

Experiencias en el Estudio de la Atmósfera Neutra Basado en Observaciones Satelitales GNSS: Un Aporte de la Geodesia a las Ciencias de la Atmósfera

Experiences in the Study of the Neutral Atmosphere Based on GNSS Satellite Observations: A Contribution of Geodesy to Atmospheric Sciences

D. Espinoza, *Ingeniera Geodesta, LUZ*, V. Cioce, *Profesor, LUZ*, E. Wildermann, *Profesor, LUZ* y G. Royero, *Profesor, LUZ*

Resumen—Las aplicaciones del GNSS (Global Navigation Satellite Systems) vinculadas al posicionamiento y navegación son ampliamente conocidas dentro del ámbito geodésico; sin embargo, al aprovechar las características de la señal de radio emitida por los satélites de la multiconstelación y evaluando el retardo durante su recorrido por la atmósfera neutra, es posible recuperar información sobre el contenido de vapor de agua precipitable, definiéndose las bases de la denominada Meteorología GNSS. En Venezuela, se cuenta con experiencias en esta atractiva implementación de la técnica geodésica satelital, enmarcadas dentro de las líneas de acción de SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas). De esa manera, se exponen los recientes avances que dan soporte al seguimiento continuo de una variable climática y meteorológica de gran interés para las ciencias atmosféricas, haciendo uso de los modelos propios del posicionamiento absoluto de precisión mejor conocido como Posicionamiento de Punto Preciso (PPP).

Palabras Clave—GNSS, PPP, retardo troposférico, vapor de agua

Abstract—Global Navigation Satellite Systems (GNSS) applications related to positioning and navigation are widely known within geodetic field. However, features of radio signal emitted by multiconstellation satellites allows

to evaluate its delay during its path through the neutral atmosphere, making possible to recover information about the precipitable water vapor content setting the basis of the so-called GNSS meteorology. In Venezuela, there are experiences of this implementation from GNSS observations, framed within SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas) objectives. In this sense, recent progress that support climatic and meteorological variable continuous monitoring through the applications of precise absolute positioning models better known as Precise Point Positioning (PPP) are presented.

Index Terms—GNSS, PPP, tropospheric delay, water vapour

I. INTRODUCCIÓN

LA constante evolución de los sistemas globales de navegación por satélites (Global Navigation Satellite Systems GNSS) ha revolucionado el posicionamiento y la navegación, entre ellos el más conocido es el estadounidense GPS (Global Positioning System). Sin embargo, existen otras aplicaciones de este sistema que han originado disciplinas de gran importancia entre ellas la Meteorología GNSS [1], que está basada en el estudio del retardo que afecta a las señales de radio que emiten las constelaciones GNSS en su paso por la atmósfera neutra (troposfera y estratosfera).

Ahora bien, este retardo troposférico ocurre en un ambiente con propiedades únicas y que puede ser modelado inicialmente

Artículo entregado para revisión el 14 de julio de 2017 a la Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales (ABAE) en el marco del II Congreso Venezolano de Tecnología Espacial (II CVTE).

D. Espinoza, Ingeniera Geodesta y Agrimensora de la Universidad del Zulia, Asistente de Cálculo e Investigación del Centro de Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS de la Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. E-mail: dhaespinoza@gmail.com.

V. Cioce, Presidente del Grupo de Trabajo I (Sistema de Referencia). Maracaibo, Venezuela.

E. Wildermann, Asesor Científico del Centro de Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS de la Universidad del Zulia (CPAGS-LUZ). Maracaibo, Venezuela.

G. Royero, Asesor Científico del Centro de Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS de la Universidad del Zulia (CPAGS-LUZ). Maracaibo, Venezuela.

en la dirección al zenit, hablándose de un retardo zenital troposférico (ZTD por sus siglas en inglés), resultante de una componente hidrostática o seca (ZHD) y una componente no hidrostática o húmeda (ZWD).

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (1)$$

La componente hidrostática puede ser modelada, en cambio la componente húmeda es dada mediante estimación GNSS y su estudio es de importancia dada su vinculación con el vapor de agua, que además de jugar un papel fundamental en el ciclo hidrológico es conocido por ser el principal gas invernadero causante entre un 60 y 70% del calentamiento atmosférico [2].

En este sentido, debido a que la componente húmeda del retardo troposférico está altamente relacionada con la cantidad de agua en la atmósfera, es posible convertir el ZWD en vapor de agua integrado (IWV), un valor esencial en la meteorología. Este describe la cantidad de agua en una columna vertical entre el sitio observado y el límite superior de la capa troposférica.

Cabe destacar que las observaciones espacialmente bien distribuidas y continuas del vapor de agua son de gran interés para la predicción e investigación climática y estudios atmosféricos.

La alta resolución espacial y temporal proporcionada por la extendida y siempre creciente red de estaciones de rastreo GNSS, siendo observaciones continuas preferiblemente, hace que las estimaciones del retardo troposférico sean altamente valiosas en el campo de las ciencias atmosféricas.

Hoy en día existe un gran interés en el estudio de la atmósfera neutra basado en GNSS, destacan por ejemplo las iniciativas de SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas; www.sirgas.org) y de UNAVCO (University NAVSTAR Consortium Inc.; www.unavco.org), que proveen de forma libre, el soporte necesario para el desarrollo de todo tipo de actividades prácticas y científicas mediante las respectivas redes de estaciones de operación continua GNSS. En Venezuela, el Centro de Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS de la Universidad del Zulia (CPAGS-LUZ) ha venido implementado diferentes estrategias para la estimación del retardo troposférico. Este trabajo pretende exponer sus avances recientes que dan soporte al seguimiento continuo de esta variable climática y meteorológica.

II. ESTIMACIÓN DEL RETARDO ZENITAL TROPOSFÉRICO MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL GPS

Los satélites de la constelación GPS constan de un oscilador que genera una señal microonda con frecuencia fundamental de 10,23MHz y para ondas electromagnéticas en el espectro de radiofrecuencias inferiores a 15GHz la troposfera no es un medio dispersivo, es decir, el índice de refracción no depende de la frecuencia sino depende de la presión del aire, temperatura y presión del vapor de agua [3].

La refracción de la señal GPS ocasiona el desvío de su trayectoria y el retardo en su tiempo de propagación, ilustrado en la Figura 1. La señal interactúa con gases neutros en equilibrio hidrostático (dependiente de presión y temperatura)

y también con agua en fase gaseosa (dependiente de su distribución espacio-temporal).

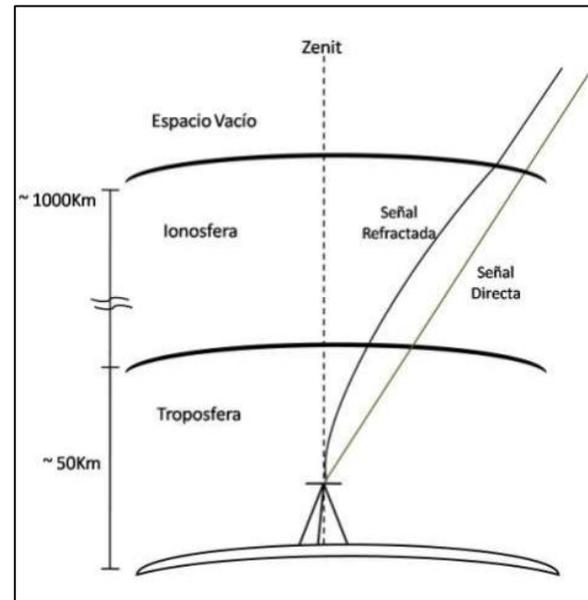


Fig 1. Refracción de la señal por su paso por la ionosfera y troposfera [4].

Debido al movimiento orbital de los satélites, sumado a la rotación terrestre, la señal GPS observada generalmente no es emitida desde la dirección del zenit. La refracción o en su defecto el retardo, también guarda dependencia con la elevación de los satélites (E), que se proyecta con funciones de mapeo respecto a la dirección del zenit; de esta manera se tiene:

$$STD = ZHD mf_h + ZWD mf_w \quad (2)$$

siendo STD el retardo total inclinado de la señal y mf_h y mf_w las funciones de mapeo para la componente hidrostática y no hidrostática respectivamente.

El retardo se hace menor en el zenit llegando a ser mayor con el incremento del ángulo zenital, [4], [5], [6], [7]. La función de mapeo es independiente del azimut y en general se expresa como una fracción continuada con tres coeficientes (a , b , c) según la fórmula [8]:

$$mf(E) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\text{Sen } E + \frac{a}{\text{Sen } E + \frac{b}{\text{Sen } E + c}}} \quad (3)$$

Diferentes grupos de coeficientes deben ser calculados, tanto para componente hidrostática (a_h, b_h, c_h) como la no-hidrostática (a_w, b_w, c_w). Estos pueden ser obtenidos de datos recolectados de radiosonda [9] o valores provenientes de modelos climáticos [6].

La componente hidrostática del retardo troposférico contribuye el 90% de la refracción total, el 10% restante corresponde a la componente no hidrostática, pero su variabilidad es mucho mayor por lo que se dificulta su determinación [4], [10]. El retardo zenital hidrostático es

asumido a partir de un formulismo derivado de la ley de los gases ideales, obedece a la influencia netamente del aire seco [16]. Una manera de calcularlo a nivel milimétrico, es mediante la expresión de Saastamoinen [11]:

$$ZHD = \frac{0,00227768 P_s}{f(\varphi, h)} \quad (4)$$

donde P_s es la presión atmosférica total medida a la altura de la estación de observación y el denominador corresponde a la variación de la aceleración gravitacional con respecto a la latitud (φ) y la altura elipsoidal (h) de la estación.

Por otra parte, la componente húmeda se ve afectada por el momento dipolar de las moléculas de agua contenidas en la troposfera en el camino de la señal hacia receptor [10], es decir el vapor de agua no se encuentra bien mezclado y su distribución espacial y temporal no es homogénea haciéndolo muy difícil de modelar, por lo tanto, al ser conocida la componente hidrostática, el retardo húmedo es calculado en el proceso de estimación GPS/GNSS mediante un ajuste por cuadrados mínimos junto con las coordenadas de la estación y parámetros del reloj del receptor [2].

El procedimiento común para estimación del retardo zenital forma parte de las estrategias de procesamiento GPS, apoyada de modelos y parámetros que aportan información precisa para garantizar un tratamiento óptimo de las observaciones, así como corregir aquellos sesgos que puedan desmejorar el cálculo del retardo. La estrategia varía de acuerdo al modo de estimación, es decir relativa o absoluta.

En el método *relativo* o también llamado diferencial, se requieren datos registrados simultáneamente por dos o más receptores que rastreen hacia los mismos satélites, haciendo uso de esta condición para reducir sesgos comunes mediante dobles diferencias. Se cuentan con varias experiencias en Venezuela relacionadas con la estimación del retardo troposférico bajo esta modalidad apoyadas únicamente en GPS [2], [4], [12], [13] así como recientes contribuciones aplicando otros sistemas GNSS como el de la Federación Rusa GLONASS [14], [15], [16].

La segunda modalidad corresponde a la absoluta, en este caso la estimación es realizada usando datos recolectados por un solo receptor que realiza rastreo hacia los satélites de la constelación sin dependencia alguna de otras estaciones. La estrategia refinada que permite obtener resultados del retardo al nivel del milímetro, es el Posicionamiento de Punto Preciso o PPP [17] que utiliza únicamente observaciones no-diferenciadas (cero-diferencias, ZD) asumiendo conocidos tanto las órbitas como los relojes de los satélites con alta precisión para determinar coordenadas geocéntricas, correcciones del reloj del receptor y parámetros troposféricos de una sola estación [18].

Actualmente el estado del arte en el procesamiento de datos GNSS para fines meteorológicos se sustenta en la aplicación del PPP ya que permite un aprovechamiento de todas las observaciones sin diferenciarlas, haciendo la estimación del parámetro troposférico más efectiva, sumado a esto la estimación es referida a un valor puntual [1], característica que no ofrece la estimación diferencial. Cabe destacar que estas

afirmaciones son solo para estimaciones troposféricas ya que el método diferencial sigue siendo considerado por la mayoría de centros de análisis GNSS en el mundo para el mantenimiento de marco geodésico, cálculo de parámetros de órbita y de reloj, información fundamental para poder aplicar el PPP [17].

En este estudio una rutina para el cálculo del retardo troposférico implementando el PPP fue diseñada con la herramienta Bernese Processing Engine (BPE) del Bernese GNSS Software v5.2 [18]. La misma se denominó PPP-LUZ [19] y la cadena de procesos se presenta en el diagrama de flujo de la Figura 2. Las convenciones del IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service [20], fueron asumidas en la estrategia.

La metodología de procesamiento PPP-LUZ abarca cinco etapas principales, la *primera etapa* que consiste en el preprocesamiento orientado a la preparación de los datos GPS, obtención y validación de los insumos necesarios para el cálculo; la *segunda etapa* corresponde al tratamiento de los códigos PRN (Pseudo Random Noise), donde se establece la sincronización del reloj del receptor (para cada una de las estaciones) con el tiempo GPS y adicionalmente genera solo para control, un posicionamiento absoluto (aproximado). La *tercera etapa* es para la detección y corrección de saltos de ciclos presentes en las observaciones por medio del preprocesamiento de las fases portadoras. Se procede en la *cuarta etapa* a una estimación inicial de parámetros, donde se efectúa el cálculo de los residuales de aquellas observaciones para detectar y reducir las que exceden los rangos de tolerancia definidos, depurando así dichas observaciones. Finalmente, la *última y quinta etapa* conlleva al cálculo de parámetros troposféricos a intervalos de 1 hora y coordenadas refinadas (finales) para cada una de las estaciones consideradas en el cálculo.

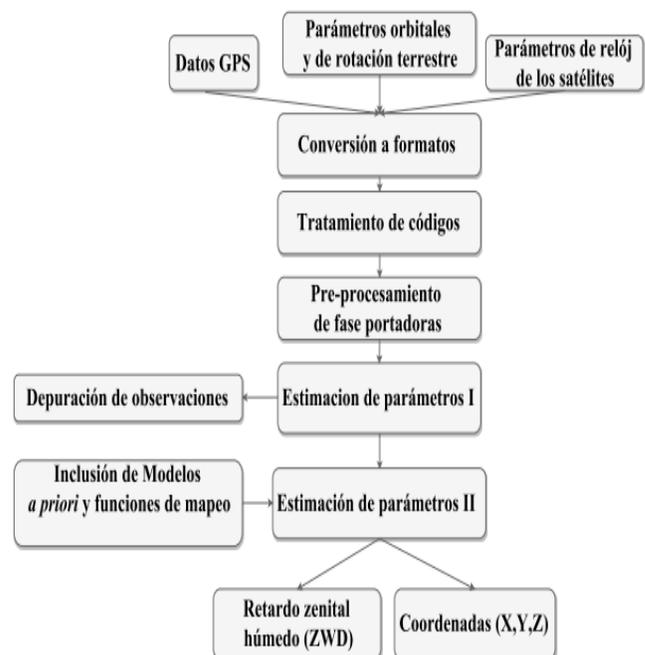


Fig. 2. Rutina PPP-LUZ implementada con Bernese GNSS Software v5.2.

III. RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PPP-LUZ

Un total de 102 estaciones fueron consideradas en el proceso de estimación (Figura 3) del retardo troposférico aplicando la estrategia PPP-LUZ, 87 estaciones pertenecientes a la red SIRGAS de funcionamiento continuo (SIRGAS-CON) y para una mayor resolución espacial y control de calidad en los resultados en el área de El Caribe, se complementó con 15 estaciones de la red COCONet (<http://coconet.unavco.org/>). Estos datos abarcaron dos periodos con una duración de dos meses cada uno, el primero desde la semana GPS de 1558 a la 1566 (noviembre 2009 a enero 2010) y el segundo semana GPS de 1610 a la 1618 (noviembre 2010 a enero 2011). Una ventana temporal más extensa, abarcando aproximadamente dos años (2015 y 2016) fue tomada en cuenta para pruebas específicas con estaciones COCONet, esto con la finalidad de evaluar el efecto estacional sobre el retardo.

Estas estaciones incluidas en el procesamiento cumplen los estándares del IGS (International GNSS Service; www.igs.org) garantizando calidad en las observaciones, por ejemplo, una duración de 24 horas continuas, intervalo de muestreo de 30 segundos, registro como mínimo de ambas frecuencias portadoras, baja influencia de la multitraectoria, empleo de antenas receptoras con variaciones absolutas en su centro de fases entre otros.



Fig. 3. Distribución geográfica de las estaciones involucradas en el procesamiento.

El procesamiento de las observaciones GPS aplicando la estrategia PPP-LUZ proporcionó valores del retardo zenital troposférico para cada una de las estaciones seleccionadas pertenecientes a las redes SIRGAS-CON y COCONet en los periodos asumidos. La consistencia interna de estos resultados, evaluada a partir del RMS a posteriori de la unidad de peso fue

satisfactoria, para un 98% de los días de observación procesados, esta variable se ubicó en 1,6mm; para el 2% restante de la muestra se obtuvieron RMS a posteriori en el orden 6mm (Figura 4), este incremento estuvo vinculado a sesgos remanentes en el tratamiento de los parámetros de reloj de los satélites, lo que pudo ser verificado en una fase de análisis.

Por su parte, el RMS del retardo zenital húmedo estimado se ubicó en un valor medio de 0,5mm, siendo mejor al correspondiente a una estimación diferencial que típicamente alcanza los 3mm [20].

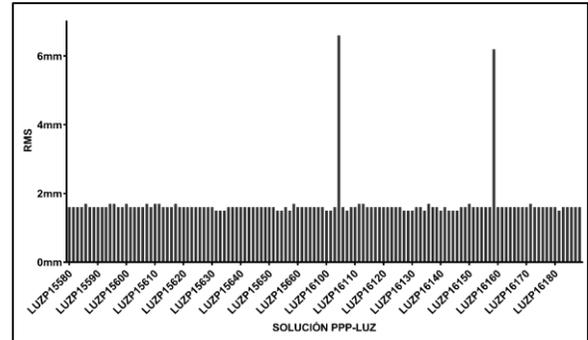


Fig. 4. RMS a posteriori de la unidad de peso para las soluciones diarias PPP-LUZ.

Para apreciar la consistencia de los resultados se presenta el caso de la estación MARA (Maracaibo), cuyo retardo varía de 0,11m a 0,38m para los meses de noviembre a enero de 2009 a 2010, y para el periodo subsiguiente (2010 a 2011) donde fluctúa en 0,13m a 0,39m; los valores medios respectivos se ubican en 0,24m y 0,29m respectivamente (Figura 5). El efecto estacional es evidente, de hecho, los ascensos y descensos en el retardo son ligeramente consistentes entre sí para los periodos evaluados.

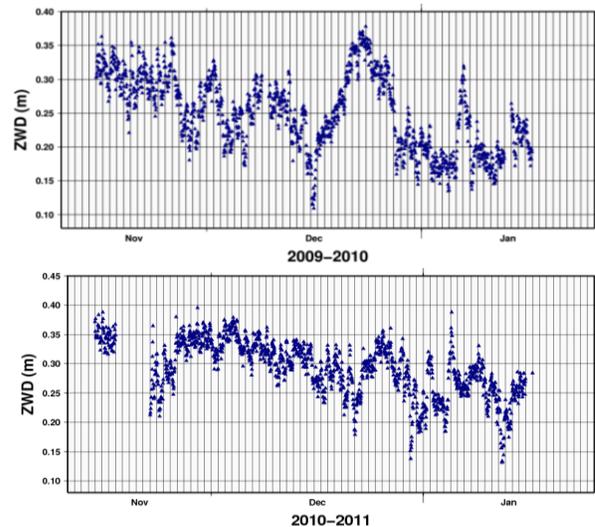


Fig. 5. ZWD para la estación MARA.

En una ventana temporal más extensa del ZWD estimado se presenta en la Figura 6 el caso para las estaciones CN19 y CN40, ambas de la COCONet ubicadas en las Islas Aruba y

Curacao respectivamente. La separación aproximada entre estas es de 132km y se encuentran a una misma latitud; es sabido que el retardo troposférico guarda dependencia con la latitud y está correlacionado con la distancia horizontal [3], [21], [22].

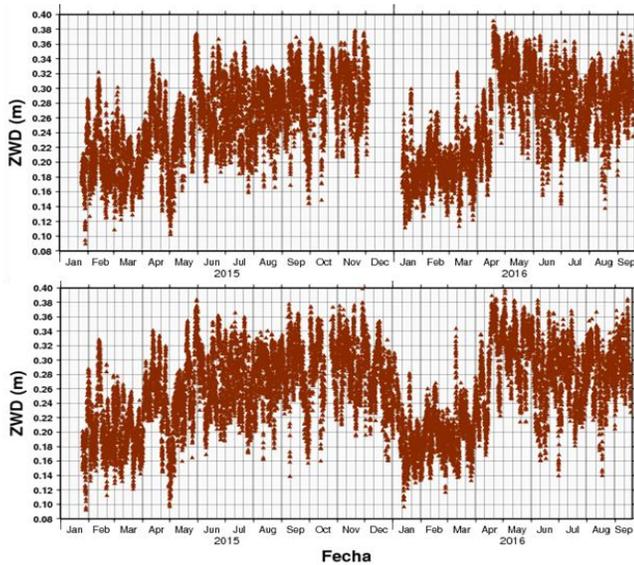


Fig. 6. ZWD para la estación CN19 (arriba) y CN40 (abajo).

Las series mostradas permiten apreciar tendencias muy similares del retardo en ambas estaciones, una vez más, se infiere sobre la bondad de la estimación en estos términos. Adicionalmente, cabe destacar que, para un periodo más extendido, en este caso casi dos años, si es posible observar el efecto estacional.

Tanto el retardo manifestado en la estación MARA como para CN40 y CN19, demuestran la alta variabilidad en función del tiempo que caracteriza al ZWD, dando a entender que la estimación PPP bajo las consideraciones propias del cálculo realizado es sensible para efectos de la representación troposférica.

Una validación de los resultados respecto a información meteorológica adicional fue realizada. Para ello se utilizó a estación CHPI ubicada en Brasil que cuenta con una estación meteorológica de superficie cuyos datos compuestos por presión atmosférica, humedad y temperatura están disponibles de forma libre (UNAVCO, www.unavco.org). Siendo el retardo húmedo objeto de estudio en este trabajo y por su directa relación con los parámetros atmosféricos antes mencionados, se extrajeron los valores de humedad relativa y temperatura correspondientes al periodo de estudio comprendido entre noviembre 2009 a enero 2010, esto con la finalidad de corroborar la estimación del retardo ZWD obtenido con PPP-LUZ. La Figura 7 revela la correspondencia entre la humedad relativa, temperatura y retardo húmedo zenital; a mayor retardo mayor es la humedad mientras que con la temperatura se aprecia claramente la relación de proporcionalidad inversa de ambos parámetros: cada vez que la temperatura incrementa la humedad relativa y el retardo húmedo decrecen y viceversa.

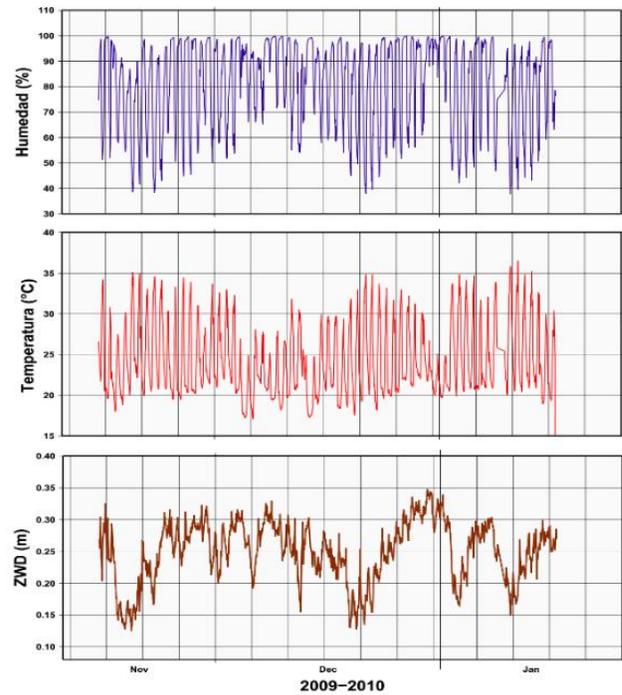


Fig. 7. Humedad relativa, temperatura y ZWD (PPP-LUZ) de la estación CHPI para noviembre 2009 a enero 2010.

Esta relación inversa es debido a que la concentración de la humedad por volumen es mayor o menor en función de la energía calorífica que contiene la atmósfera (temperatura), ya que las moléculas de agua se concentran o expanden con la energía, es decir, conforme la temperatura aumenta, hace falta un mayor número de moléculas para alcanzar el estado de equilibrio entre el vapor y el líquido. Por el contrario, se necesitan menos moléculas para obtener el equilibrio a medida que la temperatura disminuye, siempre que no entre una masa de aire que aporte más humedad al ambiente. Los valores en donde la humedad relativa alcanza el 100% indican que el aire se encuentra en su máxima saturación y su temperatura corresponde al punto de rocío [23].

En otro orden de ideas, aprovechando la cantidad de estaciones que fueron procesadas, y la disponibilidad de herramientas SIG (Sistema de Información Geográfica) fue posible generar una malla para la posterior interpolación del retardo sobre el área de cobertura. El método de mallado para representar lo mejor posible los valores del ZWD en un mapa de contornos fue la Triangulación TIN (Triangular Irregular Network). La Figura 8 muestra el mapa del retardo zenital húmedo para el día 15 de enero de 2010 a las 00^h00^m00^s (UTC). Se observa que los valores mayores del retardo se encuentran concentrados en la zona tropical que corresponde a la Amazonía (norte de Brasil, Guyana, Venezuela, Colombia y el oriente del Perú), el retardo húmedo alcanzó magnitudes de 0,38m a 0,40m, y fue disminuyendo para las zonas adyacentes al norte de México con variaciones mínimas de 0,06m a 0,12m, y al sur con las mismas magnitudes.

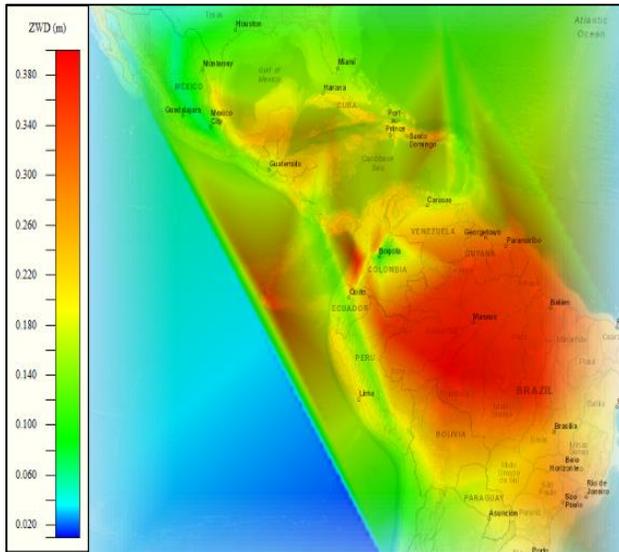


Fig. 8. Retardo zenital húmedo para el 15 de enero de 2010 a las 00^h00^m00^s (UTC).

De igual manera, se generó un mapa del ZWD para el mismo día y hora, pero al año siguiente con el fin de evaluar cambios troposféricos estacionarios. En la Figura 9 se observa que para dicha época los valores máximos del retardo continúan en el norte de Brasil de 0,38m a 0,40m y valores mínimos de 0,02m en el norte de México.

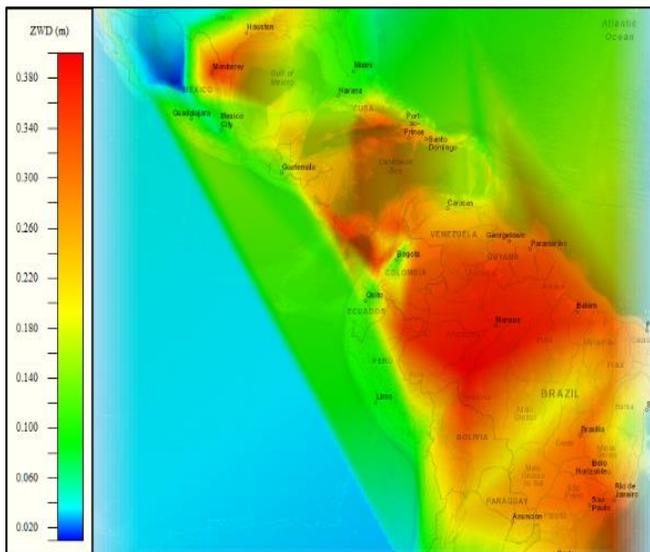


Fig. 9. Retardo zenital húmedo para el 15 de enero de 2011 00^h00^m00^s (UTC).

Para la zona de El Caribe, hubo un aumento del retardo húmedo con respecto al año anterior de magnitud 0,04m. Se detalla un cambio brusco en la distribución del retardo para el norte de México que se presume sea ocasionado por el ingreso de una mayor cantidad de vapor de agua para la época. Esto puede observarse en fuentes de información independientes como es el caso de la plataforma Giovanni de la NASA (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) que ofrece valores de vapor de agua precipitable (Figura 10), proporcional al ZWD para el mismo día considerado.

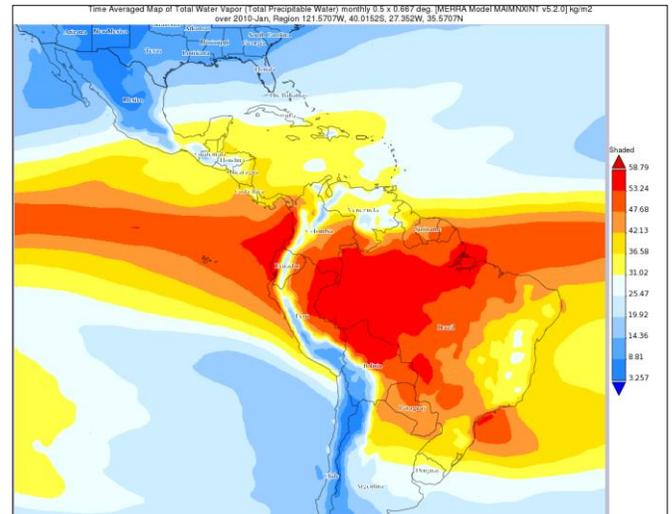


Fig. 10. Vapor de Agua total proveniente de la plataforma Giovanni para enero de 2010.

En general, para ambos días se observa que los valores de mayor magnitud del retardo se concentran cerca del Ecuador. Este impulso del retardo en el área tropical puede ser debido al transporte de agua y energía de la superficie a la atmósfera [24].

IV. CONCLUSIONES

Se logró el cálculo del retardo troposférico para 102 estaciones GNSS ubicadas a lo largo de centro, norte y sur América y parte de El Caribe aplicando de forma rigurosa el posicionamiento de punto preciso (PPP) a través de la metodología PPP-LUZ, diseñada con la finalidad de que cumpliera el requisito de estimar con la mejor calidad posible dicha variable.

El RMS del retardo zenital húmedo estimado se ubicó en un valor medio de 0,5mm para todo el conjunto de estaciones procesadas y para los resultados de las semanas procesadas una consistencia interna de 1,6mm en un 98% de las soluciones.

El retardo zenital también mostró una buena correlación espacial, lo que fue analizado considerando el caso de dos estaciones relativamente cercanas entre sí y además una buena correlación temporal al ser evidente el efecto estacional en un periodo de dos años consecutivos. Fue posible evaluar la variabilidad del ZWD con datos meteorológicos de la estación CHPI, confirmando y validando la estrecha relación de la estimación del retardo con parámetros físicos atmosféricos.

Con respecto al retardo estimado a gran escala para el área de estudio con procesamiento PPP-LUZ, mediante uso de herramientas SIG, se generaron mapas del ZWD para el 15/01/2010 y para el 15/01/2011 ambos a las 00^h00^m00^s (UTC), mostrando valores de orden similar, validado con fuentes externas. Esto permitió indagar sobre el efecto estacionario para un mismo día en años consecutivos, apreciando para la zona caribeña un incremento del retardo de 4cm mientras que los valores en la zona de la Amazonía permanecieron en el mismo orden.

Los resultados aquí obtenidos demuestran que la metodología PPP-LUZ es altamente efectiva para la estimación

del retardo troposférico en comparación con la estrategia diferencial que también ha sido evaluada en Venezuela, abriendo paso a posibilidades de aplicación de la técnica satelital GNSS en regiones específicas con climas variables ya que su efectividad y alta representatividad en los resultados pueden brindar aportes a estudios meteorológicos y climáticos.

REFERENCIAS

- [1] G. Guerova, J. Jones, Douša, G. Dick, S. de Haan, E. Pottiaux, O. Bock, R. Pacione, G. Elgered, H. Vedel, M. Bender, "Review of the state of the art and future prospects of the ground-based GNSS meteorology in Europe", *Atmospheric Measurement Techniques*, no. 9, pp. 5385–5406, 2016, DOI: <http://doi.org/10.5194/amt-9-5385-2016>
- [2] V. Cioce, M. Hoyer, E. Wildermann, G. Royero, A. Diaz, "Determinación del vapor de agua troposférico a través de observaciones GPS: primeros ensayos en Venezuela", *Revista Interciencia*, vol. 36, no. 10, pp. 721-729, Oct. 2011.
- [3] G. Seeber, "Satellite Geodesy" 2nd ed. Walter de Gruyter, Berlín, New York, 2003, pp 45-56.
- [4] V. Cioce, "Aplicación de observaciones GPS para la cuantificación del vapor de agua troposférico en la ciudad de Maracaibo", Trabajo de Grado. División de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela, 2009.
- [5] J. Böhm y H. Schuh "Vienna Mapping Function in VLBI analysis" *Geophysical Research Letters*. Vol. 31, 2004, DOI: 10.1029/2003GL018984.
- [6] J. Böhm, B. Werl., H. Schuh, "Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data", *Journal of Geophysical Research*, vol. 111, 2006, DOI: 10.1029/2005JB003629.
- [7] J. Böhm, A. Niell, P. Tregoning, H. Schuh, "Global Mapping Function (GMF): a new empirical mapping function based on numerical weather model data", *Geophysical Research Letters*, vol. 33, 2006, DOI: 10.1029/2005GL025546.
- [8] J. W. Marini, "Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile", *Radio Sci.*, vol. 7(2), pp.223–231, 1972.
- [9] A. E. Niell, "Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths", *J. Geophys. Res.*, vol. 101(B2), pp. 3227–3246, 1996.
- [10] P. Tregoning y T. Herring, "Impact of a priori zenith hydrostatic delay errors on GPS estimates of station heights and zenith total delays", *Geophysical Research Letters*. vol. 33, 2006, DOI: 10.1029/2006GL027706.
- [11] J. Saastamoinen, "Contributions to the theory of atmospheric refraction" part II, *Bull. Geod.*, vol.107, pp.13–34, 1973, <http://dx.doi.org/10.1007/BF02521844>.
- [12] M. Montero. "Factibilidad para el desarrollo de estudios troposféricos basados en la técnica satelital GPS en Venezuela". Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Geodésica, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela, 2013.
- [13] A. Barroso y K. Estrada, "Implementación del modelo climático ERA-Interim para la estimación de parámetros troposféricos a partir de las observaciones GPS", Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Geodésica, Universidad del Zulia., Maracaibo, Venezuela, 2015.
- [14] V. Cioce, E. Wildermann, G. Royero "Estimando el retardo troposférico sobre estaciones GNSS de operación continua en Venezuela mediante observaciones satelitales GLONASS" *Revista MAPPING*, En Publicación.
- [15] D. Valecillos, J. Alvarado, "Caracterización del retardo troposférico en estaciones de la red geodésica nacional de operación continua mediante observaciones GLONASS", Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Geodésica, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela. 2015.
- [16] G. Meza, L.Vera, "Incorporación de observaciones satelitales GLONASS en el procesamiento de la red SIRGAS de operación continua", Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Geodésica, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela. 2013.
- [17] J. F. Zumberge, M. B. Hefflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins, F. H. Webb, "Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from LAGE networks", *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, no. B3, pp. 5005-5017, 1997.
- [18] *GPS Software Version 5.2: User Manual*, Bernese Astronomical Institute of the University of Bern., Berna, Suiza, 2015. Disponible en <http://www.bernese.unibe.ch>.
- [19] D. Espinoza, "Cálculo del retardo troposférico mediante la implementación rigurosa del posicionamiento de punto preciso", Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Geodésica, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela, 2017.
- [20] G. Petit, y B. Luzum, "IERS Conventions 2010". IERS Technical Note 36. Verlag des Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. Frankfurt , Alemania, 2010,
- [21] V. Cioce, D. Espinoza, M. Rincón, E. Wildermann, G. Royero, L. Sánchez, (Nov. 2016) Estimación y seguimiento del retardo troposférico GPS empleando posicionamiento de punto preciso presitado en el Simposio SIRGAS 2016. Quito-Ecuador. Disponible en www.sirgas.org.
- [22] W. Torge, y J. Müller, "Geodesy", 4th Ed. de Gruyter, Berlín, Alemania, 2012, pp.113-121.
- [23] *Intermediate Wildland Fire Behavior, S-290* National Wildfire Coordinating Group- 2008. Disponible en <https://www.met.ed.ucar.edu/>.
- [24] *Meteorology Education and Training from University Corporation for Atmospheric Research*, The Comet Program. Última consulta julio-2016. <https://www.met.ed.ucar.edu/>.



Dhanniela Espinoza. Es Ingeniera Geodesta (2017) y Agrimensora (2014) egresada de la Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela. Desde 2012 a 2017 fue asistente de cálculo e investigación en el Centro de Procesamiento y Análisis SIRGAS de la Universidad del Zulia (CPAGS-LUZ) formando parte del Grupo I "Sistemas de Referencia" de SIRGAS.

Durante su formación estudiantil participo en proyectos de investigación, siendo reconocida como investigadora por la Red de Investigación Estudiantil de la Universidad del Zulia y acreditada por el Programa de Estimulación para la Investigación e Innovación (PEII). Sus áreas de interés son aplicaciones del GNSS, Sistemas de Información Geográfica y Sensoramiento Remoto para estudios diversos. E-mail: dhaespinoza@gmail.com



Victor Cioce. Es MSc. en Ingeniería Ambiental (2010), Ingeniero Geodesta (2007) y Agrimensor (2006) egresado de la Universidad del Zulia (LUZ) en Maracaibo, Venezuela. Actualmente se desempeña como Profesor e Investigador adscrito al Departamento de Geodesia Superior de la Escuela de Ingeniería Geodésica de LUZ (EIG-LUZ), responsable de la Unidad

Curricular Geodesia Satelital; sus áreas de interés son los sistemas y marcos de referencia geodésicos, fundamentos y aplicaciones del GNSS, y estudios atmosféricos basados en técnicas geodésicas. Desde 2009 es el Coordinador del Centro de Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS de LUZ (CPAGS-LUZ), siendo desde 2015 Presidente del Grupo I (Sistema de Referencia) de SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas). E-mail: vcioce@fing.luz.edu.ve



Eugen Wildermann. Es Doctor en Ingeniería (1988) e Ingeniero Geodesta (1981) egresado de la Leibniz Universität Hannover (LUH) en Alemania; actualmente es Profesor Emérito de la Escuela de Ingeniería Geodésica de la Universidad del Zulia (LUZ) y miembro del grupo de investigación del Laboratorio de Geodesia Física y Satelital de LUZ (LGFS-LUZ) siendo su área de interés la Geodesia Física, especialmente tópicos relacionados con los fundamentos y aplicaciones de observaciones gravimétricas, determinación del geoide y geodinámica. Desde 2009 brinda su asesoría científica al Centro de Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS de LUZ (CPAGS-LUZ). E-mail: ewildermann@fing.luz.edu.ve



Giovanni Royero. Es Postdoctor en Gerencia en las Organizaciones (2015) y Doctor en Ciencias Gerenciales (2014), títulos conferidos por la Universidad Rafael Belloso Chacín (URBE) en Maracaibo, Venezuela, siendo MSc. en Ingeniería Geodésica (2000) e Ingeniero Geodesta (1993) egresado de la Universidad del Zulia (LUZ), Maracaibo, Venezuela. Actualmente es Profesor e Investigador de la Escuela de Ingeniería Geodésica de LUZ con amplia experiencia en las áreas del Sensoramiento Remoto y Cartografía Matemática. Forma parte del grupo de investigación del Laboratorio de Geodesia Física y Satelital de LUZ (LGFS-LUZ) y asesor científico del Centro de Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS de LUZ (CPAGS-LUZ). Se desempeña también como Director de la División de Investigación Facultad de Ingeniería de LUZ y es integrante de la Comisión Científica del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de LUZ (CONDES-LUZ). Además, es miembro de la Sociedad Civil de Especialistas Latinoamericanos en Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial (SELPER) Capítulo Venezuela y Coordinador de la Región Zulia. E-mail: groyero@fing.luz.edu.ve.