

Contribuciones desde la Geodesia al estudio de tormentas severas

M Virginia Mackern^{1,2,3}, Patricia A Rosell^{1,2,3}, M Laura Mateo^{1,2,3}, M Fernanda Camisay^{1,2,3}

Resumen El retardo cenital troposférico en la señal GNSS de las estaciones continuas es una medida indirecta del contenido de vapor de agua integrado sobre la vertical del sitio donde esta se encuentra emplazada. Por consiguiente, desde el GNSS se implementa una nueva técnica para monitorear el vapor de agua atmosférico. En América se cuenta con una serie de tiempo del ZTD_{SIR} de 10 años (2014 a la actualidad), en más de 600 sitios, considerando todo el historial de estaciones GNSS que han integrado SIRGAS-CON (activas, inactivas y removidas). Dichos parámetros resultan una contribución al conocimiento y monitoreo de la variable atmosférica IWV de aplicación a la climatología. Con el objeto de contribuir a la meteorología, es necesario disponer de los parámetros troposféricos con una latencia de 90 minutos a un máximo de 24h. Frente a ese desafío, se aplicaron algunas técnicas de estimación del ZTD en sitios GNSS cuyas observaciones están disponibles online o bien que registran archivos cada 2h. En este trabajo se expone el análisis de variabilidad, temporal y espacial, del ZTD, sobre la región central de Argentina, para un intervalo de tiempo entre el 10 y el 23 de diciembre del 2023, período en el cual se desarrollaron dos eventos extremos: una tormenta severa en Bahía Blanca y un viento zonda intenso en Mendoza, ambos el 16 de diciembre del 2023.

Palabras clave ZTD, SIRGAS, GNSS, vapor de agua, tormenta.

INTRODUCCIÓN

El retardo cenital troposférico (ZTD) en la señal GNSS de las estaciones continuas es una medida indirecta del contenido de vapor de agua integrado (IWV) en la columna atmosférica sobre cada sitio.

Desde SIRGAS (Sistema de Referencia Geodésico para las Américas) se cuenta con una red de estaciones GNSS que en sus inicios estaban distribuidas en América del Sur, luego se sumaron estaciones de Centro América y del Caribe y actualmente incluye también estaciones de América del Norte, es la denominada red SIRGAS-CON (<https://sirgas.ipgh.org/red-gnss/estaciones/>).

En el procesamiento riguroso de la red SIRGAS-CON el ZTD se estima como un parámetro, con un intervalo de 1 hora. Dicho cálculo es realizado por cada uno de los centros de procesamiento SIRGAS. Desde el Centro de atmosfera neutra CIMA se realiza el ajuste de las contribuciones del ZTD estimado por los distintos centros de análisis, con su correspondiente indicador de precisión. Los valores resultantes se consideran productos troposféricos finales de SIRGAS (ZTD_{SIR}) y se publican semanalmente con una latencia de entre 21 y 28 días (Mackern et al., 2020).

Se cuenta con una serie de tiempo del ZTD_{SIR} de 10 años (2014 a la actualidad). Considerando todo el historial de estaciones GNSS que han integrado SIRGAS-CON (activas, inactivas y removidas) se dispone de registros del ZTD_{SIR} en 694 sitios. Dichos parámetros resultan una contribución al conocimiento y monitoreo de la variable atmosférica IWV (Rosell et al., 2023) de aplicación a la climatología.

Con el objeto de contribuir a la meteorología es necesario disponer de los parámetros troposféricos con una latencia de 90 minutos a un máximo de 24h. Frente a ese desafío se aplicaron algunas técnicas de estimación del ZTD en sitios GNSS cuyas observaciones están disponibles online o bien que registran archivos cada 2h (Mackern et al., 2020).

¹Universidad J Agustín Maza, Facultad de Ingeniería y Enología, Argentina. Email: vmackern@mendoza-conicet.gov.ar

²Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería, Argentina.

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

En este trabajo se expone el análisis de variabilidad, temporal y espacial, del ZTD, sobre la región central de Argentina, para un intervalo de tiempo entre el 10 y el 23 de diciembre del 2023, período en el cual se desarrollaron dos eventos extremos, una tormenta severa en Bahía Blanca y un viento zonda intenso en Mendoza, ambos el 16 de diciembre del 2023.

DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron las observaciones GNSS de 34 estaciones argentinas y 3 uruguayas, ubicadas entre 31° y 34° de latitud sur. Se utilizaron archivos diarios de las estaciones GNSS, con intervalos de 30 segundos. El total de los archivos de observación fueron descargados desde el sitio oficial de la red RAMSAC, Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo (<https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Ramsac/DescargaRinex>).

El cálculo del ZTD se realizó mediante la aplicación PPP, Precise Point Positioning, del servicio Canadian Spatial Reference System (<https://webapp.csr-scrs.nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>). Los procesamientos se realizaron utilizando efe-méridés rápidas del IGS (International GNSS Service). El análisis se realizó sobre el retardo cenital total (ZTD_{PPP}), el cual surgió de sumar la componente seca más la componente húmeda (TRODRY y TROWET del reporte del servicio PPP).

Para validación se contó con los correspondientes parámetros horarios de SIRGAS, ZTD_{SIR} , en 23 estaciones (Mackern et al., 2022). Cabe mencionar que se pudo disponer del ZTD estimado por el centro de procesamiento del Instituto Geográfico Nacional de Argentina (GNA), en 14 estaciones pertenecientes a la red RAMSAC, no integradas a SIRGAS. En este caso, los ZTD han sido calculados mediante postprocesamiento, con el software GAMIT/GLOBK (ZTD_{GNA}). En total se pudo realizar la validación del ZTD_{PPP} por disponer de los correspondientes parámetros de postproceso en 33 estaciones. Se muestran a modo de ejemplo las series calculadas en la Figura 1A estación VBCA y Figura 1B estación MZAC.

Se realizó un análisis cuantitativo de las diferencias entre ZTD_{SIR} (o ZTD_{GNA} según el caso) y ZTD_{PPP} . Se calcularon como indicadores estadísticos el valor medio, el desvío estándar y un histograma de las diferencias.

Cálculo del valor medio horario por sitio

Se calculó para cada sitio un valor medio horario de los retardos cenitales troposféricos, ZTD_h , considerando los parámetros obtenidos desde pos-proceso correspondientes al día y hora de los años disponibles dentro del periodo 2014-2022. Con el objeto de analizar posibles anomalías para los días de diciembre del 2023, se excluyeron en el cálculo de este promedio los valores correspondientes al año mencionado.

Cálculo de anomalías del ZTD

Tomando como referencia los valores medios horarios predeterminados ZTD_h , se realizaron las diferencias de estos con los parámetros correspondientes de los 14 días de diciembre del 2023, incluyendo días anteriores, durante y posteriores a los eventos extremos que se analizaron. En este caso se utilizaron los ZTD_{PPP} . Con las diferencias encontradas se determinó el valor medio y el correspondiente desvío estándar. Se consideraron “valores anómalos” a aquellas diferencias que excedieron de 3 veces el desvío estándar.

RESULTADOS

Análisis de las Series temporales del ZTD en eventos extremos

De la comparación realizada entre valores del ZTD de toda la serie de años se pudo obtener un patrón medio para los 14 días de diciembre, surgidos de considerar los promedios horarios de los años disponibles por cada estación, dentro del periodo 2014 al 2022. Tomados como referencia se pudo detectar en 16 estaciones (VBCA, PBCA, 3ARO, AGGO, AZUL, BCAR, CHOY, DORE, IGM1, LHCL, LPGS, MPL2, PEBA, SMDM, SRLP, SUAR) un aumento significativo del ZTD de entre 10 y 20 cm, que se relaciona con un aumento en la cantidad de vapor de agua troposférico y la consiguiente tormenta ocurrida entre La Pampa y gran parte de la provincia de Buenos Aires, alcanzando también la Capital Federal, el sábado 16 de diciembre del 2023 (día GPS 350). A modo de ejemplo se muestran las series de tiempo de la estación VBCA, ubicada en la ciudad de Bahía Blanca (Figura 1A). Se pueden observar los crecientes valores de ZTD coincidiendo con lo reportado por el SMN respecto a que “la precipitación tuvo un patrón bien definido con excesos significativos que tendieron a generalizarse en gran parte del este y norte del país, dentro de un fenómeno de El Niño bien desarrollado y de fuerte intensidad. Este factor sumado a los fuerte vientos reportados dieron como resultado el desarrollo de un gran sistema de tormentas que en su avance produjo, además de intensas lluvias, vientos muy fuertes con ráfagas que superaron los 150 km/h, registrándose severos daños” (https://www.smn.gob.ar/sites/default/files/breves_122023.pdf)

De la misma comparación se pudieron detectar en 4 estaciones (MZAC, MZAL, MZAR, MZAE) localizadas en la provincia de Mendoza que presentaron el mismo sábado 16 de diciembre un descenso en el valor del ZTD en algo más que 10 cm (Figura 1B), relacionado con una disminución de la presión atmosférica de 10 hPa y un aumento de la temperatura de 7°C entre las 13 y las 20 hs UTC, ambos factores indicadores de viento Zonda, reportados por el Servicio Meteorológico Nacional. Cabe mencionar que el SMN reportó un record de temperatura máxima más alta para el 16/12/2023 en Mendoza Aeropuerto, Mendoza Observatorio y San Rafael de 44,9, 41,8 y 41,5 °C respectivamente

Validación del ZTD obtenido por PPP

Las diferencias encontradas entre el ZTD_{SIR} (o ZTD_{GNA} según el caso) obtenido de un pos procesamiento riguroso, tomado como referencia y el ZTD obtenido de aplicar PPP para el período estudiado, nos permitió estimar la precisión de estos últimos. En el 82,4 % de las estaciones la media de las diferencias resultó entre $\pm 0,50$ cm, sólo en 4 estaciones se determinó una diferencia media positiva entre 0,51 y 2 cm y sólo en 2 estaciones se determinó una diferencia media negativa entre -0,51 y -2 cm. Concluyendo que de estimar el ZTD mediante PPP resulta posible lograr precisiones mejores que 2 cm.

Anomalías detectadas en el ZTD_{PPP}

Luego de calculadas las anomalías en cada una de las estaciones las mismas fueron mapeadas. Se generaron mapas horarios del ZTD_{PPP} (Figura 2) y sus anomalías, resultando una contribución desde esta técnica GNSS, al conocimiento del comportamiento de algunas variables atmosféricas y su posible relación con el avance de la tormenta.

Se encontraron anomalías muy significativas frente a eventos severos como los dos mencionados. En la región estudiada resultaron en diferencias respecto de la media de referencia: *positivas mayores a 15 cm, en algunos casos más de 25 cm, frente a tormentas severas *negativas menores a -10 cm, en algunos casos alcanzando -25 cm, frente a eventos de sequía extrema como ante el viento Zonda estudiado. En ambos casos la distribución de las anomalías se identifica en una determinada región y la posibilidad de mapearlas en registros horarios permite evaluar su distribución y evolución.

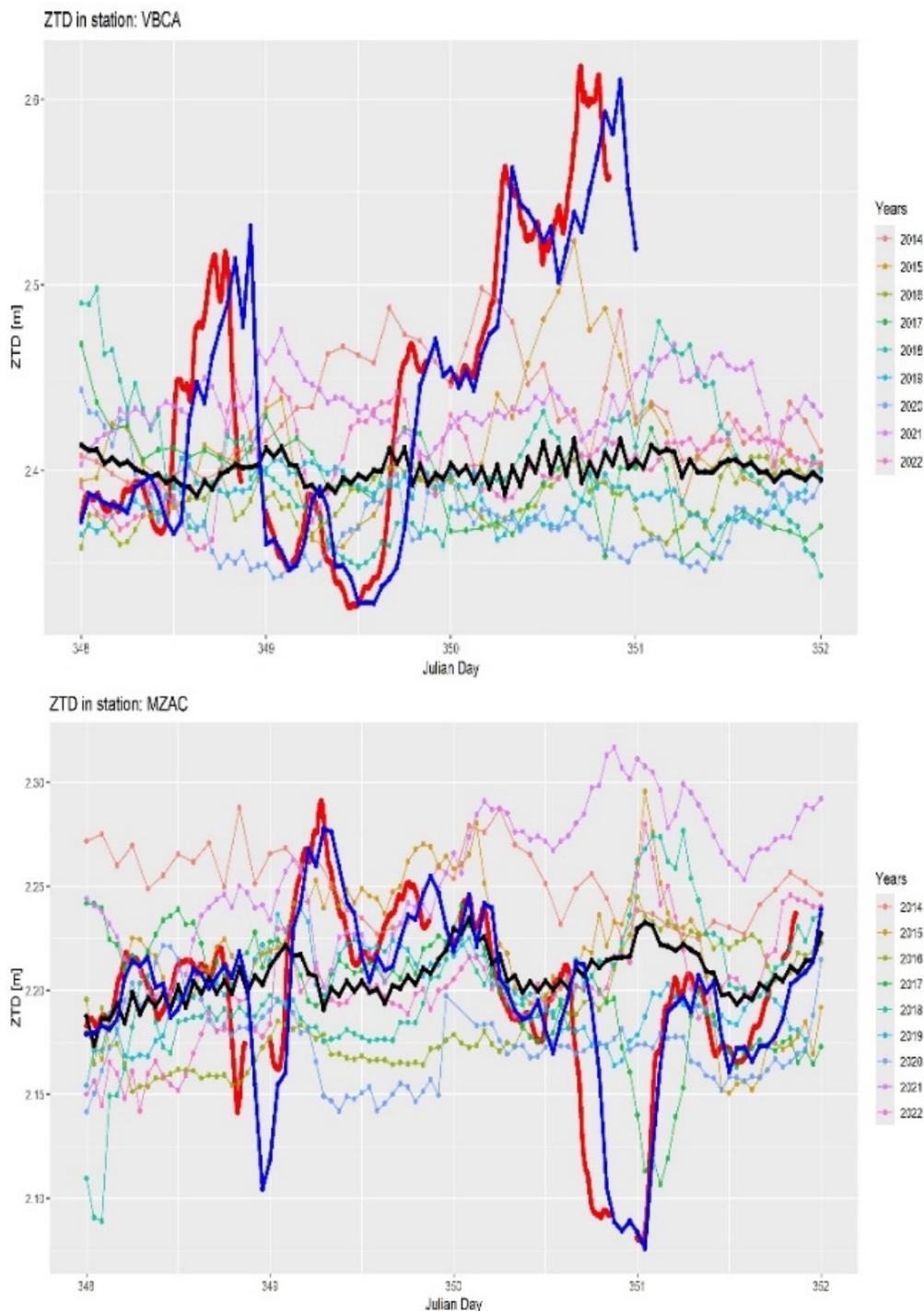


Figura 1. Series de tiempo por año del ZTD_{SIR} (en colores tenuis, según referencias). Negro: ZTD_h (valor medio horario, del periodo 2014-2022). Azul: ZTD_{SIR} valores horarios año 2023. Rojo: ZTD_{PPP} horarios año 2023. A) estación VBCA: Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires. B) Estación MZAC: Mendoza Centro.

CONCLUSIONES

La metodología propuesta para la estimación a cuasi tiempo real (de 90 minutos a 24hs) del ZTD fue validada con respecto a parámetros troposféricos estimados por postprocesamiento riguroso. Se lograron precisiones mejores que 2 cm para una comparación que incluyó parámetros horarios en 33 estaciones distribuidas en el centro de Argentina y para un período de 14 días.

Se identificaron en las series temporales del ZTD que tanto los parámetros estimados por postproceso

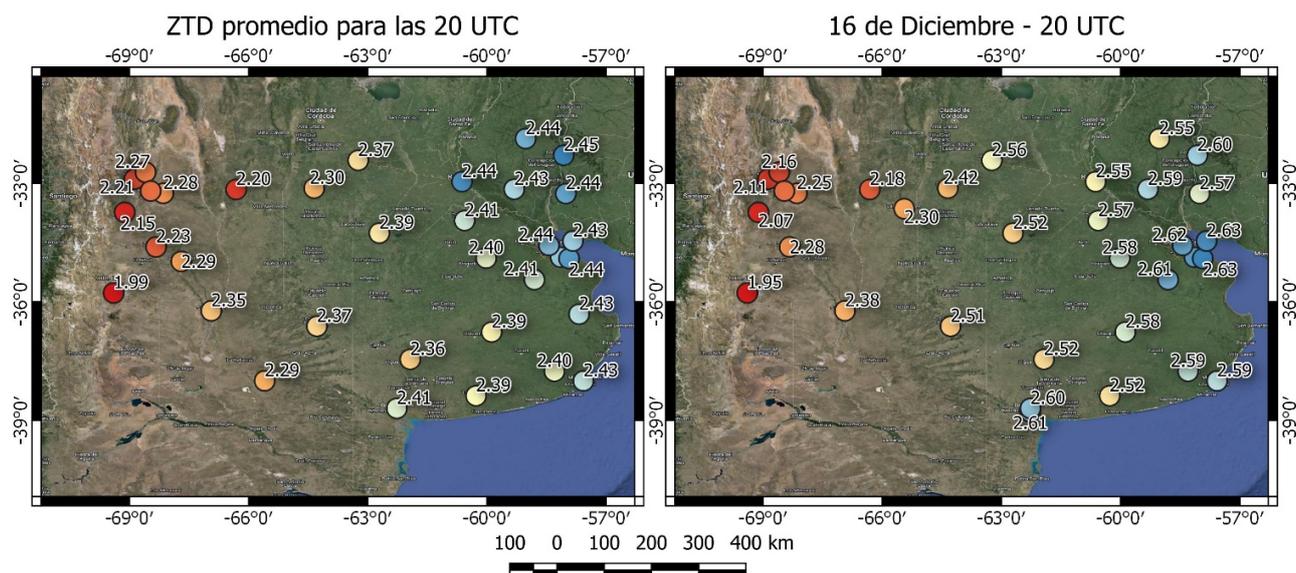


Figura 2. Ubicación de las estaciones GNSS utilizadas. A) Valores de referencia del ZTD (promedios 2014-2022 de las 20 h UTC del 16 de diciembre) y B) valores anómalos del ZTD a las 20 hs UTC del 16/12/2023.

como los obtenidos por PPP evidencia aumentos o disminuciones anómalos frente a eventos severos del orden de entre -15 cm a +25 cm. Con gradientes que evidencian fenómenos meteorológicos adversos. Considerando la magnitud de estas anomalías se concluye que es posible estimar el ZTD mediante PPP ya que la precisión lograda es suficiente como para cuantificar variaciones anómalas que son 10 veces más grandes que la misma.

El mapeo del ZTD y las anomalías correspondientes respecto de la media aporta al conocimiento de la evolución espacio temporal de los eventos meteorológicos extremos como los dos mencionados del sábado 16 de diciembre del 2023.

Por último, mencionar que si bien hay antecedentes de trabajos en donde el ZTD es utilizado para el cálculo de IWW, y esta variable es la utilizada para identificar eventos extremos (Camisay et al., 2020), el retardo cenital troposférico podría utilizarse directamente como una variable de monitoreo como tal, coincidiendo con Dousa & Vaclavovic (2014), sin requerir de las variables necesarias presión atmosférica y temperatura de superficie que en muchas estaciones GNSS no están disponibles para proceder al cálculo del IWW.

REFERENCIAS

- Camisay, M., Rivera, J., Mateo, M., Morichetti, P., & Mackern, M. (2020). Estimation of integrated water vapor derived from Global Navigation Satellite System observations over Central-Western Argentina (2015–2018). validation and usefulness for the understanding of regional precipitation events. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 197, 105143. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.105143>
- Dousa, J. & Vaclavovic, P. (2014). Real-time zenith tropospheric delays in support of numerical weather prediction applications. *Advances in Space Research*, 53, 1347–1358. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.02.021>
- Mackern, M., Mateo, M., Camisay, M., & Morichetti, P. (2020). Tropospheric products from high-level GNSS processing in Latin America. *Beyond 100: The Next Century in Geodesy*, volumen 152 of *International Association of Geodesy Symposia*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/1345_2020_121
- Mackern, M., Mateo, M., Camisay, M., & Rosell, P. (2022). Quality control of SIRGAS ZTD products. *Journal of Geodetic Science*, 12, 1–13. <https://doi.org/10.1515/jogs-2022-0136>
- Rosell, P. A., Mackern, M. V., Rivera, J. A., & Eulliadés, P. (2023). 10-year assessment of GNSS integrated water vapour in the SIRGAS network. *Journal of South American Earth Sciences*, 130, 104539. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104539>