

BALANCE HÍDRICO APLICANDO TELEDETECCIÓN PARA LA GESTIÓN DE CUENCAS FLUVIALES

Montealegre Medina F.A.^a y Gaspari F.J.^b

^a *Becario Doctoral CICPBA - CEIDE. FCAYF. Universidad Nacional de La Plata.
ARGENTINA*

^b *Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas. CEIDE. FCAYF. Universidad Nacional de La
Plata. ARGENTINA*

e-mail: cuencas@agro.unlp.edu.ar

RESUMEN

En la última década, gracias a la disponibilidad de imágenes satelitales en plataformas web, es posible estimar balances hídricos con diferentes variables espacio temporales en una cuenca hidrográfica, para el apoyo en la gestión sostenible de los recursos hídricos e inundaciones. El objetivo del trabajo es definir el balance hidrológico para la temporada húmeda del año 2017 de la subregión A1, al noroeste del Río Salado, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Se evaluó entre los meses de enero y abril utilizando datos de precipitación obtenidos del sensor IMERG, evapotranspiración del sensor MODIS, datos de escorrentía y almacenamiento de agua superficial de los componentes del sistema GLDAS 2.2 (Global Land Data Assimilation System). En la región, en dicho período, se registraron emergencias de inundación, que se corroboraron por datos pluviales de estaciones meteorológicas. El análisis se realizó a nivel de microcuenca, debido a la variabilidad espacial de los datos. Los resultados alcanzados en el periodo expresaron que la subcuenca 5 indicó la menor precipitación (750 mm) y el centro de la subcuenca A1 manifestó 835 mm. El escurrimiento superficial satelital mostró el máximo en la microcuenca 1 (68 mm), mientras que, en el resto de la subcuenca, los valores se mantuvieron uniformes. La evapotranspiración fue máxima en la microcuenca 5 (275 mm). Se concluye que esta metodología con imágenes satelitales es óptima para la descripción del balance hídrico, en una zona de gran extensión, representando en forma fehaciente distribución de la evapotranspiración y el escurrimiento superficial.

Palabras Clave: Análisis de eventos pluviales, Balance de agua, cuenca de llanura.

INTRODUCCIÓN

En la última década, gracias a la disponibilidad de imágenes satelitales en plataformas web, es posible estimar balances hídricos con diferentes variables espacio temporales en una cuenca hidrográfica, para el apoyo en la gestión sostenible de los recursos hídricos e inundaciones.

Las observaciones espaciales tienen el potencial de mejorar significativamente nuestra comprensión de los procesos hidrológicos en cuencas hidrográficas y su influencia en la variabilidad climática, geodinámica, socio-económica y generación de balances hidrológicos. Se puede obtener información sin precedentes a través de la combinación de observaciones superficiales con observaciones desde el espacio, las cuales ofrecen una

cobertura geográfica global, un buen muestreo espacio-temporal y un monitoreo continuo en el tiempo (Pereira et al., 2018).

El balance hidrológico es un modelo simplificado de estimación de la reserva de agua, en la zona de exploración radicular o sea en la zona insaturada del suelo. A partir del mismo, es posible cuantificar la disponibilidad de humedad durante el ciclo de un cultivo y el agua consumida por la planta. Además, con los resultados generados se pueden calcular índices agroclimáticos, que indiquen la disponibilidad regional de agua en el suelo en forma espacial y temporal según los valores utilizados en el cómputo (Fernández-Long et al., 2012). Es importante conocer que los factores principales que condicionan la actividad vegetativa son la humedad y la temperatura. Por debajo de unas condiciones determinadas de temperatura y de humedad se produce la limitación del desarrollo vegetativo de las plantas superiores, y por lo tanto se paraliza su actividad vegetativa (Cámara Artigas et al., 2012).

El almacenamiento de agua terrestre (TWS, Terrestrial Water Storage por su sigla en inglés) es el agua almacenada sobre y debajo de la superficie terrestre, que incluye nieve, hielo, humedad del suelo, agua subterránea y agua superficial (Tang et al., 2010). Los cambios en las anomalías de TWS derivados de las teleobservaciones del Sistema Satelital GRACE (<https://www.jpl.nasa.gov/missions/details.php?id=5882>), representan una medida integrada verticalmente de las variaciones en la acumulación de agua expresada en centímetros, y constituyen el agua subterránea, la humedad del suelo, el agua superficial, la nieve y la biomasa.

Sin embargo, el TWS es controlado principalmente por la humedad del suelo y el agua subterránea (Ospina Montes, 2016), es decir mide cambios totales de la columna integrada de agua terrestre almacenada (TWS) desde el espacio. Estas en anomalías entre el TWS y cambios en agua almacenada determinados con modelos terrestres ayuda a desasociar los componentes e identificar áreas inundadas (Thomas et al, 2020).

En los últimos meses de 2016 en el norte bonaerense y pampeano, un nuevo ciclo húmedo provocó serios anegamientos e inundaciones (Dillon et al., 2017), que obligaron a las autoridades provinciales a declarar la emergencia agropecuaria en la región, la cual se extendió en los primeros meses de 2017. Estas acumulaciones de agua se pueden monitorear con teledetección y establecer sus cambios a escala espacio - temporal.

El objetivo del trabajo fue definir el balance hidrológico aplicando técnicas de teledetección para la temporada húmeda del año 2017 de la subregión A1, al noroeste del Río Salado, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

MÉTODOS

El área en estudio fue la subregión A1 de la cuenca del Río Salado en la región Pampa húmeda bonaerense, específicamente en la Pampa Deprimida. Es una región de llanuras con un relieve muy suave, casi horizontal, cubierta de depresiones locales, donde las precipitaciones que llegan a la superficie se almacenan formando encharcamientos poco profundos y bañados, según describe el Plan Maestro del Río Salado (PMRS) (Gomez et

al., 2017; MOSP, 1999). La superficie que ocupa es de 17742.85 km², divididas en 5 subcuencas (ver Fig.1).

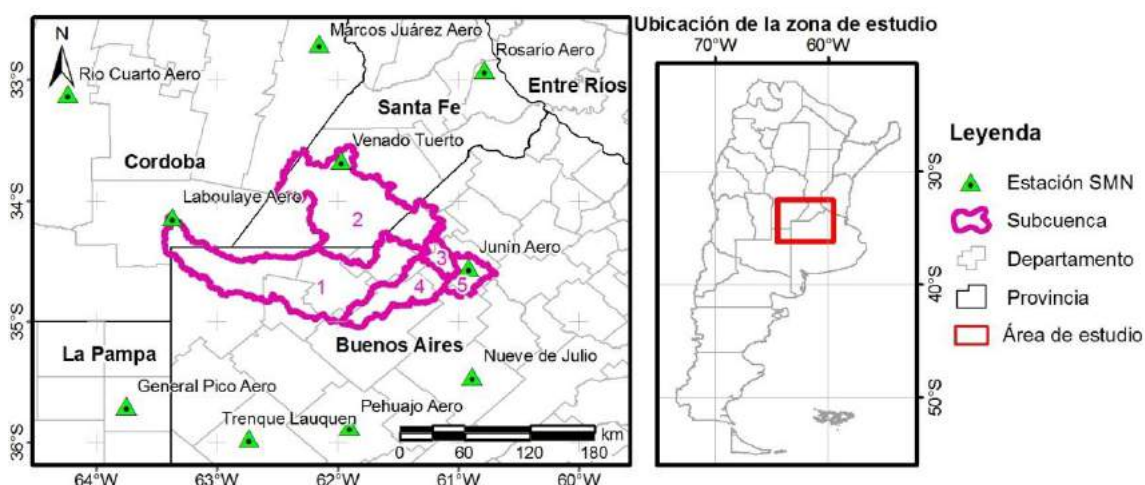


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio y estaciones meteorológicas analizadas.

Considerando las inundaciones de abril del año 2017 (Dillon et al., 2017) se solicitó al Servicio Meteorológico Nación (SMN) información pluvial mensual del año mencionado para el área de estudio. Las estaciones meteorológicas consultadas fueron: Gral. Pico Aero, Junín Aero, Laboulaye Aero, Marcos Juárez Aero, Nueve de Julio, Pehuajó Aero, Río Cuarto Aero, Rosario Aero, Trenque Lauquen y Venado Tuerto Aero. Este pedido se registró bajo el Expediente N°180.923 de Centro de Información Meteorológica (CIM). La ubicación de las estaciones se representa en la Fig. 1 y la Tabla I presenta los datos de lluvia mensual y anual de todas las estaciones, a escala regional y se identifica que las estaciones de Junín, Laboulaye y Venado Tuerto están dentro de los límites de la subregión A1.

Tabla I. Datos de precipitación del año 2017 aportados por el SMN.

Estación / Mes	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Anual (mm)
Gral. Pico Aero	62.5	195.0	183.0	210.0	59.9	19.2	38.4	21.0	76.0	63.0	87.6	41.0	1056.6
Junín Aero	148.9	54.0	94.9	359.0	98.8	12.2	29.5	71.0	138.2	104.7	29.4	68.0	1208.6
Laboulaye Aero	179.2	112.7	186.6	187.0	59.8	23.9	16.3	14.8	89.3	41.1	58.0	121.9	1090.6
Marcos Juárez Aero	178.0	135.3	100.0	123.0	15.7	34.2	6.0	16.4	102.5	32.3	78.8	173.8	996.0
Nueve de Julio	78.1	90.6	126.2	203.0	61.5	32.8	29.1	89.9	133.3	95.4	38.6	30.6	1009.1
Pehuajó Aero	82.0	161.9	50.4	96.0	52.0	62.2	33.4	52.2	94.0	56.4	56.0	53.2	849.7
Río Cuarto Aero	91.5	63.9	61.4	56.7	6.8	15.2	8.0	6.1	16.0	22.5	72.2	140.6	560.9
Rosario Aero	200.1	106.2	151.8	124.3	52.9	23.6	41.2	38.7	173.1	39.8	50.3	115.7	1117.7
Trenque Lauquen	69.0	3.0	126.5	155.5	34.2	32.0	42.0	44.0	117.0	61.0	115.0	36.5	835.7
Venado Tuerto Aero	158.0	100.5	145.8	195.0	99.7	19.1	19.0	38.3	107.0	63.0	40.5	190.7	1176.6
Promedio (mm)	124.7	102.3	122.7	171.0	54.1	27.4	26.3	39.2	104.6	57.9	62.6	97.2	9901.5

En la Tabla I se visualizan los promedios pluviales mensuales que manifiestan al cuatrimestre húmedo desarrollado entre los meses de enero y abril. Este cuatrimestre ha sido analizado en el presente trabajo, debido a su importante participación en las inundaciones estudiadas.

El balance hídrico en la A1 se determinó con la aplicación del modelo HidroBio que es un modelo matemático autoejecutable elaborado por los Dres. Rafael Cámara Artigas y José Ramón Martínez Batlle, de la Universidad de Sevilla, España, dentro del programa Microsoft Excel, aplicando el método de Thornthwaite-Matter (ver Ec. 1) (Cámara Artigas et al., 2012).

La evaluación de la acumulación de agua para definir la inundación o zona anegada en la zona de estudio se implementó aplicando técnicas de teledetección, a partir del método de equilibrio hídrico empleando variables de flujo hidrológico provenientes de imágenes satelitales (ver Ec. 1).

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = P - E - R \quad (1)$$

Donde $\Delta S / \Delta t$ representa el cambio en el almacenamiento de agua terrestre ΔS durante un período de tiempo determinado Δt ; P es la precipitación mensual (mm / mes); E es la evapotranspiración (mm / mes) y R es el flujo de la corriente o escorrentía (Runoff en inglés), que incluye tanto el agua superficial como el subsuperficial.

En este trabajo, el intervalo de tiempo fue mensual y los valores de P , R y E se obtuvieron con productos de sensores satelitales (Tang et al., 2010). Las imágenes utilizadas poseen diferentes resoluciones espaciales y temporales, se buscó obtener productos de datos acumulados mensuales que abarquen por completo la subregión A1 de estudio.

El balance hídrico geoespacial se realizó aplicando técnicas de teledetección y herramientas de información geográfica, para la temporada húmeda (enero a abril) del año 2017 de la subregión A1. Para ello, se trabajó con los productos satelitales de:

- Programa Integrated Multi-satellite Retrievals para GPM (IMERG) versión 6, obtenidos de la plataforma Giovanni de la NASA, que provee información de **precipitación acumulada (P)** por mes en milímetros (Huffman et al., 2019);
- Respecto a la **evapotranspiración (E)**, se utilizaron los productos MODIS (MOD16A2) a bordo del satélite EOS-Terra (Earth Observation System Terra) (Running et al., 2017);
- La información de **escorrentía (R)** y **almacenamiento de agua terrestre (TWS)** se obtuvieron del Global Land Data Assimilation (GLDAS) versión 2.2 (Li et al., 2020).

RESULTADOS

Observando los datos meteorológicos del SMN se encontró que en la región alcanzo valores pluviales mayores a la media en el mes de abril, obteniendo un promedio de las estaciones analizadas de 171 mm, siendo los valores máximos en la subregión A1 con 359 mm en Junín, 187 mm en Laboulaye y 195 mm en Venado Tuerto.

En la Tabla II se presenta el balance hídrico para las tres estaciones meteorológicas en la subregión A1, para el periodo húmedo, donde se visualizan los excesos hídricos producidos en el mes de abril. En dicho mes la evapotranspiración disminuye de forma considerable, generando un aumento de agua almacenada en el suelo y excedentes de humedad. Esta situación genera también un aumento en la dinámica de la escorrentía superficial.

Tabla II. Balance hídrico de Thornthwaite-Matter por localidad. Fuente (Cámara Artigas et al., 2012)

	Mes	T	P	ETP	P - ETP	ppa	ST	ΔST	ETR	Dh	S	R	DT	% S(P)
Junin	Enero	23.5	148.9	130.5	18.4	-83.0	85.4	18.4	130.5	0.0	0.0	6.4	85.5	4.3
	Febrero	23.5	54.0	122.8	-68.8	-151.8	53.0	-32.4	86.4	-36.4	0.0	3.2	53.0	5.9
	Marzo	20.6	94.9	89.3	5.6	0.0	58.6	5.6	89.3	0.0	0.0	1.6	58.6	1.7
	Abril	16.7	359.0	56.1	302.9	0.0	150.0	91.4	56.1	0.0	211.5	106.5	255.7	29.7
Laboulaye	Enero	24.6	179.2	141.0	38.2	-22.0	129.2	38.2	141.0	0.0	0.0	1.0	129.2	0.6
	Febrero	24.1	112.7	127.8	-15.1	-37.1	116.0	-13.2	125.9	-1.9	0.0	0.5	116.0	0.5
	Marzo	21.3	186.6	93.7	92.9	0.0	150.0	34.0	93.7	0.0	58.9	29.7	179.4	15.9
	Abril	17.3	187.0	58.4	128.6	0.0	150.0	0.0	58.4	0.0	128.6	79.2	214.3	42.3
Venado Tuerto	Enero	23.9	158.0	134.1	23.9	0.0	150.0	0.0	134.1	0.0	23.9	18.8	162.0	11.9
	Febrero	23.7	100.5	124.4	-23.9	-23.9	127.0	-23.0	123.5	-0.9	0.0	9.4	127.0	9.3
	Marzo	20.9	145.8	91.1	54.7	0.0	150.0	23.0	91.1	0.0	31.7	20.5	165.8	14.1
	Abril	17.2	195.0	58.5	136.5	0.0	150.0	0.0	58.5	0.0	136.5	78.5	218.3	40.3

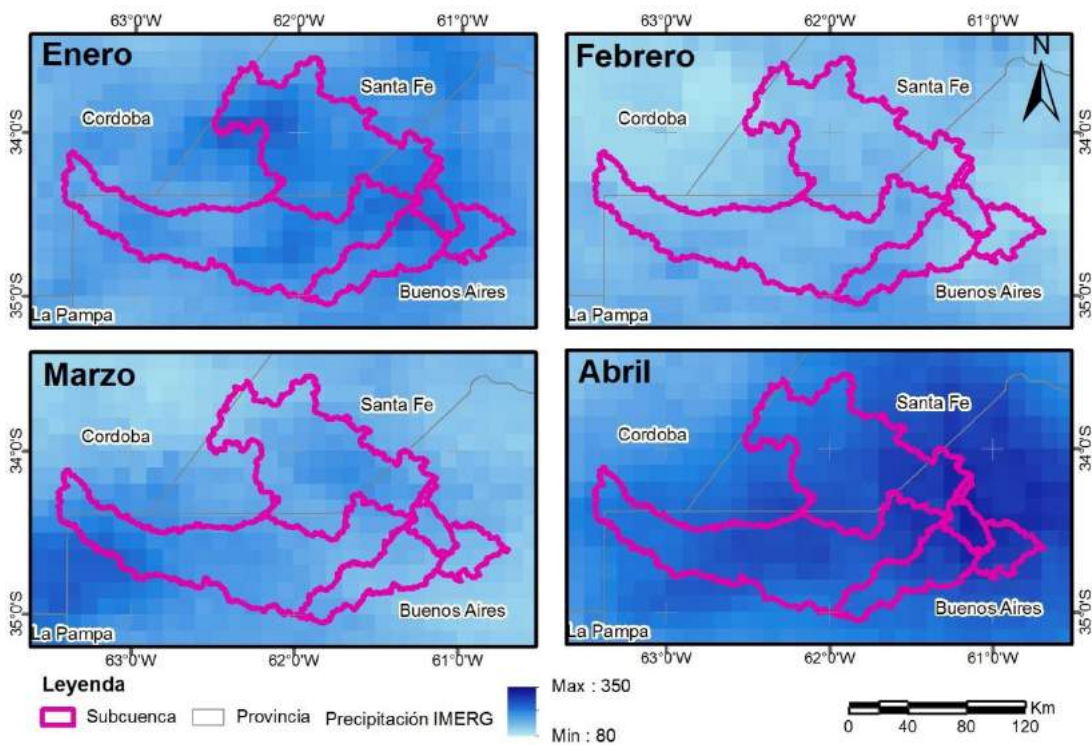
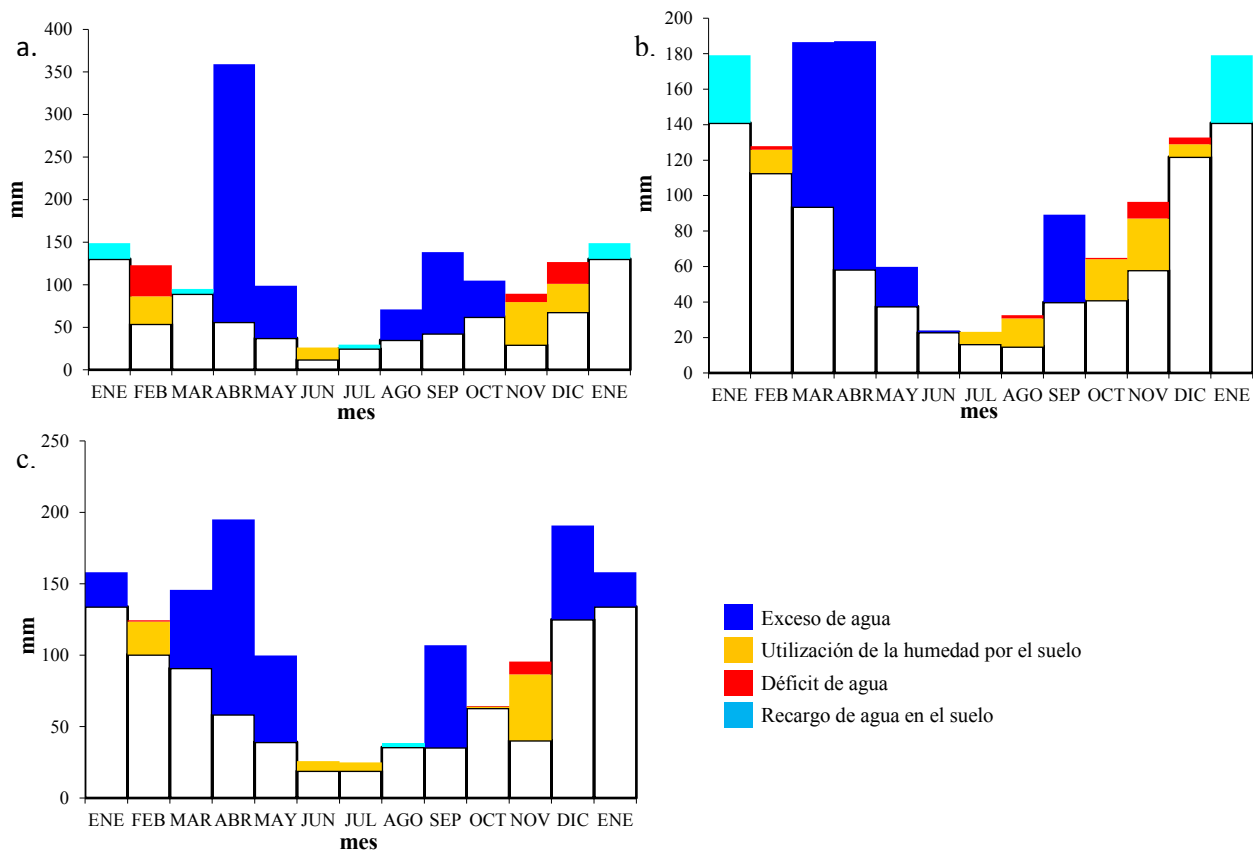
Donde T: Temperatura media mensual en °C; ETP: Evapotranspiración potencial en mm; P: Precipitación media mensual en mm; P-ETP: Pérdidas o adiciones potenciales de humedad en el suelo; ppa: Pérdidas potenciales acumuladas; ST: Agua almacenada en el suelo; ΔST: Cambios del agua almacenada en el suelo; ETR: Evapotranspiración real; S: Excedente de humedad; Dh: Déficit de humedad; R: Escorrentía total.

En la Fig. 2 se presentan los diagramas del balance hídrico corroborando los excesos de agua en toda la región para el periodo presentado en la Tabla II.

Luego de procesar la información según la temporalidad de cada producto satelital según dato (P – E – R), las imágenes satelitales de cada parámetro del balance hídrico se presentan de forma acumulada mensual en las figuras 3, 4, 5 y 6.

En la Fig. 3 se encontraron valores de P más altos en el mes de abril, coincidiendo con los datos del CIM, con valores superiores a los 300 mm en el centro de la A1, en especial en la subcuenca 3. Opuestamente, los valores más bajos de precipitación se presentaron en el mes de febrero.

La E fue reduciéndose desde enero a abril (ver Fig. 4) percibiendo los valores más bajos en el mes de abril, debido a la reducción de temperatura en la transición de verano a otoño. Los valores de temperaturas también fueron obtenidos por las estaciones del CIM y utilizados de igual forma en el balance hídrico del HidroBio como se muestra en la Tabla II.



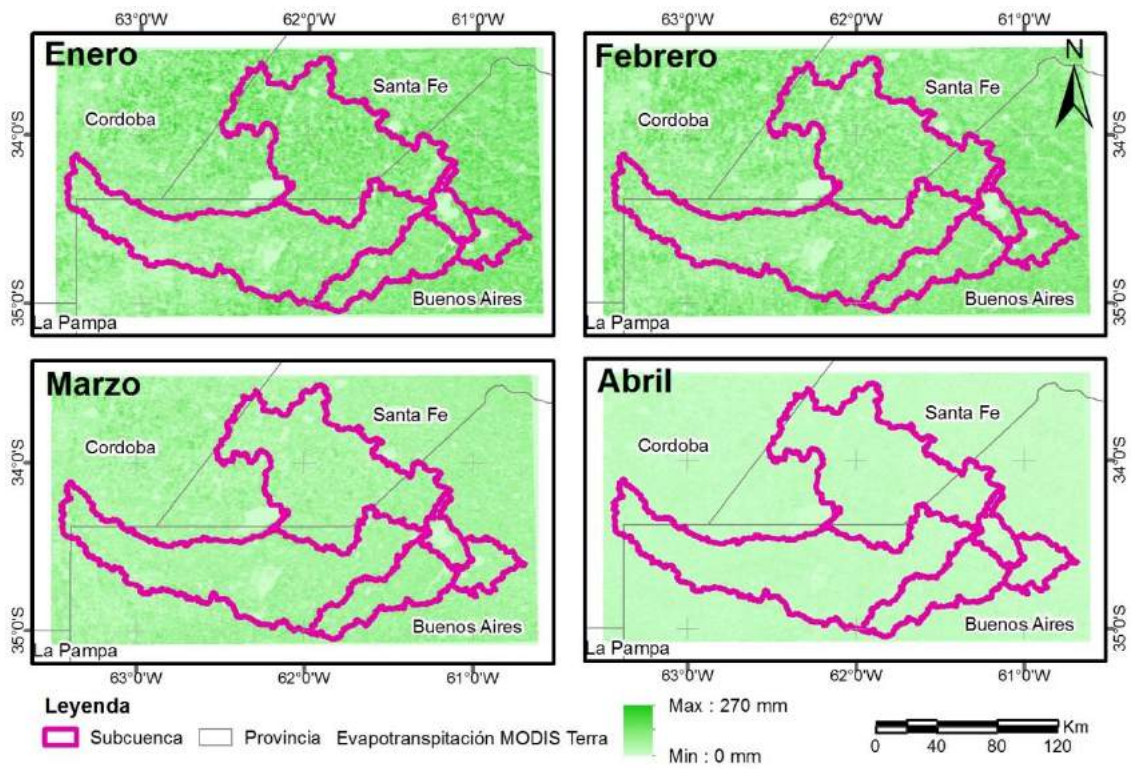


Figura 4. Evapotranspiración acumulada mensual (mm).

En la Fig. 5 se representa R detectada por el sistema GLDAS, que expresa valores mínimos en los meses de febrero y marzo hasta el inicio de las lluvias en abril.

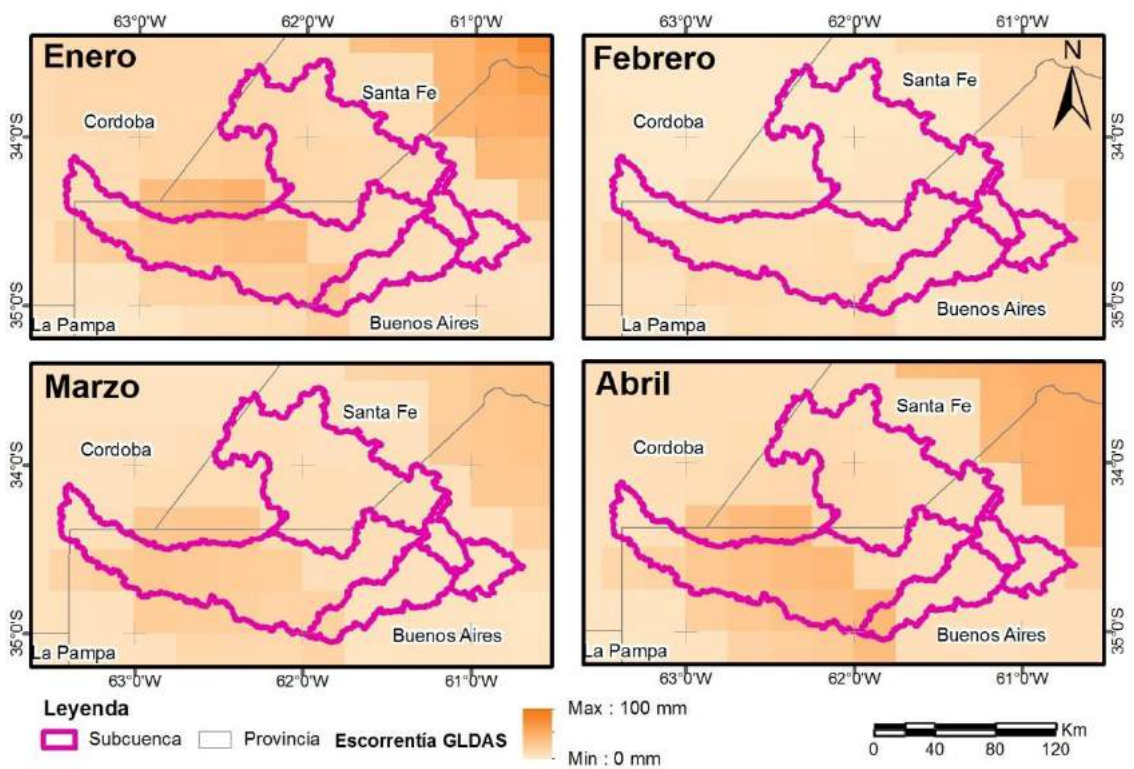


Figura 5. Escorrentía acumulada mensual (mm).

Los valores de TWS que expresan el almacenamiento de agua terrestre se calcularon por medio de la diferencia del día final e inicial de cada mes, obteniendo así la ganancia de agua en milímetros en cada periodo. En la Fig. 6 se visualiza la mayor ganancia hídrica en el mes de abril en la zona este de la subregión A1 y las pérdidas en el primer bimestre.

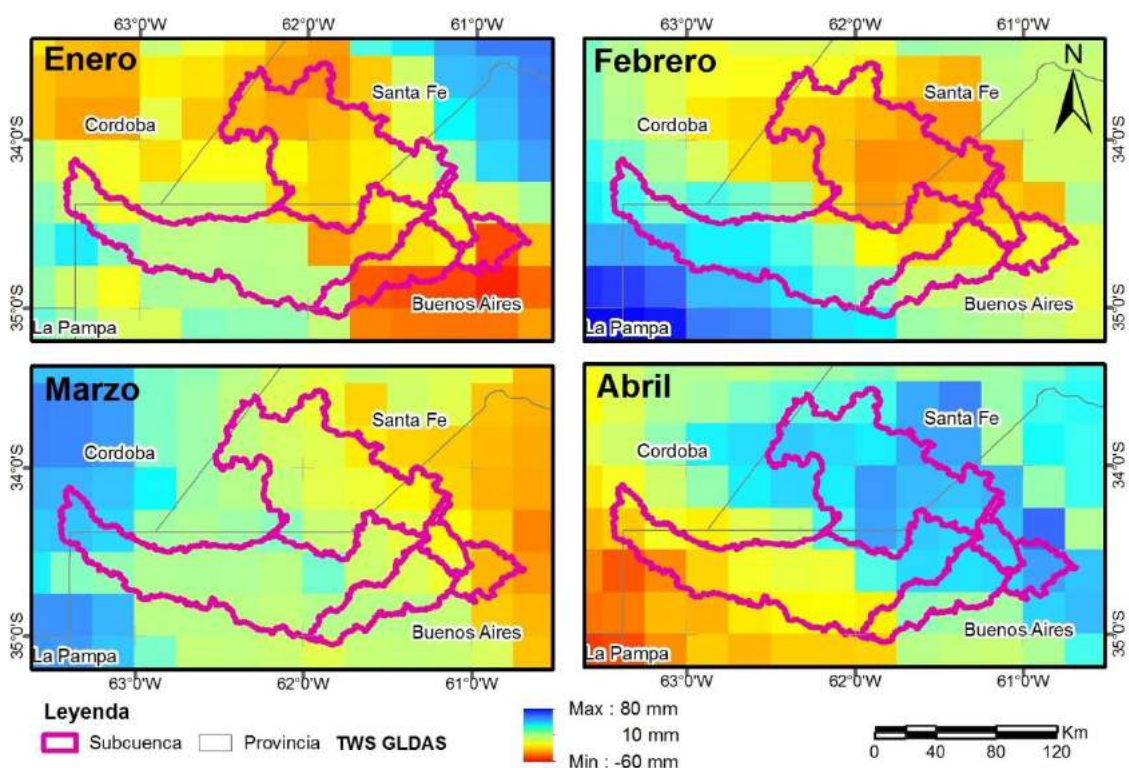


Figura 6. TWS mensual (mm).

Los resultados del análisis geoespacial logrados en el periodo húmedo de estudio, identificado como el primer cuatrimestre del año 2017, como se observa en la Tabla III y la Fig. 7, expresaron que la subcuenca 5 indicó la menor P acumulada (750 mm) y el centro de la subregión A1 manifestó 835 mm. La E fue máxima en la subcuenca 5 (275 mm). El R satelital mostró el máximo en la subcuenca 1 (68 mm), mientras que, en el resto de la subregión, los valores se mantuvieron uniformes. En relación con el TWS, se obtuvieron valores negativos, debido a que los tres primeros meses se generaron pérdidas, y aunque hubo una fuerte precipitación en abril, esta no fue suficiente para cubrir las necesidades hídricas de todo el periodo considerado.

Tabla III. Valores medios de cada variable acumulada en el periodo húmedo por subcuenca.

Subcuenca	Area (km ²)	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Escorrentía (mm)	TWS (mm)	P-E-R
1	7583.6	785.2	223.4	68.1	-6.5	493.7
2	6766.1	769.2	257.6	38.0	-15.4	473.6
3	598.2	835.1	204.3	32.0	-11.8	598.8
4	1996.2	767.4	265.0	49.5	-14.1	452.9
5	798.7	750.0	274.2	31.1	-20.8	444.6

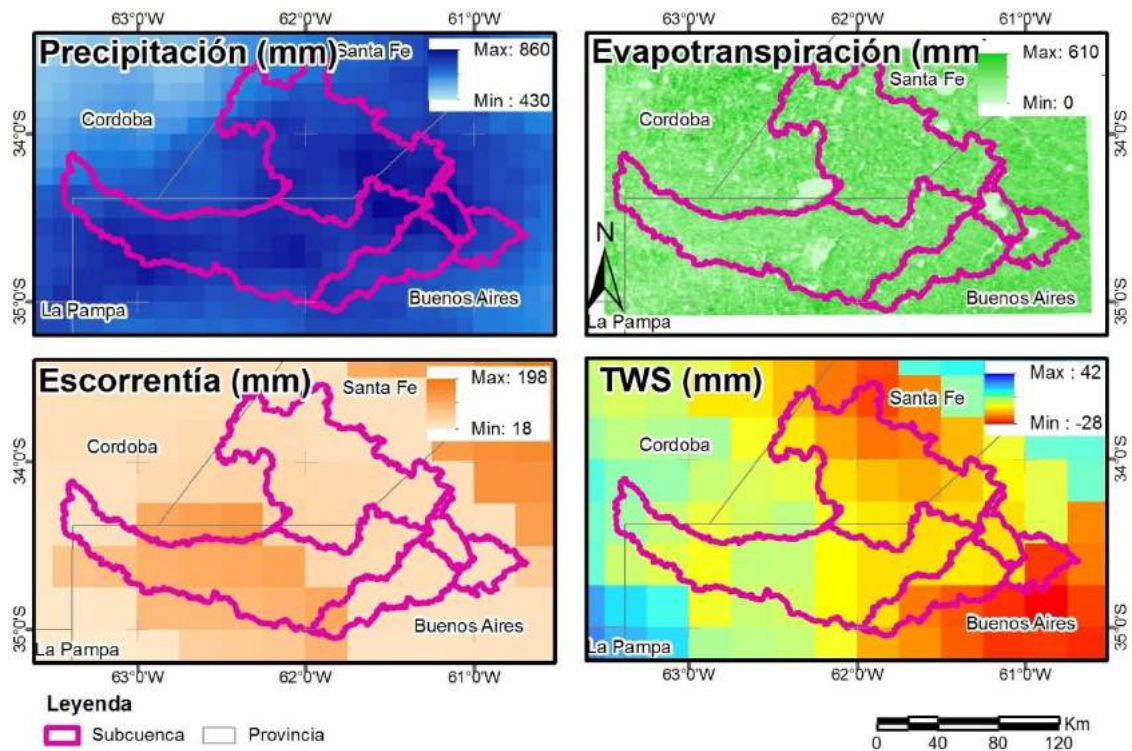


Figura 7. Datos acumulados (mm) de cada variable en el periodo húmedo (Enero a Abril).

En la Fig. 8 se representa el balance hídrico (P-E-R) a nivel geoespacial para el periodo estudiado, identificando la variabilidad de la disponibilidad hídrica representativa de áreas de llanura, obteniendo valores positivos entre el 59 y 72%, siendo el máximo en la subcuenca 3 y el mínimo en la 5.

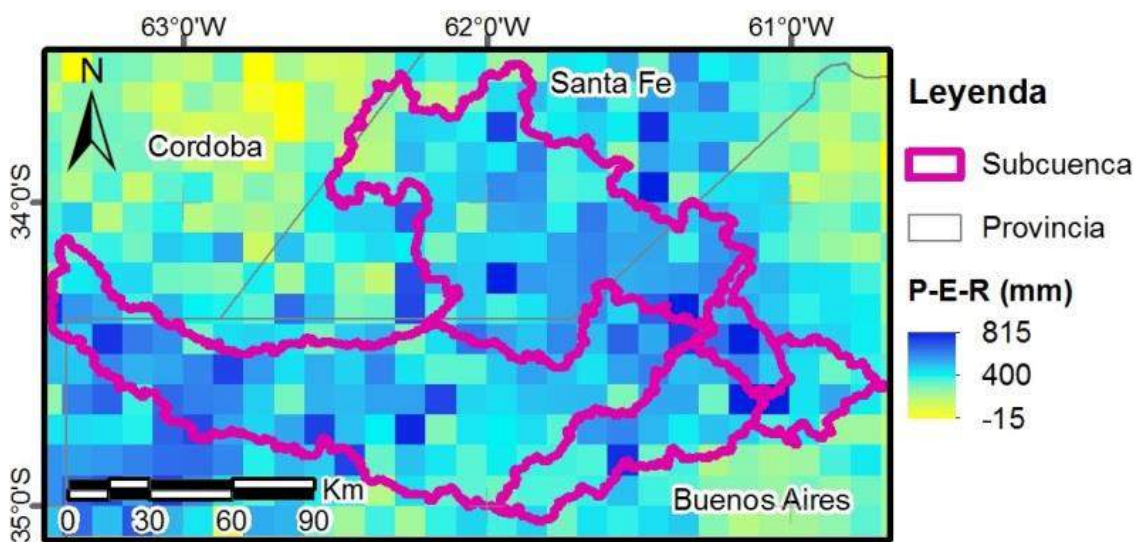


Figura 8. Resultado del balance hídrico P-E-R (mm).

En la Tabla IV se presenta el balance hídrico a nivel volumétrico (millones de metros cúbicos) definido por teledetección, reflejando la mayor ganancia en la subcuenca 1 debido a su extensa ocupación en la subregión A1, y en contraparte la subcuenca 3 al ser la más pequeña genera una menor ganancia hídrica superficial.

Tabla IV. Resultados por millones de metros cúbicos

Subcuenca	P	E	R	P-E-R
1	59549.5	16945.0	5164.1	37440.4
2	5204.8	1743.2	257.0	3204.6
3	499.6	122.2	19.2	358.2
4	1531.9	529.0	98.8	904.1
5	5990.2	2190.3	248.5	3551.4
Total	72775.9	21529.7	5787.5	45458.7

Los procedimientos aplicados contribuyeron en caracterizar los componentes hídricos de la zona de estudio, para observar el comportamiento mensual de la acumulación de agua superficial y en general del periodo húmedo del año 2017. Estos procesos otorgan un lineamiento de la diversidad espacial de las variables hidrológicas que intervienen en el balance hídrico, utilizando productos satelitales de acceso público, con diferentes resoluciones.

CONCLUSIONES

La utilización de productos de sensores satelitales, en zonas de gran extensión permite identificar espacialmente las variaciones temporales y anomalías en parámetros hídricos que intervienen en el balance hídrico y en la descripción de la acumulación de agua superficial terrestre. Los valores encontrados en los datos capturados en estaciones meteorológicas de la región se corresponden con los obtenidos en las imágenes satelitales, permitiendo de esta forma analizar diversos periodos y zonas en forma interactiva con información de acceso público, facilitando el entendimiento de la dinámica hídrica en la región, la cual puede influir directamente en emergencias de inundación en el futuro.

En la región en estudio, se observó una mayor presencia de agua en superficie localizada en las subcuencas bajas de la subregión A1. Sin embargo, es necesario caracterizar adecuadamente la zona de estudio, como por ejemplo cuerpos de agua presentes en la zona, que contribuyen al almacenamiento de agua en la superficie, ya que reflejan valores elevados en las imágenes satelitales, al igual que hay que tener en cuenta la resolución espacial de cada producto o sensor satelital.

Se concluye que esta metodología con imágenes satelitales es óptima para la descripción del balance hídrico, en una zona de gran extensión, representando en forma fehaciente distribución de la evapotranspiración y el escurrimiento superficial.

AGRADECIMIENTOS

Grupo de Trabajo Estudios Tropicales y Cooperación al Desarrollo. Grupo de Investigación Cuaternario y Geomorfología, PAI RNM-273. Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla, España.

Proyecto “Sistema Soporte de las Decisiones frente a eventos extremos para la gestión de la Cuenca Alta del Río Salado de la Provincia de Buenos Aires. Estudio De Impacto Ambiental y Social (EIAyS)”. Fondo de Innovación Tecnológica Sectorial de Medio Ambiente y Cambio Climático (FONARSEC). MINCYT. Convocatoria 2013. Res. N° 348/13 de la ANPCyT. Res N° 572/14. Director: Dr. Pablo Bereciartua. Representante por la UNLP: Dra. Fernanda Gaspari. Periodo 2015 - 2020.

REFERENCIAS

- Cámara Artigas R., Martínez Batlle J. R., Díaz del Olmo F. Metodología y aplicaciones de los balances hídrico y bioclimático y su aplicación al estudio ecodinámico de las formaciones vegetales. Grupo de trabajo Estudios Tropicales y Cooperación al Desarrollo. Grupo PAI RNM-273. 21. <https://www.geografafisica.org/2012/09/17/plantilla-para-el-calculo-del-balance-hidrico-y-el-diagrama-bioclimatico/>(2012).
- Dawers, N. H., Anders, M. H. and Scholz, C. H. Growth of Normal Faults, Displacement-Length Scaling. *Geology* 21, 1107–1110 (1993).
- Dillon, B., Pombo, D. G., Celeste, M., Uncal, M., Diharce, M. C., Escuredo, D. L., Palazzo, L., Pablo, J., & María, J. *La áreas inundadas y anegadas en el noreste de la provincia de La Pampa*. (2017).
- Fernández-Long, M. E., Spescha, L., Barnatán, I., & Murphy, G. M. Modelo de Balance Hidrológico Operativo para el Agro (BHOA). *Agronomía & Ambiente*, 32(1–2), 31–47. <https://www.researchgate.net/publication/261088005>. (2012).
- Gomez, M. E., Gaspari, F. J., Perdomo, R. A., Simontacchi, L. E., Montealegre Medina, F. A., Rodríguez Vagaria, A. M., Tavarone, M. F., & Senisterra, G. E. Modelos digitales de elevación: correcciones altimétricas para uso hidrológico en áreas de llanura. *Acta Geológica Lilloana*, 29(1), 39–51. <http://www.lillo.org.ar/revis/geo/2017/v29n1/v29n1a03.pdf> (2017).
- Huffman, G.J., E.F. Stocker, D.T. Bolvin, E.J. Nelkin, Jackson Tan GPM IMERG Final Precipitation L3 1 month 0.1 degree x 0.1 degree V06, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) Acceso 09/2020 (2019).
- MOSP. *Plan Maestro Integral de la cuenca del río Salado*. <http://www.mosp.gba.gov.ar/sitios/hidraulica/informacion/planmaestro.php> (1999).
- Li, B., H. Beaudoin, and M. Rodell, NASA/GSFC/HSL GLDAS Catchment Land Surface Model L4 daily 0.25 x 0.25 degree GRACE-DA1 V2.2, Greenbelt, Maryland, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Acceso 09/2020 (2020).
- Ospina Montes, D. L. *Análisis de la información proveniente del satélite GRACE para el monitoreo de la acumulación de agua subterránea: caso ejemplo provincia hidrogeológica de los Llanos Orientales*. 1, 59. (2016).
- Pereira, A., Cornero, C., Amherdt, S., & Pacino, M. C. Análisis Multitemporal Del Almacenamiento De Agua Continental En La Cuenca Del Plata Mediante Gravimetría Satelital. *XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. (2018).
- Running, S., Mu, Q., Zhao, M. MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Accessed 2020-09-11 de <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.006>. Acceso 09/2020. (2017).
- Tang, Q., Gao, H., Yeh, P., Oki, T., Su, F., & Lettenmaier, D. P. Dynamics of terrestrial water storage change from satellite and surface observations and modeling. *Journal of Hydrometeorology*, 11(1), 156–170. <https://doi.org/10.1175/2009JHM1152.1> (2010).

Thomas, B.; Famiglietti, J.; Reager, J.T.; Rodell, M. and Bolten, J. Sinopsis del Satélite GRACE y Sus Datos y Aplicaciones. ARSET Applied Remote Sensing Training. https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/water/Brazil/span_S5P1.pdf . Acceso (2020)