

CASO PRÁCTICO

Utilización de imágenes satelitales para comprender la dinámica lagunar en la Región Pampeana

Aliaga, V.S.^{1,*}, Ferrelli, F.¹, Bohn, V.Y.^{1,2}, Piccolo, M.C.^{1,2}

¹ Instituto Argentino de Oceanografía. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Florida 4500 Ed. 1, 8000, Bahía Blanca, Argentina.

² Departamento de Geografía y Turismo. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina. 12 de octubre y San Juan, cuarto piso. 8000, Bahía Blanca, Argentina.

Resumen: El objetivo de este trabajo fue analizar imágenes satelitales de distintas resoluciones espaciales para interpretar el comportamiento morfométrico de seis lagunas de la Región Pampeana, Argentina, caracterizadas por tener distintos régimes pluviométricos. Se analizó la respuesta morfométrica de cada una considerando su localización, condiciones de sitios y la ocurrencia eventos extremos secos y húmedos. Se utilizó el Índice Estandarizado de Precipitación (IEP) para la determinación de años húmedos, secos y normales. Este análisis mostró que las lagunas pampeanas no se comportan de la misma manera ante los eventos pluviométricos. Su origen, utilización socioeconómica y régimen pluviométrico condicionan su variación espacio-temporal y morfométrica.

Palabras clave: Región Pampeana, lagunas, precipitación, imágenes satelitales, respuesta espectral.

Utilization of satellite images to understand the dynamics of Pampas shallow lakes

Abstract: The aim of this study was to analyze satellite images of different spatial resolutions to interpret the morphometric behavior of six shallow lakes of the Pampas, Argentina. These are characterized by having different rainfall regimes. Morphometric response considering each location, site conditions and dry and wet extreme events is analyzed. Standardized Precipitation Index (IEP) for determination of wet, dry and normal years was used. This analysis showed that the Pampas shallow lakes do not behave in the same way to the rainfall events. Its origin, socio-economic use and rainfall patterns affect their spatiotemporal variation and morphometric.

Key words: Pampas, shallow lakes, precipitation, satellite imagery, spectral response.

1. Introducción

La Región Pampeana, Argentina (Figura 1) presenta numerosas lagunas distribuidas a lo largo de su superficie. Se caracteriza por la alternancia de extensos períodos de sequía y excesos hídricos que afectan la disponibilidad de agua e impactan sobre diversas actividades humanas, en especial sobre la productividad de los sistemas agropecuarios (Labraga *et al.*, 2011). La presencia de este gran número de lagunas en la región cumple funciones ambientales claves debido a que constituyen un hábitat singular para la flora y fauna característica de los humedales. Además, sirven de moderadores del régimen fluvial al ser cubetas naturales que almacenan el exceso hídrico y también cumplen un papel importante en las actividades pecuarias y turísticas, pues constituyen la fuente de desarrollo de muchas localidades (Geraldi *et al.*, 2011).

* Autor para la correspondencia: valiaga@iado-conicet.gob.ar

Las lagunas de la Región Pampeana tienden a desarrollar un alto grado de eutrofización debido a que la mayoría de ellas son poco profundas por lo que carecen de estratificación térmica (Quirós *et al.*, 2002, 2006). El área y el volumen de agua de las lagunas presentan variaciones importantes en los diferentes eventos pluviométricos (en algunos casos de hasta más del 80%). Estos pueden producirse mediante tormentas u oscilaciones interanuales como consecuencia de las fluctuaciones estacionales (Bohn, 2009). Este proceso de eutrofización es intensificado por la actividad antrópica, los cambios en el uso del suelo, el incremento del desarrollo urbano y el aumento de los sistemas de regulación (canales, compuertas). La variación en la forma y superficie de las lagunas pueden ser analizadas por medio de sensores remotos.

El objetivo del presente trabajo fue validar el método no supervisado ISODATA (descrito en metodología) en la Región Pampeana para el cálculo del área de las lagunas mediante el procesamiento de imágenes satelitales de distintas resoluciones espaciales (LANDSAT y SPOT). A partir de entonces, se estudió el comportamiento morfométrico de seis lagunas pampeanas ante eventos pluviométricos húmedos y secos, considerando que la variabilidad de la precipitación no es homogénea en toda su extensión (Aliaga *et al.*, 2016). Los resultados obtenidos con el procesamiento digital de imágenes satelitales proporcionarían una base de datos útiles para estudiar aquellas lagunas de las que se tiene escasa información. Este trabajo se enmarca dentro dos proyectos de investigación: Proyecto Argentino de Monitoreo y Prospección de Ambientes Acuáticos (PAMPA2) y del *Sensing the Americas Freshwater Ecosystem Risk* (SAFER) bajo el aval del Inter American Institute (IAI) para la investigación del cambio climático cuyos objetivos se orientan principalmente al monitoreo de los cuerpos de agua continentales.

2. Metodología

La metodología aplicada se subdividió en 3 apartados. Primero se realizaron correcciones geométricas, radiométricas y atmosféricas en imágenes satelitales SPOT 5, LANDSAT 5 TM y 8 OLI. A partir de estas imágenes corregidas se aplicó el método de clasificación no supervisado

ISODATA para obtener el perímetro de las lagunas. La aplicación de este método permitió comparar los resultados obtenidos del área de las lagunas entre imágenes SPOT 5 y LANDSAT 8 OLI. Posteriormente, se seleccionaron 6 lagunas de la región pampeana pertenecientes a distintos regímenes pluviométricos. Finalmente, se analizó la variación en la reflectividad y la morfometría de cada una de estas lagunas considerando distintos eventos extremos pluviométricos y las condiciones de sitio para comprender la dinámica espacio-temporal de ellos.

2.1. Validación del cálculo del área de lagunas

El estudio de las variaciones espacio-temporales de las lagunas se realizó con LANDSAT 5 TM. Sin embargo, para validar el método del cálculo del área se descargaron imágenes SPOT 5 y LANDSAT 8 OLI. Estas últimas se utilizaron debido a la falta de imágenes LANDSAT 5 TM próximas a las fechas de adquisición de SPOT 5. Las imágenes LANDSAT (5 y 8) para el sector del Infrarrojo Cercano (IRC) tienen la misma resolución espacial y una similar resolución espectral. A partir de estas similitudes y para los objetivos de este trabajo, se consideró que los resultados obtenidos con LANDSAT 8 OLI son comparables a los calculados con LANDSAT 5 TM.

Se compararon 12 imágenes LANDSAT 8 OLI con 15 imágenes SPOT 5, seleccionando un total de 103 lagunas (Tabla 2). Este tipo de metodología fue aplicada con éxito por diversos autores (Anaya-Acevedo y Chuvieco-Salinero, 2010; Nelasco *et al.*, 2014; Ferrelli y Aliaga, 2015). Las imágenes LANDSAT se obtuvieron del United Stated Geological Survey (USGS, Estados Unidos) y las SPOT de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE, Argentina). Las escenas se seleccionaron teniendo en cuenta la proximidad de las fechas entre las imágenes de ambos satélites con condiciones de cielo despejado (Tabla 1). Los resultados fueron comparados y contrastados entre sí mediante el cálculo de los índices de correlación de Pearson y Spearman, la Concordancia a partir del índice Kappa (Cohen, 1960; 1968), el error estadístico y el coeficiente de determinación con un α del 5%. También se realizó un test de comparación de medias de

Tabla 1. Imágenes SPOT 5 y LANDSAT 8 utilizadas para la validación.

SPOT 5 (k-j)	LANDSAT 8 (path-row)
27 de marzo de 2015, 699-423	26 de abril de 2015, 225-085
27 de marzo de 2015, 691-428; 27 de marzo de 2015, 689-428	23 de marzo de 2015, 227-087
26 de marzo de 2015, 692-426	23 de marzo de 2015, 227-086
26 de marzo de 2015, 694-427; 11 de marzo de 2015, 692-424	16 de marzo de 2015, 226-087
21 de marzo de 2015, 690-422; 17 de marzo de 2015, 693-421	7 de marzo de 2015, 227-085
12 de marzo de 2015, 689-413	7 de marzo de 2015, 227-082
12 de marzo de 2015, 699-427	14 de febrero de 2015, 224-087
12 de marzo de 2015, 690-410	7 de marzo de 2015, 227-081
12 de marzo de 2015, 690-419	7 de marzo de 2015, 227-084
12 de marzo de 2015, 699-422	18 de marzo de 2015, 224-085
8 de marzo de 2015, 702-425	18 de marzo de 2015, 224-086
7 de marzo de 2015, 695-411	16 de marzo de 2015, 226-081

Fisher para comprobar si la información presentó valores medios estadísticamente iguales considerando un $\alpha=0,05$. Además, se realizó un análisis de regresión entre los resultados de ambas imágenes junto con una prueba de ANOVA con un nivel de significancia del 5%.

2.2. Análisis pluviométricos y selección de lagunas

Se seleccionaron seis lagunas representativas de distintos régimenes pluviométricos de la Región Pampeana. Para ello se consideró el gradiente pluviométrico del área de estudio. El mismo oscila

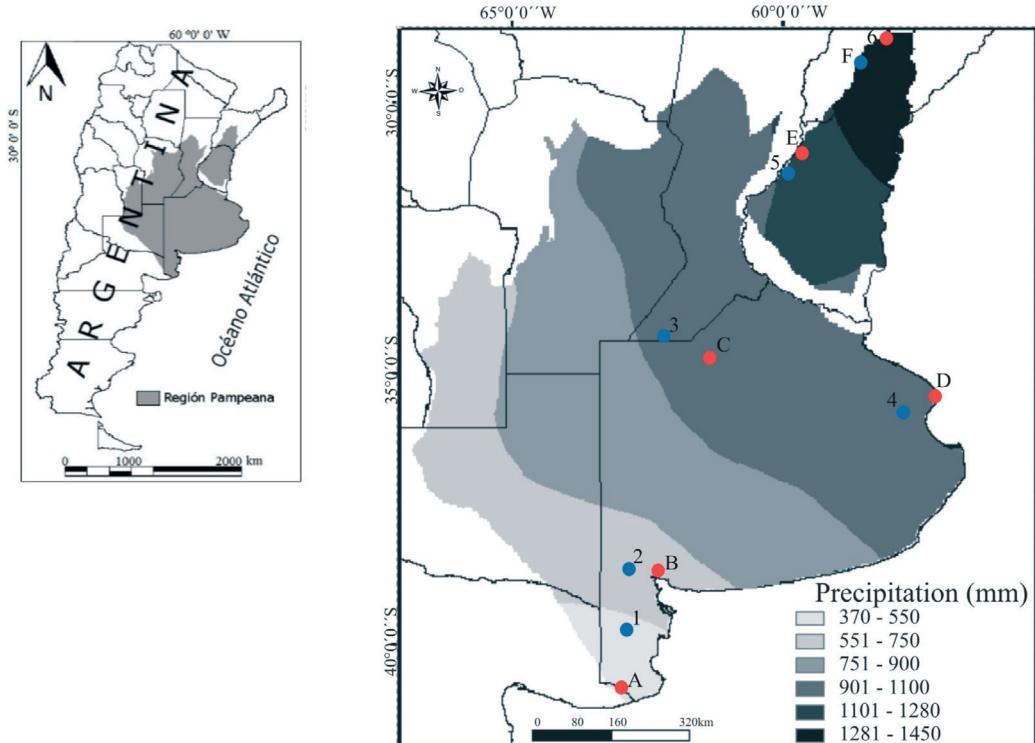


Figura 1. La Región Pampeana en Argentina (Labraga *et al.*, 2011) y localización de las lagunas estudiadas (1. La Petrona, 2. Chasicó, 3. La Picasa, 4. Chascomús, 5. Blanca y 6. La Limpia) y la estación meteorológica más cercana a la laguna (A. Viedma, B. Bahía Blanca, C. Laboulaye, D. Punta Indio, Ee. Paraná, F. Monte Casero).

entre 1400 mm anuales al noreste y disminuye hacia el sudoeste hasta alcanzar los 350 mm anuales (Figura 1). Estas lagunas poseen distinto origen geológico, uso del suelo y morfología (Tabla 2). Si bien se localizan en un clima templado son parte de diferentes subregiones tanto húmedas como semiáridas (Aliaga *et al.*, 2016). El período de estudio en el que se analizó la precipitación fue 1960-2010. Se utilizaron series mensuales de seis estaciones meteorológicas próximas a cada laguna (Figura 1). Los datos fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, Argentina). La calidad de los mismos para la región de estudio fue analizada por Díaz (2001) y la validación y prueba de normalidad, tendencia y consistencia fue realizada por Aliaga *et al.* (2016) y aplicada por Ferrelli *et al.* (2016). Se aplicó el Índice Estandarizado de Precipitación (IEP) a fin de determinar períodos húmedos, secos y normales según la clasificación de Edwards y McKee (1997). Además se tuvo en cuenta el Índice Oceánico de El Niño (ONI) desarrollado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

2.3. Análisis de la reflectividad y la morfometría

Para el estudio de los parámetros morfométricos realizado con imágenes satelitales se consideró el período de disponibilidad de imágenes LANDSAT (1986-2015) y condiciones de cielo descubierto. Una vez probada la validación y conocida la alternancia de períodos secos y húmedos en cada laguna seleccionada, se utilizaron imágenes satelitales LANDSAT 5 TM de años con condiciones pluviométricas normales, húmedas y secas (Tabla 3). Se realizó una clasificación no supervisada del tipo *Interactive Self-Organizing Data Analysis Technique (Algorithm - ISODATA)* (Swain, 1973) sobre las bandas del IRC del LANDSAT 5 TM y del LANDSAT 8 OLI. Este método se ha aplicado con éxito para el estudio de lagunas en otras partes del mundo (p.e. Díaz de Arcaya *et al.*, 2005). Este método permitió diferenciar las lagunas debido a que en el IRC el agua, tanto clara como turbia comienza a absorber la radiación, presentando baja reflectividad. En contraposición, muchas de las coberturas del suelo como la vegetación, el suelo,

Tabla 2. Características de las lagunas estudiadas: S, superficie (km^2); P, profundidad media (m); PP, precipitación media anual (mm año^{-1}); T, temperatura media anual ($^{\circ}\text{C}$); V, Velocidad de viento media anual (km/h^{-1}); EVP, evapotranspiración media anual (mm año^{-1}).

Lagunas	S	P	PP	T	V	EVP	Origen/ formación	Tipo de cuenca	Otras características	Referencias
La Petrona	5	1	400	14,8	14,5	-30	Dunar	Endorreica	Origen eólico. Escasa intervención humana.	SMN Melo <i>et al.</i> , 2003 Geraldi <i>et al.</i> , 2011
Chasicó	62	16	550	15,6	15	-10	Tectónico/ eólico	Endorreica	Aporte de agua subterráneo. Altitud -20 msnm. Balneario pesquero 209 hab.	SMN Geraldi <i>et al.</i> , 2011 Bohn <i>et al.</i> , 2012
La Picasa	300	2,5	1100	17	11	30	Deflacionario	Endorreica	Bajo potencial de escurrimiento. Altitud 102 msnm. Actividad pesquera -recreativa	Tchilinguirian <i>et al.</i> , 2003 Geraldi <i>et al.</i> , 2011
Chascomús	30,4	1,9	950	15	13	50	Fluvial	Exorreica	Zona urbana (42.277 hab). Uso recreativo y pesquero. Manejo del caudal por compuertas.	Diovisalvi <i>et al.</i> , 2010 Geraldi <i>et al.</i> , 2011
Blanca	5,6	s/d	1300	19	10	80	Fluvial	Endorreica	Actividad turística.	SMN Filí, 2001
La Limpia	3	1,5	1400	19	10	80	Fluvial	Endorreica	Balneario recreativo de 6972 hab. Turismo - pesca	SMN Poi de Neif <i>et al.</i> , 1999

las rocas, entre otras, presentan una reflectividad elevada, permitiendo discriminar el agua con facilidad (Ferrelli y Aliaga, 2015).

Las imágenes seleccionadas para el estudio de la morfometría de las lagunas se presentan en la Tabla 3. Inicialmente se realizó la corrección geométrica de las imágenes con la técnica de puntos de control (Carmona *et al.*, 2011), considerando puntos estratégicos seleccionados equidistantemente entre sí.

Para el estudio de la reflectividad se utilizaron las bandas del Visible y del IRC del LANDSAT 5 TM. Se realizó la calibración radiométrica aplicada en otros estudios como el de Ferrelli *et al.*, 2015. La misma es aquella que se le aplica a las imágenes para convertir los valores digitales a valores de radiancia (L_{sat}) por medio de:

$$L_{\lambda sat} = G_\lambda ND_\lambda + B_\lambda \quad (1)$$

donde el subíndice λ indica el número de la banda, G_λ (*Gain*) y B_λ (*Bias*) son los coeficientes de transformación de niveles digitales a valores de radiancia. En las bandas del Visible e IRC los L_{sat} se convierten a valores de reflectividad al tope de la atmósfera sin considerar los efectos de la atmósfera y considerando una superficie lambertiana bajo condiciones libres de nubes (Carmona *et al.*, 2011). En estas bandas (bandas 1-4 de LANDSAT 5 TM),

los efectos atmosféricos de dispersión no pueden despreciarse y por ello se estima teniendo en cuenta la siguiente ecuación (Schroeder *et al.*, 2006):

$$\rho_{\lambda S} = \frac{[\pi(L_{\lambda sat} - L_{\lambda p})]}{[T_{\lambda v}(E_{\lambda 0} d^2 \cos \theta_z T_{\lambda z} + E_{down})]} \quad (2)$$

donde $L_{\lambda p}$ ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$) es la radiancia registrada como resultado de la interacción entre la radiación electromagnética y los componentes atmosféricos, $T_{\lambda v}$ es la transmisividad atmosférica desde la superficie hacia el sensor, $T_{\lambda z}$ es la transmisividad atmosférica en la dirección de la iluminación solar y E_{down} es la irradiancia difusa del cielo hacia abajo ($\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$).

Para calcular los parámetros de la ecuación 2 ($L_{\lambda p}$, $T_{\lambda v}$, $T_{\lambda z}$ y E_{down}) se aplicó el método de Resta de Superficies Oscuras (Song *et al.*, 2001). El mismo supone que en la imagen se encuentran ciertos píxeles con una reflectividad cercana a cero (zonas oscuras) como lo son las aguas claras o profundas o regiones de sombras. En estos píxeles fue posible observar los efectos de la atmósfera (Carmona *et al.*, 2011). De esta manera, se sustrajo a cada $L_{\lambda sat}$ el valor de $L_{\lambda p}$ introducido por la atmósfera, para ello se aplicó la siguiente expresión (Schroeder *et al.*, 2006):

$$L_{\lambda p} = ND_{\lambda dark} G_\lambda + B_\lambda - 0.01 \frac{(E_{\lambda 0} \cos \theta_z T_{\lambda z} T_{\lambda v})}{(d^2 \pi)} \quad (3)$$

Tabla 3. Imágenes satelitales analizadas para el estudio de la respuesta espacial de las lagunas

	Latitud	Longitud	Path - Row	Imágenes utilizadas
1. La Petrona	39°30'15.3"	62°51'16.4"	227-088	LT52260882006034COA00 LT52260882002007COA00 LT52260882010013COA02
2. Chasicó	38°37'00.5"	63°04'34.9"	227-087	LT52270871994328CUB00 LT52270872005006COA00 LT52270872008047COA01
3. La Picasa	34°19'38.8"	62°14'17"	227-084	LT52270841991336XXX02 LT52270842002014COA00 LT52270842008047CUB00
4. Chascomús	35°35'23.8"	58°01'39.8"	224-085	LT52240851991363XXX02 LT52240851994051CUB00 LT52240852006036COA00
5. Blanca	31°05'32"	59°52'25.3"	226-082	LT52260822000002CUB00 LT52260822002007COA00 LT52260822008024CUB00
6. La Limpia	29°59'56.3"	59°22'01.2"	226-081	LT52260812000002CUB00 LT52260812008024CUB00 LT52260812002007COA00

donde ND_{dark} es el ND_λ mínimo en cada banda espectral para cada sector de interés (de al menos 1000 píxeles) seleccionado. El método supone una dispersión Rayleigh sin aerosoles y una reflectividad en superficie del 1% para el objeto oscuro (Carmona *et al.*, 2011). $T_{\lambda v}$ y $T_{\lambda z}$ se calcularon a partir de las siguientes ecuaciones:

$$T_{\lambda v} = \exp\left(\frac{-\tau_{\lambda v}}{\cos \theta_v}\right) \quad (4)$$

$$T_{\lambda z} = \exp\left(\frac{-\tau_{\lambda z}}{\cos \theta_z}\right) \quad (5)$$

siendo τ_{λ} el espesor óptico para la dispersión Rayleigh obtenido por medio de la siguiente ecuación (Carmona *et al.*, 2011):

$$T_{\lambda r} = \frac{0,008569}{(\lambda_m^4 [1 + 0,0113\lambda_m^2 + 0,0013\lambda_m^4])} \quad (6)$$

donde λ_{ef} (en μm) es la longitud de onda efectiva de onda de cada banda, $E_{\lambda down}$ fue considerado un parámetro nulo debido a que su contribución es insignificante (Song *et al.*, 2001).

Se seleccionaron Regiones de Interés (ROI) sobre el agua que abarcó aproximadamente el 80% del área de la laguna para obtener el valor medio de reflectividad, con lo que fue posible generar las curvas espectrales para cada una de las imágenes seleccionadas en función de su longitud de onda. Para su elaboración se utilizaron las bandas 1-4. Las bandas pertenecientes al sector del Infrarrojo Medio (IM, bandas 5 y 7) se desestimaron debido a que no contribuyen a la caracterización espectral dada la absorción de energía provocada por los cuerpos de agua (Carmona *et al.*, 2011).

La reflectividad se relacionó con el Material Particulado en Suspensión. Para estimarlo se consideró la ecuación propuesta por Bhatti (2011):

$$\text{MPS} = m \left[\frac{B_3 + B_4}{\frac{B_3}{B_4}} \right] + n \quad (7)$$

donde MPS resulta en $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, B_3 y B_4 hacen referencia a las bandas del satélite LANDSAT 5 TM y n y m se ajustan con mediciones de campo.

Debido a que no se cuentan con registros realizados en los horarios del paso del satélite por los cuerpos de agua seleccionados no fue posible obtener la concentración de MPS cuantitativamente. Sin embargo, se consideró lo expresado por Carmona

et al., (2011) en la siguiente ecuación como un indicador cualitativo de la cantidad de MPS:

$$\frac{B_3 + B_4}{\frac{B_3}{B_4}} \quad (8)$$

Finalmente, se evaluaron las variaciones espacio-temporales de distintos parámetros morfométricos. Para ello, se calcularon los valores de los mismos para cada una de las lagunas estudiadas durante la ocurrencia de tres eventos pluviométricos distintos (seco, normal y húmedo). Se consideraron los parámetros descritos por Hutchinson (1957): **A**, Área; **P**, Perímetro; **LMT**, Longitud Máxima Total; **OLMT**, Orientación de la longitud máxima total, **A. Ancho Medio**, **AM. Ancho máximo** e **DLC**. Desarrollo de línea de costa.

3. Resultados y discusión

3.1. Validación del área de las lagunas con imágenes LANDSAT 8 y SPOT 5

Los resultados obtenidos con el procesamiento de las imágenes satelitales mostraron un buen ajuste ya que el coeficiente de determinación R^2 fue mayor a 0,99 (Figura 2). Por otro lado, el índice de Spearman fue 1, el de Pearson 1, la concordancia 1 y el Error de 1,34 píxeles (es decir ≈ 40 metros). El valor medio del área calculada con SPOT (cuya área de las lagunas se obtuvo de la misma manera que con LANDSAT) para todos los cuerpos de agua fue $11,3 \text{ km}^2$, mientras que con LANDSAT ese valor fue 12 km^2 . El Test de Fisher y del análisis de la varianza fue altamente significativo (valor $p < 0,01$), por lo tanto es posible afirmar que las medias de ambas fuentes de información son estadísticamente iguales.

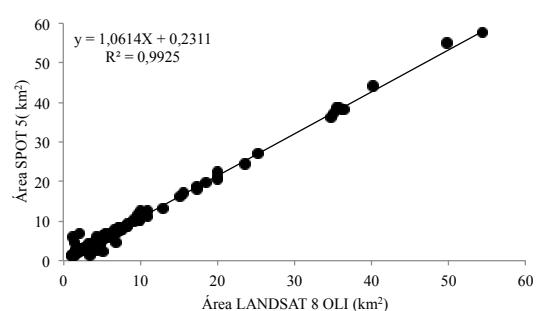


Figura 2. Gráfico de regresión entre los datos obtenidos con LANDSAT 8 OLI y SPOT 5.

3.2. Índice Estandarizado de Precipitación

El análisis del IEP para el período 1960-2010 en las distintas zonas de la región pampeana mostró una sucesión de años húmedos y secos muy diferentes. Esta variabilidad no fue simultánea entre cada área estudiada, tanto en la intensidad de la

precipitación como en su duración. A pesar de su cercanía, en las estaciones de Viedma y Bahía Blanca se observaron diferencias en la variabilidad de las precipitaciones (Figura 1). En la estación del extremo sur de la región son más frecuentes los eventos secos moderados y fuertes, mientras que en Bahía Blanca predominan los eventos lluviosos (Figura 3a y 3b). Laboulaye tuvo un

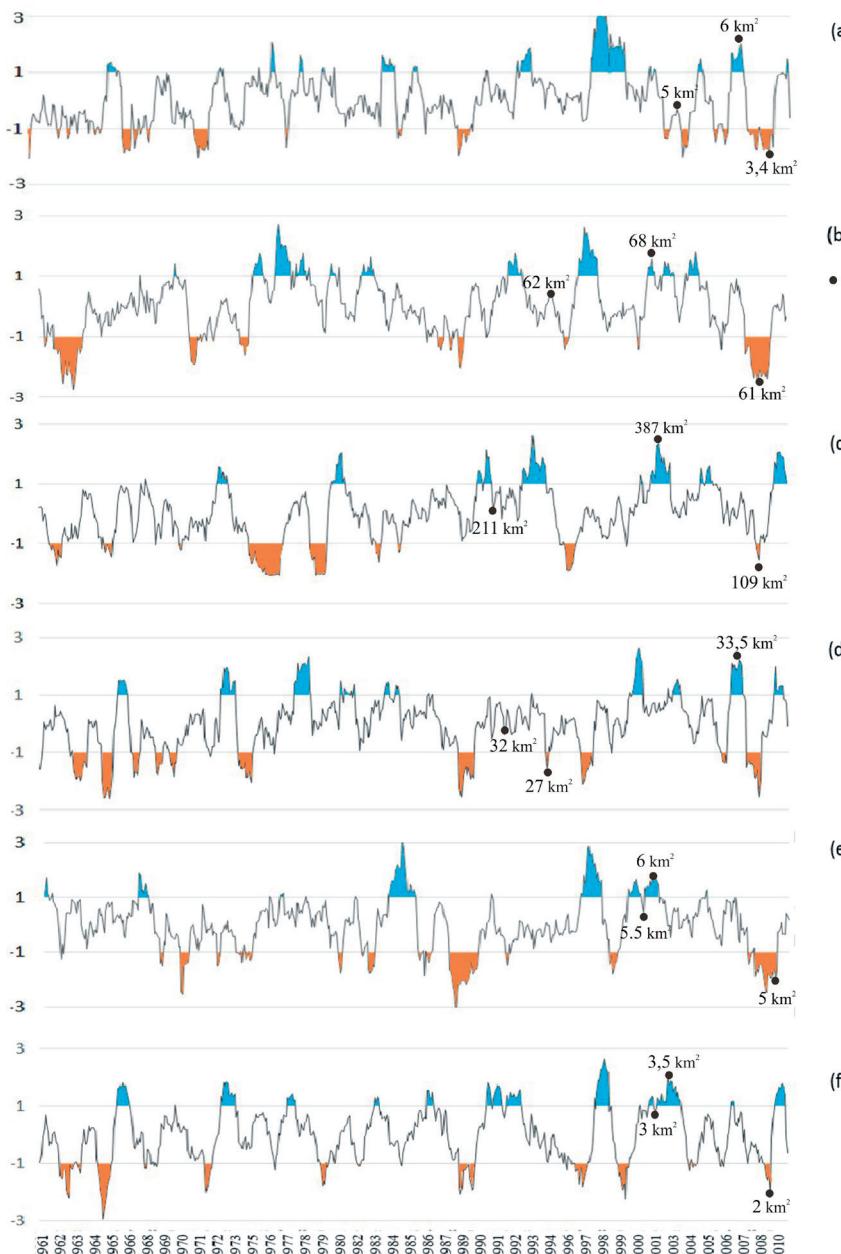


Figura 3. IEP aplicado a los datos de a) Viedma, b) Bahía Blanca, c) Laboulaye, d) Punta Indio, e) Paraná y f) Monte Caseros para el período 1960-2010. Los períodos húmedos se encuentran entre 1 y 3, mientras que los secos entre -1 y -3. Los puntos indican el área de la laguna próxima a la estación meteorológica.

comportamiento pluviométrico distinto (Figura 1). En esta zona los eventos secos (1976-1980; 1996) fueron débiles a moderados y se destaca el evento lluvioso de mayor intensidad de todas las estaciones (1997-1998). Hacia el E, Punta Indio presentó ciclos secos y húmedos con una periodicidad aproximada de 3 años. Por otro lado, se destacan similitudes entre las estaciones Paraná y Monte Caseros (en el noreste de la región) en la frecuencia de eventos húmedos y secos, siendo mayores los lluviosos (Figura 3e y 3f).

Los eventos pluviométricos de mayor intensidad afectaron simultáneamente a gran parte de la región. Por ejemplo, los eventos de sequía registrados en los años 1989-1990 y 2008-2010 y los eventos húmedos entre los años 1998-1999 y 2000-2006 se observaron en todas las zonas estudiadas (Figura 3). Según el índice ONI dichos períodos se clasifican como eventos La Niña y El Niño, respectivamente. Esta variabilidad puede afectar a la región ya sea generando inundaciones como sequías que afectan no sólo a las actividades agropecuarias sino también a la calidad de vida de los ciudadanos. Los efectos de la variación de la precipitación intervienen en la agricultura, dado que en las épocas en donde las precipitaciones son mayores, favorecen el crecimiento de los cultivos al aumentar la humedad del suelo. En los períodos de sequías, se genera un estrés en los cultivos que impiden su normal desarrollo (Huber y Trecaman, 2002; Aliaga *et al.*, 2016).

3.3. Variación espacial del Material Particulado en Suspensión (MPS)

En la laguna La Limpia, el MPS no mostró una variación considerable dado que presentó valores similares en todo el cuerpo de agua. Sin embargo, las márgenes de la laguna en el año seco presentaron valores más elevados y el año normal variaciones en el interior del cuerpo de agua. En la laguna Blanca, el MPS fue mayor en el año normal y menor en el año húmedo por lo que se podría inferir un proceso de dilución (Figura 4).

La laguna Chasicó se caracterizó por presentar en el año normal el menor valor de MPS. El mayor valor se presentó en el año húmedo, con poca variación espacial y el año seco presentó valores menores y con una similar distribución espacial que en el año húmedo. La Picasa presentó una

situación estable en todos los años analizados, no se encontraron variaciones espaciales significativas, sin embargo, se presentaron valores altos en las costas y el sudoeste de la laguna en el año seco (Figura 4).

La laguna Chasicó presentó mayores variaciones en el año normal. En ella la distribución espacial en el año seco y húmedo fueron similares, con valores bajos en el centro del cuerpo de agua y altos en la costa del NO y SE. El MPS de La Petrona presentó mayores fluctuaciones en el año seco, siendo menor en el O y aumentando hacia el E y el NE. En el año normal la situación fue homogénea con pequeños sitios con mayor cantidad de sedimentos. En el año húmedo se observó una situación homogénea con valores elevados en la costa (Figura 4).

3.4. Respuesta espectral de las lagunas

Las curvas espectrales de reflectividad media para las bandas del Visible e IRC se observan en la figura 4. Las regiones del Rojo y el IRC son un buen indicador de la concentración de MPS. Los valores altos de las bandas Rojo e IRC coinciden con elevado contenido de MPS (Bhatti, 2011; Onderka y Pekárová, 2008; Carmona *et al.*, 2011). Se observaron cuatro comportamientos al analizar la reflectividad de las lagunas estudiadas. El primero de ellos corresponde a La Limpia donde la reflectividad presentó mayores valores durante un año normal (máximo 5,6%) y seco (máximo 3,6%) con respecto al húmedo (Figura 4). El segundo está representado por Blanca y Chascomús. Ambas manifestaron valores elevados en el año húmedo y seco y bajos en el normal. En el primer caso el mayor registro fue en el año seco con 9,8% en la banda del Rojo y 4,5% en la Azul. El año normal, presentó valores de reflectividad muy bajos, asociados a cuerpos de agua con mayor absorción. El mayor valor se presentó en el IRC con 3,7%. En el segundo caso los mayores valores se presentaron en el IRC con 12,3% y en el Azul con 11,7% (Figura 5).

El tercer patrón incluye a las lagunas La Picasa y Chasicó. Las mismas responden con elevada reflectividad durante el período normal y baja en el húmedo y seco. La Picasa presentó los mayores valores en la banda Azul (7,2%) y los menores en la Verde (6,2%) mientras que no se observaron

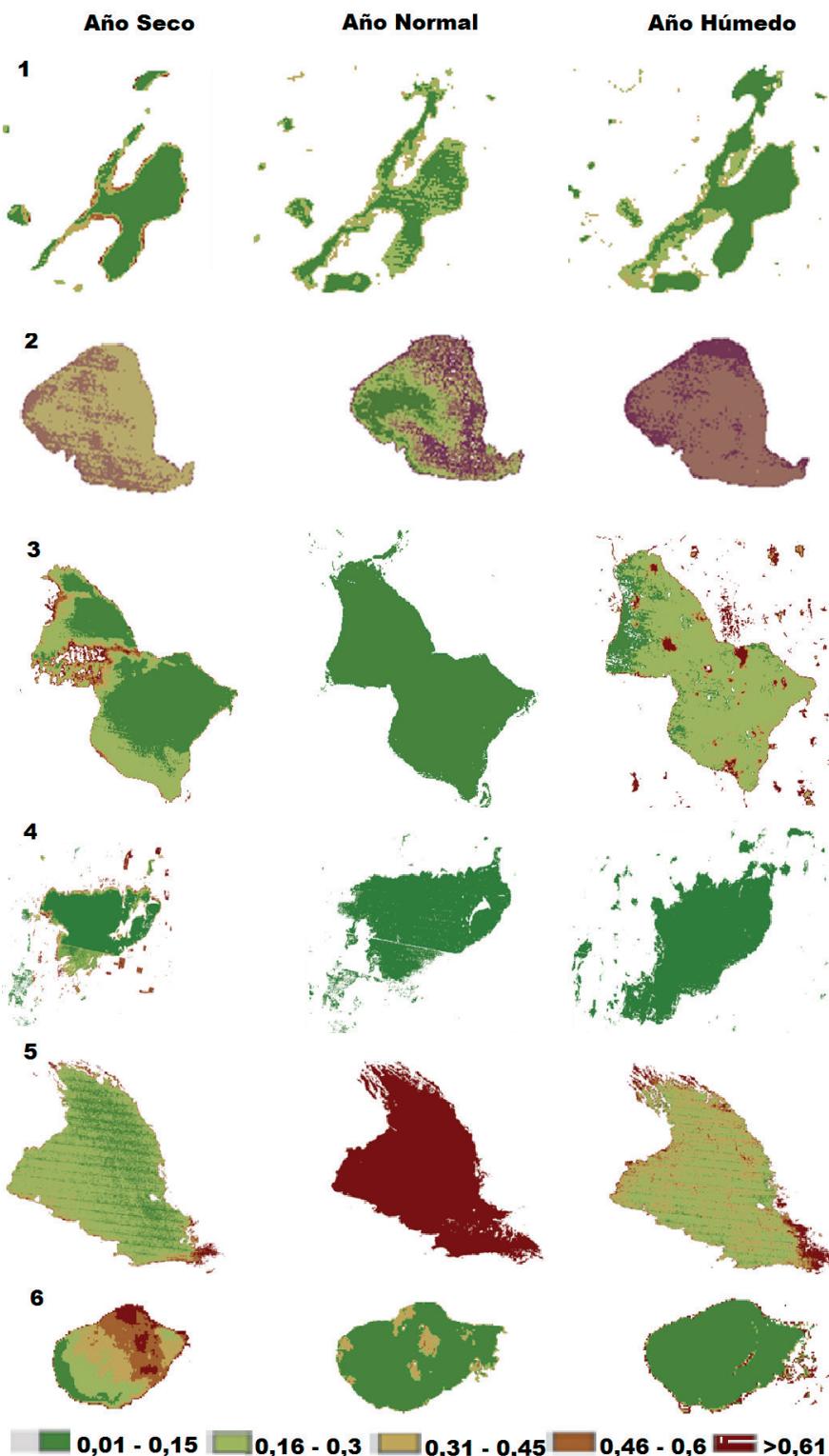


Figura 4. Esquema de las variaciones espaciales del MPS en 1. La Limpia, 2. Blanca, 3. Chascomús, 4. La Picasa, 5. Chasicó y 6. La Petrona.

variaciones marcadas de reflectividad entre los años seco y húmedo (Figura 4). En Chasicó el mayor valor se presentó en la banda del Rojo (8,2%) durante el período normal y el menor en la Verde 3,4 y 3,5% en el húmedo y el seco, respectivamente. Por último el cuarto comportamiento correspondió a la laguna La Petrona que presentó grandes diferencias en los años analizados. En el año seco, el menor valor se registró en la banda Azul con 5,7% y el mayor en el IRC con 8,2%. El año normal presentó su menor reflectividad en la banda Azul con 4,7% y el mayor en la Verde con 7,6%. El año húmedo manifestó el menor valor en la banda Azul con 0,7% y el mayor en el IRC con 8,4% (Figura 4). El estudio de la reflectividad y su relación con el MPS permite interpretar la hidrodinámica de las lagunas

(Carmona *et al.*, 2011). La alta concentración de MPS provoca una elevación de la reflectividad del agua. El caudal, la intensidad de las lluvias y el drenaje por bombeo permiten interpretar el comportamiento espacial de la reflectividad. Las curvas espetrales son el resultado de la interacción entre la radiación electromagnética con el MPS y permiten inferir su relación con otros factores tales como la vegetación, la contaminación, la profundidad del agua, salinización, etc. (Carmona *et al.*, 2011).

3.5. Respuesta morfométrica de las lagunas

En general el área de la laguna respondió a los eventos pluviométricos seco y húmedo reduciendo

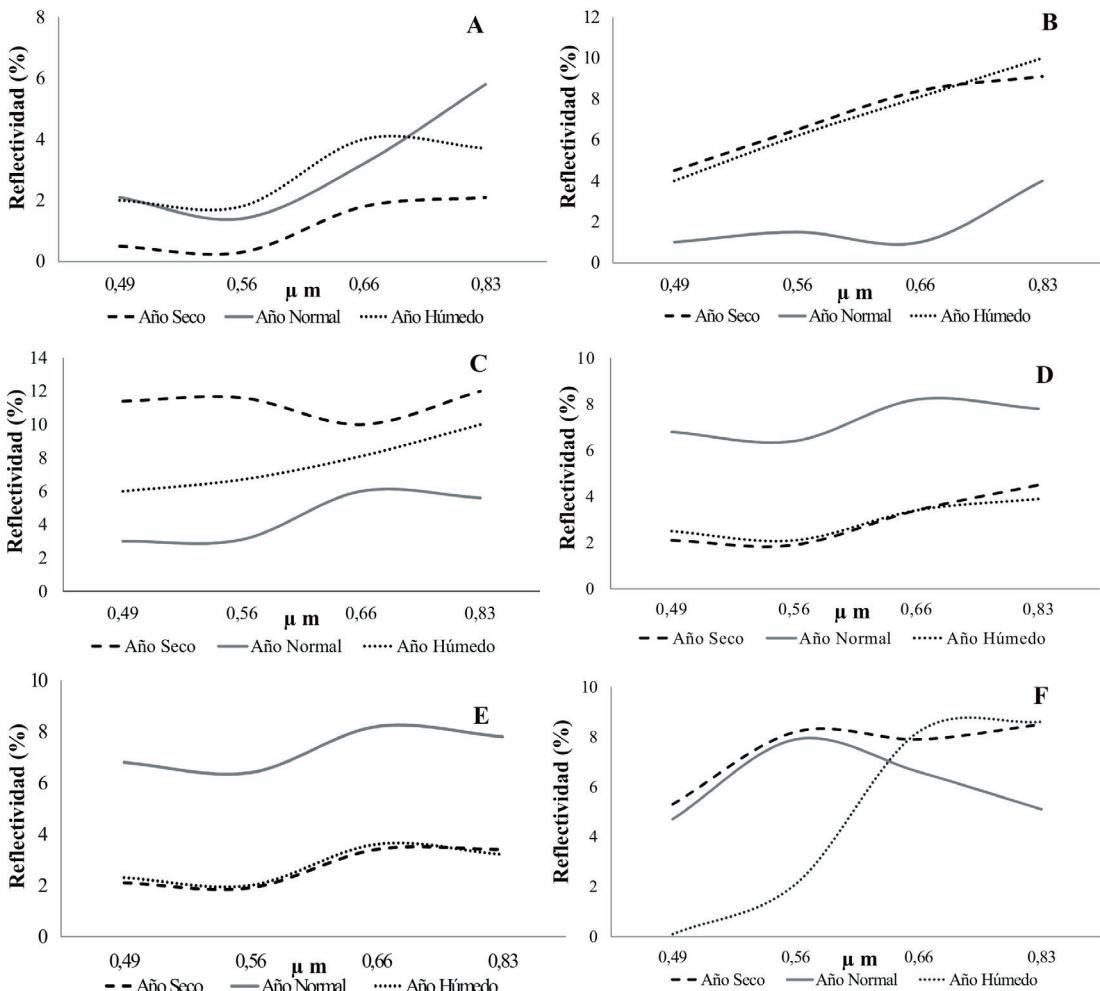


Figura 5. Reflectividad media de las lagunas a) Limpia, b) Blanca, c) Chascomús, d) La Picasa, e) Chasicó y f) La Petrona.

y ampliando su superficie, respectivamente (Tabla 4). Sin embargo, el porcentaje de aumento/decrecimiento del área lagunar en respuesta a los eventos secos y húmedos no fue igual en cada una de las diferentes lagunas. Se observó que en las zonas más lluviosas se originaron variaciones

superficiales más considerables durante eventos secos (Tabla 4).

En las regiones húmedas del centro de la región pampeana se presentaron dos situaciones diferentes. Por un lado, la laguna Chascomús tuvo una situación similar a lo observado en La Limpia,

Tabla 4. Variación de los parámetros morfométricos en las lagunas La Limpia, Blanca, Chascomús, La Picasa, Chasicó y La Petrona. PM, Parámetros Morfométricos; A, Área; P, Perímetro; LMT, Longitud máxima total; OLMT, Orientación de la LMT; Amax, Ancho máximo; Amed, Ancho medio; DLC, Desarrollo de línea de costa.

Laguna	PM	Año Seco	Año Normal	Año Húmedo
<i>La Limpia</i>	A (km^2)	2,1	3	3,1
	P (km)	12	14,8	14,9
	LMT (km)	2,8	3,7	3,9
	OLMT	NE-SW	NE-SW	NE-SW
	Amax (km)	1,4	1,5	1,6
	Amed	0,8	0,8	0,8
	DLC	2,3	2,4	2,4
<i>Blanca</i>	A (km^2)	5,5	5,6	5,8
	P (km)	11,1	11,1	11,3
	LMT (km)	3,7	3,6	3,7
	OLMT	NW-SE	NE-SE	NW-SE
	Amax (km)	2,7	2,8	2,7
	Amed	1,5	1,6	1,6
	DLC	1,3	1,3	1,3
<i>Chascomús</i>	A (km^2)	27	32,6	33,1
	P (km)	26,7	30,7	38,2
	LMT (km)	9,4	9,2	10
	OLMT	N – SE	N-SE	N-SE
	Amax (km)	4,9	4,9	5
	Amed	2,9	3,5	3,3
	DLC	1,4	1,5	1,9
<i>La Picasa</i>	A (km^2)	109,2	211,1	386,7
	P (km)	81,9	77,8	139,1
	LMT (km)	11,7	25,3	36,3
	OLMT	NW-SE	SW-NE	SW-NE
	Amax (km)	11,1	16	17,4
	Amed	9,3	8,3	10,7
	DLC	2,2	1,5	2
<i>Chasicó</i>	A (km^2)	61,6	62,8	68,2
	P (km)	42,7	42	49,5
	LMT (km)	13,9	14	15,1
	OLMT	NW-SE	NW-SE	NW-SE
	Amax (km)	7,9	8,3	8,3
	Amed	4,4	4,5	4,5
	DLC	1,5	1,5	1,7
<i>La Petrona</i>	A (km^2)	3,4	5,2	5,4
	P (km)	8,7	9,4	10,3
	LMT (km)	3,1	3,6	3,8
	OLMT	E-W	E-W	E-W
	Amax (km)	1,9	2,1	2,2
	Amed	1,1	1,4	1,4
	DLC	1,3	1,2	1,3

es decir, que las variaciones del área no fueron significativas. Esto se debe a que su volumen de agua está controlado mediante compuertas a fin de preservar el atractivo turístico pesquero (Tabla 2). Por lo tanto la injerencia antrópica es importante.

Por otro lado, La Picasa fue el cuerpo de agua que mayores fluctuaciones del área presentó en los distintos eventos, manifestando diferencias de más de 200 km² entre ellos (90%). Esto se relaciona con la composición del suelo. Al ser arcilloso dificulta la infiltración por lo que las precipitaciones ocasionan que el área de esta laguna crezca en relación a la intensidad de la lluvia (Tabla 2). En este caso no se observa la intervención humana.

Finalmente, las lagunas localizadas en el sudoeste (áreas más secas) tuvieron un comportamiento distinto. La laguna Chasicó fue menos fluctuante entre un año normal y uno seco, pero sí presentó un incremento del área en el año húmedo. Esto se debe a que se encuentra sobre una cubeta tectónica de -20 msnm, con una profundidad de 16 m y la única pérdida de agua del sistema es la evapotranspiración (Tabla 2). La Petrona, sin embargo, se vio más afectada durante un evento seco, lo cual responde a su escasa profundidad y a que la fuente de agua al sistema es precipitación y el agua subterránea (Tablas 2 y 5). Es importante destacar que sus suelos de esta área son de textura franco arenoso y propenso a la erosión hídrica y eólica con bajo contenido de materia orgánica y capacidad de retención hídrica. (Ferrelli *et al.*, 2011). Las propiedades del suelo determinan la capacidad de infiltración de agua, lo cual podría estar relacionado con las variaciones espaciales de los humedales.

Se destaca que en la laguna La Picasa se observó un cambio en la OLMT variando de NW-SE a SW-NE (Tabla 4). Todos los cuerpos de agua analizados fueron elípticos según su DLC. Se evidenció que los eventos secos generaron mayores cambios morfométricos en las lagunas con régimen pluviométrico seco que en los húmedos. En cuatro de las seis lagunas estudiadas la variación del área en relación al volumen de precipitaciones es mayor entre el año normal y el seco, que entre el normal y el húmedo. Es decir que los eventos secos tuvieron más impactos en el comportamiento espacial que los húmedos.

4. Conclusión

A partir del estudio realizado se concluye que el método de clasificación no supervisado ISODATA fue una herramienta útil para calcular el área de las lagunas en la Región Pampeana, Argentina y con ello estudiar su dinámica espacio-temporal en relación con distintos eventos pluviométricos. La validación del método a partir del procesamiento de imágenes SPOT y LANDSAT permitió conocer el error de la estimación producto del tamaño del píxel. Las imágenes satelitales permitieron conocer también el comportamiento y la variación de la reflectividad. La misma tuvo una relación con el MPS. A pesar de ello no se obtuvo una variación que mantenga una estrecha relación con la variabilidad pluviométrica, sino que la misma podría depender de factores externos como pueden ser el viento, la escorrentía, la proliferación de algas, entre otros.

Las imágenes satelitales utilizadas en este estudio permitieron, además, calcular la variación morfométrica de cuerpos de agua de la Región Pampeana. Se estableció que los mismos presentan variaciones espaciales que tienen relación con la variabilidad pluviométrica. En los eventos secos el área fue en todos los cuerpos de agua estudiados más pequeña que en el resto de los eventos. Por lo tanto, la utilización del método ISODATA con imágenes satelitales LANDSAT permite estudiar la dinámica espacio-temporal de distintos cuerpos de agua. Los resultados obtenidos con el procesamiento de estos productos satelitales podrían favorecer a los futuros planes de manejo del agua a partir de la generación de una base de datos útiles que en ciertas regiones son escasos o hasta inexistentes.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, al Instituto Argentino de Oceanografía, a la Universidad Nacional del Sur y a la Universidad Nacional de Luján. Además se destacan los proyectos de investigación Proyecto Argentino de Monitoreo y Prospección de Ambientes Acuáticos (PAMPA2) y del *Sensing the Americas Freshwater Ecosystem Risk* (SAFER) por la financiación total del presente trabajo. Finalmente, al Servicio Meteorológico Nacional por los datos

meteorológicos y al United States Geological Survey y a la Comisión Nacional de Actividades Espaciales por la información satelital.

Referencias bibliográficas

- Aliaga, V. S., Ferrelli, F., Alberdi-Algarrañaz, E. D., Bohn, V. Y., Piccolo, M. C. 2016. Distribución y variabilidad de la precipitación en la Región Pampeana, Argentina. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42(1), 261-280. <http://dx.doi.org/10.18172/cig.2867>
- Anaya-Acevedo, J., Chuvieco-Salinero, E. 2010. Validación para Colombia de la estimación de área quemada del producto 13jrc en el período 2001-2007. *Actualidades Biológicas*, 32(92), 29-40.
- Berasain, G. E., Colautti, D. C., Lenicov, M. R., Argemi, F., Bohn, V. Y., Miranda, L. A. 2015. Impact of water salinity on *Odontesthes bonariensis* (Actinopterygii, Atherinopsidae) fisheries in Chasicó Lake (Argentina). *Hydrobiologia*, 752(1), 167-174. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-014-1980-8>
- Bhatti, A., Sutinon, P., Nasu, S. 2011. Monitoring spatial and temporal variability of suspended sediment in Indus River by means of remotely sensed data. *Annals of GIS*, 17(2), 125-134. <http://dx.doi.org/10.1080/19475683.2011.576267>
- Bohn, V. Y. 2009. *Geomorfología e hidrografía de las lagunas del sur de la provincia de Buenos Aires*. Tesis de Doctor en Geografía. Universidad Nacional del Sur. Departamento de Geografía. 244 pp.
- Bohn, V. Y., Piccolo, M.C., Perillo, G. M. E., Pratolongo, P., Fornerón, F. 2012. Caracterización óptica de las lagunas Sauce Grande y Chasicó (Provincia de Buenos Aires). *Biología Acuática*, 27: 51-60.
- Bohn, V. Y., Delgado, A. L., Piccolo M. C., Perillo G. M. E. 2015. Lagunas pampeanas como indicadores de exceso o déficit hídrico en la región. *V Jornadas y II Congreso de Ecología de Paisajes. Buenos Aires, Argentina*. pp. 49-51.
- Brandolin, P. G., Ávalos, M. A., Ángelo, C. 2013. The impact of flood control on the loss of wetlands in Argentina. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 23(2), 291-300. <http://dx.doi.org/10.1002/aqc.2305>
- Carmona, F., Rivas, R., Thomas, L., Marino, B. 2011. Caracterización espectral del estuario del Río Quequén Grande por medio de imágenes Landsat. En Raúl Rivas, Facundo Carmona y Dora Ocampo. *Teledetección: Recientes aplicaciones en la Región Pampeana*. Tandil, Buenos Aires. 11-29.
- Cohen, J. 1960. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20, 37-46. <http://dx.doi.org/10.1177/001316446002000104>
- Cohen, J. 1968. Weighted kappa: nominal scale agreement with provision for scaled disagreement or partial credit. *Psychological Bulletin*, 70, 213-220. <http://dx.doi.org/10.1037/h0026256>
- Díaz, R. A. 2001. Calidad de las series mensuales de temperaturas y lluvias en Argentina. *Actas de la III Reunión Latino-Americana de Agrometeorología. Fortaleza, Brasil*. pp. 641-642.
- Díaz de Arcaya, N., Castañeda, C., Herrero, J., Losada, J. A. 2005. Cartografía de coberturas asociadas a las fluctuaciones de la laguna de Gallocanta. *Revista de Teledetección*, 24, 61-65.
- Diovisalvi, N., Berasain G., Unrein F., Colautti, D., Fermani, P., Llames, M. E., Torremorell, A., Gomarsino, L. Pérez, G., Escaray, R., Bustingorry, J., Ferraro, M., Zagarese, H. 2010. Chascomús: estructura y funcionamiento de una laguna pampeana turbia. *Ecología Austral*, 20, 89-221.
- Edwards, D. C., McKee, T. B. 1997. Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Time Scales. *Atmospheric Science*. 634, 1-30.
- Elisio, M., Vitale, A., Miranda, L. A. 2015. Influence of climate variations on Chascomús shallow lake thermal conditions and its consequences on the reproductive ecology of the Argentinian Silverside (*Odontesthes bonariensis*—Actinopterygii, Atherinopsidae). *Hydrobiologia*, 752(1), 155-166. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-014-1945-y>
- Ferrelli, F., Aliaga, V. S. 2015. *Variabilidad de las precipitaciones y sus efectos sobre la respuesta espacio-temporal de cuerpos de agua en la región pampeana, Argentina*. Universidad Nacional de Lujan, Buenos Aires. 81 pp.
- Ferrelli, F., Bustos, M. L., Huamantinco Cisneros, M. A., Piccolo, M. C. 2015. Utilización de imágenes satelitales para el estudio de la distribución térmica en distintas coberturas del suelo de la ciudad de Bahía Blanca (Argentina). *Revista de Teledetección*, 44: 31-42. <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2015.4018>
- Ferrelli, F., Bustos, M. L., Piccolo, M.C., Huamantinco Cisneros, M. A., Perillo, G. M. E. 2016. Downscaling de variables climáticas a partir del Reanálisis NCEP/NCAR en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Papeles de Geografía*, 62, <http://dx.doi.org/10.6018/geografia/2016/239051>
- Ferrelli, F., Bohn, V. Y., Piccolo, M. C. 2011. Aplicación de Geotecnologías al estudio de las precipitaciones y su relación con las coberturas del suelo (Provincia de Buenos Aires, Argentina). *Geo-Focus*, 11, 355-374.
- Fili, M. F. 2001. Síntesis Geológica e Hidrogeológica del noroeste de la provincia de Entre Ríos - República Argentina. *Boletín Geológico y Minero*, 112, 25-36.

- Geraldi, A., Piccolo, M. C., Perillo, G. M. E. 2011. El rol de las lagunas bonaerenses en el paisaje pampeano. *Ciencia Hoy*. 21(123), 16-22.
- Grimm, A. M. 2011. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(4), 537-554. <http://dx.doi.org/10.1007/s00477-010-0420-1>
- Huber, A., Trecaman, R. 2002. Efectos de la variabilidad interanual de las precipitaciones sobre el desarrollo de plantaciones de *Pinus radiata* (D. Don) en la zona de los arenales VIII Región, Chile. *Bosque*, 23(2), 43-49. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-9200200200005>
- Hutchinson, E. 1957. *A treatise on limnology*. New York. John Wiley & Sons, Inc. Vol. I. 660 pp.
- Labraga, J., Brandizi, L., López, M. 2011. Avances en el pronóstico climático de las anomalías de lluvia en la Región Pampeana. *Meteorológica*, 36(2). 59-71.
- Lagomarsino, L., Diovisalvi, N., Bustingorry, J., Escaray, R., Zagarese, H. E. 2015. Diel patterns of total suspended solids, turbidity, and water transparency in a highly turbid, shallow lake (Laguna Chascomús, Argentina). *Hydrobiologia*, 752(1), 21-31. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-014-2013-3>
- Marengo, J. A., Ambrizzi, T., Da Rocha, R. P., Alves, L. M., Cuadra, S. V., Valverde, M. C., Roger R. Torres, Daniel C. Santos, Ferraz, S. E. 2010. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. *Climate Dynamics*, 35(6), 1073-1097. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-009-0721-6>
- Melo, W. D., Schillizzi, R., Perillo, G. M. E., Piccolo, M. C. 2003. Influencia del área continental pampeana en la evolución morfológica del estuario de Bahía Blanca. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología*. 10(1), 39-52.
- Nelasco, M., Willington, E., Bocco, M. 2014. Clasificación del uso del suelo en agricultura a partir de series temporales de imágenes LANDSAT. En *6º Congreso argentino de agro-informática, CAI 2014, Sociedad Argentina de Informática e Investigación Operativa (SADIO)*. Universidad de Palermo. ISSN: 1852-4850.
- NOAA.CPC 2015. Oceanic Niño Index (ONI). Disponible en: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/oni.ascii> (fecha de acceso: 20/03/2015).
- Onderka, M., Pekárová, P. 2008. Retrieval of suspended particulate matter concentrations in the Danube River from Landsat ETM data. *Science of the Total Environment*, 397(1-3), 238-243. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.02.044>
- Quirós, R., Rennella, A., Boveri, M., Rosso, J., Sosnovsky, A. 2002. Factores que afectan la estructura y el funcionamiento de las lagunas pampeanas. *Ecología Austral* 12: 175-185.
- Quirós, R., Boveri, M. B., Petracchi, C. A., Rennella, A. M., Rosso, J. J., Sosnovsky, A., Von Bernard, H. T. 2006. Los efectos de la agriculturización del humedal pampeano sobre la eutrofización de sus lagunas. *Eutrofização na América do Sul: causas, consequências e tecnologias de gerenciamento e controle*, São Carlo, 1-16.
- Schroeder, T., Cohen, W., Song, C., Canty, M. J., Yang, Z. 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2006.03.008>
- Song, C., Woodcock, C., Seto, K., Lenney, M. P., Macomber, S. 2001. Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment*. 75(2), 230-244. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00169-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00169-3)
- Swain, P. H. 1973. Pattern recognition: a basis for remote sensing data analysis (LARS information note 111572). West Lafayette, Indiana: The Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University.
- Tchilinguirian, P., Azcurra, D., Kaku, M., Candaosa, G. 2003. Aplicación de imágenes satelitales Aster en zonas inundadas, laguna La Picasa, Provincia de Santa Fe. *Primer Congreso de la Ciencia Cartográfica y VIII Semana Nacional de Cartografía*, Buenos Aires.