede trabajar con una exactitud mejor de 1mm. de vapor de agua precipitable.

En un análisis comparativo, debe indicarse que el equipamiento GPS es de bajo costo. Efectivamente, si comparamos el precio de un receptor GPS apto para la realización de relevamientos geodésicos de alta precisión con el costo de un WVR estándar, encontraremos que el primero solo cuesta una décima parte del precio del segundo. Además, los resultados obtenidos con GPS resultan de precisión y exactitud comparables a las determinaciones de los WVRs (Coster et al., 1996).

El sistema GPS de acuerdo a su concepción, opera las 24 horas del día en cualquier lugar del planeta y bajo cualquier condición climática. Otro punto importante es su capacidad para realizar mediciones en cualquier ángulo de elevación.

Con esta facilidad, podríamos integrar gradientes horizontales de vapor de agua. Estos últimos usados junto a modelos meteorológicos locales nos permitirían realizar pronósticos de corto alcance. Sin embargo este trabajo interdisciplinario no se abordara aquí.

Hoy día, el uso de las observaciones GPS para la estimación del PWV es una técnica probada, testeada, y extensamente aplicada. Investigaciones previas (Bevis et al. 1992) muestran comparaciones del PWV GPS con idénticos valores medidos con radiómetros de vapor de agua (WVRs) y radiosondas. Ellos demostraron que el PWV GPS se puede medir con una exactitud de 1.5 milímetros (Rocken et al., 2003). A esto deben sumarse como ventajas su alta resolución temporal que

se extiende desde algunos minutos a varias horas, su adaptabilidad a cualquier condición climática y los costos relativamente bajos.

Las estimaciones de PWV GPS deben ser comparadas con medidas similares hechas con radiómetros de vapor de agua en microondas (MWRs) para su calibración. Generalmente, el PWV GPS resulta aproximadamente 4% más seco con respecto al valor MWR. Esta característica es común y aunque se han propuesto varias teorías para explicarlo, ninguna ha tenido éxito aún (Rocken et al., 2003).

### EJEMPLO DEL CÁLCULO DEL VAPOR DE AGUA PRECIPITABLE INTEGRADO DETERMINADO A PARTIR DE OBSERVACIONES GPS

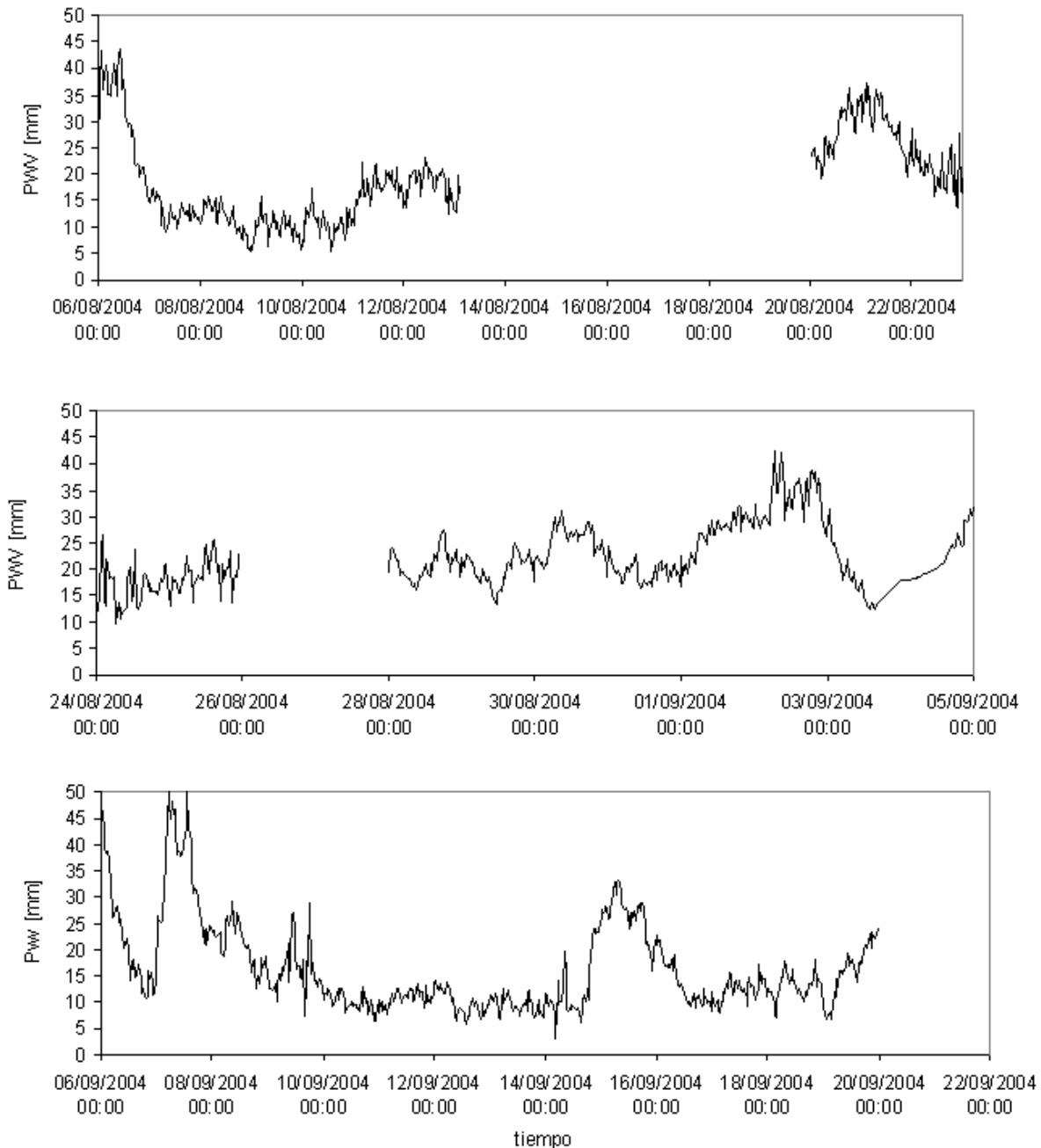
Con el objeto de calcular la cantidad de vapor de agua precipitable (PWV) a partir del retardo troposférico zenital GPS, se calculó una red geodésica. La experiencia se realizó durante los días 25 de Julio al 18 de septiembre de 2004. La red GPS seleccionada a tales fines fue la RAdEP. Esta última fue concebida con fines geodésicos, es mantenida y calculada periódicamente desde julio de 2004 por GESA en cooperación con diversas instituciones nacionales e internacionales.

En 2004 la RAdEP consistía de 15 equipos con receptores doble frecuencia y código P. Los equipos cuentan con antenas geodésicas, formando 14 líneas de base con longitudes entre 50 y 2000 Km. La inclusión de líneas de base largas nos sirve para de-correlacionar las soluciones obtenidas numéricamente.

Asimismo se contó con la cobertura completa de datos meteorológicos (temperatura, presión y humedad relativa) para las ciudades de La Plata y Río Grande, tabuladas cada 5 minutos durante el periodo de interés. Dado que las estaciones escogidas pertenecen a la red global IGS, los datos meteorológicos fueron obtenidos a través de un ftp anónimo desde la dirección: [http://www.gfz-potsdam.de/pb1/igs\\_trop\\_wg/index\\_IGS\\_TROP\\_WG.html](http://www.gfz-potsdam.de/pb1/igs_trop_wg/index_IGS_TROP_WG.html). Efectivamente, desde 1997 el IGS genera semanalmente subproductos troposféricos combinados. Estos subproductos no son otra cosa más que el promedio pesado del retraso cenital total basado en condiciones de atmósfera neutra (esto es: 1013 mb. de presión atmosférica, 15°C de temperatura y 50% de humedad relativa), sobre cada una de las estaciones que remiten datos. Entre los datos y subproductos disponibles, hallamos los datos meteorológicos reales almacenados para otras aplicaciones similares, en formato RINEX (Receiver Independent Exchange) disponibles para algunas de las estaciones que forman la red IGS.

Mostramos aquí los resultados obtenidos para La Plata y Río Grande siguiendo el proceso de (Duan et al., 1996) para obtener PWV con buena exactitud y precisión, luego de procesar las observaciones GPS con BSW y reprocesarlas siguiendo el esquema de la figura 3.

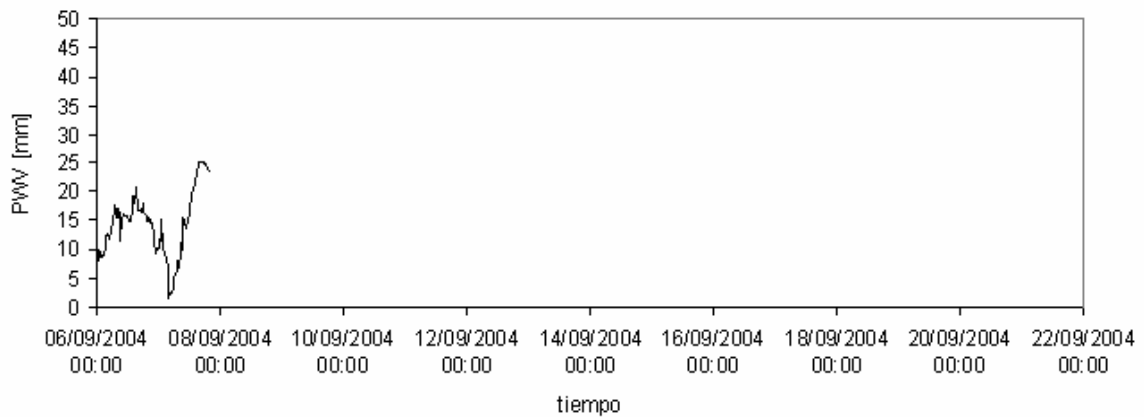
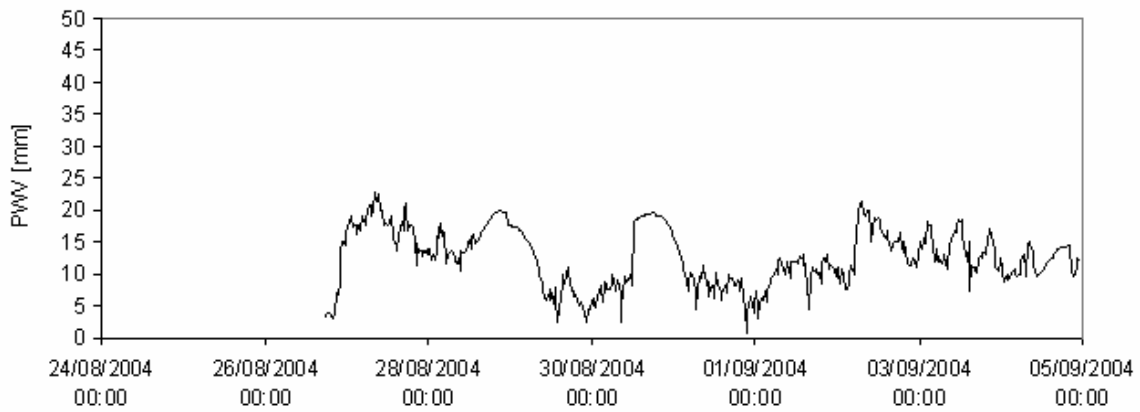
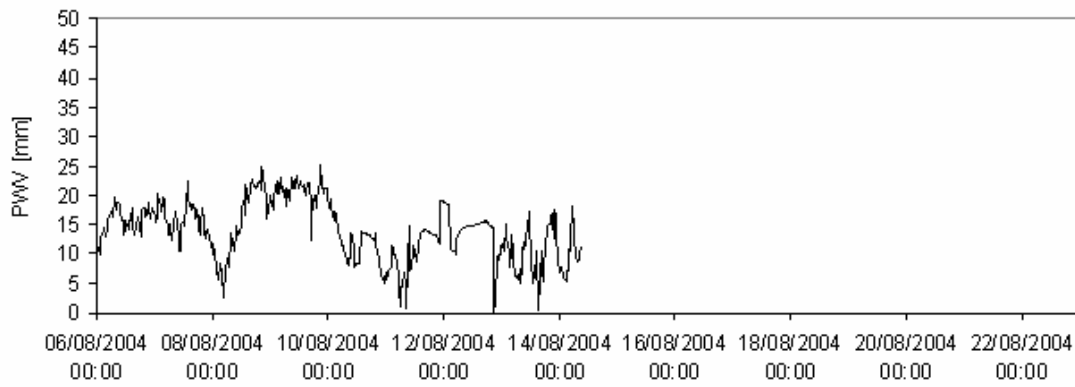
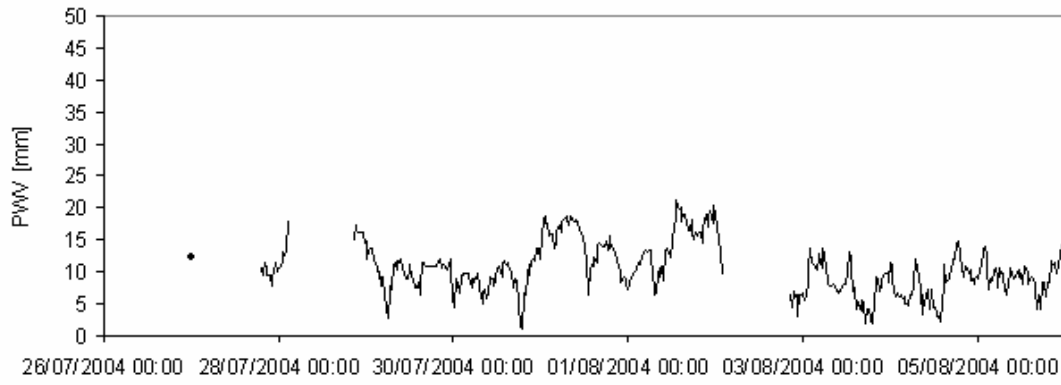




**Figura 6.** Perfiles de IPWV para la estación La Plata (LPGS) en Buenos Aires; durante las semanas GPS 1281 a 1288, correspondientes al periodo 25 de julio de 2004 al 18 de septiembre de 2004.

De la figura 6 vemos claramente que en La Plata los valores calculados de PWV nunca caen por debajo de los 10 mm. y se presentan frecuentes “picos” de humedad a lo largo del período estudiado. Suponiendo que para una dada estación de prueba se verificase un comportamiento similar al mostrado aquí, y que este comportamiento se repite para un periodo suficientemente largo, digamos un año. Entonces, el lugar estudiado no sería apto para la colocación de instrumental interferométrico, u otro instrumento que pudiera verse afectado en la calidad de sus mediciones por la presencia de las moléculas de vapor de agua en la atmósfera.

Además, son evidentes algunos máximos asociados a baja presión atmosférica y muy elevada humedad, condiciones previas a la precipitación o incluso durante tormentas. Así, los días lluviosos, y los muy húmedos se reflejan claramente en el comportamiento de la curva obtenida dado que el sistema sigue completamente operativo bajo esas condiciones.



**Figura 7.** Perfiles de IPWV para la estación Río Grande (RIOG) en Tierra del Fuego; durante las semanas GPS 1281 a 1288, correspondientes al periodo 25 de julio de 2004 al 18 de septiembre de 2004.

En la figura 7 vemos el perfil de PWV para Río Grande, Tierra del Fuego, estudiado durante el mismo periodo de tiempo. De esta figura puede verse Río Grande es un lugar menos húmedo que La Plata, aunque la cantidad de vapor de agua precipitable integrado verticalmente es aún bastante alta. El valor de PWV para Río Grande nunca cae debajo de los 5mm y alcanza los 12.5 mm en promedio durante el periodo de estudio que abarca casi dos meses.

Como antes este análisis es solo preliminar si tratamos de hallar un sitio apto para la colocación de instrumental sensible a la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera, tal como el interferométrico. Estos ejemplos nos sirven como una guía que nos permite descartar lugares extremadamente húmedos como La Plata, pero no nos permite concluir acerca de lugares potencialmente aptos. En efecto, estas conclusiones basadas en un caso supuesto sólo serán validas si se las respalda con un grafico que muestre los cuartiles de cantidad de PWV para las noches del periodo estudiado sobre la estación de prueba. Además, el periodo elegido debería contemplar la época prevista como mas húmeda del año por los modelos climatológicos o bien monitorear durante periodos muy largos (un año o mas).

Los gaps o saltos que pueden verse en ambas curvas obedecen a fallas en los receptores GPS, falta de datos meteorológicos o ambos. De nuevo, es importante destacar que el sistema es capaz de operar sin interrupciones ni alteraciones en la calidad de sus determinaciones aún en condiciones de clima adverso. Considerando que el periodo de prueba abarca parte del invierno en el hemisferio sur, es esperable por lo menos uno o más días de nevadas en latitudes tan australes como Río Grande. Sin embargo la estación RIOG produce datos GPS a tiempo real para el IGS desde hace varios años sin que las condiciones de clima invernal extremo afecten su performance.

## ESTADO DEL ARTE Y POSIBILIDADES FUTURAS

Según lo discutido hasta aquí, hoy día esta bien demostrado que el monitoreo del vapor de agua en la atmósfera usando GPS constituye un complemento a los sistemas tradicionales que resulta ser: autónomo, económico e independiente de las condiciones climáticas imperantes (Bevis et al., 1992; Rocken et al., 1993, Coster et al., 1996; Ware et al., 2000, 2001; Rocken et al., 2003; Bi et al., 2006).

Los autores miembros de GESA-UNLP hemos investigado este tema desde el año 2002 (Meza et al., 2003; Meza et al., 2005). Las primeras aplicaciones de la técnica en Argentina se desarrollaron con el fin de buscar sitios aptos para la colocación de instrumental astronómico que exige condiciones de sequedad extrema con muy alta precisión (PWV por debajo de los 4 mm.) para asegurar la calidad de sus medidas.

Desde esa fecha hasta hoy, la Red Argentina de Estaciones GPS Permanentes ha crecido en número de miembros y se ha consolidado en cuanto a la continuidad temporal y calidad de los datos GPS. Por esta razón actualmente nos encontramos trabajando en dos proyectos científicos aprobados por la Agencia de Promoción Científica y el Conicet (PICT12130 y PIP5703), con el objeto de avanzar en el estudio y la aplicación de este tópico como un subproducto valioso del procesamiento geodésico de la red GPS y para equipar con instrumental meteorológico algunas de las estaciones bajo la supervisión de GESA (Ej. VBCA) con el fin de continuar y profundizar estos estudios en cooperación con especialistas de otras disciplinas (ejemplo: Climatología, Geografía).

En los párrafos siguientes, reseñaremos brevemente la tarea realizada, así como el trabajo proyectado para el futuro próximo.

### **Búsqueda de sitios aptos para la Astronomía milimétrica**

El contenido de vapor de agua en la atmósfera terrestre es uno de los mayores problemas en la interferometría milimétrica y sub-milimétrica. El vapor de agua es un constituyente atmosférico altamente variable y sigue siendo hoy en día uno de los parámetros meteorológicos mas pobremente caracterizados. Su presencia constituye un factor limitante para la obtención de resoluciones angulares altas en observaciones interferométricas de interés Astrofísico.



Por lo tanto entre los estudios necesarios para la elección de un sitio de instalación de una antena milimétrica o sub-milimétrica, se debe tener en cuenta el porcentaje de vapor de agua precipitable (equivalente a la opacidad a 225 GHz) en el lugar. Para ejemplificar estos estudios, se calculó el PWV de un potencial sitio (Meza et al., 2003).

#### **Obtención del slant wet delay (SWD) y sus utilidades**

La obtención del vapor de agua integrado en la dirección de un satélite individual se llama el vapor de agua "inclinado" (slant water vapor, SWV). El SWV se calcula a partir de la estimación del PWV y de los residuos del proceso estocástico. Esta combinación asume que los residuos de la observación están dominados por el retraso atmosférico y que este no se puede representar correctamente por un solo valor en el cenit. Típicamente, el término no-isotrópico es menor al 20% del término del PWV. Puede ser positivo o negativo, dependiendo del campo de la humedad en la dirección del satélite individual.

El cálculo del SWV no es otra cosa más que la solución de una integral de línea a través de la atmósfera. En muchos casos, la estimación del IPWV (integrado en la dirección cenital) es una representación exacta del campo de la humedad. Sin embargo, en campos complejos de la humedad (es decir en épocas de la iniciación de la convección, o a lo largo de frentes de la tormenta), el SWV proporciona un muestreo superior de la atmósfera (Braun, 2006).

(Rocken et al., 2003) muestran que el SWD es poco sensible a las diferencias en el perfil de refractividad adoptado. Para obtener la información del perfil atmosférico (sobre el receptor) a partir de observaciones del retraso (del inglés, Slant Delay; SD) recogidas en una sola estación, es necesario monitorear al satélite GPS a muy bajas elevaciones. (Rocken et al., 2003) han desarrollado un método bastante simple pero de baja resolución para los perfiles tomados en tierra. El método implica el cálculo del SD en función del ángulo de elevación, luego se busca un perfil (dentro de una biblioteca de perfiles potenciales) que aproxime lo mejor posible a las observaciones (Lowry et al. 2002).

Las observaciones GPS de baja elevación necesarias para perfilar un sitio GPS, requieren de funciones de mapeo con buena performance a baja elevación para procesar los datos. Dado que la función de mapeo de Niell (Niell, 1996) no es útil por debajo de los 3 grados de la elevación, (Rocken et al., 2003) probaron una nueva técnica que denominaron "mapeo directo" (Rocken et al., 2001). El "mapeo directo" requiere un perfil de la refractividad adecuado al intervalo de tiempo y la localización del receptor GPS. Si se asume que no existe gradiente horizontal de la refractividad, entonces el trazado de rayos a través de este perfil de refractividad, permite estimar una función de mapeo específica para ese sitio y para ese instante. Esta técnica solo se usa para las observaciones por debajo de los 5 grados de elevación (Rocken et al., 2003).

Desde el punto de vista práctico, las medidas de SD son útiles para identificar la variabilidad espacial del campo de la humedad en comparación a un único término del PWV integrado en el cenit. Estas diferencias espaciales se asocian normalmente a los campos de la humedad de la capa límite.

Las observaciones superficiales de la temperatura y del punto de condensación muestran cambios muy leves antes del inicio de la lluvia. En contraste, las observaciones de PWV/SWV muestran un claro aumento de casi 20 milímetros en el contenido total de vapor de agua unas 1.5 horas antes del comienzo de la precipitación. Este cambio representa un aumento del 50% en humedad atmosférica. El ápice en los valores de PWV/SWV ocurre casi simultáneamente con el inicio de la lluvia (Braun, 2006).

Además, las determinaciones efectuadas a través de una red complementan la resolución obtenida por una sola estación, identificando así las diferencias espaciales en vapor de agua. Estos ejemplos muestran un modo de estudiar el comportamiento del campo de la humedad en un ambiente de la tormenta donde el vapor de agua está ayudando a aprovisionar de combustible la convección asociada a la línea de chubasco, aumentando la intensidad de la tormenta. Los mapas del PWV interpolados espacialmente revelan grandes diferencias en el contenido de vapor de agua atmosférico en sistemas de tormenta. Un método alternativo es investigar la correlación en la serie de tiempo de observaciones del vapor de agua de redes de estaciones.

Los dos valores meteorológicos que pueden extraerse como subproductos del procesamiento de una red geodésica de alta precisión (PWV y SWV), representan cantidades atmosféricas integradas. El PWV es una estimación de la cantidad de vapor de agua verticalmente integrada sobre una estación, muestreando un volumen que puede extender radialmente a 50 kilómetros de la misma. Esto hace el PWV un buen estimador para los estudios que requieren una resolución espacial más baja, y/o la asimilación de los datos en modelos con puntos grillas mayores de 10 kilómetros. En contraste, el SW

representa una integral de línea a través de este volumen de atmósfera. Esto permite resolver los campos de humedad atmosférica tan pequeños como algunos pocos kilómetros de tamaño, haciendo el SWV útil para los estudios de la resolución fina y los experimentos de asimilación de datos para la validación de modelos numéricos.

#### **Asimilación de los datos en modelos climatológicos no tomográficos**

Las determinaciones GPS del contenido de vapor de agua precipitable (PWV-GPS) son una fuente de datos relativamente reciente de la información de la humedad para la asimilación de datos. Los pronósticos meteorológicos numéricos de corto alcance sufren de una inadecuada observación del campo tridimensional de la humedad debido a su alta variabilidad espacial y temporal. Según lo discutido anteriormente, las estimaciones del PWV a partir del retraso de la señal GPS pueden complementar las observaciones clásicas del campo de la humedad troposférica realizadas a través de radiómetros de vapor de agua o radiosondas.

La determinación del PWV GPS utiliza el retraso cenital total para calcular un valor verticalmente integrado, con alta resolución temporal y bajo cualquier condición climática, incluyendo precipitaciones, condiciones en las cuales las observaciones pasan a ser muy importantes para los pronósticos de la humedad atmosférica.

Como un ejemplo, podemos citar que desde Junio de 2005 los datos del PWV GPS calculados por la red Suominet (EE.UU.) a tiempo casi real, están siendo asimilados en un modelo operacional en tiempo real que pertenece al NCEP (National Centers for Environmental Prediction) (Smith et al., 2006).

También son dignos de mención otros dos proyectos de investigación desarrollados en la misma dirección: COST-716 (European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research 716) y GASP (GPS Atmosphere Sounding Project). Cost 716 trazó quizás los primeros pasos en estas aplicaciones, involucrando instituciones y profesionales de 15 diferentes países europeos (Marel et al., 2004). Posteriormente, se desarrolla GASP en Alemania. Este último proyecto, aún activo, es similar a Suominet por cuanto es capaz de calcular a tiempo cuasi real el PWV sobre su territorio utilizando para ello una densa red estaciones GPS (Gent et al., 2001).

Siguiendo esta tendencia, deben mencionarse los trabajos efectuados en América del Sur por el CPTEC-INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) en Brasil. Actualmente dicho centro es el único en la región que realiza de modo operacional una asimilación de datos de PWV sobre territorio Brasileño. Los datos provienen de sensores a bordo de satélites. Además, se encuentra en fase de implementación una nueva metodología para que los datos calculados a partir de la Red Brasileña de Monitoreamiento Continuo de Satélites GPS (Rede Brasileira de Monitoramento Continuo dos Satélites GPS, RBMC) sean asimilados dentro de modelos de previsión numérica del tiempo (Numerical Weather Prediction models, NWP) (Sapucci et al., 2007).

Por lo anterior, los valores de PWV calculados sobre territorio argentino a partir de datos GPS provenientes de la RADEP, constituyen una aplicación potencialmente importante en un esfuerzo por densificar las determinaciones en territorio sudamericano. Así, una base de datos compuesta por valores de PWV GPS calculados en una gran porción del continente podría resultar una fuente adicional de datos confiables para el estudio de fenómenos climáticos de gran escala.

Las medidas del vapor de agua a partir de datos GPS poseen alta confiabilidad bajo cualquier condición climática. Las exactitudes del dato obtenido han demostrado ser comparables a, o incluso mejores que, las medidas integradas de las radiosondas, sin los problemas bien conocidos en condiciones de humedad alta o baja temperatura. Sin embargo, debe señalarse que una desventaja principal en la determinación del PWV GPS es que este valor proporcionan solamente las medidas escaladas en el cenit y no contienen (en sí mismos) ninguna información sobre la distribución vertical de la humedad en la atmósfera.

Sin embargo, se han desarrollado algunas técnicas rudimentarias para asimilar estas observaciones en los modelos numéricos de predicción del clima. Esto produjo mejoras en los pronósticos a corto plazo de la humedad en los niveles más bajos en la atmósfera, notándose los mayores beneficios durante los meses fríos (Smith et al., 2000; Gutman y Benjamin, 2001). Dado el sistema PWV GPS resulta de bajo costo y alta confiabilidad, resulta ser un sistema de observación rentable, y sus desventajas no parecen ser impedimentos técnicos para su puesta en práctica operacional dentro del servicio meteorológico nacional de los EEUU (National Weather Service, NWS).

Desde los inicios de la red Suominet a la fecha (2000-2007), los meteorólogos ha desarrollado técnicas para asimilar los datos de PWV GPS en modelos numéricos. Actualmente están ampliando esta técnica para utilizar las observaciones de SD (Rocken et al., 2003). Los resultados iniciales de la simulación indican que los valores PWV derivados de GPS pueden ayudar a mejorar la confiabilidad de la predicción de los acontecimientos severos de la precipitación (Guo et al. 2000), y que las observaciones de SWD en redes densas puede ser útil para recuperar la estructura vertical del vapor de agua atmosférico (Ha et al., 2002; 2003).

Como ya se dijo, debido a la alta calidad de las estimaciones del PWV GPS, es posible utilizar estos datos para los estudios del clima. Existe un fuerte interés en el uso del GPS para el pronóstico de tiempo, aunque su uso exige el proceso de los datos del GPS a tiempo casi-real. Sin embargo, (Rocken et al., 2003) han demostrado que los resultados del PWV GPS procesados a tiempo casi real se pueden obtener casi con la misma exactitud que los resultados obtenidos luego de un cuidadoso post-proceso.

#### **Análisis de tormentas fuertes**

Los pronósticos de tormentas severas están limitados por observaciones inexactas e incompletas del contenido de vapor de agua (Park y Droegemeier, 1999, 2000), con predicciones de eventos en la estación calida de lluvias allí donde modelos numéricos actuales de la predicción del tiempo se muestran menos hábiles (Fritsch y Carbone, 2004). Estudios previos indican que cambios en la mezcla del vapor de agua tan pequeños como 1 g./kg. en la capa límite puede transformar una atmósfera no convectiva en una con convección severa (Crook, 1996). Los estudios de asimilación indican que estas estimaciones del vapor de agua precipitable integrado (IPWV) pueden implicar una mejora significativa en los pronósticos de precipitación (Cucurull et al., 2004; Ha et al., 2003). A medida que estas redes continúan ampliándose en número y tamaño, ofrecen oportunidades crecientes de observar campos de humedad troposférica a media y gran escala.

(Braun, 2006) determinando SWD a partir de GPS encontraron una correlación lineal fuerte (0.7) entre la humedad atmosférica total y la intensidad de las tormentas. Esta correlación relativamente alta demuestra la relación directa entre la fuerza de la tormenta y la humedad atmosférica. La investigación indica que los pronósticos de la intensidad son excepcionalmente sensibles a las observaciones de la humedad. Estos datos se han asimilado en modelos numéricos de la predicción del tiempo; los han utilizado para estudiar diferencias espaciales y temporales en campos de la humedad; pero también para calibrar las observaciones de radiómetros en satélites y radiosondas (Braun, 2006).

Por todo lo anterior, el estudio de las tormentas severas utilizando determinaciones del SWD GPS, así como la posibilidad de asimilar el dato en modelos numéricos son promisorias tareas proyectadas para el futuro cercano como una cooperación entre la Geodesia y otras geociencias como la Climatología, la Meteorología, la Hidrología y la Geografía.

### **CONSIDERACIONES FINALES**

En este trabajo presentamos los primeros pasos en el cálculo de los valores de PWV integrado cenitalmente sobre una estación GPS (también conocido como IPWV). En particular se analiza la aplicación de esta técnica sobre territorio argentino para dos estaciones GPS permanentes: LPGS y RIOG. Dichas estaciones, que pertenecen a la red IGS, también forman parte de la RAdeEP.

Los estudios atmosféricos (troposfera, ionosfera), a partir de la estimación del retraso en el tiempo de viaje de la señal en radio ondas que proviene de los satélites GPS como consecuencia de haber atravesado la atmósfera, han cobrado singular importancia desde finales de la década del 90.

Efectivamente, durante los primeros años se analizó de modo exhaustivo el problema puramente geodésico que dio origen al sistema (posicionamiento) hasta lograr precisiones milimétricas y asumiendo que el retraso troposférico no era mas que una fuente de error que debía compensarse. Con el correr de los años, las precisiones en el posicionamiento alcanzadas por el sistema han convertido al GPS en una herramienta útil para otras disciplinas científicas vinculadas a las geociencias. Como ejemplo podemos citar: movimiento de placas tectónicas, estudios de la irregularidad en la rotación terrestre, etc. Estos últimos a su vez han derivado en otros estudios tales como la circulación atmosférica y oceánica global y validación de modelos hidrológicos globales, entre otros.

Luego de varios años, y una vez que estos temas se hubieran abordado en profundidad, comenzó a verse al GPS como una herramienta capaz de proveer de modo económico y confiable datos

adicionales tales como el contenido de vapor de agua en la troposfera o el contenido total de electrones de la ionosfera que encuentra la radio señal GPS en su trayecto desde el satélite hasta el receptor.

En vista de que las aplicaciones geodésicas GPS exigen redes cada vez más densas y existe un número mayor de estaciones con posiciones precisas conocidas [del orden de unos pocos milímetros], la estimación del contenido de vapor de agua integrado hoy día, constituye una técnica factible en casi cualquier lugar del planeta. Solo debemos exigir un receptor GPS de calidad geodésica y datos meteorológicos básicos (presión atmosférica y temperatura) disponibles.

Aunque se han desarrollado numerosos estudios de validación de los resultados PWV GPS con respecto a otras técnicas como los WVR (Bevis et al., 1992; Businger et al., 1996; Rocken et al., 1995; Duan et al., 1996; Elgered et al., 1997; Dai et al., 2002), especialmente en el hemisferio norte; también existen desarrollos actualmente operativos en el hemisferio sur encabezados por Brasil (Monico y Sapucci, 2003).

Los estudios de Meteorología GPS son desarrollos interdisciplinarios llevados a cabo por científicos de las Ciencias Atmosféricas y la Geodesia, principalmente. Esta reciente disciplina se apoya en tres pilares fundamentales: i) la estimación de PWV integrado en la dirección cenital de la estación; ii) la estimación del SWV y iii) la tomografía del vapor de agua, esto es, la obtención de valores correspondientes a una estructura tridimensional de vapor de agua en una dada región utilizando una red GPS (Bi et al., 2006).

Actualmente algunas de las densas redes GPS que operan de modo estable desde hace varios años, son capaces de proveer mapas del contenido de vapor de agua integrado sobre grandes porciones continentales casi a tiempo real. Esto es, con un retraso de una hora y media, tal y como lo requieren los pronósticos meteorológicos (Guerova et al., 2004). Ejemplos de ello son la red Suominet en EE.UU. (Ware et al., 2001) y GASP en Alemania (Gent et al., 2001).

Si bien se ha demostrado que la exactitud de las determinaciones de PWV GPS es bastante alta, esta cantidad no provee otra información mas que el contenido de vapor de agua vertical restringiendo así las aplicaciones a la investigación atmosférica (Bi et al., 2006). Sin embargo, es necesario realizar este paso previo y validar los datos obtenidos antes de abordar problemas mas complejos, como el calculo del SWV.

Así, el presente trabajo resume los inicios de la aplicación antes descripta para el cálculo del PWV GPS en territorio argentino, usando para ello las estaciones de la RAdeEP. En el futuro próximo presentaremos una validación de los resultados obtenidos con esta técnica, utilizando radiosondeos disponibles en Argentina para un dado periodo de prueba.

Nuestro grupo de trabajo (GESA) posee amplia experiencia en el cálculo de redes GPS en la generación de subproductos del procesamiento geodésico preciso tales como los cálculos del VTEC y el STEC (Slant total Electron Content). Es nuestra aspiración que los sucesivos refinamientos y mejoras a la técnica aquí presentada resulten en una fuente de datos confiable cuyos usuarios naturales serán los científicos de las Ciencias de la Atmósfera que podrán usar esta facilidad para sus estudios y/o asimilación en sus modelos.

**Agradecimientos:** Los autores miembros de GESA, agradecen el apoyo brindado por la Agencia de Promoción Científica y Tecnológica y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas a través de los subsidios PICT12130 y PIP 5703. Asimismo, queremos agradecer a todos los que contribuyen al mantenimiento y la continuidad de las estaciones GPS permanentes en Argentina, especialmente al Dr. Claudio Brunini. Los autores agradecen los comentarios y sugerencias por parte de dos revisores anónimos que han ayudado significativamente a mejorar la presentación de este trabajo.

## REFERENCIAS

- Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, R. H. Ware 1992 GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, 97, 15787-15801.
- Bevis, M., S. Businger, T. A. Chiswell S., T. A. Herring, R. A. Anthes, C. Rocken, R. H. Ware. 1994. GPS meteorology: Mapping Zenith wet delays onto precipitable water. *Journal of Applied Meteorology* V 33, 379-386.
- Bi Y., Mao J., Li Ch. 2006. Preliminary results of 4-D water vapor tomography in the troposphere using GPS. *Adv. In Atmos. Sci.* V. 23 N°4, 551-560.

Braun, J. J., 2006: Identifying Mesoscale Variations in Boundary Layer Moisture Using Ground Based GPS Networks. Fourth Joint Korea-U.S. Workshop on Mesoscale Observations, Data Assimilation, and Modeling for Severe Weather, Seoul, Korea.

Businger S., Chiswell S.R., Bevis M., Duan J., Anthes R.A., Rocken C., Ware R. H., Exner M., VanHove T., Solheim F.S. 1996. The promise of GPS in Atmospheric monitoring. *Bull. of the Am. Meteorological Soc.* Vol 77. N°1, 5–18.

Coster, A, A. Niell, F., Solheim, V., Mendes, P., Toor, K., Buchmann, C., Upham, 1996 Measurements of Precipitable Water Vapor by GPS, Radiosondes, and a Microwave Water Vapor Radiometer, *ION GPS-96*, 625-640.

Crook, N. A., 1996: Sensitivity of moist convection forced by boundary layer processes to low-level thermodynamic fields. *Monthly Weather Review*, 124, 1767-1785.

Cucurull, L., F. Vandenberg, D. Barker, E. Vilaclara, and A. Rius, 2004: Threedimensional variational data assimilation of ground-based GPS ZTD and meteorological observations during the 14 December 2001 storm event over the western Mediterranean sea. *Monthly Weather Review*, 132, 749-763.

Dach R., Hugentobler U., Friedez P., Meindl M. (eds), 2007. *Bernese GPS Software Version 5.0*, Astronomical Institute, University of Berne.

Dai A., Wang J., Ware R., Van Hove T. 2002. Diurnal variation in water vapor over North America and its implications for sampling errors in radiosonde humidity. *Journal of Geophys. Res.* V 107, D10, 10.1029/2001JD000642, 2002.

Duan J., Bevis M., Fang P., Chiswell S., Businger S., Rocken C., Solheim F., van Hove T., Ware R., McClusky S., Herring Th., King R. 1996 GPS Meteorology: Direct Estimation of the Absolute Value of Precipitable Water, *Journal of Applied Meteorology* Vol 35, N 6. 830-838.

Elgered G., Johansson J., Rönnäng B., Davis J. 1997 Measuring regional atmospheric water vapor using the Swedish permanent GPS network. *Geoph. Res. Lett.* V24, N° 21, 2663-2666

Elgered G., Davis J.L., Herring T.A., Shapiro I.I.. 1991. Geodesy by radio Interferometry: water vapor radiometry for estimations of the wet delay. *J. of Geophys. Res.* V 96, Nro B4, 6541-6555.

Fritsch, J. M. and R. E. Carbone, 2004. Improving quantitative precipitation forecasts in the warm season. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85, 955-965

Gendt G., Reigber C., Dick G. 2001. Near real-time water vapor estimation in a German GPS network—first results from the ground program of the HGF GASP project. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy* Volume 26. Issues 6-8, 413-416

Guerova G., Bettems J.M., Brockmann E., Matzler Ch., 2004. Assimilation of the GPS-derived integrated water vapour (IWV) in a MeteoSwiss numerical weather model – a first experiment. *Physics and Chemistry of the Earth*, 29, 177-186.

Gradinarsky L.P., Haas R., Johansson J.M., Elgered G. 1999. Comparison of atmospheric parameters estimated from VLBI, GPS and microwave radiometer data. *Proc.of the 13<sup>th</sup> Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry.* 161-165.

Guo Y.-R., Y. -H. Kuo, J. Dudhia, D. Parsons, C. Rocken, 2000. Four Dimensional Variational Data Assimilation of Heterogenous Mesoscale Observations for a Strong Convective Case, *Monthly Weather Review*, 619-643.

Gutman, S., and S. Benjamin, 2001 The Role of Ground-Based GPS Meteorological Observations in Numerical Weather Modeling, *GPS Solutions*, 4, 16-24.

Ha, S.-Y., Y.-H. Kuo, Y.-R. Guo and C. Rocken, 2002: Comparison of GPS Slant Wet Delay Measurements with Model Simulations during the Passage of a Squall Line, *Geophys. Res. Lett.* 29, 2113, doi:10.1029/2002GL015891.

Ha, S.-Y., Y.-H. Kuo, Y.-R. Guo and G.-H. Lim, 2003: Variational assimilation of slant-path wet delay measurements from a hypothetical ground-based GPS network, *Mon. Wea. Rev.* 131, 2635-2655.

Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. 1992 *Global Positioning System: Theory and Practice.* Springer-Verlag. Wien.

Hopfield H. 1969 Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *Journ. Geophys. Res.* 74, N 18, 4487-4499.

Kaniuth K., D. Kleuren and H. Tremel. 1998. Sensitivity of GPS height estimates to tropospheric delay modelling, *AVN* No. 6,

- Kleusberg A., Teunissen P. 1996 GPS for Geodesy. Springer-Verlag. ISBN 3-540-60785-4.
- Lowry A.R., Rocken C., Sokolovskiy K., Anderson D. 2002. Vertical Profiling of refractivity from ground-based GPS. *Radio Science* V. 37 N° 3, 13.1-13.10.
- Marel H. Van der. and Cost 716 team. 2004. COST-716 demonstration project for the near real-time estimation of integrated water vapour from GPS. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* Volume 29, Issues 2-3, Probing the Atmosphere with Geodetic Techniques, Pages 187-199.
- Meza A., Fernández L., Natali M.P., Moirano J., Brunini C. 2003 Aplicaciones del sistema GPS en la búsqueda de sitios para interferometría astronómica milimétrica. *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía* 46, 121-123.
- Meza A., Fernández L., Brunini C., Gende M., Müller M., Aráoz L., 2005. Monitoring the variability of the ionosphere and troposphere over Argentina. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7, 01223
- Moirano, J. F. 2000. Materialización del Sistema de Referencia Terrestre Internacional en Argentina mediante observaciones GPS. PhD Tesis at Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata.
- Monico, J F G ; Sapucci, L F . GPS Meteorologia: Fundamentos E Possibilidades De Aplicações No Brasil. In: Xxi Congresso Brasileiro De Cartografia, 2003, Belo Horizonte. *Anais Do XXI Congresso Brasileiro De Cartografia*, 2003. V. 1.
- Natali, M. P. 2000. Práctica de la Especialidad, "Influencia de las ambigüedades en la determinación de alturas precisas con GPS", Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata.
- Natali M. P.; Kaniuth K.; Brunini C.; Drewes H. 2002. "Monitoring Tide Gauges Benchmarks in Argentina by GPS" *IAG Symposia* Volume 124. *Vertical Reference Systems*, 255-258.
- Natali M. P. 2006. Tesis doctoral "Materialización de un sistema de referencia vertical mediante mareógrafos controlados con GPS", Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata.
- Niell A. 1996. Global mapping functions for the atmospheric delay at radio wavelengths. *Journ. Geophys. Res.* (101) 3227-3246.
- Park, S. K. and K. Droegemeier, 1999 Sensitivity analysis of a moist 1D eulerian cold model using automatic differentiation. *Monthly Weather Review*, 127, 2180-2196.
- Park, S. K. and K. Droegemeier, 2000. Sensitivity analysis of a 3D convective storm: Implications for variational data assimilation and forecast error. *Monthly Weather Review*, 128, 140-159.
- Rocken, C. R. H. Ware, T. Van Hove, F. Solheim, C. Alber, J. Johnson, M. Bevis, and S. Businger, 1993. Sensing atmospheric water vapor with the Global Positioning System, *Geophys. Res. Lett.*, 20(23), 2631-2634.
- Rocken, C. Van Hove T., Johnson J. M., Solheim F., Ware R. H., Bevis M., Chiswell S., Businger S. 1996. *J. Atm. Ocean. Tech.*, Vol. 12, 468-478.
- Rocken, C., S. Sokolovskiy, J. M. Johnson, and D. Hunt, 2001. Improved Mapping of Tropospheric Delays, *J. Atm. Ocean. Tech.*, Vol. 18, No. 7, 1205-1213.
- Rocken, C., J. Braun, T. Van Hove, J. Johnson, and Y.-H. Kuo, 2003. Developments in ground-based GPS meteorology. *Proceedings, International Workshop on GPS Meteorology*, Tsukuba, Japan, 1-6.
- Saastamoinen J. 1973 Contributions to the theory of atmospheric refraction: Part II: Refraction corrections in Satellite Geodesy. *Bulletin Geodesique* 107, 13-34.
- Sapucci L. F., Monico J.FG., Toledo Machado L.A., Herdies D. L., Ferreira de Souza R. A. 2007 Assimilacao Do Iwv-Gps No Brasil: Otimizacao Das Estimativas Do Atraso Zenital Troposferico Em Tempo Real. *Revista Brasileira de Geofisica* vol. 25(3), 267-279
- Sapucci L.F., Machado L.A.T., Monico JFG. 2004. Modelagem da temperatura media troposferica no Brasil para quantificacao do IWV utilizando GPS. In: *Congr. Bras. Met.*, 13.: 2004, Fortaleza. *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Fortaleza: SBMET, 2004. CDROM.
- Schüler, T., A. Pósfay, G. W. Hein, Biberger R. 2001. A Global Analysis of the Mean Atmospheric Temperature for GPS Water Vapor Estimation. *Proceedings of ION-GPS 2001*, The Institute of Navigation. 2476-2489; online: <http://forschung.unibw-muenchen.de/ainfo.php?&id=521>
- Smith, T.L., S.G. Benjamin, B.E. Schwartz, and S.I. Gutman, 2000: Using GPS-IPW in a 4-D data assimilation system. *Earth, Planets and Space*, 52, 921-926.
- Smith T.L., Benjamin S.G., Gutman S.I., Sahn S., Holub K. 2006. Operational Assimilation of GPS-IPW observations in the 13-km RUC at NCEP 10th Symposium on Integrated Observing and

Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS). 86th American Meteorological Society Annual Meeting. Atlanta, EE.UU.

Ware R. H., Fulker D. W., Stein S. A., Anderson D. N., Avery S. K., Clark R. D., Droegenmeier K.K., Kuettner J. P., Minster J. B., Sorooshian S. 2000. SuomiNet: A Real-Time National GPS Network for Atmospheric Research and Education. Bull. Amer. Meteorol. Soc., 81, 677-694.

Ware R. H., Fulker D. W., Stein S. A., Anderson D. N., Avery S. K., Clark R. D., Droegenmeier K.K., Kuettner J. P., Minster J. B., Sorooshian S. 2001. Real-time national GPS networks for atmospheric sensing. Jour. of Atmos, and Solar Terrestrial Phys. 63, 1315-1330.

Wiedner, M. C. 1998 Atmospheric Water Vapour and Astronomical Millimeter Interferometry, PhD Thesis. Cambridge University (<http://cfa-www.harvard.edu/~mwiedner/>)