

Methodological proposal for the study of floods in plains areas with a lack of information

Guido Borzi, Francisco Cellone, Carolina Tanjal, Edoardo Melendi & Eleonora Carol

Centro Investigaciones Geológicas (CIG)- CONICET-UNLP, La Plata, Argentina. gborzi@fcnym.unlp.edu.ar, fcellone@fcnym.unlp.edu.ar, ctanjal@cig.museo.unlp.edu.ar, edoardolucam@fcnym.unlp.edu.ar, eleocarol@fcnym.unlp.edu.ar

Received: February 14th, 2020. Received in revised version: August 18th, 2020. Accepted: August 25th, 2020.

Abstract

The plains constitute areas of great potential for agricultural production frequently affected by floods. The objective of the work is to use a methodology that allows demonstrating under what conditions floods occur in plains areas with a shortage of basic information, taking as a case study the Samborombón River basin, located in the center-east of Argentina. For this, Landsat satellite images were observed and daily water balances were performed, to subsequently perform a statistical analysis of recurrence. The results obtained show that flooding is greatly influenced by previous soil water conditions. The methodology used allows estimating return periods in low-slope plain basins, requiring only satellite images of free access and daily average temperature and precipitation data, obtaining results that reflect the state of the basin after precipitation events.

Keywords: waterlogging; precipitation; evapotranspiration; soil available water; plains hydrology.

Propuesta metodológica para el estudio de inundaciones en áreas de llanura con escasez de información

Resumen

Las llanuras constituyen áreas de gran potencial para la producción agropecuaria afectadas frecuentemente por inundaciones. El objetivo del trabajo es utilizar una metodología que permita evidenciar bajo qué condiciones ocurren inundaciones en áreas de llanura con escasez de información base, tomando como caso de estudio a la cuenca del río Samborombón, situada en el centro-este de Argentina. Para esto fueron observadas imágenes satelitales Landsat y se realizaron balances hídricos diarios, para posteriormente realizar un análisis estadístico de recurrencia. Los resultados obtenidos evidencian que las inundaciones se ven influenciadas en gran medida por las condiciones hídricas previas del suelo. La metodología utilizada permite estimar períodos de retorno en cuencas de llanura de baja pendiente requiriendo solamente de imágenes satelitales de libre acceso y de datos de precipitación y temperatura media diaria, obteniendo resultados que reflejan el estado de la cuenca posterior a eventos de precipitación.

Palabras clave: anegamiento; precipitación; evapotranspiración; excedentes hídricos; hidrología de llanuras.

1. Introduction

Las llanuras del mundo son áreas de gran potencial para la producción agropecuaria [1-4], siendo aquellas de clima húmedo y lluvioso las más fértiles y afectadas por inundaciones. Los anegamientos y/o inundaciones refieren a la acumulación de agua en un área debido a un evento de precipitación, ascenso del nivel freático o desborde del cauce

de un curso fluvial [5,6] obteniéndose como resultado de estos procesos, o una combinación de estos, agua en superficie. En este sentido, la variación climática registrada a escala global [7] asociada a aumentos en las precipitaciones podría contribuir a un aumento de la frecuencia de las inundaciones de aquellos sitios propensos a anegarse.

A su vez, existe una tendencia mundial creciente a ocupar áreas con riesgo de inundación por parte de asentamientos

urbanos [1,8,9], resultando imprescindible la conformación de mapas de riesgo o vulnerabilidad para un adecuado ordenamiento territorial. Por otro lado, una vez definidas las zonas con riesgo de inundación, el estudio se debe centrar en saber con qué periodo o frecuencia estos sitios son nuevamente ocupados por agua, es decir, determinar el periodo de retorno. De esta manera, para una adecuada gestión de inundaciones, además de conocer las áreas con riesgo de inundación y poseer una estrategia de gestión [10], es necesario conocer bajo qué condiciones ocurren las inundaciones y la recurrencia de estas.

El análisis de la recurrencia se ha abordado comúnmente a través de registros históricos de caudales, a partir de establecer períodos de retorno de un caudal particular en un sitio dado. Sin embargo, en Sudamérica los datos hidrológicos base, como es particularmente el caso del registro de caudales, no suelen estar uniformemente distribuidos tanto espacial como temporalmente debido a falta de continuidad de políticas públicas que repercuten en los organismos encargados del registro. Esta información se encuentra interrumpida en numerosas ocasiones, y se cuenta con series que resultan incompletas para realizar un análisis de recurrencia, por lo que un estudio basado en estos datos sería sesgado y erróneo. Un ejemplo es el caso de Argentina, en donde el sector más poblado del país posee mediciones de caudales que se restringen sólo a algunos ríos [11]. La provincia de Buenos Aires, localizada en la Región Pampeana en el centro este de Argentina (Fig. 1), es una vasta llanura de importancia mundial por su gran producción agropecuaria [12], en donde los anegamientos periódicos afectan a sus habitantes [13,14]. El relieve llano y el clima templado subtropical húmedo de la provincia, condicionan en parte que sea un sector con inundaciones regulares, agravándose esta problemática debido a la tendencia registrada en el aumento de las precipitaciones anuales [15]. Las inundaciones registradas en esta provincia repercuten en este sector productivo, afectando las cosechas de las áreas rurales y, en numerosas ocasiones a los centros poblados, causando pérdidas humanas y económicas, situación que demanda el análisis y elaboración de medidas de mitigación [13,16,17]. La cuenca del río Samborombón, situada en el noreste de la provincia de Buenos Aires, no escapa a la situación previamente detallada, y no cuenta con registros de caudales continuos en el tiempo, por lo cual se dificulta la tarea de realizar análisis de recurrencia a partir de los mismos. Actualmente presenta solo una estación meteorológica que se encuentra en la localidad de Brandsen, el principal centro poblado de la cuenca, donde se han registrado los mayores anegamientos. La problemática se ve agravada debido a que en las últimas décadas numerosas urbanizaciones han ocupado áreas con riesgo de inundación [18,19], principalmente en la localidad mencionada (Fig. 1). En este contexto se vuelve imperiosa la necesidad de encontrar otras herramientas que permitan comprender bajo qué circunstancias ocurren las inundaciones en la cuenca. Considerando la necesidad de brindar herramientas para una adecuada gestión de inundaciones, el objetivo del trabajo es utilizar una metodología que permita evidenciar bajo qué

condiciones ocurren inundaciones en áreas de llanura con escasez de información base, tomando como caso de estudio a la cuenca del río Samborombón.

2. Metodología

Imágenes satelitales Landsat fueron utilizadas para observar condiciones de grandes anegamientos entre los años 1972 y 2015 en el sector medio de la cuenca del río Samborombón, coincidente con la localidad de Brandsen (Fig. 1). La observación de las imágenes satelitales tuvo la finalidad de clasificar cualitativamente la extensión de las inundaciones registradas en la cuenca, como así también la condición sin inundación o de caudal base.

Se recurrió a datos meteorológicos obtenidos a partir del cuerpo de Bomberos Voluntarios de Brandsen para analizar bajo qué condiciones se producen inundaciones en la cuenca del río Samborombón. En una primera instancia se procedió a la utilización de imágenes satelitales y datos de precipitación, para observar si existe una relación entre las inundaciones de mayor extensión registradas en la serie Landsat con la precipitación anual.

Por otra parte, utilizando datos de precipitación diaria y temperatura media diaria se confeccionaron balances hídricos diarios mediante la metodología de Thornthwaite y Mather [20]. Cabe destacar que la utilización de otro tipo de balances en grandes períodos de tiempo, como por ejemplo las formulaciones de Penman–Monteith, Priestley y Taylor, Turc, entre otros, se ve obstaculizada debido a que las estaciones meteorológicas del área no poseen datos continuos en el tiempo de otras variables además de precipitación y temperatura. Asimismo, respecto a la precipitación, el cuerpo de Bomberos Voluntarios de Brandsen solo colecta datos de precipitación acumulada diaria, sin poder observar intensidad de la lluvia en los días registrados.

Mediante la realización de los balances hídricos se obtuvieron valores diarios de evapotranspiración de agua, reserva útil del suelo y excedentes hídricos para la serie 1972-2015.

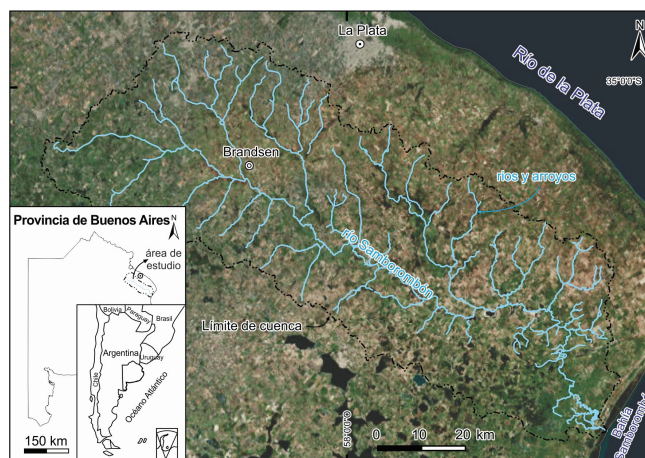


Figura 1. Ubicación del área de estudio en el noreste de la provincia de Buenos Aires.

Fuente: Los Autores.

Donde:

$$ETP = K \cdot \epsilon \quad (1)$$

$$\epsilon = 16 \cdot (10t/I)a \quad (2)$$

$$I = \sum i \quad (3)$$

$$i = (t/5)1,514 \quad (4)$$

$$a = 6,75 \cdot 10 - 913 - (7,71 \cdot 10 - 5)I2 + (1,792 \cdot 10 - 5)I + 0,49239 \quad (5)$$

$$K = N/12/30 \quad (6)$$

Donde:

t: es la temperatura media diaria en °C del mes en que se calcula

N: es la duración media del día (horas)

I es un índice térmico que depende de las temperaturas medias anuales.

Las características del suelo fueron determinadas por el INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) [21] donde el horizonte A posee un espesor de 50 cm y está compuesto por un 44% de arcilla, 46% de limo y 10% de arena, lo cual representa una textura arcillo limosa.

El agua utilizable para esta textura, basada en Saxton y Rawls [22], es de 14%, con una capacidad de campo de 41% y un punto de marchitez permanente de 27%. Considerando una zona radicular de 50 cm y una densidad aparente de 1,4 gr/cm³ [22], la capacidad de depósito del terreno o reserva es de alrededor de 100 mm.

Los balances hídricos fueron calculados de la siguiente manera:

$$ET = ETP \text{ si } P > ETP \quad (7)$$

$$ET = P + [\Delta R] \text{ si } P < ETP \quad (8)$$

$$P - ET = \Delta R \quad (9)$$

$$P - ET = Ex \text{ si } R \text{ alcanza } 100 \text{ mm} \quad (10)$$

Donde:

P: precipitación

ETP: evapotranspiración potencial

ET: evapotranspiración (real)

R: reserva de agua del suelo

ΔR: variación en la reserva del agua del suelo

Ex: excedentes

Los excedentes hídricos obtenidos mediante balances hídricos fueron comparados con las imágenes de la serie Landsat para observar y clasificar la relación entre estos. Debido a que la toma de datos de precipitación se realiza a las 9 a.m. (hora local), y a que el horario central de la captura de una imagen satelital Landsat es aproximadamente de las 10 a.m. (hora local), se correspondió la imagen satelital con el balance hídrico del día previo.

Por último, una vez observado bajo qué condiciones se generaba una inundación de gran magnitud, se realizó una sumatoria de 4 días consecutivos de excedentes hídricos obtenidos mediante los balances para cada año de la serie y se utilizaron los valores extremos de estos para adoptar la función de Gumbel [23] y obtener una recurrencia de los anegamientos. Secuencias diarias de excedentes hídricos

comprendidos entre los años 1970 y 2015 fueron utilizadas para la realización de un análisis de recurrencia mediante la metodología propuesta por Aparicio Mijares [24].

3. Resultados

Se visualizaron 1925 imágenes Landsat, de las cuales 30 fueron descartadas debido a que evidenciaron problemas técnicos en la captura. De las restantes, 846 presentaban una cobertura nubosa que no permitió observar bajo qué condiciones se encontraba el terreno durante la captura de la imagen. La condición de caudal base (b) sin presencia de agua en la superficie fue observada en 884 imágenes, mientras que 9 presentaron un anegamiento extenso (i2) del sector medio de la cuenca, entendiéndose al mismo cuando la llanura de inundación en las cercanías de Brandsen se encontraba completamente cubierta por agua de manera generalizada. Por último, en 156 imágenes satelitales se observó un escenario intermedio entre las dos situaciones previas, donde la inundación fue moderada (i1) y la llanura de inundación en las cercanías de Brandsen evidenció agua dispersa por sectores (Fig. 2).

Respecto a la utilización de datos meteorológicos, la precipitación media anual de la estación de Brandsen para el periodo 1072-2015 fue de 1006 mm. La precipitación anual no presentó una clara correspondencia entre años relativamente más húmedos y los anegamientos extensos observados en las imágenes Landsat, como se puede apreciar en el año 1995, el cual fue un año relativamente seco (Fig. 3).

Por su parte, los balances hídricos diarios permitieron relacionar los mm de agua de excedentes hídricos derivados de las precipitaciones y la condición de las imágenes satelitales respecto a la presencia de agua en superficie.



Figura 2. Clasificación cualitativa de las inundaciones de la cuenca en imágenes Landsat.

Fuente: Los Autores.

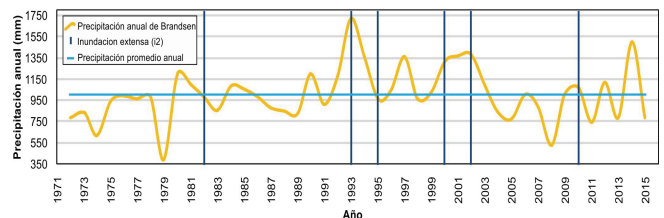


Figura 3. Precipitación acumulada de la estación meteorológica de Brandsen entre los años 1972 y 2015. Las líneas azules representan los años en que se registraron inundaciones extensas en la serie Landsat.

Fuente: Los Autores.

Se observó que la inundación extensa (i2) se corresponde con los valores más altos de excedentes hídricos acumulados durante 4 días consecutivos, superando aproximadamente los 70 mm y un promedio de 103 mm. Por otro lado, la inundación moderada (i1) fue observada cuando los excedentes hídricos acumulados durante 4 días rondaron los 7 mm promedio y un máximo de 47 mm, en tanto que la condición de caudal base se registró con un excedente hídrico acumulado durante 4 días con un promedio cercano a 0 mm. Si bien se registraron precipitaciones intensas, en ocasiones no fueron reflejados excedentes, correspondiéndole esta situación con los meses de mayor déficit hídrico y/o con el registro de imágenes Landsat de más de 4 días posterior a las lluvias. Para observar el comportamiento descrito fueron seleccionados 3 años donde se registraron anegamientos extensos en la serie Landsat, destacándose el año 1993 como año lluvioso (1722 mm), 1995 como año seco (964 mm) y 2000 como año con un régimen hídrico intermedio (1318 mm) (Figs. 4, 5 y 6).

Durante el año 1993 se registraron 31 imágenes satelitales de las cuales 15 poseían una cobertura nubosa que no permitió clasificar la condición hídrica del terreno (Fig. 4). La condición de caudal base se registró en 7 imágenes, mientras que 9 presentaron inundaciones. De estas últimas, 6 fueron inundaciones moderadas (i1) y 3 fueron clasificadas

como inundaciones extensas (i2), en donde el excedente hídrico acumulado fue de 70,5 mm para abril, 71,5 para inicios de junio y de 93,5 para mediados del mismo mes. Si bien durante el mes de febrero los excedentes hídricos superan el valor umbral de 70 mm (Fig. 4), la serie Landsat no posee registro de capturas durante los 4 días consecutivos posteriores al evento. Asimismo, se destaca que en diciembre de este año, el excedente hídrico alcanza un valor cercano a los 100 mm. Sin embargo, la imagen satelital de la serie Landsat se registra 5 días posteriores al excedente obtenido, por lo que la fuerte evapotranspiración de este periodo hace que al momento de la captura el excedente acumulado sea bajo y solo pueda observarse una inundación moderada (i1).

El año 1995 no supera la precipitación media anual, sin embargo, pudo observarse un anegamiento extenso ocurrido durante abril de dicho año (Fig. 5). Durante este año se registraron 25 imágenes satelitales de las cuales 11 se encontraban con cobertura nubosa y 10 en condición de caudal base. De las restantes, se observaron 3 inundaciones moderadas (i1) y 1 inundación extensa (i2) en las imágenes satelitales, la cual se corresponde con un excedente acumulado de 117,1 mm. Respecto al resto del año, si bien ocurrieron precipitaciones, se obtuvieron escasos excedentes, principalmente durante otoño, por lo que sólo se registraron inundaciones moderadas (i1).

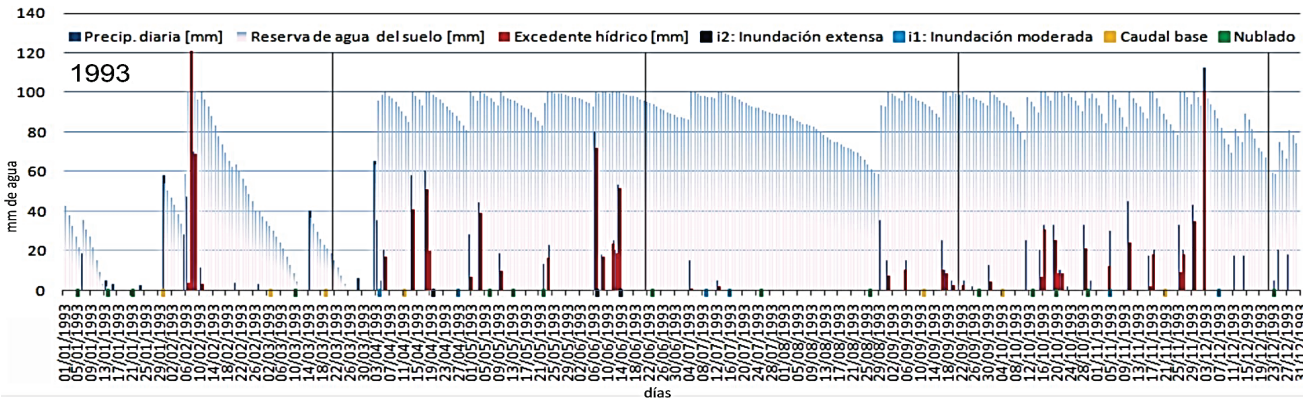


Figura 4. Balance diario realizado para el año 1993 en la estación de Bomberos Voluntarios de Brandsen.
Fuente: Los Autores.

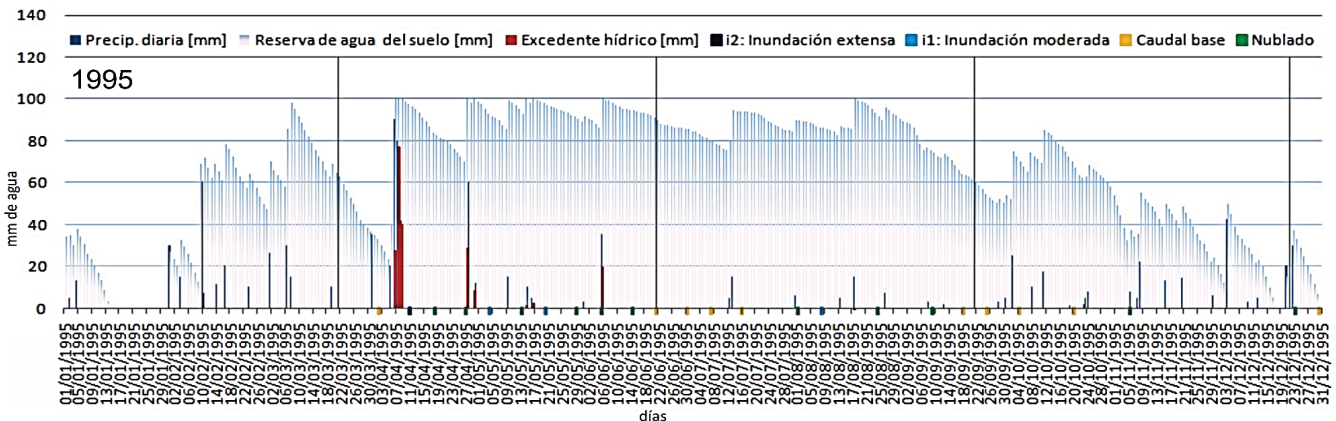


Figura 5. Balance diario realizado para el año 1995 en la estación de Bomberos Voluntarios de Brandsen.
Fuente: Los Autores.

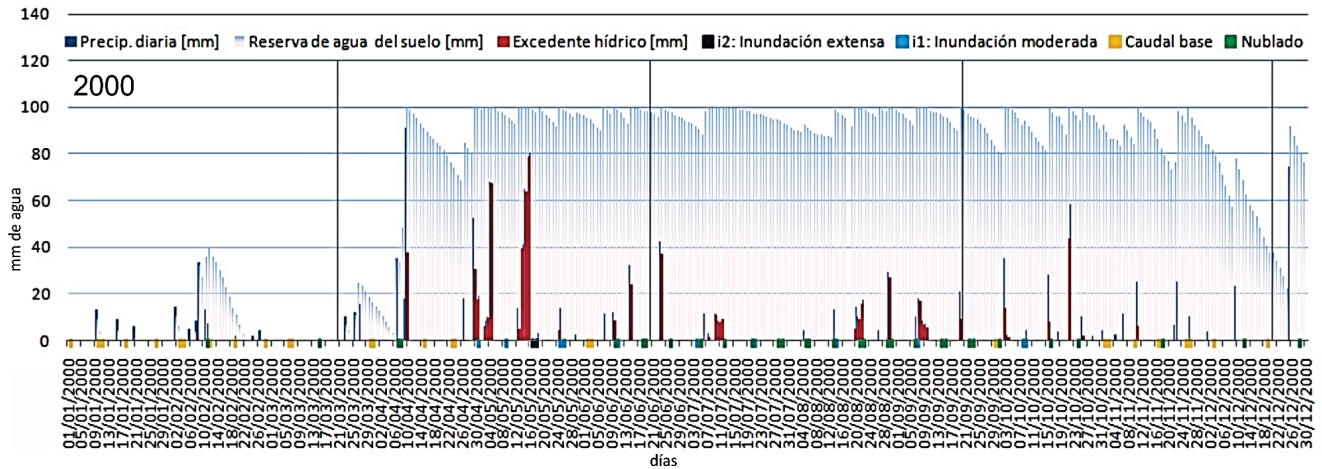


Figura 6. Balance diario realizado para el año 2000 en la estación de Bomberos Voluntarios de Brandsen. Fuente: Los Autores.

Por su parte, durante el año 2000 se pudieron observar 72 imágenes satelitales Landsat. Respecto al balance hídrico realizado para este año, la condición de caudal base fue registrada en 28 imágenes satelitales, en tanto que 31 imágenes presentaron una cobertura nubosa que no permitió ver la condición del terreno (Fig. 6). Las inundaciones fueron registradas en 13 capturas, 11 correspondientes a una inundación moderada (i1) y 2 a una inundación extensa (i2). Cabe aclarar que las 2 inundaciones extensas registradas se corresponden a dos días sucesivos del mes de mayo, en donde la acumulación de excedentes hídricos fue de 181,6 mm y 142,2 mm respectivamente. Por último, si se observa el balance a inicios de mayo, durante los días previos ocurren grandes precipitaciones con sus correspondientes excedentes hídricos, sin embargo, la captura de la imagen satelital ocurre posteriormente a 4 días del último excedente hídrico registrado, por lo que solo se observa una inundación moderada. Respecto al resto de los excedentes hídricos observados, ninguno supera los 50 mm y la condición observada en las imágenes satelitales fue de inundación moderada o de caudal base cuando la captura fue posterior a 5 días de los excedentes registrados (Fig. 6). En este sentido, el análisis realizado detallado para los años 1993, 1995 y 2000, utilizando excedentes hídricos acumulados e inundaciones registradas en las imágenes Landsat, pudo corroborarse en todos los balances hídricos para los años seleccionados.

Respecto al análisis estadístico, una vez observado bajo qué condiciones se generaba una inundación extensa en la cuenca, se procedió a la utilización de valores extremos de excedentes acumulados durante 4 días para cada año de la serie. Esto permitió obtener un valor máximo de excedente hídrico de 198 mm para 1993 y un valor de 0 mm para 1979. La media de esta población fue de 77,7 mm y la desviación estándar de 44,8 mm para los 46 años analizados. Acorde a estos datos, μ y fue de 0,5468 y σ y de 1,1538, obteniendo un valor de α y β de 0,025717251 y 56,49887691, respectivamente. Se pudo comprobar mediante la prueba de

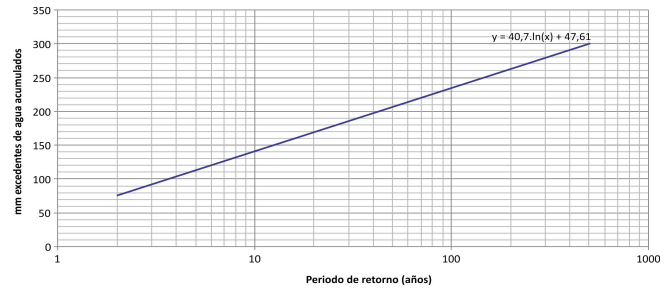


Figura 7. Recta de recurrencia o período de retorno para una inundación extensa en el área de estudio donde la variable “y” representa los excedentes hídricos acumulados durante 4 días y “x” el período de retorno. Fuente: Los Autores.

bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov que los datos utilizados se ajustan a una distribución de Gumbel con un 99% de confianza. Esto permitió generar una recta de recurrencia o período de retorno para una inundación extensa en el área de estudio (Fig. 7).

Si se utiliza el valor de 70 mm, considerado como umbral para alcanzar una inundación extensa, el tiempo de recurrencia estadístico para que ocurra dicho evento es de 1,73 años.

4. Discusión

La determinación de áreas anegables con potencial riesgo de inundación se ha realizado de manera satisfactoria relacionando imágenes Landsat con eventos hidrometeorológicos, encontrando este tipo de análisis en otros lugares del mundo [25,26]. Con respecto a la precipitación anual, se desprende que no existe una correspondencia entre los años relativamente más lluviosos y las inundaciones más extensas desarrolladas en la cuenca.

Los resultados obtenidos evidencian que las inundaciones en la cuenca del río Samborombón se ven influenciadas en gran medida por las condiciones hídricas previas del suelo y en menor medida por la cantidad de agua precipitada, situación descrita por diversos autores [27-29]. Durante los meses de

menor déficit hídrico, si bien son coincidentes con las menores precipitaciones, la baja evapotranspiración condiciona que el contenido de agua en el suelo se encuentre cercano a la capacidad de campo. Si bien en áreas de llanura los movimientos verticales del agua (evapotranspiración – infiltración) poseen una gran relevancia [30,31], en condiciones de saturación del suelo adquiere importancia la componente subhorizontal asociada al escurrimiento superficial. Al producirse una precipitación existen las condiciones necesarias para que se produzca el escurrimiento superficial hacia las áreas más bajas como la llanura de inundación del río. En este sentido las inundaciones extensas observadas en la cuenca identificadas utilizando las imágenes satelitales Landsat responderían a las condiciones hídricas previamente detalladas.

Por su parte, durante los períodos de mayor déficit hídrico ocurren las mayores precipitaciones, situación que no se refleja en la existencia de anegamientos. La mayor evapotranspiración de este periodo influye en este proceso, condicionando que inicialmente la reserva de agua del suelo se encuentre en sus valores mínimos. Posteriormente a una precipitación debe colmatarse este parámetro para que se produzca un excedente hídrico, situación que no fue común en los balances hídricos diarios realizados durante el periodo de mayor déficit hídrico.

Se destaca que la realización de balances mediante la metodología de Thornthwaite y Mather [20], pese a ser criticada [32], es bastante aceptable [33], obteniéndose resultados representativos, especialmente en regiones húmedas y templadas [34], como es el área de estudio. Thornthwaite y Mather [20] plantean que teóricamente esta metodología puede ser utilizada con datos diarios, lo cual ha sido corroborado por Steenhuis y Van der Molen [35]. Asimismo, es importante remarcar la simpleza de la metodología y los pocos parámetros requeridos para su utilización [36,37], obteniendo como resultado parámetros como la evapotranspiración, excedentes hídricos, entre otros.

Respecto al análisis de recurrencia, se obtuvo un valor estadístico de cada cuántos años puede esperarse una inundación extensa en la cuenca. Si bien el análisis de recurrencia de inundación es usado comúnmente con datos de caudal, también se ha realizado con datos de precipitación [38-42], sin embargo, en el área de estudio una gran precipitación no necesariamente produce inundaciones [43]. En este sentido, la utilización de excedentes hídricos derivados de balances hidrológicos podría ser igualmente válida, habiendo generado el primer pronóstico de recurrencia de inundaciones en la cuenca estudiada. Cabe destacar que la presente propuesta metodológica permite estimar períodos de recurrencia en cuencas de llanura de baja pendiente, aun cuando la información base es escasa, contribuyendo a la gestión de cuencas en un sector productivo afectado fuertemente por inundaciones regulares.

5. Conclusiones

El presente estudio constituye un aporte tendiente a determinar cuáles son los factores que controlan las

inundaciones en cuencas de llanura como es la cuenca del río de Samborombón cuando la información hidrológica y climática de base es escasa. Se destaca que la metodología utilizada requiere solamente de imágenes satelitales de libre acceso y de datos de precipitación y temperatura media diaria. Esto permite obtener resultados que reflejen el estado de la cuenca posterior a eventos de precipitación, pudiéndose aplicar a cuencas vecinas. Asimismo, la utilización de balances diarios puede ser usados en tiempo real o planteando escenarios hipotéticos de lluvias. En este sentido, observar el valor umbral en que se producen las inundaciones extensas y el monitoreo diario de los excedentes hídricos acumulados constituyen una herramienta para generar avisos tempranos de evacuación en áreas potencialmente anegables, y evitar posibles pérdidas económicas y humanas.

Agradecimientos

Agradecemos al Servicio Meteorológico Nacional y a los Bomberos Voluntarios de Brandsen por el aporte de los datos utilizados en este trabajo.

Referencias

- [1] Penning-Rowsell, E., The effect of flood damage on land use planning. *Geographica Polonica*, 34, pp. 139-153, 1976.
- [2] Roath, L.R. and Krueger, W.C., Cattle grazing influence on a mountain riparian zone. *Journal of Range Management*, 35(1), pp. 100-103, 1982.
- [3] Tockner, K. and Stanford, J.A., Riverine flood plains: present state and future trends. *Environmental Conservation*, 29(3), pp. 308-330, 2002. DOI: 10.1017/S037689290200022X
- [4] Bardhan, S. and Jose, S., The potential for floodplains to sustain biomass feedstock production systems. *Biofuels*, 3(5), pp. 575-588, 2012. DOI: 10.4155/bfs.12.51
- [5] Ferrando, F.J., Sobre inundaciones y anegamientos. *Revista de Urbanismo*, 15, pp. 25-42, 2006.
- [6] Aragón, R., Jobbágy, E.G. and Viglizzo, E.F., Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina). *Ecohydrology*, 4(3), pp. 433-447, 2010. DOI: 10.1002/eco.149
- [7] Zhang, X., Zwiers, F.W., Hegerl, G.C., Lambert, F.H., Gillett, N.P., Solomon, S., Nozawa, T., Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature*, 448(7152), pp. 461-465, 2007. DOI: 10.1038/nature06025
- [8] Montz, B.E. The generation of flood hazards and disasters by urban development of floodplains. *Floods*, 1, pp. 116-127, 2000.
- [9] Plate, E.J., Flood risk and flood management. *Journal of Hydrology*, 267(1-2), pp. 2-11, 2002. DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00135-X
- [10] Kourgialas, N.N. and Karatzas, G.P., Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas—a case study. *Hydrological Sciences Journal—Journal des Sciences Hydrologiques*, 56(2), pp. 212-225, 2011. DOI: 10.1080/02626667.2011.555836
- [11] Integrated Hydrologic Database, [online]. [consulted, 20th of August of 2019]. Available at: <http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar>
- [12] Durán, A., Morrás, H., Studdert, G. and Liu, X., Distribution, properties, land use and management of Mollisols in South America. *Chinese Geographical Science*, 21(5), art. No. 511, 2011. DOI: 10.1007/s11769-011-0491-z
- [13] Scarpati, O.E., Spescha, L. and Capriolo, A., Occurrence of severe floods in the Salado river basin, Buenos Aires Province, Argentina. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 7(3), pp. 285-301, 2002.
- [14] González, M.H. and Fernández, A.E., Floods increasing in Buenos Aires Salado River Basin. *Environmental Change and Rational*

- Water Use, International Geographical Union, Buenos Aires, Argentina, pp. 96-113, 2007.
- [15] Kruse, E. y Laurencena, P., Aguas superficiales. Relación con el régimen subterráneo y fenómenos de anegamiento. En: Relatoría del XVI Congreso Geológico Argentino. La Plata, Argentina, 2005.
- [16] Scarpati, O.E., Lay, J.A.F. y Capriolo, A.D., La inundación del año 2001 en la Provincia de Buenos Aires, Argentina. Mundo Agrario, 9(17), pp. 1-21, 2008.
- [17] Carol, E., Kruse, E. and Pousa, J., Eco-hydrological role of deep aquifers in the Salado sedimentary basin in the Province of Buenos Aires, Argentina. Environmental Earth Sciences. 4, pp. 749-756, 2010. DOI: 10.1007/s12665-009-0212-4.
- [18] Borzi, G. y Carol, E., Identificación de áreas anegables y su vinculación con el crecimiento urbano en la cuenca del río Samborombón. II Jornadas Nacionales de Ambiente. 2014.
- [19] Borzi, G., Influencia de la actividad antrópica en la geohidrología de la cuenca del río Samborombón. Tesis Dr., Universidad Nacional de La Plata, Argentina, 2018.
- [20] Thornthwaite, C.W. and Mather, J.R., Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and water balance, 1957.
- [21] INTA (Instituto Nacional de tecnología Agropecuaria). Cartas de Suelos de la República Argentina. ISSN 0327-781X. Centro de Investigaciones de recursos Naturales. Instituto de Suelos área de Investigación en Cartografía de Suelos y Evaluación de Tierras. 1993.
- [22] Saxton, K.E. and Rawls, W.J., Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. Soil science society of America Journal, 70(5), pp. 1569-1578, 2006. DOI: 10.2136/sssaj2005.0117
- [23] Gumbel, E.J., Statistical theory of floods and droughts. Journal of the Institution of Water Engineers and Scientists, (12), pp. 157-184, 1958.
- [24] Aparicio-Mijares, F.J., Fundamentos de Hidrología de Superficie, Limusa. 2001.
- [25] Wang, Y., Using Landsat 7 TM data acquired days after a flood event to delineate the maximum flood extent on a coastal floodplain. International Journal of Remote Sensing, 25(5), pp. 959-974, 2003. DOI: 10.1080/0143116031000150022
- [26] Pantaleoni, E., Engel, B.A. and Johannsen, C.J., Identifying agricultural flood damage using Landsat imagery. Precision Agriculture, 8(1-2), pp. 27-36, 2007. DOI: 10.1007/s11119-006-9026-5
- [27] Wanders, N., Karssenber, D., De Roo, A., De Jong, S.M. and Bierkens, M.F.P., The suitability of remotely sensed soil moisture for improving operational flood forecasting. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 10(11), pp. 13783-13816, 2013. DOI: 10.5194/hess-18-2343-2014
- [28] Massari, C., Brocca, L., Moramarco, T., Trambly, Y. and Lescot, J.F.D., Potential of soil moisture observations in flood modelling: Estimating initial conditions and correcting rainfall. Advances in Water Resources, 74, pp. 44-53, 2014. DOI: 10.1016/j.advwatres.2014.08.004
- [29] Grillakis, M.G., Koutroulis, A.G., Komma, J., Tsanis, I.K., Wagner, W. and Blöschl, G., Initial soil moisture effects on flash flood generation—A comparison between basins of contrasting hydro-climatic conditions. Journal of Hydrology, 541, pp. 206-217, 2016. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.03.007
- [30] Fuschini-Mejía, M.C., Hidrología de Grandes Llanuras. Actas del Coloquio de Olavarría. PHI – UNESCO. Olavarría. 1983.
- [31] Forte-Lay J.A., Kruse, E. and Aiello, J.L., Hydrologic scenarios applied to the agricultural management of the northwest of the Buenos Aires Province, Argentina. Geojournal, 70(4), pp. 263-271, 2007. DOI: 10.1007/s10708-008-9140-1
- [32] Fernández-Long M.E., Cañás, S., Ocampo, D. y Rivas, R., Estimación de la evapotranspiración potencial en la Argentina: comparación de metodologías. Asociación Argentina de Agrometeorología. 2014.
- [33] Black, P.E., Revisiting the Thornthwaite and Mather water balance. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 43(6), pp. 1604-1605, 2007. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2007.00132.x
- [34] Rapp, B., Comparación de cinco metodologías de estimación de la evapotranspiración para cuatro localidades de La Pampa húmeda y semiárida Argentina. Tesis de grado, 2014.
- [35] Steenhuis, T.S. and Van der Molen, W.H., The Thornthwaite-Mather procedure as a simple engineering method to predict recharge. Journal of Hydrology, 84(3-4), pp. 221-229, 1986. DOI: 10.1016/0022-1694(86)90124-1
- [36] Schaake, J.C. and Liu, C., Development and application of simple water balance models to understand the relationship between climate and water resources. In: New Directions for Surface Water Modeling Proceedings of the Baltimore Symposium, 1989.
- [37] de Castro-Victoria, D., Santiago, A.V., Ramos-Ballester, M.V., Pereira, A.R., Victoria, R.L. and Richey, J.E., Water balance for the Ji-Paraná river basin, western Amazon, using a simple method through Geographical Information Systems and Remote Sensing. Earth Interactions, 11(5), pp. 1-22, 2007.
- [38] Castillo, E.J. and Beltran, R.L., Precipitaciones máximas en España. Ministerio de Agricultura, Madrid, 1977, 545 P.
- [39] Harris, A., Rahman, S., Hossain, F., Yarborough, L., Bagtzoglou, A.C. and Eason, G., Satellite-based flood modeling using TRMM-based rainfall products, Sensors, 7, pp. 3416-3427, 2007.
- [40] Vázquez, P.M., Cabria, F.N., Del, M., Rojas, C. y Calandroni, M. B., Riesgo de anegamiento: estimaciones para la cuenca baja del río Salado, CI. Suelo (Argentina), 227(9), pp. 237-246, 2009.
- [41] Gutiérrez-Lozano, J., Vargas-Tristán, V., Romero-Rodríguez, M., de la Cruz, P., Manuel, J., Aguirre-Bortoni, M.D.J. y Silva-Espinoza, H.T., Periodos de retorno de lluvias torrenciales para el estado de Tamaulipas, México. Investigaciones Geográficas, (76), pp. 20-33, 2011.
- [42] Wu, H., Adler, R.F., Tian, Y., Huffman, G.J., Li, H. and Wang, J., Real-time global flood estimation using satellite-based precipitation and a coupled land surface and routing model. Water Resources Research, 50(3), pp. 2693-2717, 2014.
- [43] Borzi, G., Tanjal, C. y Kruse, E., Recurrencia de anegamiento en la cuenca del Río Samborombón, Provincia de Buenos Aires. En: Jornadas de Hábitat y Ambiente: sustentabilidad territorial y urbana, indicadores de gestión ambiental. Mar del Plata. 2016.

G. Borzi, recibido como Lic. en Geología en la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la Universidad Nacional de La Plata en 2011, trabajó en sectores relacionados al medio ambiente e hidrogeología. En 2018 adquirió el grado de Dr. en Ciencias Naturales y actualmente se desempeña como hidrogeólogo en el Centro de Investigaciones Geológicas dependiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas desarrollando tareas de investigación relacionadas a la hidrogeología y medio ambiente. ORCID: 0000-0002-4157-7987

F. Cellone, recibido como Lic. en Geología en la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la Universidad Nacional de La Plata en 2014. En 2019 adquirió el grado de Dr. en Ciencias Naturales y actualmente se desempeña como hidrogeólogo en el Centro de Investigaciones Geológicas dependiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas desarrollando tareas de investigación relacionadas a la hidrogeología y medio ambiente. ORCID: 0000-0002-3490-9816

C. Tanjal, recibida como Lic. en Geoquímica en la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la Universidad Nacional de La Plata en 2016. Actualmente se encuentra realizando su doctorado en temas relacionados al agua subterránea en el Centro de Investigaciones Geológicas dependiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas desarrollando tareas de investigación relacionadas a la hidrogeología y medio ambiente. ORCID: 0000-0001-7036-078X

E. Melendi, recibido como Lic. en Geología en la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la Universidad Nacional de La Plata en 2016, trabajó en sectores relacionados al agua subterránea. Actualmente se encuentra realizando su doctorado en temas relacionados al agua subterránea en el Centro de Investigaciones Geológicas dependiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas desarrollando tareas de investigación relacionadas a la hidrogeología y medio ambiente. ORCID: 0000-0001-9894-9254

E. Carol, recibida como Lic. en Geología y Licenciada en Geoquímica en la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la Universidad Nacional de La Plata en 2001, trabajó en sectores relacionados al medio ambiente e hidrogeología. En 2008 adquirió el grado de Dra. en Ciencias Naturales y actualmente es Investigadora Independiente en el Centro de Investigaciones Geológicas dependiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas desarrollando tareas de investigación relacionadas a la hidrogeología y medio ambiente.
ORCID: 0000-0002-7181-2976