



Efecto de la Variabilidad Climática Sobre el Estado de la Vegetación y la Cobertura de Agua en una Cuenca de Clima Templado (Argentina)

Climatic Variability Effects on the Vegetation
State and Water Coverage in a Watershed of Temperate Climate (Argentina)

Andrea S. Brendel^{1,2,3}; Vanesa Y. Bohn^{2,4} & M. Cintia Piccolo^{1,2}

¹ Instituto Argentino de Oceanografía (IADO - CONICET).

Florida 8000 (Camino La Carrindanga km 7,5), Bahía Blanca, B8000BFW, Buenos Aires, Argentina

² Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo.

12 de Octubre 1198, 4° piso, Bahía Blanca, B8000BFW, Buenos Aires, Argentina

³ Universidad Nacional del Sur, Departamento de Agronomía.

San Andrés, 800, Bahía Blanca, B8000BFW, Buenos Aires, Argentina

⁴ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Godoy Cruz 2290, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, C1425FQB, Argentina

E-mails: andreabrendeluns@gmail.com; vbohn@criba.edu.ar; mcpiccol@gmail.com

Recibido em: 03/04/2017 Aprobado em: 01/06/2017

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2017_2_05_16

Resumen

El área de estudio se encuentra en el sur de la provincia de Buenos Aires (Argentina) y forma parte de la región pampeana Argentina. Se caracteriza por el predominio de un clima templado. El objetivo de este trabajo fue cuantificar los efectos de los eventos climáticos extremos en el estado de la vegetación y la extensión del área cubierta por agua, en una cuenca hidrográfica de clima templado (cuenca del arroyo Napostá Chico). El período de estudio fue 2000-2013. La metodología incluyó el análisis de serie de datos del Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI) a escala 1, 3 y 12 meses, para la detección de eventos climáticos extremos. Mediante interpretación visual de imágenes satelitales, se determinaron las diferentes coberturas de la cuenca y se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (en inglés, NDVI). Además, se delimitaron los cuerpos de agua del área de estudio mediante procesamiento digital de imágenes satelitales Landsat 5 TM y 7 ETM+ correspondientes a los eventos extremos definidos mediante la aplicación del SPEI. Los mismos fueron definidos para 2001 y 2004 (eventos húmedos), 2008 y 2009 (eventos secos) y 2007 (evento normal). El estado de la vegetación así como también las extensiones cubiertas por los cuerpos de agua, presentaron variaciones a lo largo de los diferentes eventos climáticos extremos. La vulnerabilidad climática de la cuenca y el conocimiento de los eventos de precipitación extremos es fundamental para la gestión de los recursos hídricos y de las actividades agroeconómicas que allí se desarrollan.

Palabras claves: variabilidad climática; SPEI; NDVI

Abstract

The study area is located in the south of the Buenos Aires province (Argentina) and it is included in the “Región Pampeana” Argentina. It is characterized by a temperate climate. The aim of this work was quantify the extreme climatic events effects on vegetation state and area covered by water, in a watershed of a temperate climate (Napostá Chico creek). The study period was 2000-2013. The methodology included the analysis of Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) in 3 temporal scales (1, 3 and 12 months) in order to detect the extreme climatic events. Several land covers were defined by visual interpretation of satellite image and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) application. Landsat 5 TM and 7 ETM+ satellite images were processed for water bodies delineation. The extreme events were defined during 2001 and 2004 (wet years), 2008 and 2009 (dry years) and 2007 (normal year). As a result, state of vegetation and area covered by water showed variations among extreme events. Knowledge about climatic vulnerability of the watershed and the extreme events occurrence is essential for the hydric resources management and economic activities of the study region.

Keywords: climatic variability; NDVI; SPEI

1 Introducción

La variabilidad climática es una sumatoria de eventos meteorológicos que se producen en diferentes escalas temporales (estaciones, años, décadas) y espaciales. El fenómeno ENSO (en inglés, El Niño-Oscilación del Sur) es una de las principales causas de la variabilidad interanual y estacional de las precipitaciones en gran parte del planeta (Trenberth, 1997). A través del estudio de este fenómeno, Aceituno (1988) afirma que existe estrecha conexión entre presión atmosférica, temperatura, precipitación y anomalías hidrometeorológicas. En el sur de Sudamérica, se ha demostrado que existe una gran relación entre las lluvias estivales y los episodios ENSO (Scian, 2002). En la provincia de Buenos Aires (Argentina), se experimentaron períodos de precipitaciones extremas durante la fase negativa del ENSO (El Niño) y eventos secos durante la fase positiva (La Niña) (Aceituno, 1988; Severov *et al.*, 2004; Grimm, 2010). La alternancia de estos períodos y sus condiciones extremas en la región pampeana tienen importantes consecuencias sociales y económicas (Aliaga *et al.*, 2016a). El conocimiento de las coberturas del suelo así como también la estacionalidad del vigor y densidad de la vegetación es de suma importancia para el entendimiento de los procesos hidrológicos y de la influencia climática sobre las mismas (Bohn *et al.*, 2012). El uso de imágenes satelitales y el álgebra de bandas (ej. cálculo de índices de vegetación) permiten evaluar los cambios en las coberturas del suelo a diferentes escalas temporales y espaciales. El índice más utilizado es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (en inglés, NDVI) proporcionando consistentes comparaciones espaciales y temporales de las condiciones globales de la vegetación (Monteith, 1981; Farrell, 2011; Rodríguez Moreno & Bullock, 2013).

Se han realizado numerosos estudios de aplicación de imágenes satelitales a temas medioambientales y climáticos. Teniendo en cuenta la aplicación del NDVI, a escala planetaria, Zorogastua Cruz *et al.* (2011) analizaron la evolución temporal y espacial de la dinámica vegetal sobre varias coberturas de suelo en Perú durante el período 1990-2000, utilizando imágenes satelitales Landsat 5 TM y NDVI. Algunos de sus resultados indican que las variaciones climáticas (en mayor medida la precipitación) tiene un efecto muy marcado sobre

la vegetación. En este sentido, Gómez-Mendoza *et al.* (2008) afirma que existe directa relación entre el NDVI y la precipitación en Oaxaca (México). Esta relación también fue hallada por Gonzaga Aguilar (2014) para la provincia de Loja (Ecuador), mediante la utilización del NDVI calculado a partir de imágenes satelitales Landsat 7ETM+ (período 1964-2001).

En relación a la cobertura de agua, el lago Poyang (China) experimenta cambios de gran escala en su nivel de agua. En períodos húmedos, el tamaño del lago aumenta a 4000 km² mientras que en los períodos secos, se reduce a extensiones menores a 1000 km² (Jiang *et al.*, 2005). A escala nacional, Zerda & Tiedemann (2010) estudiaron la dinámica temporal del NDVI del bosque y pastizal natural en el Chaco Seco (provincia de Santiago del Estero). Para ello analizaron el NDVI derivado del producto satelital SPOT 4-Vegetation. Como resultado obtuvieron que la cobertura bosque presentó mayor estabilidad en relación a las variaciones de la precipitación, mientras que la cobertura pastizal fue más sensible a la temperatura y radiación. Por su parte, Iglesias *et al.* (2010) caracterizaron la dinámica espacio-temporal del NDVI en tres reservas naturales ubicadas en la provincia fitogeográficas del Monte y la región del Chaco Árido (Argentina) y su relación con el patrón de precipitaciones (1998-2003). Estos autores hallaron que en los tres sitios analizados, existe alta correlación entre las precipitaciones mensuales y las series de NDVI.

A escala regional, Ferrelli *et al.* (2011) estudiaron la dinámica de 3 coberturas de suelo en el sur de la provincia de Buenos Aires para el período 2004-2009. Como resultado, determinaron que la actividad fotosintética de la vegetación mostró sensibilidad al efecto de la evaporación y las sequías mostrando los mínimos valores de NDVI del período durante el año más seco (2009). Bohn *et al.* (2012) estudiaron la evolución temporal del NDVI en las coberturas de pastizal, arbustal y cultivo de herbáceas gramíneas, en el sudoeste bonaerense, durante los años 2006 y 2007. Estos autores obtuvieron que el estado de la vegetación fue más variable en la cobertura de cultivo, con un valor medio de NDVI de 0,36 y un Coeficiente de variación (CV) de 27,82 seguida de la vegetación correspondiente a pastizal (CV=15,04) y arbustal (CV=13,73). Por otro lado, Aliaga *et al.* (2016b)

estudio la dinámica espacial y temporal de seis lagunas considerando su localización, condiciones de sitio y ocurrencia de eventos climáticos extremos húmedos y secos, en la región pampeana argentina. Estos autores mostraron que los eventos secos generaron mayores cambios morfométricos en las lagunas con régimen pluviométrico seco que en los húmedos. D'Ambrosio *et al.* (2013) realizaron un estudio multitemporal del Dique Paso de las Piedras (sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina) a través de imágenes satelitales Landsat 5 TM, correspondientes a un año seco (2009), uno húmedo (2001) y uno normal (2007). Como resultado hallaron que durante el año húmedo la superficie de agua superó los 29 km² mientras que en 2007 sólo alcanzó 20,5 km². En el año seco, la superficie ocupada por agua fue de 14 km². En este sentido, Bohn (2009) afirma que la precipitación es factor influyente sobre el funcionamiento de las lagunas de la región pampeana argentina. El estudio multitemporal sobre las variaciones de su área y su volumen son relevantes desde el punto de vista del manejo de estos recursos hídricos (Bohn, 2009). Teniendo en cuenta los resultados mencionados el objetivo de este trabajo fue analizar los efectos de los eventos climáticos extremos en el vigor de la vegetación y la extensión del área cubierta por agua, en una cuenca de clima templado durante el período 2000-2013.

2 Área de Estudio

El área de estudio se localiza al sur de la provincia de Buenos Aires y forma parte de la región pampeana argentina (Aliaga *et al.*, 2016a). Se extiende entre los 61° 40' y 62° 45' Oeste y los 38° Sur y su límite con la línea de costa (Figura 1). Es una cuenca endorreica con una superficie de 1370 km² (Melo & Zinger, 1996). El arroyo Napostá Chico (también denominado "Bajo Hondo") posee un recorrido de 80 km aproximadamente. Sus nacientes se localizan en el sector sudoeste del sistema serrano de Ventania (Figura 1). Este sistema emerge de la llanura bonaerense como relieve interpuesto y de él nacen cursos fluviales que desembocan en la costa atlántica (Capelli de Steffens & Campo de Ferreras, 1994).

En cuanto a los aspectos topográficos, la cuenca de estudio presenta alturas máximas y mínimas de 1243 y 10 msnm, respectivamente. La pendiente del

terreno es escasa, no supera los 4° (Bohn, 2009). El clima es frío subhúmedo o semiárido (Díaz & Mormeneo, 2002) también denominado templado de transición, con máximas precipitaciones en primavera y otoño. Se presentan variaciones espaciales en las temperaturas y en las precipitaciones en relación a la continentalidad, exposición a los flujos de aire dominantes, orientación de la costa y corrientes oceánicas. Las temperaturas medias anuales son de aproximadamente 14°C.

Los suelos de la región son aptos para la agricultura y la ganadería, dicha aptitud decrece en relación con el gradiente de isohietas anuales (de noreste a sudoeste). El mismo varía entre los 900 mm al noreste y los 600 mm al sudoeste con notables desplazamientos en esta dirección durante los últimos años, con avances y retrocesos que coincidieron con las fases húmedas y secas del ciclo pluviométrico (Viglizzo *et al.*, 2005). El sistema productivo predominante del área de estudio es mixto (agrícola/ganadero). La actividad agrícola predominante es la de grano fino, siendo el trigo el principal cultivo del área de estudio.

3 Materiales y Métodos

Para la identificación de eventos extremos en el área de estudio se aplicó el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI) (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). Las grillas correspondientes, se obtuvieron de la página oficial (<http://sac.csic.es/spei/home.html>) a una escala de 1, 3 y 12 meses y con una resolución espacial de 0,5° (período 2000-2013). Se analizaron 2 estaciones de SPEI ubicadas al norte (cuenca superior) y sur (cuenca inferior) de la cuenca hidrográfica del arroyo Napostá Chico (Figura 1). El SPEI es un índice climático mensual calculado a partir de la diferencia entre la precipitación acumulada en un período de tiempo y la evapotranspiración potencial. Puede ser calculado a diferentes escalas espaciales y temporales y es utilizado por diferentes disciplinas científicas para detectar, monitorear y analizar las sequías (Vicente-Serrano *et al.*, 2010).

Puede ser calculado a diferentes escalas, desde 1 a 48 meses. En la presente investigación el SPEI fue aplicado a escala 1, 3 y 12 meses debido a que las condiciones de humedad o sequía en el suelo responden a anomalías de precipitación

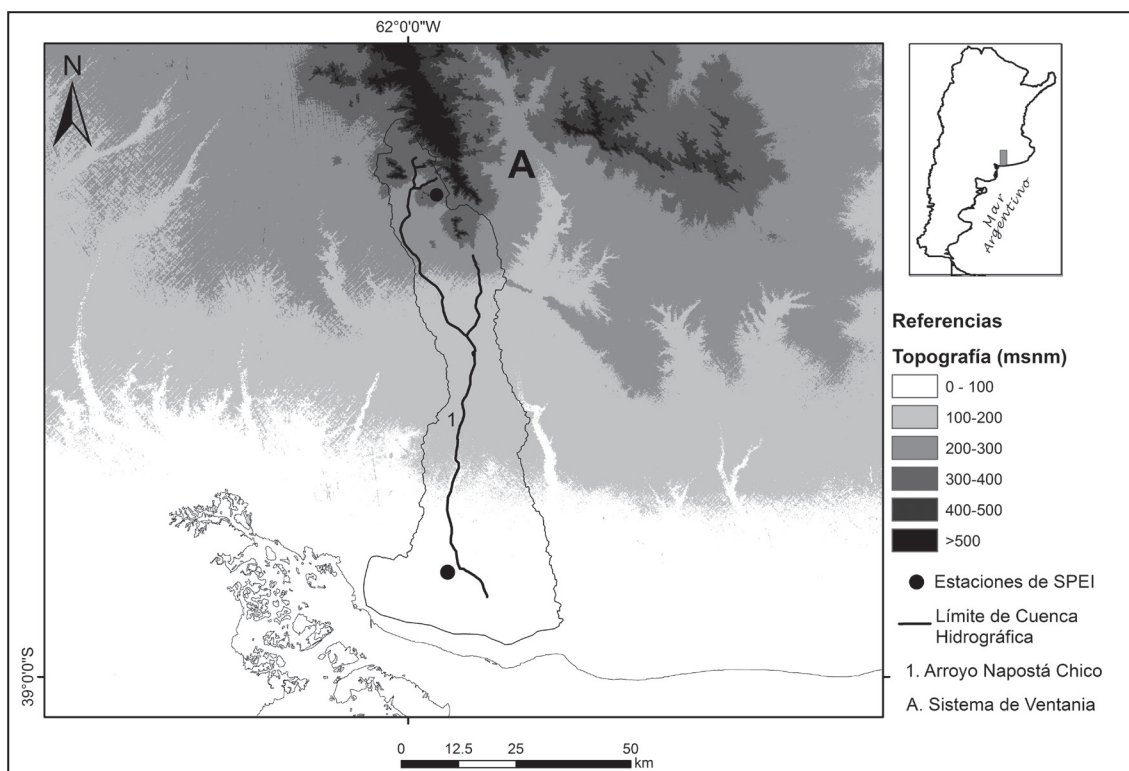


Figura 1
 Localización del área de estudio.
 Fuente: elaboración propia sobre la base de ASTER GDEM.

relativamente cortas (1, 3, 6 meses) mientras que el agua de las corrientes superficiales subterránea y reservorios reflejan anomalías de lluvia de períodos más largos: escalas temporales de 12, 24 y 48 meses. Respecto a la categorización de los valores de referencia del SPEI, los registros con valores mayores a 1, se consideran húmedos, mientras que, los registros con valores menores a -1 se consideran secos. Los períodos para los que el valor del SPEI se encuentra entre -0.99 y 0.99 son considerados normales (Tabla 1).

Valores de SPEI	
2.0 o más	Extremadamente húmedo
1.5 a 1.99	Muy húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Normal
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-1.5 a -1.99	Muy seco
-2 o menos	Extremadamente seco

Tabla 1 Categorías de SPEI (Fuente: Vicente-Serrano *et al.*, 2010).

Para el conocimiento de la cobertura de la tierra en un año normal, se digitalizaron dichas categorías sobre una imagen Landsat (septiembre de 2007) mediante interpretación visual. La validación de las mismas se realizó sobre una imagen de alta resolución (Google Earth). Para el análisis del

estado y vigorosidad de la vegetación se realizó el estudio de la evolución interanual y mensual del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) durante el período 2004-2009. Los datos de NDVI fueron obtenidos mediante el procesamiento digital del producto Satelital MODIS NDVI (Resolución temporal=15 días; resolución espacial=250 m) (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos-USDA). Como parte del procesamiento se extrajeron valores de NDVI para la cobertura vegetación correspondientes a los meses de octubre, noviembre y diciembre (período 2004-2009). Sólo se seleccionaron dichos meses debido a que coinciden con el estado de floración de la vegetación.

El NDVI es una medida del vigor y verdor de la vegetación (Tarpley *et al.*, 1984) y sus valores se obtienen a partir de la diferencia normalizada entre las bandas espectrales correspondientes al rojo (R) e infrarrojo cercano (NIR) (1) y oscilan entre 1 (vegetación muy densa) y 0 (ausencia total de vegetación) (Rouse & Haas, 1974).

$$NDVI = (NIR - VIS) / (NIR + VIS) \quad (1)$$

Donde, NIR= rango del espectro correspondiente al infrarrojo cercano y VIS=rango del espectro correspondiente al visible.

La extensión de cuerpos de agua y área ocupada por los mismos en la cuenca estudiada se obtuvo mediante clasificación supervisada de tres imágenes LANDSAT 5 TM Y 7 ETM+, correspondiente a los años 2001 (húmedo), 2007 (normal) y 2009 (seco). Dichas imágenes fueron obtenidas en valores de reflectancia superficial del sitio web del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).

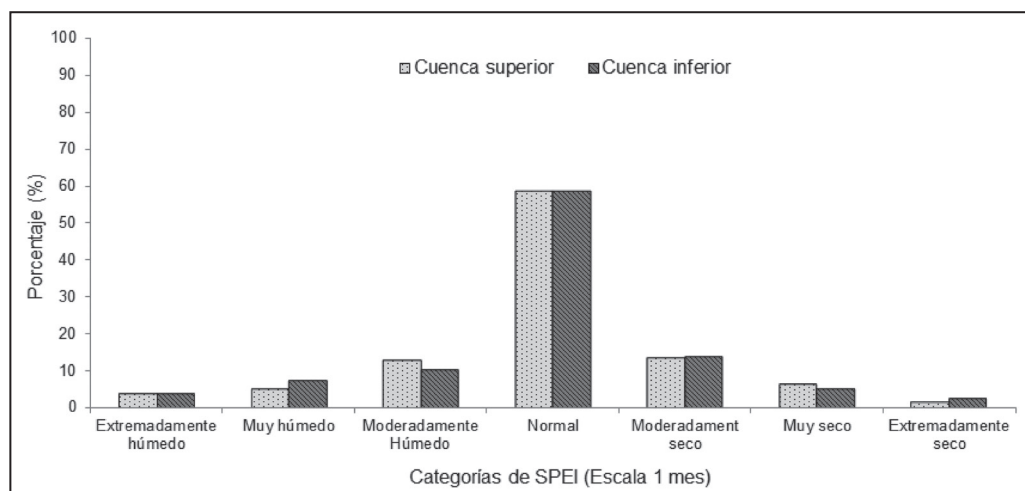
4 Resultados y Discusión

4.1 Evolución Espacial y Temporal del SPEI (Período 2000-2013)

4.1.1 SPEI a Escala 1 Mes

El SPEI a escala 1 mes demostró que los períodos normales fueron los más frecuentes (58 %) tanto en la cuenca superior como inferior del arroyo Napostá Chico. Los períodos húmedos (moderadamente húmedo+muy húmedo+extremadamente húmedo) obtuvieron similares porcentajes en ambos sectores estudiados (21 %) mientras que los períodos húmedos obtuvieron leves diferencias. En la cuenca inferior fueron del 21 % mientras que en el sector superior del 20 % (Figura 2). Dentro de la categorización del SPEI se hallaron pequeñas variaciones. La más significativa se obtuvo en la categoría “moderadamente húmedo” (13 % en la cuenca superior y 10 % en la inferior) (Figura 2). Los eventos extremadamente secos fueron del 2 % en el sector sur (cuenca inferior) y del 1 % en el sector norte (cuenca superior). Por su parte, los eventos extremadamente húmedos obtuvieron porcentajes similares en ambos sectores (Figura 2).

Figura 2 Proporción de categorías de SPEI (escala 1 mes) en el área de estudio (período 2000-2013).



Durante el período estudiado y desde el punto de vista pluviométrico, los años 2001, 2002 y 2004 fueron húmedos (Figura 3). En el año 2001, se registraron meses extremadamente húmedos de forma consecutiva entre abril y junio, seguidos de meses moderadamente húmedos y muy húmedos. El máximo valor de humedad de todo el período analizado ocurrió en junio (2.30) en la cuenca inferior y en mayo (2.25) en la cuenca superior del arroyo Napostá Chico. Los valores positivos de SPEI en 2001, 2002 y 2004 también fueron hallados para la región por Bohn *et al.* (2016).

La tendencia de la precipitación en el año 2002 se comportó de manera similar a lo ocurrido en 2001. En ambas estaciones, a partir de mayo y hasta diciembre, ocurrió un período húmedo con alternancia de categorías extremadamente húmedas, muy húmedas y moderadamente húmedas. En agosto de 2002 ocurrieron los máximos valores de SPEI tanto en el sur como en el norte de la cuenca (SPEI=2.32 y 2.18, respectivamente). Los demás meses fueron pluviométricamente normales (Figura 3).

En el año 2003 no se registraron períodos de humedad y sequía prolongados. Se destacaron los meses de marzo y octubre por presentar categorías de SPEI “muy secas” y “muy húmedas”, respectivamente. Durante el año 2004, las categorías predominantes fueron las moderadamente húmedas con alternancia de meses muy húmedos (julio y agosto en el sur y diciembre en el norte) y extremadamente húmedo en diciembre y julio (SPEI= 2.04 y 2.07). Los registros mensuales de SPEI, durante el año 2005, indicaron características pluviométricas normales.

Sólo se obtuvieron categorías moderadamente secas, en octubre de ese año (-1.15 y -1.28 en la cuenca inferior y superior, respectivamente) (Figura 3).

El comportamiento del SPEI en el año 2006 se presentó de manera similar tanto en el norte como en el sur del área de estudio (Figura 3). Predominaron las características normales, alternadas con categorías moderadamente secas. En cuanto a las categorías húmedas, sólo se presentaron en octubre y fueron moderadas (SPEI = ~1.40). El año 2007 también se determinó como normal. La distribución de las categorías de SPEI cumplió la misma tendencia en dos estaciones analizadas.

La situación pluviométrica en el año 2008 estuvo caracterizada por eventos secos alternados con períodos normales. En la cuenca inferior, se extendió un período extremadamente seco (SPEI ~ -2.10) durante noviembre y diciembre mientras que en la cuenca superior durante ese mismo período, se desarrollaron condiciones muy secas. Otro período de sequía pero de categoría moderadas, se desarrolló durante ese mismo año y en la totalidad del área de estudio, durante marzo a mayo de 2008 (SPEI ~ -1.25). Los eventos secos también predominaron en el año 2009 y fueron de mayor intensidad y duración que los ocurridos en 2008 (Figura 3). Durante todo el año los valores de SPEI fueron negativos y la sequía fue extrema en enero y agosto (SPEI ~ 2.50). Los años 2008 y 2009 también fueron definidos

como secos en la región por Bohn *et al.* (2011) y para el oeste del área de estudio por D'Ambrosio *et al.* (2013). Durante el resto del año, las categorías de SPEI fueron muy secas y en menor medida moderadamente secas. Los años 2010, 2011, 2012 y 2013, fueron considerados normales. Durante el último año estudiado se observó el predominio de condiciones normales hasta abril y a partir de mayo predominaron las situaciones moderadamente secas.

4.1.2 SPEI a Escala 3 Meses

El análisis del SPEI a escala 3 meses registró predominio de las situaciones normales y también se observó diferencias espaciales. En la cuenca superior representaron el 65 % mientras que en la cuenca inferior el 67 %. Los períodos húmedos fueron del 14 % en ambos sectores y los secos (moderadamente seco + muy seco + extremadamente seco) mayores en el sector superior (20 %) (Figura 4). Las categorías moderadamente húmedo y seco fueron levemente mayores en la cuenca superior (10 y 13 %). Por su parte, no se hallaron diferencias espaciales en los períodos muy secos (5 % en ambos sectores) mientras que las situaciones muy húmedas fueron mayores en la cuenca inferior (5 %). Los eventos extremos secos fueron levemente superiores en la zona sur (3 %) y no se encontraron diferencias entre los sitios analizados en los eventos extremadamente húmedos (1 %) (Figura 4).

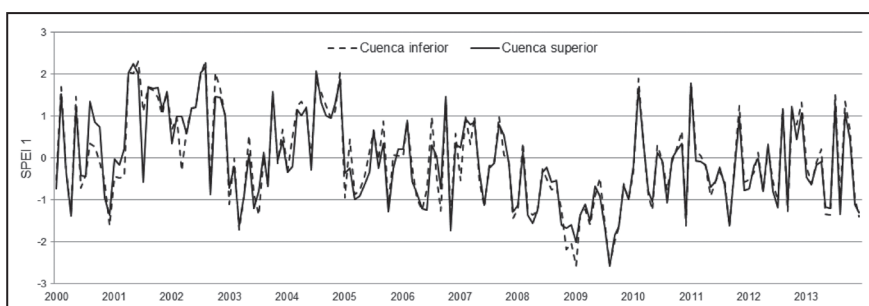


Figura 3 SPEI en el área de estudio (escala temporal: 1 mes, período 2000-2013).

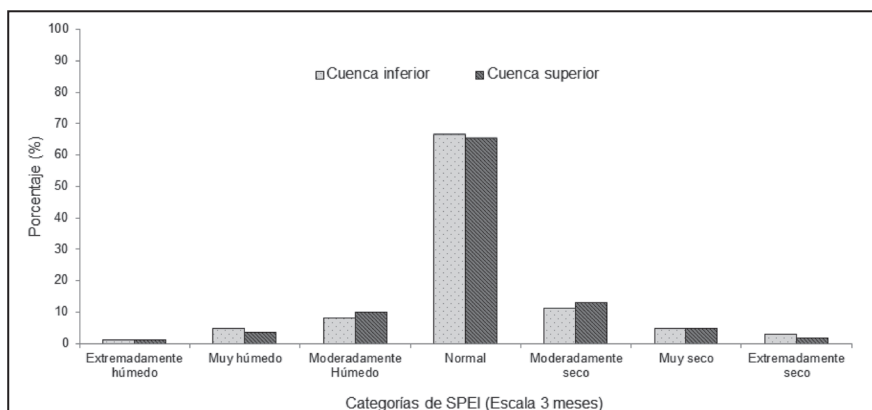


Figura 4 Proporción de categorías de SPEI (escala 3 meses) en el área de estudio (período 2000-2013).

Durante el año 2000, se registraron situaciones pluviométricas normales tanto en el norte como en el sur de la cuenca analizada (Figura 5). Al igual que en el SPEI a escala 1 mes, el año 2001 fue húmedo. Los valores de humedad extrema se encontraron, en ambas estaciones, en octubre (en la cuenca superior, $SPEI=2.36$ y en la inferior, $SPEI=2.18$) alternado con meses moderadamente húmedos y muy húmedos. El año 2002, también presentó meses consecutivos de humedad mientras que en el año 2003 se observó alternancia de eventos normales y secos.

En el año 2004, se observaron en las 2 estaciones analizadas, eventos húmedos. El máximo valor de SPEI se registró en la cuenca superior durante diciembre y presentó un valor de SPEI de 1.71. En ambos sectores, los años 2005, 2006 y 2007 fueron normales. Durante 2008 y 2009 se registró el período más extenso de sequía en toda el área de estudio. Tanto en la cuenca superior como inferior, las condiciones extremadamente secas se desarrollaron durante los meses de primavera/verano y el máximo valor de SPEI se presentó en noviembre

de 2008 en el sur ($SPEI= -2.91$). Esta sequía generó grandes pérdidas económicas a los agricultores como consecuencia del bajo rendimiento de los cultivos (D'Ambrosio *et al.*, 2013). Por otro lado, en los años 2010, 2011, 2012 y 2013 la mayor parte de los registros de SPEI mostraron valores de precipitación normal (Figura 5).

4.1.3 SPEI a escala 12 meses

En el área de estudio, las situaciones normales, al igual que en las escalas 1 y 3 meses, también fueron las más frecuentes. En la cuenca superior fueron del 71 % mientras que en la inferior del 67 % (Figura 6). Los períodos secos fueron mayores en la cuenca inferior (23 %) y los húmedos mayores cuenca superior (11 %). Dentro de las categorías secas, las moderadas fueron las más importantes. Estos fueron mayores en el sector sur (13 %) que en norte (8 %) al igual que en lo ocurrido con las condiciones de extrema sequía (8 y 7 %, respectivamente). Por el contrario, las situaciones muy secas fueron más frecuentes en el sector norte (3 %) (Figura 6).

Figura 5 SPEI en el área de estudio (escala temporal: 3 meses, período 2000-2013).

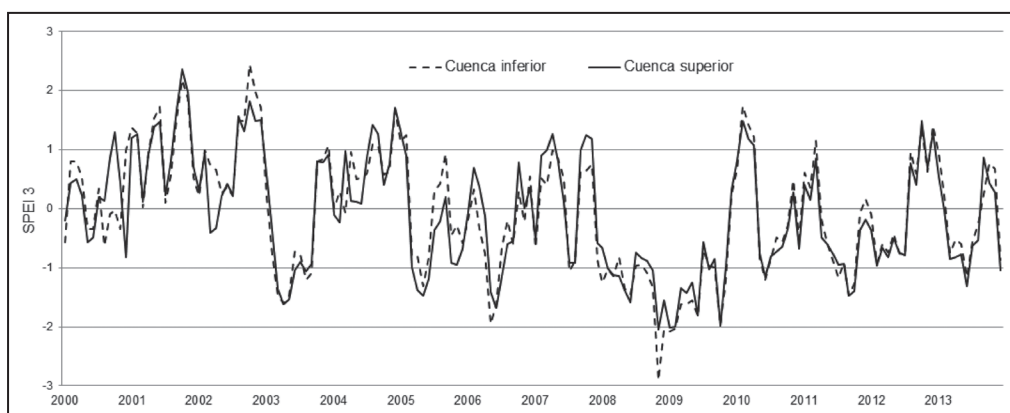
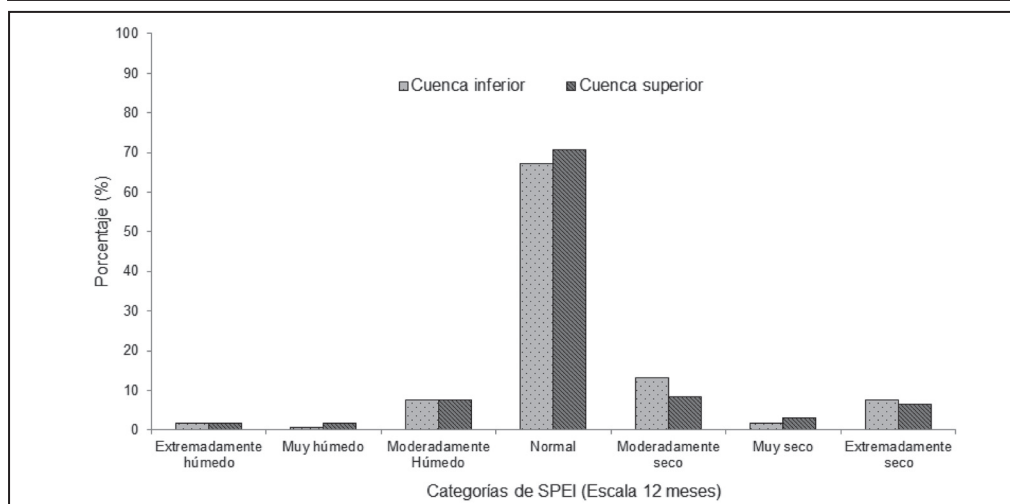


Figura 6 Proporción de categorías de SPEI (escala 12 meses) en el área de estudio (período 2000-2013).



El análisis del SPEI a escala 12 meses mostró que, pluviométricamente, el año 2000 fue normal en los dos sectores de la cuenca. El año 2001, las condiciones fueron extremadamente húmedas desde octubre hasta diciembre. Esta tendencia se prolongó a lo largo del 2002, donde se registraron alternancia de eventos normales con húmedos. El año 2003 fue normal mientras que en el año 2004 se registró un largo periodo de condiciones húmedas que se extendió desde julio hasta febrero de 2005. Por su parte, los años 2006 y 2007 fueron considerados normales. Las situaciones secas severas del período estudiado se observaron durante los años 2008 y 2009. El año 2009 presentó 10 meses consecutivos con situaciones extremadamente secas con valores que alcanzaron los -2.70 en la cuenca superior. Por otro lado, los años 2010, 2011 y 2013 se consideraron normales mientras que en 2012, se registró un período de sequía moderada de 7 meses de duración (Figura 7).

4.2 Análisis de la Variación del Estado y Vigorosidad de la Vegetación Durante el Período 2004-2009

Como resultado de la interpretación visual una imagen satelital correspondiente a un año normal (2007) se obtuvieron las coberturas de la tierra en la cuenca del arroyo Napostá Chico (Figura 8). Las coberturas definidas fueron: vegetación/cultivo, médanos, cuerpos de agua y afloramiento rocoso. La cobertura vegetación/cultivo fue la que obtuvo el mayor porcentaje de representatividad, alcanzando un 85 %. Por su parte, las coberturas médano y afloramiento rocoso estuvieron representadas en un 5,6 y 7,9 %, respectivamente. En menor porcentaje (1,5 %) se encontraron los cuerpos de agua (Figura 8).

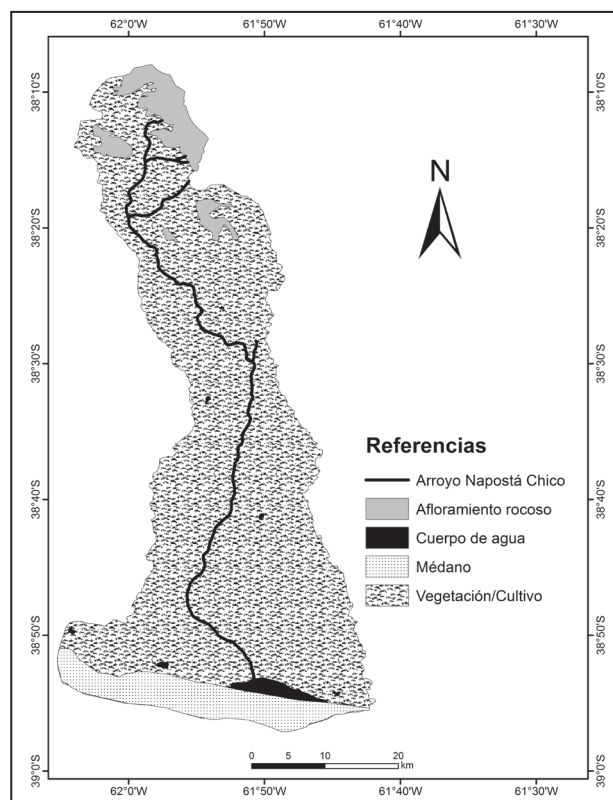


Figura 8 Cobertura de la tierra en la cuenca del arroyo Napostá Chico (septiembre de 2007).

Desde el punto de vista pluviométrico, los eventos climáticos extremos fueron el año 2004 (húmedo) y los años 2008 y 2009 (seco). La distribución espacial de la vegetación de acuerdo a su vigorosidad y densidad varió a lo largo del período estudiado. En el año 2007, los mayores valores de NDVI ocurrieron entre octubre y la primera quincena de noviembre (NDVI= 0,52) mientras que en los restantes meses, los valores oscilaron entre 0,31 y 0,22. Durante el año húmedo, la vegetación presentó mayor vigor y densidad que en los demás años.

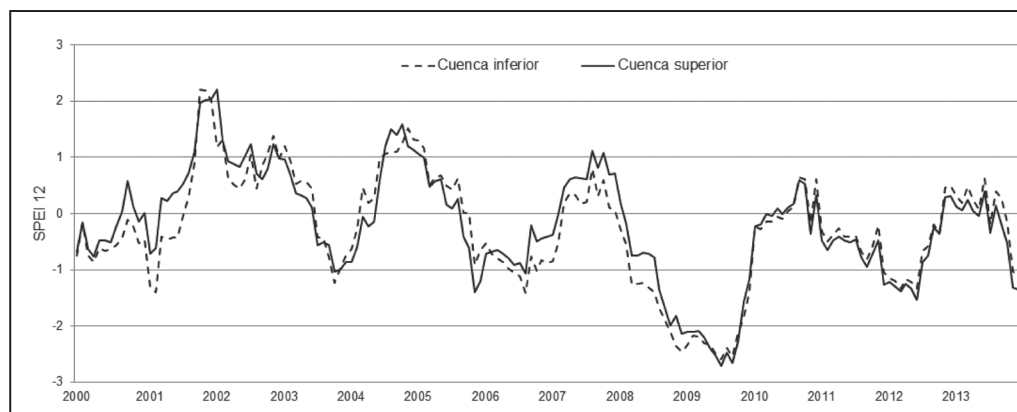


Figura 7 SPEI en el área de estudio (escala temporal: 12 meses, período 2000-2013).

Los valores de NDVI oscilaron entre 0,34 y 0,56 y al igual que el año normal, los meses de octubre y noviembre fueron los que presentaron los mayores valores de NDVI (Figura 9). Estos resultados coinciden con lo hallado por Iglesias *et al.* (2010) en tres sitio de las reservas naturales ubicadas en la región central-occidental de Argentina. Los mayores valores de NDVI ocurren en aquellos períodos donde se producen las mayores precipitaciones (Iglesias *et al.*, 2010).

Por último, en los años secos (2008 y 2009) se obtuvieron los mínimos valores de NDVI de todo el período, representado en la menor vigorosidad y/o densidad de la vegetación (Figura 9). Durante el año 2009, la primera quincena de noviembre y diciembre fue la que presentó el menor valor de NDVI (0,27) mientras que durante el año 2008, los mínimos valores ocurrieron en la totalidad del mes de diciembre (NDVI = 0,21). En los años 2005 y 2006 los valores de NDVI calculados mostraron una vigorosidad y densidad de la vegetación que se asemejó a las condiciones de la vegetación en un año pluviométrico normal. Los máximos valores se observaron entre los meses de septiembre a noviembre (NDVI entre 0,30 y 0,40) y los mínimos valores en los meses restantes (NDVI menor a 0,30) (Figuras 6 y 9). Se detectó correlación entre la actividad fotosintética de la vegetación y la precipitación. Los años secos mostraron una gran sensibilidad de esta cobertura al efecto de la precipitación, representado a partir de los mínimos valores de NDVI y por consiguiente menor vigorosidad y densidad. Por el contrario, en el año húmedo, la vegetación mostró mayores valores de NDVI, indicando su mayor vigorosidad y densidad. Los resultados obtenidos en esta investigación, coinciden con lo hallado por Bohn *et al.* (2012) en

el cual analizaron y cuantificaron la variabilidad del estado y densidad de la vegetación mediante el uso de sensores remotos e índices de vegetación en algunos ambientes del sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Como resultado obtuvieron que las precipitaciones influenciaron en la dinámica de las coberturas de cultivo de herbáceas gramíneas, pastizal y la vegetación herbácea, tomando valores elevados de NDVI, durante la estación húmeda (primavera) y valores bajos de NDVI durante las estaciones de menor disponibilidad hídrica (invierno y verano).

4.3 Análisis de la Variación de la Cobertura de Agua en Años Secos, Húmedos y Normales

Como resultado del análisis de la precipitación anual, el año 2007 fue caracterizado como normal mientras que los años 2001 y 2009 como húmedo y seco, respectivamente. Según Bohn *et al.* (2016) el fenómeno ENSO y sus fases, afecta claramente a la precipitación de la región. Los años considerados como secos y húmedos en la presente investigación, también fueron definidos por Aliaga *et al.* (2016a) para la región pampeana argentina y según el Índice Oceánico de El Niño (ONI) se clasifican como eventos Niño (2001) y Niña (2008 y 2009) (Aliaga *et al.* 2016b, Bohn *et al.* 2016). En el área de estudio, la mayor área cubierta por agua fue detectada durante el año 2007 alcanzando los 13,5 km² (~0,99 % del área de estudio) mientras que en el año 2001, se obtuvieron valores similares (12,7 km²) (~ 0,93 % del área de estudio) (Figura 10). Este último valor de área fue arrojado tras el procesamiento de una imagen Landsat correspondiente a principios de 2001 (SPEI normal). A medida que el año avanzó, las

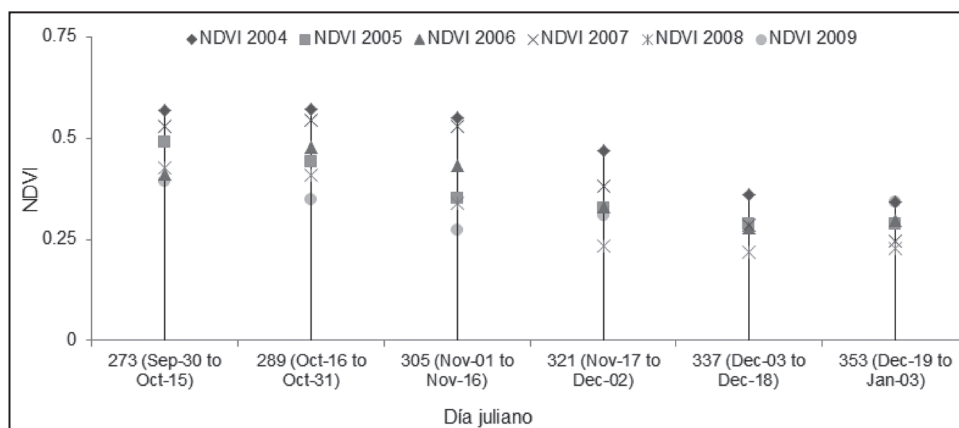


Figura 9 Evolución del NDVI. Período 2004-2009 (octubre, noviembre y diciembre).

categorías de SPEI fueron moderadamente húmedas (septiembre y octubre) y muy húmedas (noviembre y diciembre) y el área cubierta por agua fue superior a lo hallado en un año normal (17,8 km²). Esta tendencia de valores muy húmedos de SPEI persistió durante principios de 2002 y los valores de cobertura de agua también fueron mayores que lo ocurrido en un año normal (15 km²).

En el año seco (2009) las precipitaciones anuales fueron mínimas y la superficie cubierta por agua fue escasa (0,47 km²) representando aproximadamente el 0,034 % del área de estudio (Figura 10). Según Aliaga *et al.* (2016b) la variación del área de lagunas de la región pampeana argentina, en relación al volumen de precipitaciones, es mayor entre el año normal y el seco, que entre el normal y el húmedo. Se experimentó una disminución del 96,3 % de la cobertura de agua entre el año húmedo y seco. Similares resultados fueron hallados por D'Ambrosio *et al.* (2013) en el área del Dique Paso de las Piedras (provincia de Buenos Aires). Durante la sequía del año 2009, este cuerpo de agua, cercano a la región de estudio, experimentó una reducción del 52 % en relación al año húmedo (2001) y del 31 % en relación al año 2007 (normal).

Entre el año húmedo (2001) y normal (2007) se obtuvo una disminución del 6,0 % de la cobertura de agua mientras que entre el año normal y seco (2009), la disminución fue del 96,5 % (Figura 10). En términos generales, la extensión (km²) de los cuerpos de agua fueron mayores en años húmedos o normales mostrando un decrecimiento de su

superficie durante el año seco. Estos resultados coinciden con los hallados por Bohn *et al.* (2011), en su estudio acerca de los efectos de la precipitación en el área y número de lagunas pampeanas en el sur de la Provincia de Buenos Aires. Estos autores concluyeron que las máximas y mínimas coberturas de agua ocurrieron en años húmedos y secos, respectivamente. Complementariamente, se han detectado similares resultados con lo estudiado por Carbone *et al.* (2015) en dos cuerpos de agua de una cuenca hidrográfica ubicada al sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina, durante años extremadamente secos, húmedos y normales. Durante la sequía extrema, el área de la laguna se redujo un 26 % con respecto al año extremadamente húmedo. Los resultados encontrados en la presente investigación también coinciden con lo analizado por Ferrelli *et al.* (2011) en dos unidades administrativas del sur de la provincia de Buenos Aires (Argentina). Estos autores obtuvieron que la diferencia de extensión areal de la cobertura de agua fue del 30 % entre períodos húmedos (año 2004) y secos (año 2009).

5 Conclusión

La influencia de los eventos climáticos extremos en la evolución del estado y vigorosidad de la vegetación y la cobertura de agua de la cuenca del arroyo Napostá Chico, fue demostrada mediante el uso del SPEI, NDVI e imágenes satelitales durante años secos, húmedos y normales. La utilización del SPEI permitió caracterizar la

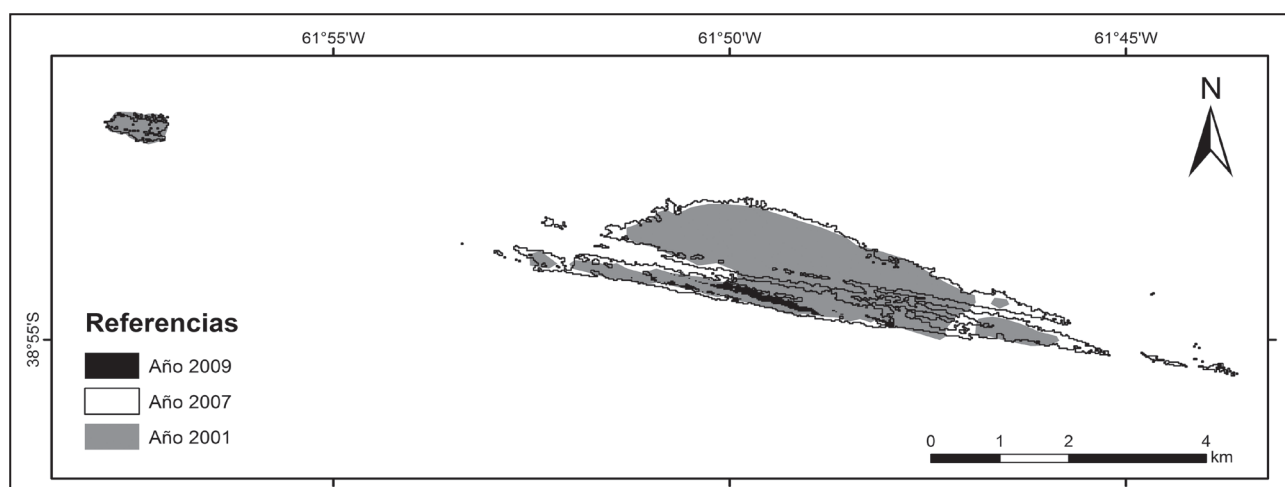


Figura 10 Variación areal de los cuerpos de agua en el sector inferior de la cuenca estudiada, en base al procesamiento digital de imágenes Landsat 5TM y 7 ETM+.

distribución e intensidad de eventos climáticos extremos, siendo una herramienta útil para su gestión y planificación. Durante el período de estudio (2000-2013) las condiciones pluviométricas ocurridas en la cuenca superior e inferior fueron muy similares en las 3 escalas estudiadas. El año 2009 fue el que presentó mayor número de categorías secas con valores extremos de SPEI en los meses de verano. Por su parte, el mayor número de categorías húmedas fueron halladas en los años 2001 y 2002 con máximos valores de SPEI en los meses de primavera. En ambas estaciones de SPEI y en todas las escalas analizadas, los eventos normales fueron las más frecuentes. El área de estudio, está sujeta a la alternancia de períodos extremadamente secos y húmedos que, en algunos años, se han extendido por más de 12 meses, generando consecuencias económicas y sociales. El análisis de eventos hídricos extremos en relación con el estado y vigorosidad de la vegetación fue un indicador de las situaciones pluviométricas ocurridas. Ante un año seco, los valores de NDVI fueron mínimos, mientras que durante un año húmedo, se comportó de manera opuesta, permitiendo de esta manera inferir el estado de la vegetación.

La dinámica espacial y temporal de los cuerpos de agua tuvo relación directa con los valores de SPEI en el área de estudio. Las máximas áreas cubiertas por agua fueron detectadas mayormente en el año normal y húmedo en contraste con las extensiones areales mínimas, en el año seco. Entre el año húmedo y normal se obtuvo una disminución del 6,0 % de la cobertura de agua mientras que entre el año normal y seco del 96,5 %. El conocimiento de los eventos climáticos extremos y su efecto sobre el estado de la vegetación y los cuerpos de agua, es fundamental para la planificación de las actividades agroeconómicas y los recursos hídricos en una zona semiárida y de clima templado, como la estudiada.

6 Agradecimientos

El presente trabajo fue realizado en el marco de la Beca de Estímulo a las Vocaciones Científicas (CIN) y la Beca Doctoral financiada por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Los autores agradecen a los proyectos “Estudio Integrado de lagunas pampeanas, Provincia

de Buenos Aires (Argentina)” subsidiado por la Universidad Nacional del Sur (UNS) y “Sensing the Americas Freshwater Ecosystem Risk (SAFER)” financiado por el Inter-American Institute for Global Change Research (IAI).

7 Referencias

- Aceituno, P. 1988. On the functioning of the Southern oscillation in the South American sector. *Monthly Weather Review*, 116:505-524.
- Aliaga, V.S.; Ferrelli, F.; Alberdi-Algañaraz, E.D.; Bohn, V.Y. & Piccolo, M.C. 2016a. Distribución y variabilidad de la precipitación en la Región Pampeana, Argentina. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42: 261 – 280.
- Aliaga, V.S.; Ferrelli, F.; Bohn, V.Y. & Piccolo, M.C. 2016b. Utilización de imágenes satelitales para comprender la dinámica lagunar en la Región Pampeana. *Revista de Teledetección*, 46:133-146.
- Bohn, V.Y. 2009. *Geomorfología e hidrografía de las lagunas del sur de la provincia de Buenos Aires*. Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo, Bahía Blanca, Tesis de Doctorado en Geografía, 244p.
- Bohn, V.Y.; Piccolo M.C & Perillo, G.E. 2011. Análisis de períodos secos y húmedos en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Climatología*, 11:31-43.
- Bohn, V.Y.; Fornerón, C. & Piccolo, M.C. 2012. Análisis de cubiertas vegetales en ambientes naturales del sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). In: JORNADAS NACIONALES DE GEOGRAFÍA FÍSICA, 9, Bahía Blanca, 19 al 21 de abril de 2012, p.1-12.
- Bohn, V.Y.; Delgado, A.L.; Piccolo, M.C. & Perillo, G.M.E. 2016. Assessment of climate variability and land use effect on shallow lakes in temperate plains of Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 75: 817 – 831.
- Capelli de Steffens, A. & Campo de Ferreras, A. 1994. *La transición climática en el Sudoeste Bonaerense*. Nro. 5. Colección SIGEO. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina. 77p.
- Carbone, M.E.; Fornerón, C.F. & Piccolo, M.C. 2015. Impacto de los eventos de sequía en la región de la cuenca hidrográfica de la laguna Sauce Grande (Provincia de Buenos Aires, Argentina). *Investigaciones Geográficas*, 63: 131-142.
- D'Ambrosio, G.; Bohn, V.Y. & Piccolo, M.C. 2013. Evaluación de la sequía 2008-2009 en el oeste de la Región Pampeana. *Cuadernos Geográficos*. Granada: Universidad de Granada, 52: 29-45.
- Díaz, R.A. & Mormenco, I. 2002. Zonificación del clima de la región Pampeana mediante análisis de conglomerados con consenso. *Revista Argentina de Agrometeorología*, 2(2):25-131.
- Farrell, M. 2011. Caracterización del cultivo de trigo mediante aplicaciones del índice EVI de imágenes MODIS. In: ANGUİL, A. B.; QUIROGA, A. & FRASIER, I. (eds.). *El cultivo de trigo en la región semiárida y subhúmeda pampeana*, INTA p.85-90.
- 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). *Geofocus, Revista*

- Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 11: 355-374.
- Gomez-Mendoza, L.; Galicia, L.; Cuevas-Fernandez, M.L.; Magaña, V.; Gomez, G. & Palacio-Prieto, J.L. 2008. Assessing onset and length of greening period in six vegetation types in Oaxaca, Mexico, using NDVI-precipitation relationships. *International Journal of Biometeorology*, 52: 511-520.
- Gonzaga Aguilar, C. 2014. *Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal en la Zona Centro de la Provincia De Loja, Ecuador*. Tesis de Maestría en Geomática, 120 p.
- Grimm, A.M. 2010. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. *Stochastic Environmental Research and Risk*, 25: 537-554.
- Iglesias, M.R.; Barchuk, A. & Grilli, M.P. 2010. Dinámica estacional e interanual del NDVI en bosques nativos de zonas áridas argentinas. *Revista de Teledetección*, 34: 44-54.
- Jiang, L.; Yua, X.; Zhaoa, H. & Zhoua, Y. 2005. China's Wetlands Restoration around Poyang Lake, Middle Yangtze: Evidences from Landsat TM/ETM+ Images. *IEEE*, p. 2387-2389.
- Melo, W. & Zinger, S. 1996. Comportamiento y dinámica del arroyo Napostá Chico, Provincia de Buenos Aires. In: JORNADAS DE GEOGRAFÍA FÍSICA, 1, Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, 1996, p. 122-129.
- Monteith, J. 1981. Evaporation and surface temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 107:1-27.
- Rodríguez-Moreno, V.; Bullock, M. & Stephen, H. 2013. Comparación espacial y temporal de índices de la vegetación para verdor y humedad y aplicación para estimar LAI en el Desierto Sonorense. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4: 611-623.
- Rouse, J.W. & Haas, R.H. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation: Final Report. Oreenbello, MD.: NASA/OSFC, p. 1-371.
- Scian, B. 2002. Variabilidad de las condiciones hídricas en la región semiárida pampeana, Argentina. *Geoacta*, 27: 30-52.
- Severov, D.N.; Mordecki, E. & Pshennikov, V.A. 2004. SST anomaly variability in Southwestern Atlantic and El Niño/Southern oscillation. *Advances in Space Research*, 33: 343-347.
- Tarpley, J.; Schneider, S. & Money, R. 1984. Global vegetation indices from NOAA-7 meteorological satellite. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23: 491-494.
- Trenberth, K. 1997. Short-term climate variations: recent accomplishments and issues for future progress. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78: 1081-1096.
- Vicente-Serrano S.M.; Santiago Beguería, S. & López-Moreno, J. 2010. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. *Journal of Climate*, 23: 1696-1718.
- Viglizzo, E.F.; Frank, F.C. & Carreño, L. 2005. Situación ambiental en las ecorregiones pampa y campos y malezales. In: BROWN, U.; MARTÍNEZ ORTIZ, M.; ACERBI, J. & CORCHERA, F. (eds.). La situación ambiental Argentina. Fundación Vida Silvestre Argentina. Buenos Aires, p. 577.
- Zerda, H.R. & Tiedemann, J.L. 2010. Dinámica temporal del NDVI del bosque y pastizal natural en el Chaco Seco de la Provincia de Santiago del Estero, Argentina. *Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais*, 6: 14-23.
- Zorogastua Cruz, P.; Quiroz Guerra, R. & Garatuza Payan, J. 2011. Evaluación de cambios en la cobertura y uso de la tierra con imágenes de satélite en Piura, Perú. *Ecología aplicada*, 10: 13-22.