

Impacto de la sequía del año 2020 en el régimen hidrológico local: un análisis hidrogravimétrico

Jonatan Pendiuk^{1,2,3}, Luis Guarracino^{1,2,3}

Resumen En los últimos años, aumentó la frecuencia de los eventos climáticos extremos, provocando cambios en el régimen hidrológico como en las tasas de precipitación, evapotranspiración y recarga de los acuíferos. El monitoreo de estos eventos resulta fundamental para una gestión eficaz del recurso hídrico y la mitigación de su impacto. La hidrogravimetría presenta una oportunidad única para tal fin, ya que proporciona valores de las variaciones del almacenamiento de agua de manera integral. En el presente trabajo se analiza el impacto en las componentes de flujo de agua de la ecuación de balance provocado por la sequía que afectó a la Provincia de Buenos Aires en el año 2020. Para tal fin, se utilizarán datos hidrometeorológicos y residuos de un gravímetro superconductor instalado en el Observatorio Argentino-Alemán de Geodesia, Parque Pereyra Iraola, Prov. de Buenos Aires. A partir de este análisis, se observó una notable reducción en los registros de precipitación acumulada anual y un descenso continuo del nivel freático de 1.3 m en el periodo analizado. Además, las tasas de evapotranspiración se sobrestiman utilizando la ecuación de balance hidrológico clásica para un ambiente de llanura. Por lo tanto, se propone introducir un nuevo término a la ecuación de balance que tenga en cuenta la pérdida de agua por flujo regional. A partir de este nuevo enfoque, se estimaron valores de evapotranspiración en 782 mm y la caída en la reserva de agua de 281.5 mm utilizando datos de gravedad de alta precisión.

Palabras clave Sequías, balance de agua, gravimetría, eventos hidrológicos extremos.

INTRODUCCIÓN

Las sequías meteorológicas son fenómenos climáticos extremos que se producen cuando existe un déficit o escasez continua de precipitaciones. Pueden afectar significativamente la disponibilidad de recursos hídricos, impactando directamente en la cantidad y calidad de agua disponible para diversos usos como consumo humano, agrícola e industrial. La llanura pampeana ha padecido los efectos de sequías de variada intensidad de manera periódica. En los últimos 60 años, se pueden destacar los siguientes períodos de sequías: 1962-1963, 1988-1989, 1995-1999, 2007-2009 y 2020-2023.

En el año 2020, Argentina experimentó una sequía meteorológica severa relacionada con el denominado fenómeno de La Niña. De acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional, el periodo mencionado es el quinto más seco registrado desde 1961, con un valor negativo de la anomalía de precipitaciones del 16% aproximadamente. Particularmente, la sequía del año 2020 tuvo un impacto severo en la Provincia de Buenos Aires, perjudicando la actividad agropecuaria y el abastecimiento de agua para consumo. Como consecuencia de este fenómeno, el Gobierno Provincial declaró en el año 2021 la emergencia hídrica en el norte de la provincia (Decreto 710), incluyendo los partidos de Avellaneda, Berazategui, Berisso, Ensenada, La Plata y Quilmes.

El comportamiento hidrológico de una región se puede analizar mediante la ecuación de balance hídrico. Este balance deriva del concepto de conservación de masa, es decir, el equilibrio entre el almacenamiento de agua y todos los recursos hídricos que entran o salen de un sistema en un intervalo de tiempo determinado. Los ingresos al sistema están dados principalmente por las precipitaciones (lluvia o nieve), mientras que las pérdidas se deben a la evapotranspiración y la escorrentía (superficial y subterránea). En zonas extremadamente planas o de "hiperllanura", como en la Provincia de Buenos

¹Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Argentina. Email: jpendiuk@fcaglp.unlp.edu.ar

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

³Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Argentina.

Aires, los movimientos horizontales de agua prevalecen sobre los verticales. En estas zonas se suele utilizar la siguiente ecuación de balance hídrico:

$$\Delta S = P - R - ET, \quad (1)$$

donde ΔS representa las variaciones del almacenamiento de agua en el sistema durante el período considerado, P es la precipitación, R es la escorrentía superficial y ET es la evapotranspiración. Debido a la poca pendiente topográfica, la escorrentía suele ser muy débil, estimándose en un valor cercano al 5% de la precipitación. La ET suele representar la mayor salida de agua del sistema, pudiendo superar el 80% de la precipitación. El término más difícil de medir o estimar en la ecuación (1) es la variación del almacenamiento ΔS . En la zona saturada, la contribución a ΔS puede estimarse mediante el monitoreo del nivel freático en pozos. Sin embargo, las variaciones del almacenamiento en la zona no saturada suelen ser mucho más complejas y difíciles de realizar.

Las variaciones temporales de gravedad provistas por los gravímetros superconductores constituyen actualmente la única técnica no invasiva que permite estimar de manera continua las variaciones del almacenamiento en todo el perfil de suelo. Afortunadamente Argentina cuenta con el único gravímetro superconductor de Sudamérica (SG038) que se encuentra instalado en el Observatorio Argentino-Alemán de Geodesia (AGGO) en el Parque Pereyra Iraola, Partido de Berazategui. En el presente trabajo se propone evaluar los efectos de la sequía del año 2020 mediante un balance hídrico utilizando los datos del gravímetro superconductor y el instrumental hidrometeorológico instalado en AGGO.

METODOLOGÍA Y DATOS

El observatorio AGGO cuenta con 3 estaciones meteorológicas automáticas distribuidas en diferentes locaciones dentro de su predio para monitorear las variables atmosféricas en tiempo real. Cada estación cuenta con un pluviógrafo que registra las precipitaciones con una resolución temporal de 15 minutos. En este trabajo, los tres registros de precipitaciones fueron comparados y agrupados para obtener una única serie temporal sin faltantes de datos. Para monitorear las variaciones del nivel freático del acuífero Pampeano se instalaron transductores de presión en dos pozos de monitoreo cuya separación es de 3.15 m. Debido a la pequeña distancia entre los pozos, los registros de los transductores de presión son prácticamente idénticos. En la Figura 1 se muestran las variaciones del nivel freático registradas en uno de los pozos.

El gravímetro superconductor SG038 instalado en AGGO registra las variaciones temporales de gravedad desde diciembre del 2015. Este gravímetro permite monitorear las variaciones de las reservas de agua (ΔS) de manera integral y no invasiva en un área determinada por un radio de influencia de aproximadamente 1000 m. Estas variaciones reflejan el balance de los ingresos y egresos de los diferentes flujos de agua en el sistema hidrológico producidos por la precipitación, la evapotranspiración y la escorrentía. Es por ello que el gravímetro superconductor es una herramienta invaluable para el desarrollo de estrategias de mitigación de las consecuencias de eventos hidrológicos extremos, como el que se analiza en este trabajo, fortaleciendo de este modo la resiliencia de los sectores socioeconómicos y medioambientales (Creutzfeldt et al., 2012).

Los datos del gravímetro superconductor SG038 se encuentran disponibles, con diferentes niveles de procesamiento, en la base de datos del Servicio Internacional para la Geodinámica y Mareas Terrestres (IGETS) (Wziontek et al., 2017). De particular interés para este trabajo son los datos de Nivel 3. A estos datos de gravedad se le han removido los principales efectos geodinámicos, tales como las mareas terrestres, el movimiento del polo, la carga oceánica y los efectos gravimétricos producidos por la redistribución de masas atmosféricas. Se asume, que esta serie gravimétrica está principalmente afectada por la distribución de masas hidrológicas locales (Van Camp et al.,

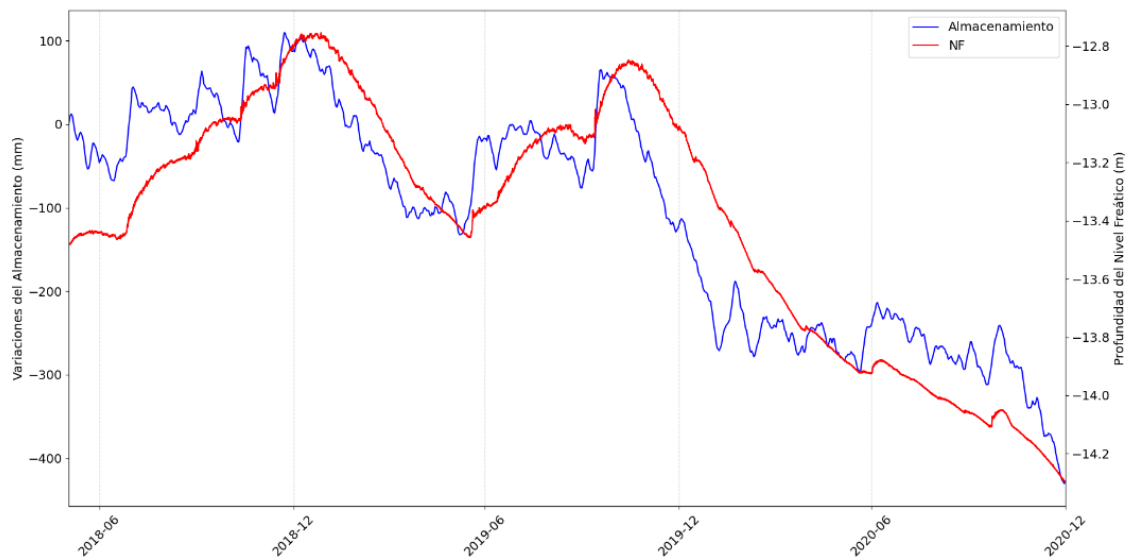


Figura 1. Series temporales del nivel freático (NF) y variaciones del almacenamiento del agua estimada mediante los datos del gravímetro superconductor SG038.

2017). Los datos de gravedad de Nivel 3 tienen unidades de nm/s^2 y están procesados hasta el día 31 de diciembre del 2020 (último acceso: 15 de enero del 2024). La serie temporal gravimétrica tiene una resolución temporal de 1 minuto, pero fue remuestreada a 1 día para realizar el análisis hidrogravimétrico. Además del procesamiento estándar realizado por el IGETS, en el presente trabajo se removieron los efectos hidrológicos globales y la carga oceánica no mareal utilizando los modelos provistos por el Servicio de Cargas del EOST (<http://loading.u-strasbg.fr/>). Por último, para transformar los valores de gravedad en valores de almacenamiento (mm) se utiliza un factor de conversión cuyo valor fue estimado por Pendiuk et al. (2023b) en 2.67 mm/nm/s^2 . En la Figura 1 se ilustran los datos de almacenamiento para el período comprendido entre mayo de 2018 y diciembre de 2020.

Los datos del gravímetro superconductor SG038 fueron utilizados exitosamente para estimar la evapotranspiración acumulada mediante la ecuación de balance (1) en períodos climáticos que podrían calificarse como normales para la región de estudio (Pendiuk et al., 2023a,b). Durante la sequía del año 2020 el gravímetro superconductor midió una caída abrupta de las reservas de agua de 281.5 mm que fue acompañada por un descenso del nivel freático superior a un metro (ver Figura 1). Bajo estas condiciones la hipótesis de flujo unidimensional de la ecuación (1) deja de ser válida ya que los movimientos horizontales de agua comienzan a ser significativos. Los descensos del nivel freático no son producto de la ET sino del flujo regional que de manera lenta pero continua descarga hacia el Río de La Plata. Para contemplar este efecto, se propone incluir un término adicional en la ecuación de balance hídrico (1) que representa la salida de flujo de agua del sistema hidrológico por flujo regional:

$$\Delta S = P - R - ET - \alpha S_y \Delta h, \quad (2)$$

donde S_y es el rendimiento específico del acuífero, Δh la variación temporal del nivel freático en el período temporal considerado para el análisis y α una constante del modelo. El valor de S_y para el acuífero Pampeano en el predio de AGGO fue estimado en 0.1 utilizando los datos del gravímetro superconductor (Pendiuk et al., 2020). Resulta importante remarcar que en condiciones de precipitaciones normales el nivel freático permanece aproximadamente estable ($\Delta h = 0$) por lo

que el término de flujo regional ($\alpha S_y \Delta h$) de la ecuación (2) resulta despreciable y el flujo vuelve a ser predominantemente vertical.

RESULTADOS

Para analizar el efecto de la sequía en el régimen hidrológico se utilizaron datos de precipitación, nivel freáticos y residuos del gravímetro superconductor registrado en AGGO en el periodo comprendido entre los días 1 de enero del 2020 y 31 de diciembre del 2020. Durante el periodo analizado se registró una precipitación de 792 mm que resulta ser significativamente menor al promedio anual de 1073 mm. La disminución de las precipitaciones modificó el régimen hidrológico local que se tradujo en variaciones del nivel freático que fueron medidas por los transductores de presión instalados en los pozos de monitoreo de AGGO. Estos registros mostraban un comportamiento estacional en el periodo mayo 2017 - noviembre 2019 con una profundidad promedio del nivel freático de 13.22 m. Sin embargo, a partir de noviembre del 2019 los niveles de agua descendieron de manera continua debido a la baja tasa de recarga del acuífero Pampeano y al flujo regional. Para fines del año 2020 se registró un descenso de 1.3 m en los niveles de agua (ver Figura 1). Bajo estas condiciones, la mayor parte del agua precipitada en el periodo analizado fue retenida en las primeras capas del suelo y consumida por las plantas que se encontraban bajo estrés hídrico.

Por último, mediante el análisis de datos disponibles y la aplicación de la ecuación de balance hidrológico (Ec. 2), se logró determinar un valor de evapotranspiración acumulada para el periodo de interés de 782 mm. Es importante destacar que estos resultados difieren significativamente de los obtenidos mediante la aplicación de la ecuación clásica de balance (Ec. 1), la cual tiende a sobreestimar la evapotranspiración en periodos de sequías, proporcionando valores notoriamente más altos, alcanzando los 1033.3 mm.

CONCLUSIONES

El análisis del comportamiento hidrológico en ambientes de llanura durante un período de sequía como el que tuvo lugar en el año 2020 motivó la revisión de los modelos de balance hídrico. La utilización del modelo clásico conduce a resultados erróneos como la obtención de ET superiores a la precipitación. En este trabajo se propone la inclusión de un término adicional en la ecuación de balance que tiene en cuenta el flujo regional. Este término depende del rendimiento específico del acuífero (S_y) y las variaciones del nivel freático, resultando significativo sólo durante períodos de sequía. Para estimar el término de la variación de las reservas de agua en el sistema (ΔS) se utilizan datos del gravímetro superconductor de AGGO. Esta técnica hidrogravimétrica es la única capaz de monitorear esta variable de manera continua y no invasiva, lo que constituye un valioso aporte del área de la Geofísica al conocimiento hidrogeológico de la región. Para el año 2020 la precipitación acumulada fue estimada en 792 mm, la ET en 782 mm y la caída en la reserva de 281.5 mm. Finalmente, resulta importante destacar que la sequía asociada al fenómeno de La Niña continuó hasta el año 2023 y será analizada de manera completa cuando se actualicen en la base del IGETS los datos de Nivel 3 del gravímetro superconductor SG038.

REFERENCIAS

- Creutzfeldt, B., Ferré, T., Troch, P., Merz, B., Wziontek, H., & Güntner, A. (2012). Total water storage dynamics in response to climate variability and extremes: Inference from long-term terrestrial gravity measurement. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117, D08112. <https://doi.org/10.1029/2011JD016472>
- Pendiuk, J., Degano, M., Guarracino, L., & Rivas, R. (2023a). Superconducting gravimeters: A novel tool for validating remote sensing evapotranspiration products. *Hydrology*, 10(7), 146. <https://doi.org/10.3390/hydrology10070146>
- Pendiuk, J., Guarracino, L., Reich, M., Brunini, C., & Güntner, A. (2020). Estimating the specific yield of the Pampeano

aquifer, Argentina, using superconducting gravimeter data. *Hydrogeology Journal*, 28, 2303–2313. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02212-z>

Pendiuk, J., Guarracino, L., Reich, M., & Güntner, A. (2023b). Estimating cumulative evapotranspiration using superconducting gravimeter data: a study in Buenos Aires Province, Argentina. *Hydrological Sciences Journal*, 68(15), 2262–2275. <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2264283>

Van Camp, M., de Viron, O., Watlet, A., Meurers, B., Francis, O., & Caudron, C. (2017). Geophysics from terrestrial time-variable gravity measurements. *Reviews of Geophysics*, 55, 938–992. <https://doi.org/10.1002/2017RG000566>

Wziontek, H., Wolf, P., Häfner, M., Hase, H., Nowak, I., Rülke, A., Wilmes, H., & Brunini, C. (2017). *Superconducting gravimeter data from AGGO/La Plata - Level 1*. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/igets.lp.11.001>