
Efectos de la variabilidad

pluviométrica sobre la morfometría de los recursos hídricos de una cuenca hidrográfica de la región pampeana, Argentina

Effects of rainfall variability on the morphometry
of water resources in a hydrographic basin
located in Pampas, Argentina

Andrea Brendel^{1, 2}

Federico Ferrelli^{1, 3}

María C. Piccolo^{1, 3}

Gerardo M. E. Perillo^{1, 4}

1 Universidad Nacional del Sur, Instituto Argentino de Oceanografía (IADO) /CONICET

2 Universidad Nacional del Sur, Departamento de Agronomía

3 Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo

4 Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geología

Bahía Blanca, Argentina

asbrendel@iado-conicet.gob.ar

Brendel, Andrea Soledad: <https://orcid.org/0000-0002-0909-4694>

Ferrelli, Federico: <https://orcid.org/0000-0002-5623-8929>

Maria Cintia Piccolo: <https://orcid.org/0000-0002-5184-9149>

Gerardo Miguel Eduardo Perillo: <https://orcid.org/0000-0002-1200-5138>

Resumen

El objetivo de este estudio fue cuantificar y caracterizar el impacto de eventos secos y húmedos ocurridos en la cuenca del río Sauce Grande (región Pampeana, Argentina) sobre la morfometría de sus principales recursos hídricos, durante el período 1987-2017. Para ello, se analizaron series anuales del Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración y se calcularon siete índices morfométricos a partir del procesamiento de imágenes satelitales Landsat. El área de influencia del dique Paso de Las Piedras y la laguna Sauce Grande presentó alternancia de eventos secos y húmedos de diferente duración, intensidad y frecuencia. La variabilidad pluviométrica generó cambios en la morfometría del área de estos dos cuerpos de agua. Los eventos secos ocasionaron un mayor impacto sobre el dique, mientras que los húmedos sobre la laguna. Los resultados encontrados constituyen una base de datos fundamental para el diseño de políticas orientadas a la gestión de los recursos hídricos de la cuenca del río Sauce Grande.

PALABRAS CLAVE: gestión de recursos hídricos; variación morfométrica multitemporal; SPEI; cuenca del río Sauce Grande.

Abstract

This study aimed to quantify and characterize the impact of dry and wet events that occurred in the Sauce Grande River basin (Pampas, Argentina) on the morphometry of its main reservoirs, Paso de Las Piedras dam and Sauce Grande shallow lake, during the period 1987-2017. That's why, the annual series of the Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index were analyzed, and seven morphometric indices were calculated from the processing of Landsat satellite images. The area of influence of the Paso de Las Piedras dam and the Sauce Grande shallow lake had alternation of dry and wet events of different duration, intensity, and frequency. The rainfall variability produced changes in the morphometry of the area of these two water bodies. Dry events caused a more significant impact on the dam, whereas wet ones on the shallow lake. The results are an essential database for the designation of policies oriented to the management of the water resources of the Sauce Grande River basin.

KEY WORDS: water resources management; multitemporal morphometric variation; SPEI; Sauce Grande River basin.

1. Introducción

La variabilidad de la precipitación es un factor fundamental para comprender la dinámica de los recursos hídricos, principalmente de aquellos ubicados en llanuras (Aliaga *et al.*, 2016a). Su importancia recae en que afecta la disponibilidad de nutrientes y carbono, la capacidad de infiltración, el suministro de servicios ecosistémicos, la productividad primaria, la calidad del agua, la morfometría, entre otros (Palmer *et al.*, 2008; Yan *et al.*, 2014). En la región Pampeana, los cuerpos de agua son en su mayoría someros. Esta característica hace que respondan rápidamente a las variaciones ambientales. Por esta razón son considerados como ‘centinelas’ del cambio climático y el impacto antrópico (Adrian *et al.*, 2009; Zunino *et al.*, 2018).

El análisis de su morfometría brinda información sobre los mecanismos de respuesta de los sistemas acuáticos a la variabilidad climática (Williamson *et al.*, 2009). Sin embargo, existen otros factores determinantes de los cambios morfométricos, tales como el origen del lago, sus características geomorfológicas, las actividades antrópicas, entre otros (Bohn *et al.*, 2016), convirtiéndose en indicadores representativos de respuestas regionales (Ma *et al.*, 2011). Por tanto, el conocimiento de sus variaciones espaciales es fundamental para la planificación y el aprovechamiento del recurso (Bohn y Piccolo, 2018a).

La utilización de imágenes satelitales Landsat ha sido una herramienta fundamental para conocer los cambios morfométricos de lagos localizados en distintas partes del mundo durante extensos períodos de tiempo. Por ejemplo, se han aplicado para evaluar el comportamiento de 51 cuerpos de agua ubicados en la llanura de Jiangnan (China) durante 1978-2014 (Shi *et al.*, 2017), en el lago Sevan (Armenia, 1973-2015), (Hovsepyan *et al.*, 2019), como así también en lagos de Australia, durante 1987-2014 (Mueller *et al.*, 2016). En la re-

gión Pampeana argentina se han analizado para estudiar el comportamiento morfométrico de diversas lagunas durante la generación de eventos pluviométricos húmedos y secos (p. ej., Aliaga *et al.*, 2016b; Zunino *et al.*, 2018).

En el contexto actual de calentamiento global, el aumento de la temperatura se ha convertido en uno de los factores más importantes en la intensificación de las sequías (Ye *et al.*, 2015; Polong *et al.*, 2019). Por ello, la cuantificación objetiva de este fenómeno es más precisa si se utilizan los efectos conjuntos de la precipitación y la temperatura (Ye *et al.*, 2015). Actualmente, el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración es el más utilizado para caracterizar los períodos húmedos y secos (SPEI, por sus siglas en inglés), (Vicente-Serrano *et al.*, 2010; Bohn y Piccolo, 2018b). Su aplicación ha permitido estimar el tiempo de respuesta de las aguas superficiales a la precipitación (Bohn y Piccolo, 2020), monitorear y predecir las sequías en la cuenca del lago Urmía (Irán), (Abbasi *et al.*, 2019) y evaluar la variabilidad espacio-temporal de los eventos húmedos y secos en la cuenca del río Tana (Kenya), (Polong *et al.*, 2019). Sin embargo, son escasos los estudios en la región Pampeana que evalúen los efectos de la variabilidad pluviométrica sobre la morfometría de los recursos hídricos, utilizando un extenso período de tiempo.

Por lo expuesto, el objetivo de este estudio fue cuantificar y caracterizar los impactos de los eventos secos y húmedos de la cuenca del río Sauce Grande (región Pampeana, Argentina) sobre la morfometría de sus principales recursos hídricos durante el período 1987-2017. Los resultados obtenidos permitirán comprender la dinámica espacial y temporal de los cuerpos de agua y obtener información esencial para el diseño de planes de manejo del recurso hídrico, principalmente durante períodos de extensas sequías.

2. Área de estudio

El área de estudio es la cuenca del río Sauce Grande (4.856 km²), localizada en el sur de la región Pampeana (Argentina), (FIGURA 1). Es una cuenca exorreica y a lo largo de su extensión presenta dos cuerpos de agua principales: el dique Paso de Las Piedras (DPP) y la laguna Sauce Grande (LSG), localizados en el sector de la llanura (FIGURA 1). El primero, es el reservorio de agua más importante de la región, dado que abastece de agua potable a más de 500.000 habitantes, siendo también fuente de agua para el polo industrial cercano (Casado y Campos, 2019). Por otro lado, la LSG es de régimen permanente y es el cuerpo de agua más extenso de la cuenca baja. Recibe por su margen izquierdo al río Sauce Grande que drena sus aguas desde el DPP, desembocando en el océano Atlántico (FIGURA 1).

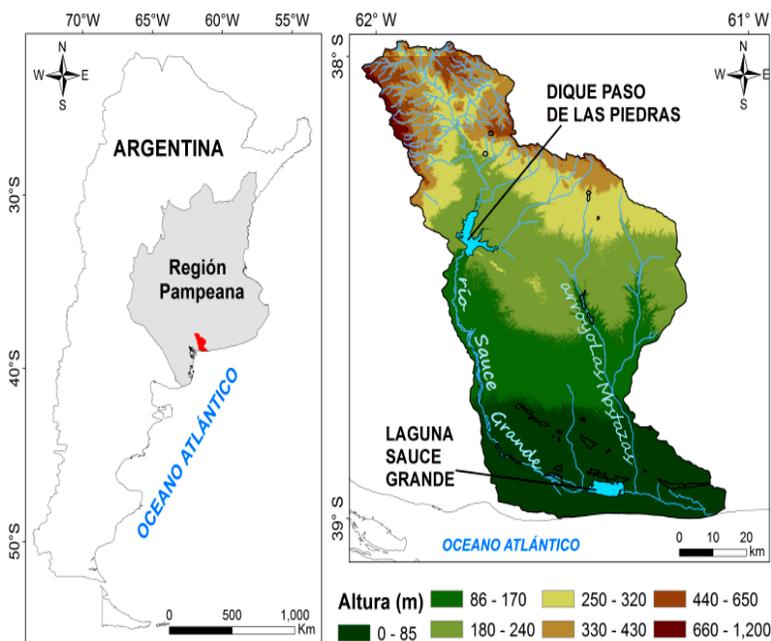
Es una alargada depresión en sentido W-E y su costa es de tosca con suaves declives, por

lo general fangosas y con juncuales emergentes raleados y no muy accesibles (Fornerón *et al.*, 2010). Su principal atractivo turístico es la pesca deportiva del pejerrey. El clima de la cuenca es subhúmedo-húmedo al norte, con una precipitación media anual de 750 mm, mientras que al sur es subhúmedo-seco (646 mm anuales).

3. Materiales y métodos

El análisis de los eventos secos y húmedos se realizó con la aplicación del Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI, por sus siglas en inglés). Este es el resultado de la diferencia entre la precipitación acumulada y la evapotranspiración potencial. Puede ser calculado para diferentes escalas de tiempo (desde 1 a 48 meses) y permite detectar, monitorear y analizar los eventos secos y húmedos. Para su estimación, se debe considerar la siguiente ecuación (1):

FIGURA 1. Localización del dique Paso de Las Piedras y la laguna Sauce Grande



$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (1)$$

donde $W = -2\ln(P)$, D es la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial; P es la probabilidad de exceder una D determinada; C y d son constantes: $C_0 = 2,515517$, $C_1 = 0,802853$, $C_2 = 0,010328$, $d_1 = 1,432788$, $d_2 = 0,189269$ y $d_3 = 0,001308$ (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). En este estudio se utilizó la escala temporal 12 meses (SPEI 12), dado que es la que permite analizar con más precisión la dinámica de las aguas superficiales (Vicente-Serrano *et al.*, 2010).

La serie de datos de SPEI fue obtenida del sitio web <http://sac.csic.es/spei/home.html> para el período 1987-2017. Se estudiaron dos sitios que representaron las condiciones meteorológicas de los dos cuerpos de agua localizados en la cuenca (DPP y LSG). Por un lado, en el caso del DPP se analizó la estación localizada en $38^\circ 25'S - 61^\circ 75' W$, mientras que para la LSG se consideró la estación ubicada en $38^\circ 75' S - 61^\circ 25' W$. Del estudio realizado sobre las series de tiempo del SPEI, se caracterizaron los eventos secos y húmedos según los criterios presentados en la TABLA 1. También se determinó: a) la frecuencia de estos eventos que se refiere al número de eventos secos o húmedos; b) la periodicidad que corresponde al tiempo

transcurrido entre la generación de uno y la ocurrencia de otro; c) la duración que es la extensión temporal (en meses) y, d) la intensidad que es el valor medio anual del SPEI (Podestà *et al.*, 2016).

Posteriormente, se evaluaron los efectos de la variabilidad pluviométrica sobre la morfometría de los cuerpos de agua. Para ello, se procesaron 27 imágenes satelitales Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI-TIRS (TABLA 2), descargadas del catálogo de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE, Argentina). Se utilizó este satélite dado que permite disponer de información espacial para extensos periodos de tiempo, considerando la misma resolución espacial, espectral y temporal.

Se realizaron las correcciones atmosféricas, geométricas y radiométricas siguiendo los pasos metodológicos descritos en Brendel *et al.* (2019). Inicialmente, se realizó la corrección geométrica a partir de la aplicación de sitios de control. Esta se realizó considerando puntos estratégicos seleccionados equidistantemente entre sí (Carmona *et al.*, 2011). Posteriormente, se aplicó la corrección radiométrica de cada banda con el objetivo de convertir los valores digitales a valores de radiancia al tope de la atmósfera. Para ello, se aplicó la siguiente ecuación (2):

TABLA 1. Categorías del SPEI

FUENTE: MODIFICADO DE VICENTE SERRANO *et al.* (2010) Y WANG *et al.* (2015)

Tipo de evento	SPEI	Categorías
Húmedo (H)	2,0 o más	Extremadamente húmedo (EH)
	1,5 a 1,99	Muy húmedo (MH)
	1,0 a 1,49	Moderadamente húmedo (MDH)
	0,51 a 0,99	Incipiente humedad (IH)
Normal (N)	-0,50 a 0,50	Normal (N)
Seco (S)	-0,51 a -0,99	Incipiente sequía (IS)
	-1,0 a -1,49	Moderadamente seco (MDS)
	-1,5 a -1,99	Muy seco (MS)
	-2,0 o menos	Extremadamente seco (ES)

$$L_{\lambda sat} = G_{\lambda}DN_{\lambda} + B_{\lambda} \tag{2}$$

donde λ indica el número de la banda y G_{λ} (Gain) y B_{λ} (Bias) son los coeficientes de transformación de niveles digitales a valores de radiancia. Estos se encuentran en la información adicional de las imágenes satelitales.

Finalmente, los valores de reflectancia se transformaron en reflectancia a tope de la atmósfera, aplicando el método propuesto por Schroeder *et al.* (2006). El mismo asume una superficie lam-

bertiana, libres de nubes y sin considerar los efectos de la atmósfera. Por último, se aplicó la corrección atmosférica, considerando el método de sustracción de superficies oscuras (Chávez, 1988).

Para corregir el error de escaneo de las Landsat 7 ETM+, se aplicó la técnica de interpolación SCL-OFF (*Scan Line Corrector*, por sus siglas en inglés), (Pringle *et al.*, 2009). Las imágenes correspondieron a días despejados y se analizaron las correspondientes al mes de enero, dado que es el mes donde hay mayor probabilidad de encontrar cielos despejados. Cuando no se cumplió esta condición, se optó por utilizar las pertenecientes al mes de febrero.

Los cuerpos de agua se delimitaron a partir del cálculo del Índice Normalizado de Diferencia de Agua (Ec. 3), (NDWI, por sus siglas en inglés), (McFeeters, 1996) que ha sido ampliamente utilizado a escala mundial y regional (p.ej., Donia, 2018; Bohn y Piccolo, 2020). El mismo varía entre -1 y 1, siendo los valores mayores a 0,5 la superficie cubierta por agua. A partir de estos valores, se crearon muestras espaciales georreferenciadas y se aplicó el método de Máxima Verosimilitud, dado que es el más preciso para clasificar las coberturas del suelo del área de estudio (Brendel *et al.*, 2019). Posteriormente, se vectorizaron los resultados y se obtuvo la delimitación de los dos cuerpos de agua. Este proceso fue realizado con los softwares ArcGis 10.5 y ENVI 5.3.

$$NDWI = \frac{V - IRC}{V + IRC} \tag{3}$$

donde, V: verde (banda espectral 2 del Landsat 5 TM, 7 ETM+ y 3 del Landsat 8 OLI-TIRS) y IRC: infrarrojo cercano (banda espectral 4 de Landsat 5 TM y 7 ETM+ y 5 del Landsat 8 OLI-TIRS).

Una vez que se corrigieron las imágenes y se delimitaron los cuerpos de agua, se calcularon siete parámetros morfométricos definidos por Hutchinson (1957) para el período 1987-2017. Estos fueron:

TABLA 2. Imágenes satelitales utilizadas en el presente estudio

Fecha de la imagen satelital	Descripción
14/01/1987	LM52260871987011401T1
01/01/1988	LM52260871988001FFFF03
04/02/1989	LM52260871989035FFFF03
22/01/1990	LM52260871990022FFFF03
25/01/1991	LM52260871991025FFFF03
22/12/1995	LT52260871996039CUB01
28/01/1998	LT52260871998028COA00
15/01/1999	LT52260871999015COA00
02/01/2000	LT52260872000002CUB00
04/01/2001	LT52260872001004COA00
07/01/2002	LT52260872002007COA00
18/01/2003	LE72260872003018EDC00
05/01/2004	LE72260872004005ASN01
07/01/2005	LE72260872005007EDC00
10/01/2006	LE72260872006010EDC00
22/02/2007	LT52260872007053CUB00
01/02/2008	LE72260872008032EDC00
27/02/2009	LT52260872009058COA00
05/01/2010	LE72260872010005EDC00
08/01/2011	LE72260872011008EDC00
28/02/2012	LE72260872012059EDC00
14/02/2013	LE72260872013045EDC00
08/01/2014	LC82260872014008LGN00
12/02/2015	LC82260872015043LGN00
14/01/2016	LC82260872016014LGN00
16/01/2017	LC82260872017016LGN01
19/01/2018	LC82260872018019LGN00

- Área (A). Es la extensión en km² de cada cuerpo de agua.
- Perímetro (P). Este parámetro se calcula para obtener el IDC y se expresa en km. Fue considerado como una estimación dado que depende altamente del error del píxel, haciendo que los valores sean sobre-estimados.
- Longitud Máxima Total (LMT). Es la longitud (en km) de la línea que conecta los puntos más extremos de los cuerpos de agua. Se considera como la longitud de las aguas abiertas y no atraviesa la tierra, a menos que sea una isla.
- Orientación de la LMT (O.LMT). Es la dirección del eje de la LMT expresado según la rosa de los vientos.
- Ancho medio (A.MED). Es la relación (en km) entre el área del cuerpo de agua con la LMT, es decir (4):

$$\frac{A}{LMT} \quad (4)$$

- Ancho máximo (A.MAX). Es la longitud de la línea recta que es perpendicular al eje de la LMT.
- El Desarrollo de Línea de Costa (DLC) es una medida de la regularidad del contorno de un cuerpo de agua, indicando su mayor o menor semejanza al círculo. Para calcularlo, se aplicó la ecuación 5:

$$DLC = \frac{P}{2(\pi S)^{1/2}} \quad (5)$$

donde P es el perímetro y S es el área del cuerpo considerado. Este índice define el grado de contacto con la tierra firme, la cantidad de terreno que puede ser colonizado por algas, la diversificación del ambiente béntico, etc. Según Hutchinson (1957), los resultados obtenidos permiten definir la forma de un cuerpo de agua en: circular (DLC: 1,04-1,15), elíptica (1,15-2,5), subrectangular elongado (2,5-5) y dendrítica (mayor a 5).

4. Resultados

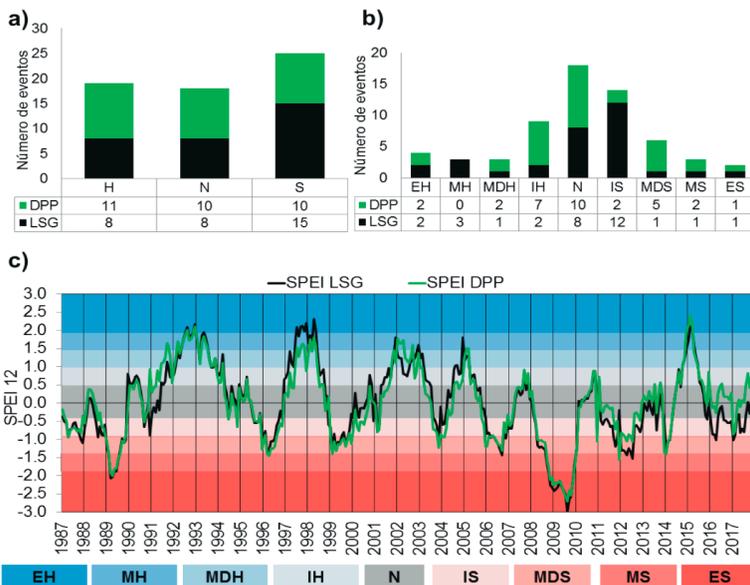
4.1 Análisis de la variabilidad pluviométrica

El número de eventos secos, húmedos y normales, su intensidad y el comportamiento interanual se presentan en la figura 2. Se encontró una significativa diferenciación del total de eventos secos y húmedos en los dos sitios analizados. Durante el período 1987-2017, los secos fueron más frecuentes que los húmedos en la LSG (15 y 8, respectivamente), mientras que si bien en el DPP, los húmedos fueron más representativos, la diferencia fue escasa (11 y 10, respectivamente), (FIGURA 2A). Se originaron ocho y diez eventos normales en la LSG el DPP, respectivamente (FIGURA 2B).

Los de intensidad incipiente fueron los eventos secos más representativos de la LSG y ocurrieron un total de doce (FIGURA 2B). Son ejemplos: 2006 y 2012 (SPEI: -0,55 y -0,65, respectivamente). El evento moderadamente seco se generó en 1987 (SPEI: -1,11), el muy seco en 2009 (SPEI: -1,6) y el extremadamente seco durante el 2008 (SPEI: -2,3), (FIGURA 2C). Por otro lado, los eventos muy húmedos fueron los más frecuentes y ocurrieron en 2001 (SPEI: 1,8), 2002 (SPEI: 1,6) y 2004 (SPEI: 1,8). Se contabilizaron un total de dos eventos extremadamente húmedos en la LSG en 1993 y 1997 (SPEI: 2,2) y uno moderadamente húmedo en 2014 (SPEI = 1,45), (FIGURA 2B y 2C).

En el DPP, los períodos de incipiente humedad fueron los más frecuentes, contabilizando siete (p.ej., 1990, 1991, 2017). Se registraron dos eventos de moderada humedad en los años 2001 y 2002 (SPEI = 1,1 y 1,4, respectivamente) y dos de extrema humedad en 1992 y 2014 (SPEI = 2,1 en ambos) (FIGURA 2B y 2C). Dentro de las categorías secas, los de intensidad moderada fueron los más representativos (cinco eventos, p.ej., 1995, 1999, 2013), seguido de los de incipiente sequía y los muy secos, con un total de dos registros en cada uno. Los eventos muy secos se presentaron en

FIGURA 2. A) Número de eventos húmedos (H), normales (N) y secos (S); B) Según su intensidad; C) Comportamiento interanual del SPEI en la laguna Sauce Grande y el dique Paso de Las Piedras durante el período 1987-2017



el año 2009 y 2011 con un valor de SPEI de -1,7 y -1,6, respectivamente. Por último, el de extrema sequía ocurrió, al igual que en la LSG, durante en el año 2008 (SPEI: -2), (FIGURA 2B y 2C).

La duración media de los períodos húmedos fue similar en ambos sitios (12,3 meses), pero fueron más intensos sobre el DPP que en la LSG (valor medio de SPEI: 1,42 y 1,26, respectivamente). El evento húmedo más extenso duró 36 meses en el DPP (abril 1991-marzo 1994) y 32 meses (agosto 1991-marzo de 1994) en la LSG, siendo más intenso en 1992 (SPEI: 1,66) (FIGURA 2C). La periodicidad fue mayor en el DPP (3 vs 3,3 años). Por otro lado, la duración y la intensidad de los eventos secos fue superior en la LSG (10,6 vs 9,1 meses, respectivamente, SPEI = -1,2). La sequía más extensa fue de 23 meses y ocurrió en ambos sitios entre marzo de 2008 y enero de 2010 (FIGURA 2C). La periodicidad fue mayor en la LSG (2,4 años) que en el DPP (2,7 años). Finalmente, es importante destacar que los eventos húmedos tuvieron una mayor duración

que los secos, pero presentaron una menor periodicidad.

4.2 Respuesta de los índices morfométricos a la variabilidad pluviométrica

La variación del SPEI y los parámetros morfométricos de la LSG y el DPP durante el período 1987-2017 se muestra en la FIGURA 3, mientras que el valor medio, máximo y mínimo de los mismos se presenta en la TABLA 3. En general, los índices morfométricos presentaron un comportamiento similar en los dos cuerpos de agua y sus variaciones estuvieron en relación con la variabilidad pluviométrica (FIGURA 3). Ambos cuerpos de agua presentaron los mismos períodos de incremento (2001 a 2005 y 2014 a 2017) y reducción de su superficie (2007 a 2013) y además, los de menor cobertura fueron los más extensos (FIGURA 3).

Durante el año 2002, la LSG presentó su máxima área (24,4 km²), mientras que en DPP se produjo

FIGURA 3. Variación estandarizada del SPEI y de los índices morfométricos de la laguna Sauce Grande y el dique Paso de Las Piedras durante el período 1987-2017

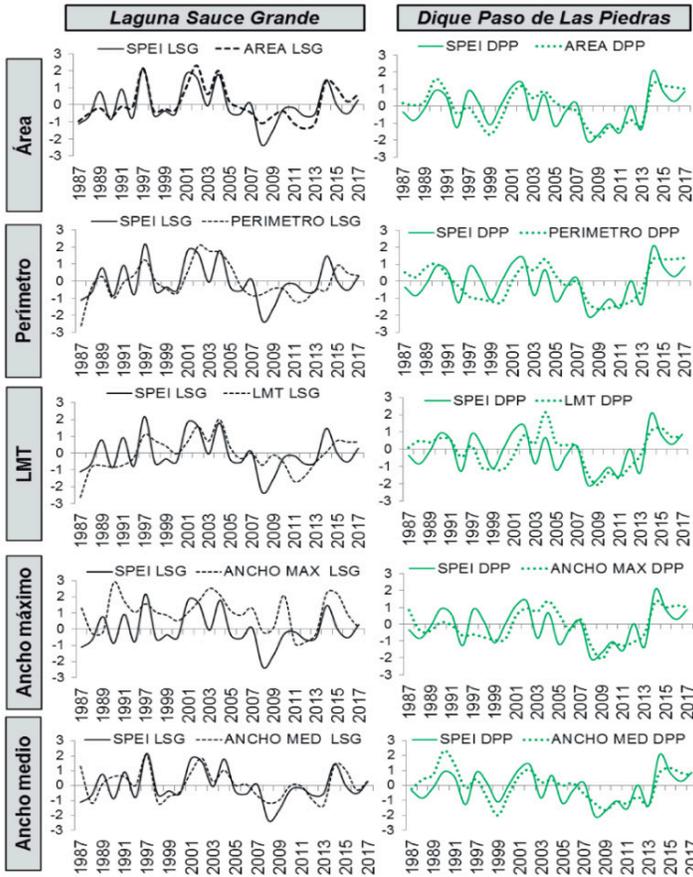


TABLA 3. Valores medios, máximos y mínimos de los índices morfométricos

	Valor medio		Máximo		Mínimo	
	LSG	DPP	LSG	DPP	LSG	DPP
A	18,6 ± 2,6 km ²	26,4 ± 5,8 km ²	24,4 km ²	35,8 km ²	14,8 km ²	15,9 km ²
P	23,3 ± 2,3 km	49,9 ± 6,8 km	28 km	59,5 km	17,5 km	39,2 km
LMT	8,2 ± 0,8 km	10,4 ± 0,8 km	9,6 km	12,1 km	6,3 km	8,9 km
O.LMT	SW-NE	NW-SE	SW-NE	NW-SE	SW-NE	NW-SE
A.MAX	3,3 ± 0,1 km	8,6 ± 0,8 km	3,5 km	9,9 km	3,1 km	6,9 km
A.MED	2,3 ± 0,2 km	3 ± 0,5 km	2,7 km	4,1 km	2 km	2,1 km
DLC	1,5 ± 0,1	2,8 ± 0,2	1,7	3	1,2	2,4

en el año 1990 (35,8 km²), en coincidencia con años húmedos (SPEI: 1,6 y 0,93, respectivamente) (FIGURA 3; TABLA 3). La superficie de la LSG en ese año se incrementó en 31,2%, mientras que la del DPP un 35,6%. Como consecuencia del aumento del área, el resto de los parámetros morfométricos se modificaron. Por ejemplo, el perímetro del DPP aumentó un 19,2%, mientras que el de LSG fue 20,2%. En el caso de la LTM, el incremento fue de 16,3 y 17,1%, respectivamente (TABLA 3). Por su parte, el ancho máximo de la LSG creció un 6,1%, pero fue más significativo en el DPP (15,1%).

En contraposición, la mínima área ocurrió durante el evento seco de 2012 en la LSG (SPEI = -1,15) y 2009 en el DPP (SPEI = -2,3). En el primer caso, la extensión areal de la LSG se redujo un 20,4%, pero fue más significativa en el DPP (39,7%). El resto de los parámetros también oscilaron como consecuencia de la sequía. El perímetro disminuyó 23,9% en la LSG y 21,4% en el DPP y la LTM 23,1 y 14,4%, respectivamente. El ancho máximo disminuyó de manera significativa en el DPP dado que fue 19,7% menor, mientras que en la LSG fue 6% (TABLA 3). Es importante destacar que la orientación de la LMT no presentó cambios y siempre fue SW-NE en la LSG y NW-SE en el DPP (TABLA 3). Finalmente, no se observaron variaciones en el DLC, lo que demuestra que a pesar de las fluctuaciones pluviométricas, la LSG siempre tuvo una forma elíptica mientras que el DPP, se clasificó como subrectangular elongado.

5. Discusión

Los períodos secos y húmedos son parte de la variabilidad pluviométrica natural de una región y se caracterizan por ser altamente dinámicos espacial y temporalmente (Casado y Campos, 2019). Por lo tanto, la cuantificación objetiva de su duración, frecuencia, periodicidad e intensidad es compleja (Dai, 2011). Sumado a ello, no existe en

la literatura una única definición de estos fenómenos, sino que esta se adapta a los diferentes tipos de clima (Wilhite *et al.*, 2007). Para su estudio, se han diseñado e implementado un amplio número de índices. En esta investigación se aplicó el SPEI, dado que al incorporar la evapotranspiración potencial en su cálculo, permitió analizar las sequías con mayor precisión (Vicente-Serrano *et al.*, 2010; Tong *et al.*, 2018; Polong *et al.*, 2019). En el área de influencia de los dos cuerpos de agua, las categorías generales del SPEI presentaron significativas diferencias durante el período 1987-2017 (FIGURA 2A). En este sentido, la LSG registró un mayor número de eventos secos que el DPP, mientras que en este último predominaron las condiciones húmedas. Por lo tanto y considerando la clasificación pluviométrica de la región Pampeana (Aliaga *et al.*, 2016a), se evidenció la existencia de distintos regímenes pluviométricos en ambos sitios.

Por un lado, la zona de influencia del DPP es húmeda, mientras que la LSG es seca. Además, se detectó una marcada alternancia de eventos secos y húmedos de diferente intensidad, frecuencia y duración. Esta variabilidad probablemente se relacione con el fenómeno ENSO (El Niño-Oscilación del Sur, por sus siglas en inglés), dado que el mismo es uno de los principales factores de la variación de las precipitaciones a escala interanual en la región Pampeana (Grimm *et al.*, 2000; Aliaga *et al.*, 2016a). Numerosos estudios han demostrado que esta área presenta períodos húmedos en la fase cálida (Niño) y secos en la fase opuesta (Niña), (Severov *et al.*, 2004; Scian *et al.*, 2006; Scarpati y Capriolo, 2013). Sin embargo, existen otros procesos atmosféricos responsables de la variabilidad pluviométrica, tales como los cambios en la temperatura superficial del mar en el océano Atlántico Sur y fluctuaciones en la actividad convectiva dentro de la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZACS, por sus siglas

en inglés), (Garreaud y Aceituno, 2007; Casado y Campos, 2019).

Los eventos húmedos presentaron una duración similar en el DPP y la LSG, pero fueron más intensos y más frecuentes sobre el primero. Por otra parte, la duración, intensidad y periodicidad de los eventos secos fue mayor en la LSG. Esta situación es importante considerarla dado que la alternancia de los mismos y sus condiciones extremas generan grandes consecuencias sociales, económicas y ambientales (Gabella y Campo, 2016; Ferrelli, 2017a). Durante períodos secos se han incrementado los procesos de erosión del suelo, pérdida de cultivos, la mortalidad de animales, la eutrofización de los cuerpos de agua, entre otros (Scarpati y Capriolo, 2016; Ferrelli, 2017b). Además, durante una sequía extrema, como la ocurrida en el año 2009, se han registrado pérdidas del 67% de superficie cubierta por cultivos y del 90% de la de los cuerpos de agua continentales (Brendel *et al.*, 2017). Por su parte, los ciclos húmedos intensos han reducido significativamente las áreas cubiertas por bosques nativos, generando pérdidas de cultivos por el desarrollo de enfermedades fúngicas y mayores tasas de erosión hídrica, entre otros (Ferrelli, 2017b; Tsesmelis *et al.*, 2019).

Por otro lado, los parámetros morfométricos de los dos cuerpos de agua fluctuaron en función de la variabilidad pluviométrica. Sin embargo, el porcentaje de variación del área de la LSG y el DPP en respuesta a los eventos secos y húmedos no fue igual. Los secos generaron una mayor tasa de cambio en el DPP, mientras que los húmedos en la LSG. La orientación de la LMT y el DLC no identificaron variaciones temporales.

Por tanto, la LSG y el DPP presentan una dinámica morfométrica similar a los cuerpos de agua de la región Pampeana (Aliaga *et al.*, 2016b; Bohn *et al.*, 2016; Zunino *et al.*, 2018). Además,

los años donde se registró la menor cobertura de agua coinciden con años La Niña, mientras que aquellos de máxima área con años El Niño. Este patrón coincide con lo hallado en diversos trabajos de investigación realizados sobre lagos de la región Pampeana (p. ej., Aliaga *et al.*, 2016b; Zunino *et al.*, 2018). Los ciclos de menor cobertura de agua fueron los más extensos. Esta situación es importante considerarla, dado que la reducción en la superficie genera una disminución del oxígeno disuelto, mortandad de peces, eutrofización, descenso de la actividad turística, entre otros (Cony *et al.*, 2014; Espósito *et al.*, 2017). La sequía ocasiona una drástica reducción del nivel de agua del embalse DPP y por lo tanto, se dificulta el acceso al agua para diversos fines. Esto se evidenció durante el evento seco que se extendió desde 2008 hasta 2010 (Dambrosio *et al.*, 2013; Zilio *et al.*, 2019).

Finalmente, es importante considerar que la cuenca del río Sauce Grande presenta un gran manejo antrópico, fundamentalmente por la presencia del DPP. Este embalse, como se ha mencionado, provee agua para el consumo humano y las actividades industriales (Casado y Campos, 2019) y su volumen es regulado para asegurar la provisión de agua, principalmente en periodos de sequía (Autoridad del Agua de la provincia de Buenos Aires, 2020). Por lo tanto, el caudal del río Sauce Grande aguas abajo también se ve modificado por el manejo del dique. Esta situación es relevante dado que los cambios morfométricos del DPP y de la LSG pueden no responder a la variabilidad pluviométrica, sino a las actividades antrópicas desarrolladas sobre el embalse o a ambas. Además, el agua del río Sauce Grande, antes de su descarga en la LSG, es utilizada para el riego de cultivos, lo cual podría ocasionar variaciones en la morfometría de este cuerpo de agua (Cifuentes y Bonzini, 2014).

6. Conclusión

El área de influencia de la LSG y el DPP presentó alternancia de eventos secos y húmedos de diferente duración, intensidad y frecuencia durante el período 1987-2017. La laguna presentó una mayor cantidad de eventos secos, mientras que en el dique predominaron los húmedos. A su vez, la duración de los períodos húmedos fue similar en ambos sitios, pero más intensos y periódicos sobre el DPP, mientras que los secos fueron de mayor extensión, magnitud y periodicidad en la LSG.

La variabilidad pluviométrica generó cambios en los morfometría de los dos cuerpos de agua y su impacto fue más significativo sobre el área donde se localizan. En general, los eventos secos fueron los que generaron una mayor variación en el DPP, mientras que los húmedos sobre la LSG. Por lo

tanto, el procesamiento de imágenes satelitales Landsat fue fundamental para comprender, por primera vez, la dinámica espacial y temporal de estos cuerpos de agua durante un extenso período de tiempo. Los resultados encontrados constituyen una base de datos fundamental para el diseño de políticas orientadas a gestionar el recurso hídrico de la cuenca del río Sauce Grande.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del CONICET y la Universidad Nacional del Sur por el financiamiento del estudio. Se agradece también a la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) por la información satelital brindada a través del proyecto Misión SAOCOM.

8. Referencias citadas

- ABBASI, A.; KHALILI, K.; BEHMANESH, J. & A. SHIRZAD. 2019. "Drought monitoring and prediction using SPEI index and gene expression programming model in the west of Urmia Lake". *Theoretical and Applied Climatology*, 138(1-2): 553-567.
- ADRIAN, R.; O'REILLY, C. M.; ZAGARESE, H.; BAINES, S. B.; HESSEN, D. O.; KELLER, W. & G. A.WEYHENMEYER. 2009. "Lakes as sentinels of climate change". *Limnology and oceanography*, 54(6): 2.283-2.297.
- ALIAGA, V. S.; FERRELLI, F.; ALBERDI-ALGARAÑAZ, E. D.; BOHN, V. Y. & M. C. PICCOLO. 2016a. "Distribution and variability of precipitation in the Pampas, Argentina". *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42(1): 261-280.
- ALIAGA, V. S.; FERRELLI, F.; BOHN, V. Y. & M. C. PICCOLO. 2016b. "Utilización de imágenes satelitales para comprender la dinámica lagunar en la Región Pampeana". *Revista de Teledetección*, 46: 133-146.
- AUTORIDAD DEL AGUA DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES (ADA). 2020. Disponible en: <http://www.ada.gba.gov.ar>
- BOHN, V. Y.; DELGADO, A. L.; PICCOLO, M. C. & G. M. E. PERILLO. 2016. "Assessment of climate variability and land use effect on shallow lakes in temperate plains of Argentina". *Environmental Earth Sciences*, 75(9): 818.
- BOHN, V. Y. & M. C. PICCOLO. 2018a. "Propuesta metodológica para el análisis de las inundaciones en cuencas hidrográficas de llanura (Buenos Aires, Argentina)". *Párrafos Geográficos*, 17(2): 1-16.
- BOHN, V. Y. & M. C. PICCOLO. 2018b. "Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) as a tool to determine the hydrological dynamic of plain regions (Argentina)". *Geosciences*, 37(3): 627-637.

- BOHN, V. Y. y M. C. PICCOLO. 2020. "Propuesta metodológica para la predictibilidad de las inundaciones lagunares en llanuras (Provincia de Buenos Aires, Argentina)". *Anuário do Instituto de Geociências*, 43(1): 107-116.
- BRENDEL, A. S.; BOHN, V. Y. y M. C. PICCOLO. 2017. "Efecto de la variabilidad climática sobre el estado de la vegetación y la cobertura de agua en una cuenca de clima templado (Argentina)". *Anuário do Instituto de Geociências*, 40(2): 5-16.
- BRENDEL, A. S.; FERRELLI, F.; PICCOLO, M. C. & G. M. E. PERILLO. 2019. "Assessment of the effectiveness of supervised and unsupervised methods: maximizing land-cover classification accuracy with spectral indices data". *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(1): 014503.
- CARMONA, F.; RIVAS, R.; THOMAS, L. y B. MARINO. 2011. "Caracterización espectral del estuario del río Quequén Grande por medio de imágenes Landsat". En: R. RIVAS; F. CARMONA y D. OCAMPO (Eds.), *Teledetección: Recientes aplicaciones en la Región Pampeana*. pp. 11-29. Tandil, Buenos Aires, Argentina.
- CASADO, A. y A. M. CAMPO. 2019. "Extremos hidroclimáticos y recursos hídricos: estado de conocimiento en el suroeste bonaerense, Argentina". *Cuadernos Geográficos*, 58(1): 6-26.
- CHAVEZ JR., P. S. 1988. "An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data". *Remote Sensing of Environment*, 24(3): 459-479.
- CIFUENTES, O. y M. BONZINI. 2014. "TIG's como Herramientas para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos". En: J. UBOLDI (Ed.), *Geotecnologías del Sur Argentino: casos de estudio*. pp. 397-413. EDIUNS. Bahía Blanca, Argentina.
- CONY, N. L.; FERRER, N. C. y E. J. CÁCERES. 2014. "Evolución del estado trófico y estructura del fitoplancton de un lago somero de la región pampeana: laguna Sauce Grande (Pcia. de Buenos Aires, Argentina)". *Biología Acuática*, 30: 79-91.
- DAI, A. 2011. "Drought under global warming: a review". *Climate Change*, 2(1): 45-65.
- D'AMBROSIO, G.; BOHN, V. Y. y M. C. PICCOLO. 2013. "Evaluación de la sequía 2008-2009 en el oeste de la Región Pampeana". *Cuadernos Geográficos*, 52: 29-45
- DONIA, N. 2018. "NDWI based change detection analysis of Qarun Lake Coastal Area, El-Fayoum, Egypt". En: H. EL-ASKARY; S. LEE; E. HEGGY & B. PRADHAN (Eds.), *Advances in Remote Sensing and Geo Informatics Applications*. pp. 121-124. Advances in Science, Technology & Innovation (IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development), Springer, Cham.
- ESPÓSITO, M. E.; BLANCO, M. C.; SEQUEIRA, M. E.; PAOLONI, J. D. y S. N. FERNÁNDEZ. 2017. "Contaminación natural (As, F) y eutrofización (N, P) en la cuenca del arroyo El Divisorio, Argentina". *International Journal of Experimental Botany*, 85(2): 51-62.
- FERRELLI, F. 2017a. "Efectos de eventos El Niño y La Niña sobre las lagunas del sur de la Región Pampeana (Argentina)". *InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade*, 2(6): 122-142.
- FERRELLI, F. 2017b. "Variabilidad pluviométrica y sus efectos sobre las coberturas del suelo al sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina". *Revista Geográfica Venezolana*, 58(1): 26-38.
- FORNERÓN, C. F.; PICCOLO, M. C. y M. E. CARBONE. 2010. "Análisis morfométrico de la laguna Sauce Grande (Argentina)". *Huellas*, 14: 11-30.
- GABELLA, J. I. y A. M. CAMPO. 2016. "Procesos de ocupación y construcción del espacio rural pampeano: el caso del partido de Patagones". *Huellas*, 20: 79-99.

- GARREAUD, R. D. & P. ACEITUNO. P. 2007. "Atmospheric circulation and climatic variability". En: T. VEBLEN; K. YOUNG & A. ORME (Eds.), *The Physical Geography of South America*. pp. 45-66. Oxford University Press. Oxford.
- GRIMM, A. M.; BARROS, V. R. & M. E. DOYLE. 2000. "Climate variability in Southern South America associated with El Niño and La Niña events". *Journal of Climate*, 13: 35-58.
- HOVSEPYAN, A.; TEPANOSYAN, G.; MURADYAN, V.; ASMARYAN, S.; MEDVEDEV, A. & A. KOSHKAREV. 2019. "Lake Sevan Shoreline Change Assessment Using Multi-Temporal Landsat Images". *Geography, Environment, Sustainability*, 12(4): 212-229.
- HUTCHINSON, E. 1957. *A treatise of Limnology. Geography, physics and chemistry*. John Wiley and Sons Inc., New York, USA.
- MA, R.; YANG, G.; DUAN, H.; JIANG, J.; WANG, S.; FENG, X.; LI, A.; KONG, F.; XUE, B.; WU, J. & S. LI. 2011. "China's lakes at present: Number, area and spatial distribution". *Science China. Earth Sciences*, 54(2): 283-289.
- MCFEETERS, S. K. 1996. "The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features". *International Journal of Remote Sensing*, 17(7): 1.425-1.432.
- MUELLER, N.; LEWIS, A.; ROBERTS, D.; RING, S.; MELROSE, R.; SIXSMITH, J. & A. IP. 2016. "Water observations from space: Mapping surface water from 25 years of Landsat imagery across Australia". *Remote Sensing of Environment*, 174: 341-352.
- PALMER, M. A.; REIDY LIERMANN, C. A.; NILSSON, C.; FLÖRKE, M.; ALCAMO, J.; LAKE, P. S. & N. BOND. 2008. "Climate change and the world's river basins: anticipating management options". *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(2): 81-89.
- PODESTÁ, G.; SKANSI, M.; HERRERA, N. y H. VEIGA. 2016. *Descripción de índices para el monitoreo de sequía meteorológica implementados por el Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur. Reporte CRC-SAS-2015-001*. Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur.
- POLONG, F.; CHEN, H.; SUN, S. & V. ONGOMA. 2019. "Temporal and spatial evolution of the standard precipitation evapotranspiration index (SPEI) in the Tana River Basin, Kenya". *Theoretical and Applied Climatology*, 138(1-2): 777-792.
- PRINGLE, M. J.; SCHMIDT, M. & J. S. MUIR. 2009. "Geostatistical interpolation of SLC-off Landsat ETM plus images". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64: 654-664.
- SCARPATI, O. E. y A. D. CAPRIOLO. 2013. "Sequías e inundaciones en la provincia de Buenos Aires (Argentina) y su distribución espacio-temporal". *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 82: 38-51.
- SCARPATI, O. E. y A. D. CAPRIOLO. 2016. "Sequías agrícolas: recurrencia, clasificación y distribución en la Región Pampeana Argentina". *Cuadernos Geográficos*, 55(1): 6-32.
- SCHROEDER, T. A.; COHEN, W. B.; SONG, C.; CANTY, M. J. & Z. YANG. 2006. "Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon". *Remote Sensing of Environment*, 103(1): 16-26.
- SCIAN, B.; LABRAGA, J. C.; REIMERS, W. & O. FRUMENTO. 2006. "Characteristics of large-scale atmospheric circulation related to extreme monthly rainfall anomalies in the Pampa Region, Argentina, under non-ENSO conditions". *Theoretical Applied Climatology*, 85: 89-106.

- SEVEROV, D. N.; MORDECKI, E. & V. A. PSHENNIKOV. 2004. "SST anomaly variability in the South-western Atlantic and El Niño/Southern oscillation". *Advances in Space Research*, 33: 343-347.
- SHI, Y.; FENG, L. & J. GONG. 2017. "Four decades of the morphological dynamics of the lakes in the Jiangnan Plain using Landsat observations". *Water and Environment Journal*, 31(3): 353-359.
- TONG, S.; LAI, Q.; ZHANG, J.; BAO, Y.; LUSI, A.; MA, Q.; LI, X. & F. ZHANG. 2018. "Spatio-temporal drought variability on the Mongolian Plateau from 1980–2014 based on the SPEI-PM, intensity analysis and Hurst exponent". *Science of the total environment*, 615: 1.557-1.565.
- TSESMEIS, D. E.; KARAVITIS, C. A.; OIKONOMOU, P. D.; ALEXANDRIS, S. & C. KOSMAS. 2019. "Assessment of the vulnerability to drought and desertification characteristics using the standardized drought vulnerability index (SDVI) and the environmentally sensitive areas index (ESAI)". *Resources*, 8(1): 6.
- VICENTE-SERRANO, S. M.; SANTIAGO BEGUERÍA, S. & J. LÓPEZ-MORENO. 2010. "A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI". *Journal of Climate*, 23: 1.696-1.718.
- WANG, K.; LI, Q.; YANG, Y.; ZENG, M.; LI, P. & J. ZHANG. 2015. "Analysis of spatio-temporal evolution of droughts in Luanhe River Basin using different drought indices". *Water Science and Engineering*, 8(4): 282-290.
- WILHITE, D. A.; SVOBODA, M. D. & M. J. HAYES. 2007. "Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness". *Water Resources Management*, 21(5): 763-774.
- WILLIAMSON, C. E.; SAROS, J. E.; VINCENT, W. F. & J. P. SMOL. 2009. "Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change". *Limnology and Oceanography*, 54(6): 2.273-2.282.
- YAN, L.; CHEN, S.; XIA, J. Y. & Y. LOU. 2014. "Precipitation regime shift enhanced the rain pulse effect on soil respiration in a semi-arid steppe". *PLoS ONE*, 9(8): e104217.
- YE, X. C.; LI, Y. L.; LI, X. H.; XU, C.Y. & Q. ZHANG. 2015. "Investigation of the variability and implications of meteorological dry/wet conditions in the Poyang Lake catchment, China, during the period 1960–2010". *Advances in Meteorology*, 11.
- ZILIO, M. I.; SEITZ, C.; SCORDO, F.; GIL, V.; ZAPPERI, P.; COSTILLA, P.; HUAMANTINCO CISNEROS, M. A.; PERILLO, G. M. E. & M. C. PICCOLO. 2019. "Is collaborative management always possible? the case of Sauce Grande River Basin, Argentina". *International Journal of River Basin Management*, 17(2): 251-261.
- ZUNINO, J.; FERRELLI, F. y M. C. PICCOLO. 2018. "Cambios morfológicos en una laguna pampeana (Argentina) como consecuencia de la variabilidad pluviométrica (1960-2015) y sus posibles efectos sobre la comunidad ictica". *Geociências (São Paulo)*, 37(4): 835-847.