



FACULTAD DE AGRONOMÍA
Universidad Nacional de La Pampa

“Relación entre ciclos de precipitación e inundaciones en la Región Nordeste de la provincia de La Pampa y Oeste de Buenos Aires”

“Trabajo final de graduación presentado para obtener el título de Ingeniera Agrónoma”

Autora: Villaló, Mailen

Director: Peinetti, Raúl. Fisiología vegetal. Facultad de Agronomía, UNLPam.

Evaladoras: Noellemeyer, Elke. Edafología. Facultad de Agronomía, UNLPam.

Kin, Alicia G. Fisiología vegetal. Facultad de Agronomía, UNLPam.

**FACULTAD DE AGRONOMIA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA
Santa Rosa (La Pampa)-ARGENTINA 2019**

INDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	5
INTRODUCCION.....	7
1. MATERIALES Y METODOS	8
1.1. Características del área de estudio	8
1.1.1. Delimitación espacial	8
1.1.2. Características geo-climáticas	10
1.2. Digitalización de áreas inundadas	12
1.3. Delimitación de cuencas de hidrográficas.	14
1.4. Régimen pluviométrico.....	15
1.5. Análisis de datos.	16
1.5.1. Anegamiento.	16
1.5.2. Relación Área Anegada – Precipitación.	17
2. RESULTADOS.....	17
2.1. Régimen de inundaciones	17
2.1.1. Patrón regional.	17
2.1.2. Unidades políticas.	21
2.1.3. Cuencas hidrológicas.....	23
2.2. Relación entre inundaciones y pluviometría local.....	25
DISCUSIÓN.....	29
CONCLUSIONES.....	31
BIBLIOGRAFÍA.....	32

RESUMEN

Los eventos de inundaciones son recurrentes en la región pampeana. En la porción occidental, denominada región semiárida pampeana (RSP), los periodos de exceso hídrico se alternan con sequías de variada duración. Las inundaciones producen consecuencias negativas en calidad de vida de la población, infraestructuras y producción agropecuaria. Para desarrollar estrategias de mitigación de estos efectos es importante conocer la dinámica de los excesos hídricos. En este estudio se determinó el patrón espacio-temporal de las superficies anegadas en los últimos 27 años en un área de 29.728 km² de la RSP. Las áreas anegadas se delinearon en base a interpretación de imágenes de la serie histórica de la misión *LANDSAT* utilizando técnicas de digitalización automática. Se eligió para el análisis una imagen de alta calidad por año (< 10% de nubes). El régimen de inundaciones fue altamente variable, donde el valor máximo del año 2017 (5.153 km²) superó por más de 100 veces el valor mínimo registrado en el 2009 (50 km²). Otro evento de inundación importante se observó en los años 2001-2002 (1.360 km²). Se destaca el comportamiento cíclico de las inundaciones con valores de recurrencia cercanos a los 12 años. La duración de los eventos de excesos hídricos fue mucho menos prolongada que los de déficit. Las precipitaciones acumuladas de 6, 12 y 24 meses, explican las superficies anegadas hasta un valor umbral por encima del cual se observan grandes variaciones en anegamiento ante valores estables de precipitaciones. Este comportamiento fue muy evidente en las anomalías hídricas del 2016-2017. La relación anegamiento:precipitación confirma el aporte externo de agua en los eventos de inundaciones extraordinarias. Estos aportes se corresponderían con los desbordes del Río Quinto. Por otra parte, los datos obtenidos confirman la existencia de una cuenca de drenaje desde el norte de la región en sentido noreste, lo cual confirma la conexión hídrica con el sistema

hídrico del Río Quinto. Las acciones de prevención de efectos negativos de las inundaciones requieren de modelos predictivos confiables. Para la construcción de estos modelos es necesario considerar el aporte de agua del sistema hidrológico del Río Quinto, además del régimen de precipitaciones.

Palabras claves: régimen hídrico; digitalización de áreas anegadas, imágenes satelitales, Río Quinto, cuencas hidrológicas.

ABSTRACT

Flood events are recurrent in the Pampean region. In the western portion, known as the semi-arid Pampean region (RSP), excess water alternate with droughts of varying duration. Floods have negative effects on life quality, infrastructure and agricultural production. Understanding surface-water dynamics is important for developing mitigation activities. In this study, I determined the spatio-temporal pattern of inundated surfaces in the last 27 years in an area of 29,728 km² of the RSP. Flooded areas were delineated from historical Landsat images, using automatic digitization techniques. One high-quality image was used (<10% of clouds) for each year of the temporal series. Flood regime was highly *variable*, with values ranging from a maximum area of 5,153 km² in 2017, to a 100 times lower a minimum registered in 2009 (50 km²). Another important flood event was observed during 2001-2002 (1,360 km²). Flood had a cyclic behavior with an approximate recurrence of 12 years. The duration of floods, was shorter than the duration of the drought periods. The accumulated rainfall of 6, 12 and 24 months explained the extent of the flooded surface areas up to a threshold value above which, a large variations in flooded areas were observed under similar amount of rainfall. This behavior was more evident in the hydric anomalies of 2016-2017. All these results support the hypothesis that exceptional flood events were associated to an external source of water from the overflow of the River V in the north of the region. Moreover, there was a large hydric connection among the north to the northeast direction of the study area. This may constitute a drainage basin where water from the River V move to the central eastern part of the RSP. Actions to prevent the negative effects of inundations require reliable predictive models. For the construction of these

models, it is necessary to consider the dynamics of the River V alongside with the rainfall regime.

Keywords. water regime; surface water digitization, satellite images, Río Quinto, hydrologic basins.

INTRODUCCION

Los pastizales pampeanos del centro este de la Argentina cubren una amplia planicie de más de 3.000.000 de km². La altura sobre el nivel del mar no supera los 200 m con discontinuidades producidas por la presencia de formaciones serranas como los sistemas de Tandilla y Ventania. Los suelos se han desarrollado sobre sedimentos loessicos depositados en el Pleistoceno Tardío-Holoceno. El régimen térmico moderado, la provisión abundante de agua de lluvia y la fertilidad de sus suelos son factores decisivos para el desarrollo de la agricultura sin riego y la ganadería. Las variaciones climáticas, geomorfológicas y edáficas permiten diferenciar subregiones con diferente potencial productivo (Taboada *et al.*, 2012).

La región pampeana semiárida (RSP) comprende la porción occidental de los pastizales pampeanos, y se caracteriza por presentar un régimen hídrico más variable y de menor pluviometría (Magrin *et al.*, 2009). Los suelos son menos desarrollados y la productividad agrícola es sustentable dentro del rango histórico de precipitaciones. Sin embargo, la ocurrencia de anomalías en el régimen pluviométrico genera sequía o excesos hídricos que compromete la sustentabilidad de la producción. Los años de sequía producen pérdidas de cosechas por limitaciones en la siembra o en el desarrollo del cultivo (CARBAP 2017). Los ciclos húmedos producen el ascenso de napas freáticas, acumulaciones de agua en superficie y anegamiento de suelos (Betelú 1999).

El sistema hidrológico de la RSP se caracteriza por presentar cuencas de drenaje con baja pendiente y un escurrimiento lento (Dornes *et al.*, 2015). El bajo escurrimiento superficial determina que el agua precipitada en exceso de la capacidad de almacenamiento del suelo, tienda acumularse en el paisaje por considerables períodos de tiempo. Se distinguen también áreas bajas

de paisaje donde la acumulación de agua es permanente (lagunas). Sin embargo, es probable que la dinámica hídrica de esta región no dependa solamente de las precipitaciones sino también del sistema hidrológico del Río Quinto (Jensen *et al.*, 2000). Este es un río de carácter endorreico, que recorre el centro sur de la provincia de San Luis y el sur de la provincia de Córdoba. Si bien el cauce normal del Río Quinto no atraviesa la RSP, cuando el caudal de río es de gran magnitud, el agua puede ingresar en las provincias de La Pampa y Buenos Aires.

Para reducir la vulnerabilidad de esta región ante eventos extremos es necesario contar con elementos predictivos que permitan anticipar no sólo la ocurrencia de excesos hídricos, sino también su variación espacio-temporal. En este estudio se elaboraron mapas digitales de superficie anegada en la RSP para los últimos 27 años (1990-2017). Asimismo, se evaluó la importancia relativa de las precipitaciones locales y el aporte hídrico externo, en los eventos de anegamiento registrados durante ese periodo. La reconstrucción espacio-temporal del régimen de anegamiento permitirá identificar zonas de mayor riesgo de impacto climático, lo cual constituye una información significativa para el desarrollo de estrategias de mitigación.

1. MATERIALES Y METODOS

1.1. Características del área de estudio

1.1.1. Delimitación espacial

El área de estudio abarca una superficie de 29.728 Km² de la RSP que corresponde al sector NE de la provincia de la Pampa y el oeste de la Provincia de Buenos Aires (Fig. 1). En la provincia de La Pampa se incluyen la totalidad de los Departamentos Trenel, Maracó, Quemú Quemú, Capital y Catriló y en forma parcial Realicó, Chapaleufú, Conhelo y Toay, y en la provincia de

Buenos Aires los Partidos de Rivadavia, Pellegrini y la parte oeste de Trenque Lauquen (Tabla 1).

Tabla 1. Departamentos de la provincia de La Pampa y Partidos de la provincia de Buenos Aires incluidos en el área de estudio.

Unidad Polítca	Área total (km ²)	Área de estudio (km ²)	Porcentaje
<i>Pcia. de La Pampa</i>			
Capital	2539.02	2539.02	100
Catriló	2507.03	2507.03	100
Chapaleufú	2496.85	1287.25	52
Conhelo	5240.89	4558.97	87
Maracó	2509.58	2509.58	100
Quemú Quemú	2511.33	2511.33	100
Realicó	2450.39	1716.13	70
Toay	5011.76	3089.01	62
Trenel	1961.48	1961.48	100
<i>Pcia. de Bs. As.</i>			
Pellegrini	1818.35	1818.35	100
Rivadavia	3921.02	3638.48	93
Trenque Lauquen	5465.53	1661.79	30

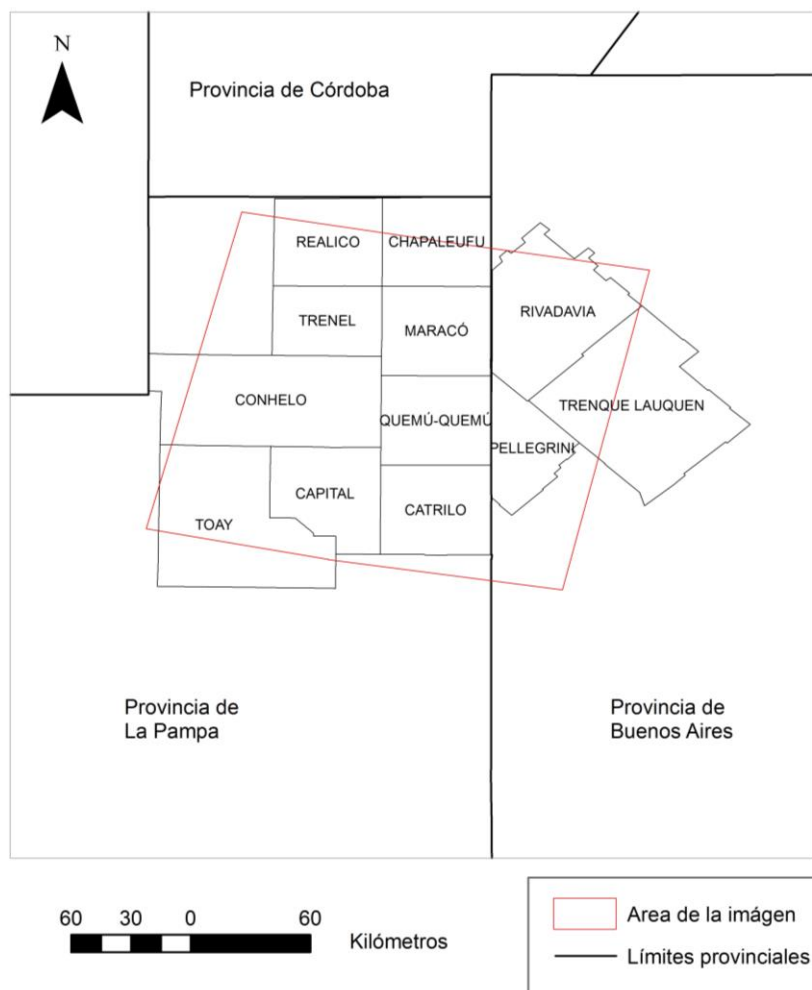


Figura 1. Localización del área de estudio.

1.1.2. Características geo-climáticas

La región de estudio constituye una planicie levemente ondulada con suelos originados por acumulación de materiales finos de origen cuaternario. El clima es subhúmedo seco, con temperaturas medias anuales que varía entre los 14 y 17 °C (Vergara *et al.*, 2005). La amplitud térmica es pronunciada debido a la baja influencia del efecto moderador del océano. Una de las

características de esta región es la alta variabilidad inter e intra-anual de las precipitaciones. Las precipitaciones medias anuales varían en promedio en un rango de 800 en el noreste a 500 mm en el sudoeste. Estas se originan por el choque de masa de aire húmedo que ingresan desde el N y NE con masas de aire más secos y fríos provenientes del SO. Si bien las precipitaciones pueden ocurrir a lo largo de todo el año su mayor frecuencia se da durante la primavera, verano y principios del otoño. El invierno es típicamente seco con temperaturas muy bajas en el orden de los -3 a -15 C°. Los suelos corresponden en su mayor parte al orden Molisoles (Hapludoles, Haplustoles y Argiudoles). En el sector NE de la RSP se encuentran suelos con horizontes claramente diferenciado y alto contenido de materia orgánica.

El área de estudio comprende tres subregiones de la RSP diferenciadas principalmente por topografía y suelos (INTA 1980):

Subregión de las planicies con tosca: Constituye una franja con sentido N-S en la porción O de la RSP. Esta corresponde a una planicie uniforme suavemente ondulada con una pendiente regional SO-NE. El microrelieve está compuesto por pequeñas lomas y depresiones. El suelo está bien provisto de materia orgánica y nutrientes formando un horizonte superficial mólico. Tienen régimen de humedad ústico y de temperatura térmica. Estas tierras están dedicadas a la explotación agropecuaria con predominio de agricultura. Las limitaciones son: poca profundidad efectiva por presencia de tosca con limitado drenaje natural, sequías estacionales y erosión eólica moderada.

Subregión de colinas y lomas. Se ubica al sur de la subregión anterior en la parte central de la provincia de La Pampa. El relieve es de ondulado a colinado, con lomas y colinas de 1 a 2 km de diámetro como promedio. Las características del suelo en cuanto a su profundidad y desarrollo varían de acuerdo a la posición en el paisaje. Las precipitaciones medias anuales varían

entre los 600-700 mm. La vegetación natural ha sido en su mayoría transformada a agricultura, manteniendo en la actualidad algunos relictos de bosque nativo. La actividad es de tipo agrícola-ganadera.

Subregión de las planicies medanosas. Se encuentra ubicada en el extremo NE de la provincia de La Pampa y oeste de la provincia de Buenos Aires. El relieve corresponde a ondulaciones arenosas con sentido N-S y de médanos aislados. Intercaladas entre estas ondulaciones existen planicies arenosas de aproximadamente 3 a 4 km de ancho y áreas deprimidas con lagunas temporarias. Los regímenes térmicos e hídricos son adecuados para la producción agropecuaria. La precipitación media anual puede superar 800 mm.

1.2. Digitalización de áreas inundadas

El patrón espacio-temporal de las áreas anegadas se reconstruyó mediante interpretación y digitalización de la serie histórica de imágenes satelitales *LANDSAT*. Se utilizaron imágenes pancromáticas de los satélites *LANDSAT* TM 4-5 y *LANDSAT* 8 con resolución espacial de 30 m, comprendidas entre los años 1990-2017 correspondiente al path 228 y row 85 del sistema cartográfico del satélite *LANDSAT*. Se utilizó una imagen satelital por año con un porcentaje de nubes inferior al 10%. Debido a problemas en la disponibilidad de imágenes de calidad (bajo porcentaje de nubes y sin errores del sensor) no fue posible mantener la consistencia temporal entre las imágenes utilizadas para los distintos años (Tabla 2). Por otra parte, no se encontró una imagen de calidad disponible para el año 2012. Las imágenes fueron descargadas del sitio Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Estas fueron geoméricamente corregidas para garantizar el ajuste espacial. Posteriormente se re proyectaron al sistema POSGAR 2007- Zona 4. El procesamiento de la información geográfica se realizó con el programa *ARCGIS 10*.

La delimitación de las áreas anegadas se realizó con el programa de digitalización automática *Feature Analyst TM* (Overwatch Textron Systems, Providence, RI, USA). Las áreas anegadas fueron identificadas por color y forma. Las salidas del programa de digitalización automática fueron evaluadas visualmente y corregidas a través de iteraciones sucesivas hasta obtener una clasificación satisfactoria. Se generaron archivos *Shapefile* de polígonos de áreas anegadas por cada imagen. Se calculó el área y perímetro de las áreas anegadas con la herramienta de geometría de *ARCGIS 10*.

Tabla 2. Fecha de captura y sensor de imágenes satelitales utilizadas en el estudio.

Año	Fecha de captura	Sensor LANDSAT
1990	29-jun	LT5
1991	24-feb	LT5
1992	30-mar	LT5
1993	05-may	LT5
1994	04-jun	LT5
1995	15-sep	LT5
1996	31-jul	LT5
1997	02-jul	LT5
1998	11-feb	LT5
1999	14-feb	LT5
2000	21-abr	LT5
2001	13-jul	LT5
2002	21-ene	LT5
2003	23-oct	LT5
2004	05-jun	LT5
2005	21-may	LT5
2006	05-mar	LT5
2007	14-jul	LT5
2008	14-oct	LT5
2009	09-nov	LT5
2010	10-oct	LT5
2011	29-oct	LT5
2013	16-jun	LC8
2014	01-jul	LC8
2015	18-jun	LC8
2016	11-nov	LC8
2017	09-sep	LC8

1.3. Delimitación de cuencas hidrográficas

Las cuencas hidrográficas de la región de estudio se delimitaron con la herramienta *Hidrología* del complemento *Análisis espacial* de *ARCGIS 10*, en base a un modelo digital de terreno con tamaño de pixel de 90 m. En el análisis se delinearon las redes de drenaje y se delimitaron 4 cuencas hidrográficas (Tabla 3 y Fig. 2).



Figura 2. Cuencas hidrográficas delimitadas en el área de estudio.

Tabla 3. Superficie de las cuencas hidrográficas delimitadas en la región de estudio.

Cuenca	Área de la cuenca (km ²)	Área incluida en el estudio (km ²)	Porcentaje
1	11384.05	866.44	76
2	4728.17	4401.86	93
3	8121.92	6531.19	89
4	13474.31	11453.93	85

1.4. Régimen pluviométrico

Se compilaron datos de precipitaciones diarias para el período 1988-2017 de pluviómetros ubicados en las siguientes localidades: Realicó, Intendente Alvear, General Pico, Trenel, Eduardo Castex, Quemú Quemú, Santa Rosa, Toay, Catriló y Anguil. La información fue obtenida de la página web de la Policía Provincial y la Estación experimental INTA ANGUIL. No se incluyeron registros de lluvias para el periodo de estudio para los partidos de la provincia de Buenos Aires comprendidos en este estudio.

El promedio anual de precipitaciones para las estaciones analizadas fue de 800 mm, con una alta variabilidad entre años (Fig. 3). El régimen de la distribución de las lluvias a lo largo del año en La Pampa, muestra que las mayores precipitaciones ocurren en el semestre estival (octubre a marzo) con picos mayores en octubre y/o marzo, haciéndose ello más notorio en el N de la provincia. El mes de menores lluvias en general es agosto, aunque en la parte meridional los son junio o julio.

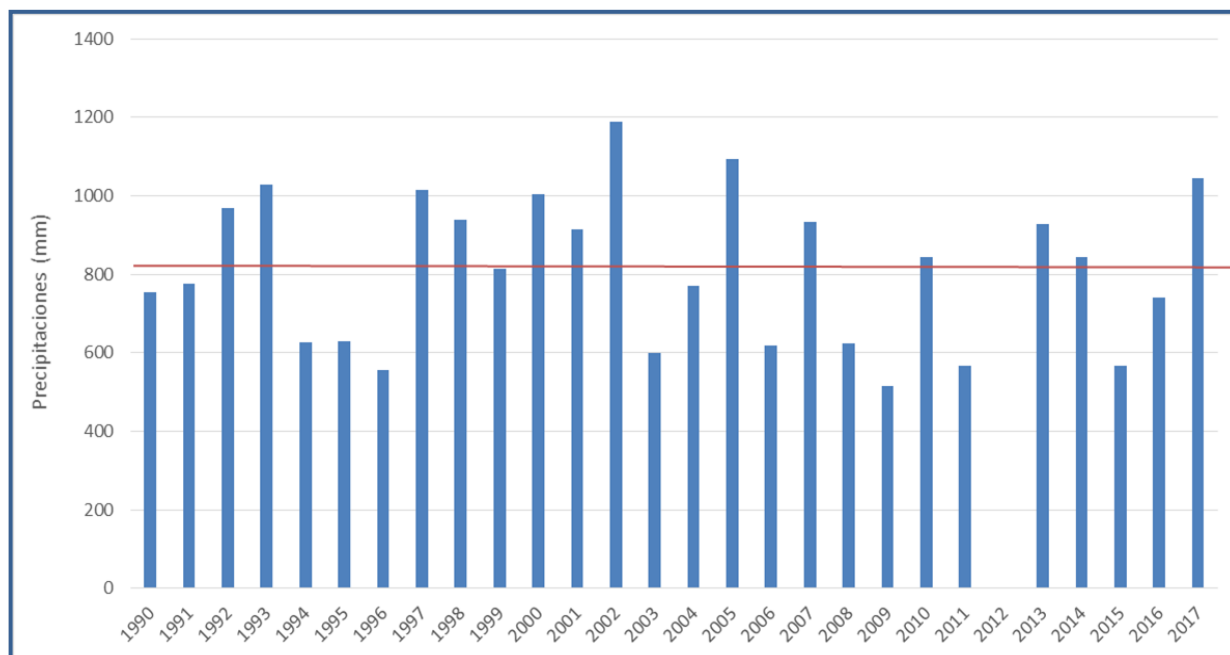


Figura 3. Promedio anual de precipitaciones durante el periodo comprendido entre los años 1990 y 2017, para los Departamentos de La Pampa.

1.5. Análisis de datos.

1.5.1. *Anegamiento.* Los datos fueron analizados considerando: la totalidad de la región de estudio, las unidades políticas (Departamentos y Partidos) y las cuencas hidrográficas. El modelado de las series temporales se realizó con el programa *Zaitun Times Series* (www.zaitunsoftware.com). Para describir tendencia temporal se utilizó un modelo lineal, ajustado a través de mínimos cuadrados. Para caracterizar el comportamiento cíclico de las series se utilizó la herramienta *Decomposition analysis* del programa *Zaitun Times Series*, la cual permite separar la serie temporal en componentes de tendencia, ciclo, estacionalidad e irregularidad. El modelo seleccionado por su mejor ajuste fue el multiplicativo con tendencia

lineal. Finalmente, se realizaron análisis de autocorrelación temporal (correlogramas), para determinar recurrencia de inundaciones y sequías.

1.5.2. *Relación Área Anegada – Precipitación.* Se realizó un análisis de regresión lineal entre las series temporales de áreas anegadas por cuenca hidrológica y precipitaciones acumuladas de 6, 12 y 24 meses previos a la fecha de registro de cada imagen satelital. En cada caso, se utilizaron las estaciones meteorológicas incluidas o cercanas a la cuenca. Se utilizó una transformación logarítmica para mejorar la distribución de residuos del modelo lineal

2. RESULTADOS

2.1. Régimen de inundaciones

2.1.1. *Patrón regional.* El área anegada en la región de estudio durante el período comprendido entre los años 1990 y 2017 fue altamente variable (Fig. 4). Se destacan dos máximos correspondiéndose a los años 2001-2002 y 2016-2017. Notablemente, el área anegada en 2016-2017 (5.153 km²) es ~4 veces superior al del 2001-2002 (1.360 km²) y ~100 veces mayor al valor mínimo observado en 2009 (50 km²). El porcentaje anual de área anegada fue < 2% en 22 del total de los 27 años analizados. En los años 2000, 2002, 2001, 2016 y 2017 los porcentajes superaron ese valor (2.9%, 3.5%, 4.5%, 6.6% y 17.3 %, respectivamente).

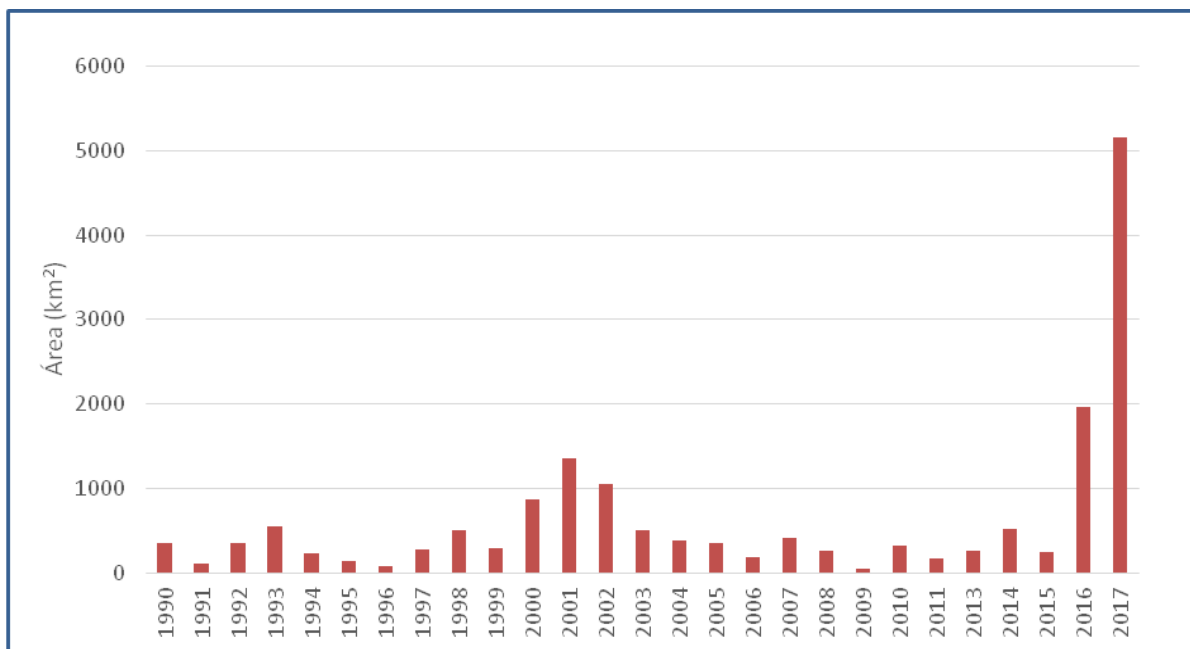


Figura 4. Evolución de la superficie anegada en el área de estudio, en Km².

El análisis de tendencia temporal de anegamiento muestra un valor de pendiente positivo, pero estadísticamente no significativo ($p > 0.25$) (Fig. 5). Los valores positivos de la pendiente probablemente se deban a la influencia de la anomalía hídrica (áreas anegadas) observada en 2016-2017. La corrección de los datos por tendencia permite detectar claramente el comportamiento cíclico de las inundaciones.

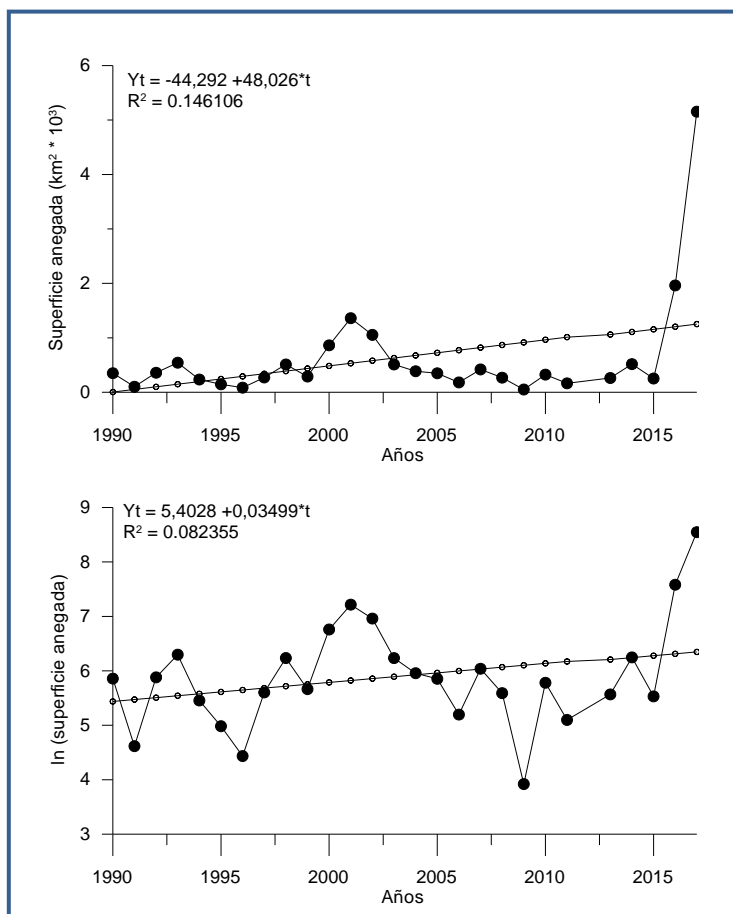


Figura 5. Análisis de tendencia temporal de superficie anegada.

Durante el periodo de 27 años analizados se observan 3 ciclos de inundación y dos de sequía (Fig. 6). La autocorrelación temporal de la serie de anegamiento muestra valores máximos positivos y mínimos negativos desplazados aproximadamente 6 años (Fig. 7). El valor máximo de correlación positiva se observó con un desplazamiento de la serie de 1 año. La autocorrelación con desplazamiento de dos años es muy baja y no significativa, lo que indicaría que los periodos de inundación tienden a ser cortos. Por el contrario, los periodos de sequía tienden a ser más prolongados.

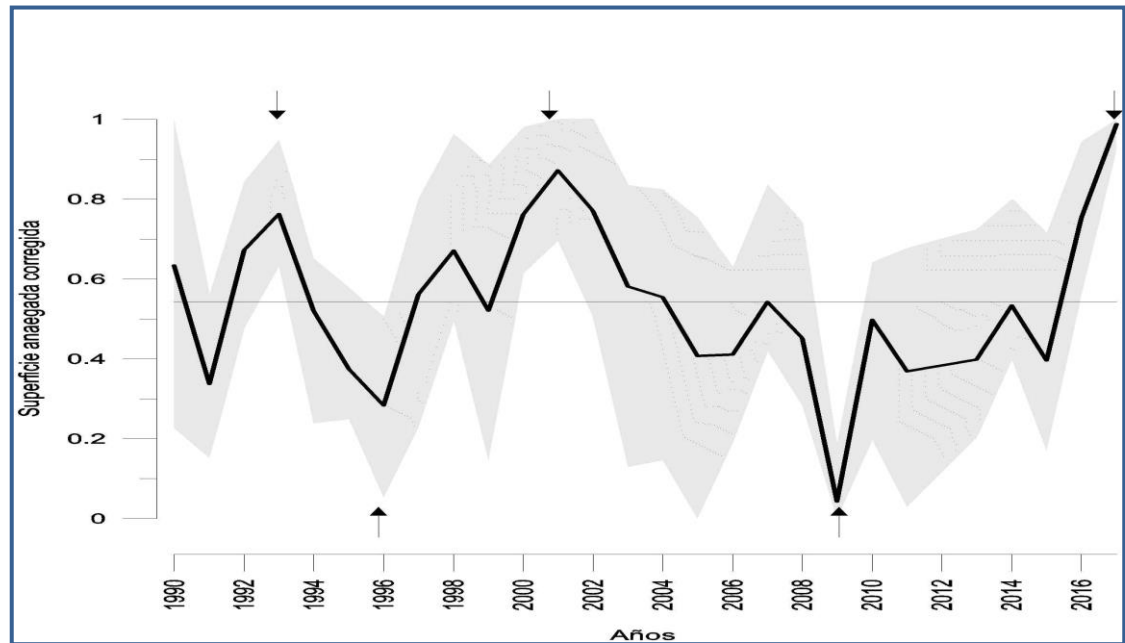


Figura 6. Evolución del área anegada en la región de estudio corregida por tendencia.

Las áreas grises delimitan los valores máximos y mínimos de anegamiento observado en las unidades políticas (departamentos y partidos). Las flechas indican los máximos y mínimos de la tendencia del ciclo.

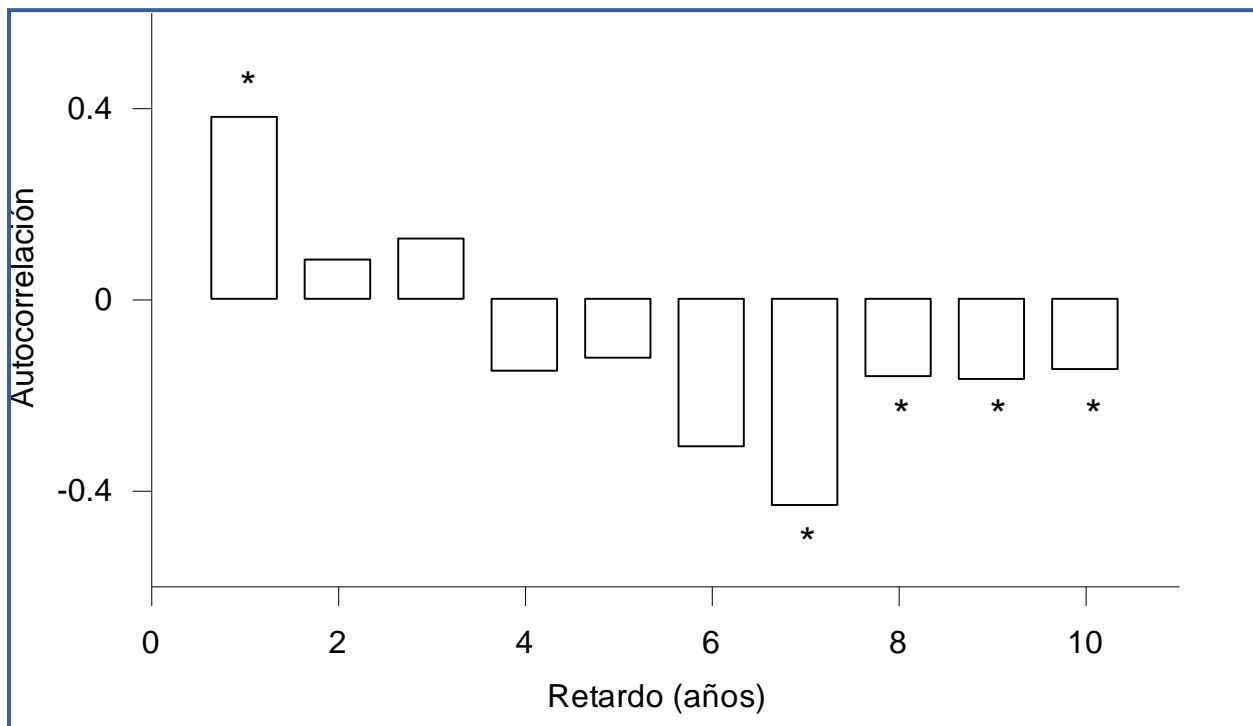


Figura 7. Correlograma de superficie anegada

2.1.2. *Unidades políticas.* La tendencia temporal del área inundada no fue estadísticamente significativa ($p > 0.05$) en ninguno de los Departamentos y Partidos analizados (Fig. 8). Los Departamentos ubicados más al norte, principalmente Chapaleufú y Trenel, mostraron mayor variabilidad interanual en la serie de anegamiento comparado con los ubicados al sur (Toay y Capital). En los demás Departamentos y Partidos la variabilidad fue intermedia.

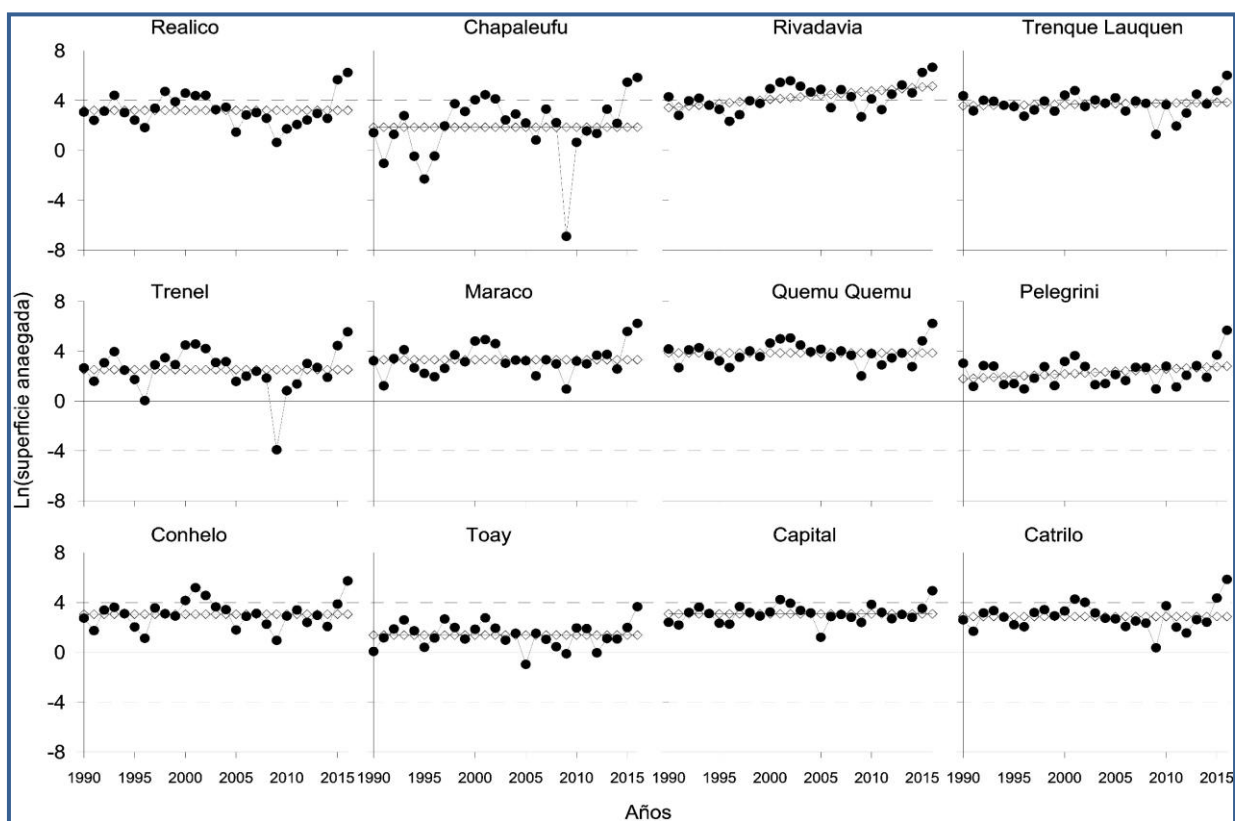


Figura 8. Análisis de tendencia temporal en Departamentos de La Pampa y Partidos de Provincia de Buenos Aires.

Se observó una alta correlación de las series temporales de inundación entre las unidades políticas vecinas con excepción del Partido de Pelegrini (Fig. 9). Los Departamentos Realicó, Chapaleufú, Trenel, Maracó, Quemú Quemú, Catriló y en menor medida Conhelo, mostraron alta intercorrelación, lo que implicaría una fuerte conexión hídrica. Estas unidades políticas conformarían aparentemente una red hidrológica que se diferenciaría de los Departamentos ubicados al SO (Capital y Toay) y de los Partidos del oeste de la provincia de Buenos Aires. Este patrón hidrológico se corresponde con los resultados de análisis de autocorrelación de las series de anegamiento (Fig. 10), que muestra ciclos de inundaciones y sequía similares en las unidades políticas ubicadas en el norte y centro incluido el Departamento Catriló, respecto de las ubicadas al sur.

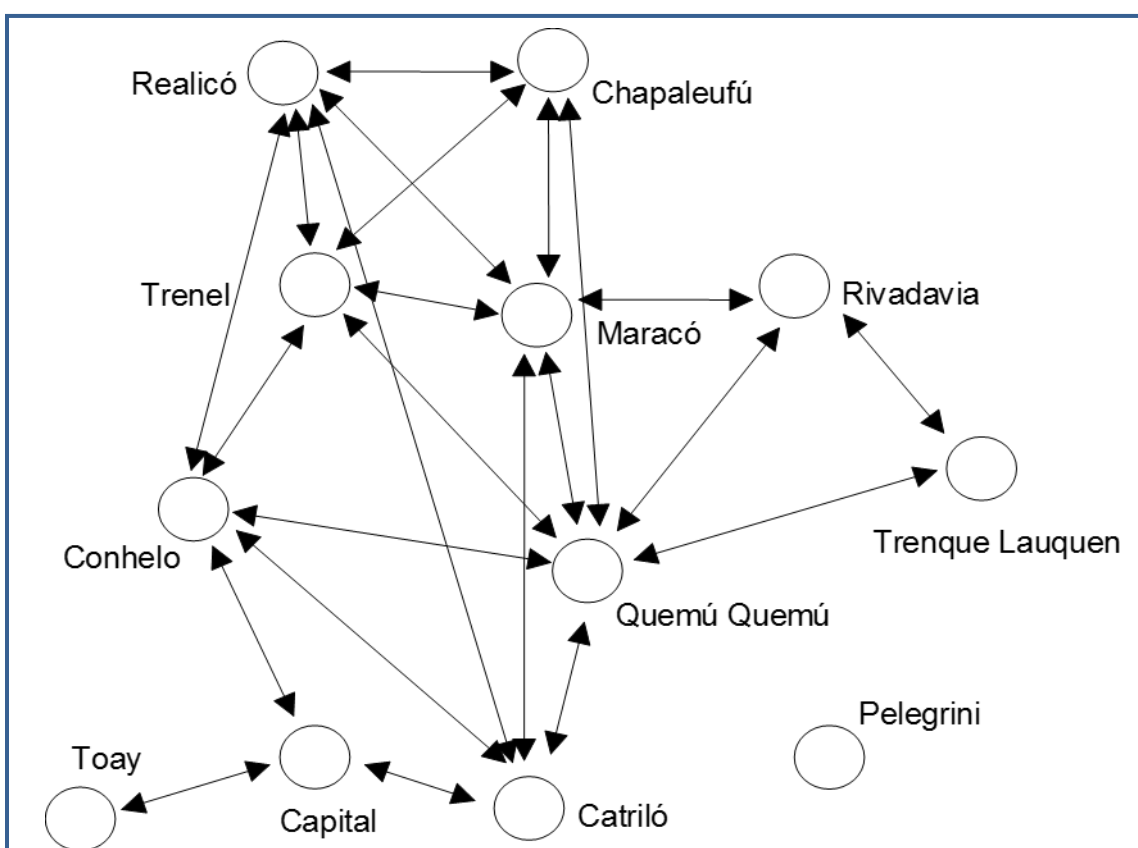


Figura 9. Intercorrelación entre las series de anegamiento entre unidades políticas. Las flechas indican las unidades políticas con correlaciones significativas y superiores o iguales a 0,8.

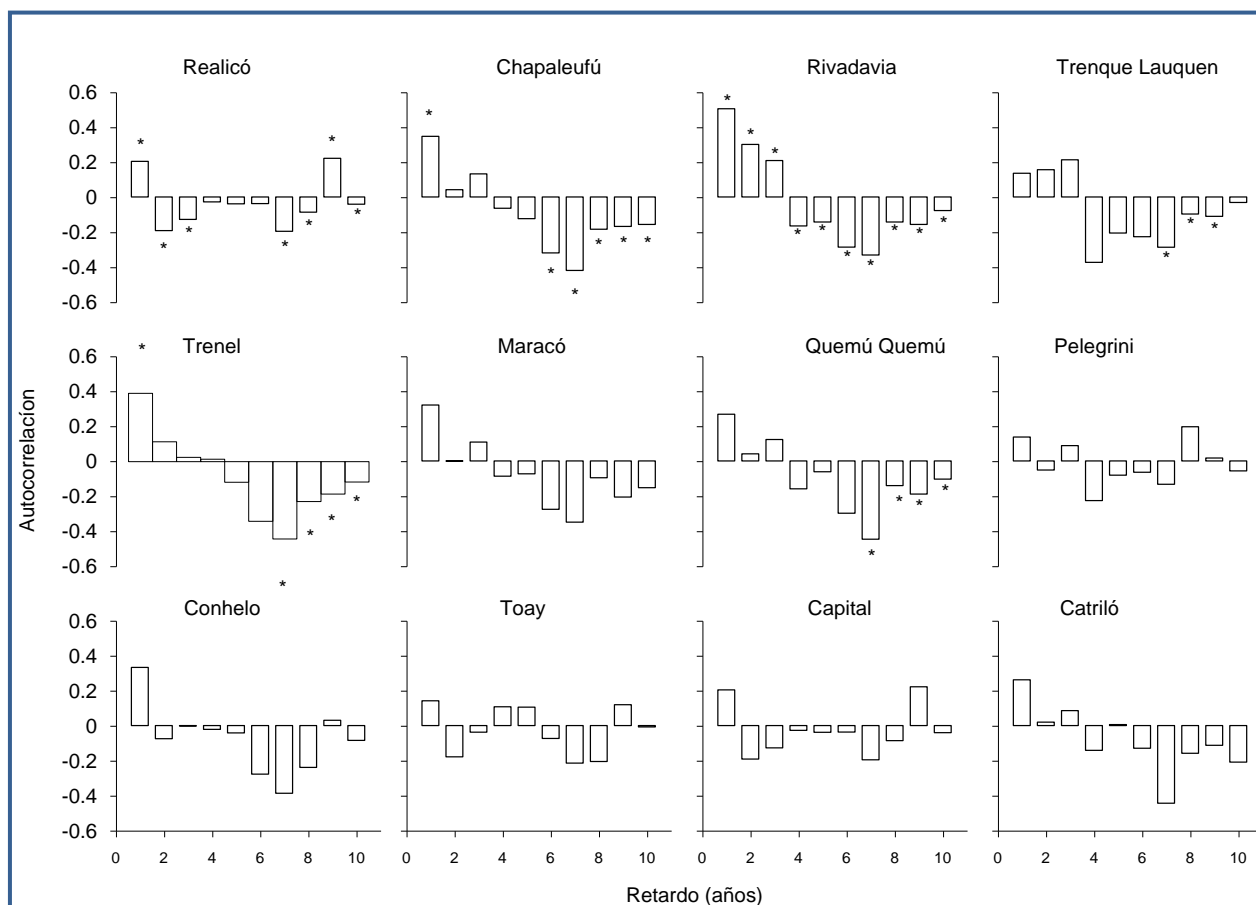


Figura 10. Correlograma de superficie anegada en los Departamentos y Partidos incluidos en el área de estudio.

2.1.3. *Cuencas hidrológicas.* La tendencia temporal de áreas anegadas en las 4 cuencas de la RSP mostraron tendencia positiva pero estadísticamente no significativa ($p > 0.05$). El patrón cíclico de anegamiento fue similar entre cuencas, pero en las del norte, este fue más contrastante en las cuencas 1 y 4 (Fig. 2 y Fig. 11).

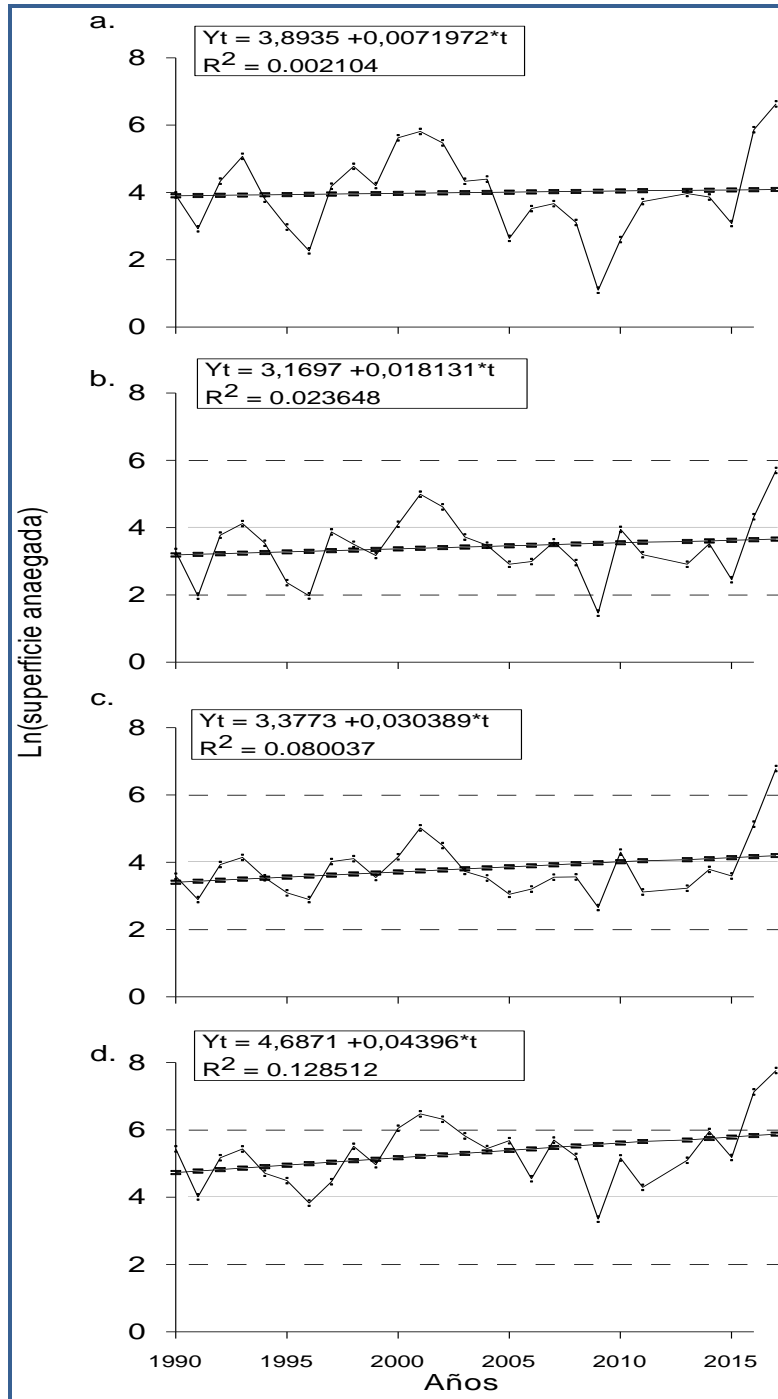


Figura 11. Análisis de tendencia temporal, correspondiente a las 4 cuencas hidrológicas. Las cuencas, 1 al 4, se representan en los gráficos a al c respectivamente.

2.2. Relación entre inundaciones y pluviometría local

El área inundada en la región de estudio tendió a aumentar con el incremento de la precipitación acumulada 6, 12 y 24 meses previos a la fecha de registro de cada imagen satelital, sin embargo la relación está altamente influenciada por la presencia de dos años anómalos, correspondientes al 2016 y 2017 (Fig. 12). Si se excluyen esos años (Fig. 13), se observa que la precipitación acumulada de 12 meses (Fig.13b) constituye la variable predictiva más adecuada para inferir el área anegada a través de un modelo lineal, en comparación con la acumulada de 6 meses (Fig. 13a). La relación entre área anegada y precipitación acumulada de 24 meses muestra un comportamiento tipo exponencial, con una relativa estabilidad del área inundada cuando el acumulado supera los 2000 mm (Fig. 13c).

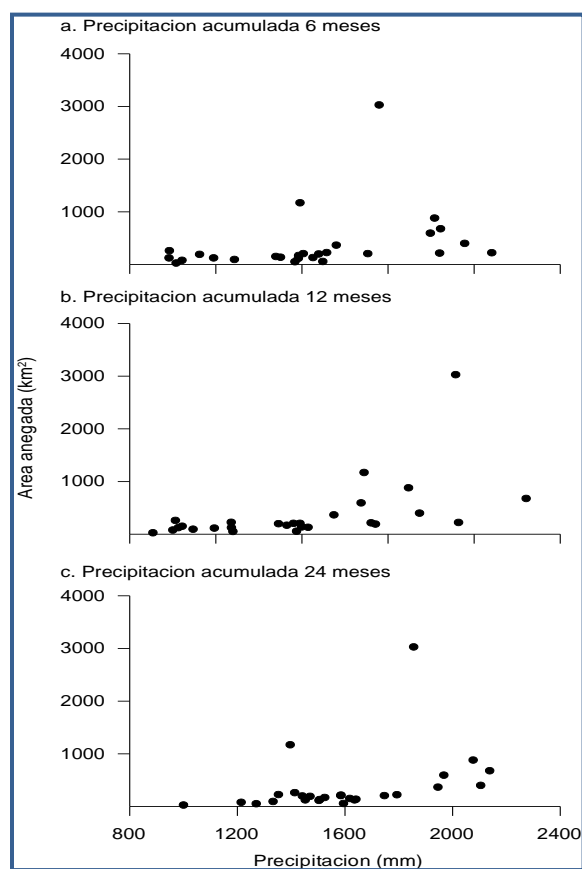


Figura 12. Relación entre área anegada y precipitación acumulada de 6 (a), 12 (b) y 24 (c) meses.

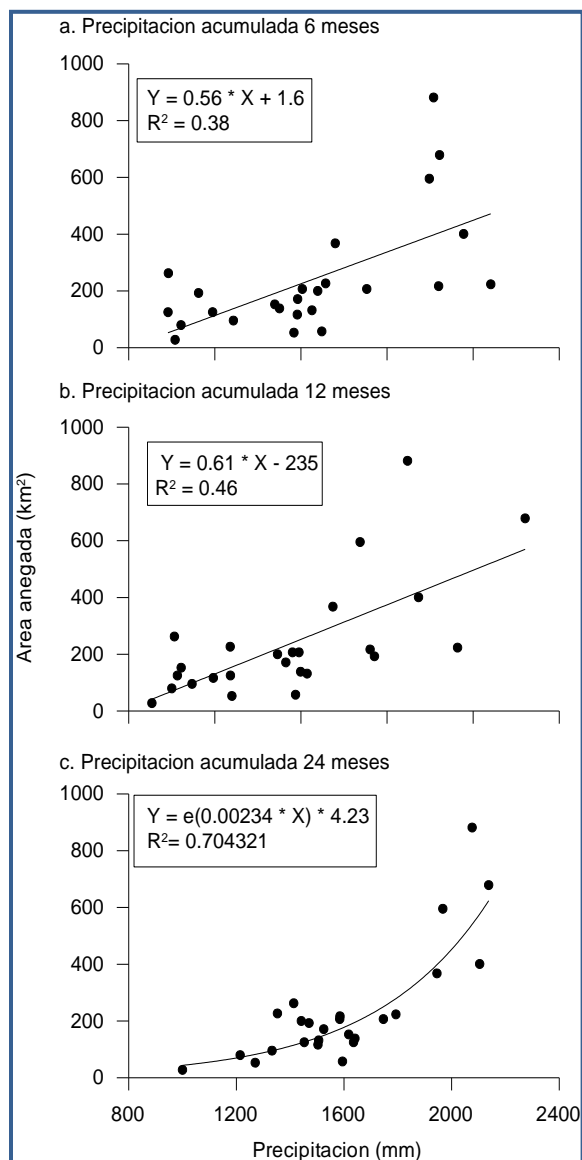


Figura 13. Relación entre área anegada y precipitación acumulada 6 (a), 12 (b) y 24 meses (c) sin considerar los años 2016 y 2017.

La relación entre precipitación acumulada y área anegada discriminada por cuenca hidrológica muestra la misma anomalía en los años 2016 y 2017 a la observada en la combinada para el área de estudio. Si se excluyen esos dos años, se observa que la acumulada de 12 meses es la que mejor se ajusta a un modelo lineal, sin embargo, el ajuste es bajo sobre todo en la cuenca 4

(Figs. 14 y 15). La precipitación acumulada de 6 meses muestra un ajuste menor y en algunos casos no se corresponde con un modelo lineal. El modelo de respuesta para la precipitación acumulada de 24 meses muestra en todas las cuencas, una tendencia a la estabilización del área anegada para valores altos de precipitaciones.

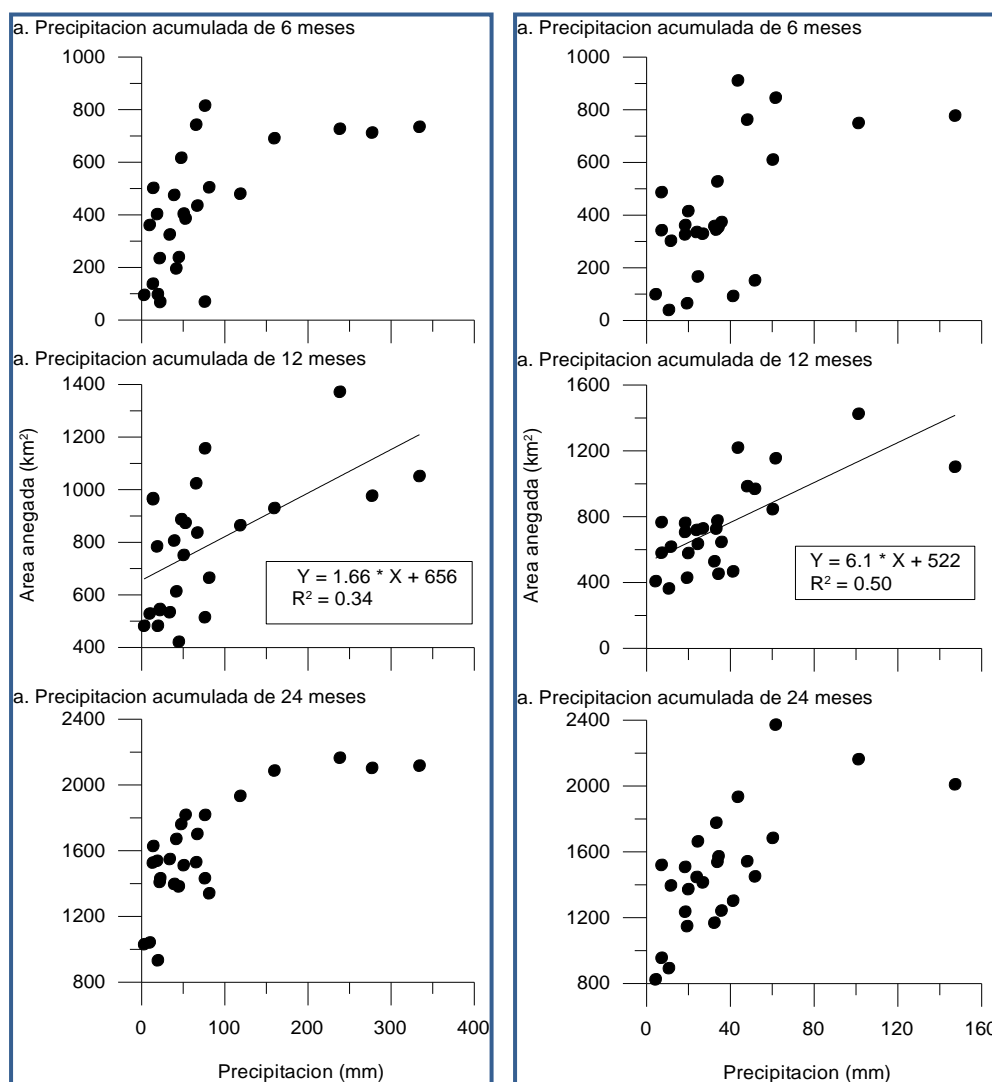


Figura 14. Relación entre área anegada y precipitación acumulada de 6, 12 y 24 meses para las cuencas hidrológicas 1 (izq.) y 2 (der), excluyendo los años 2016 y 2017.

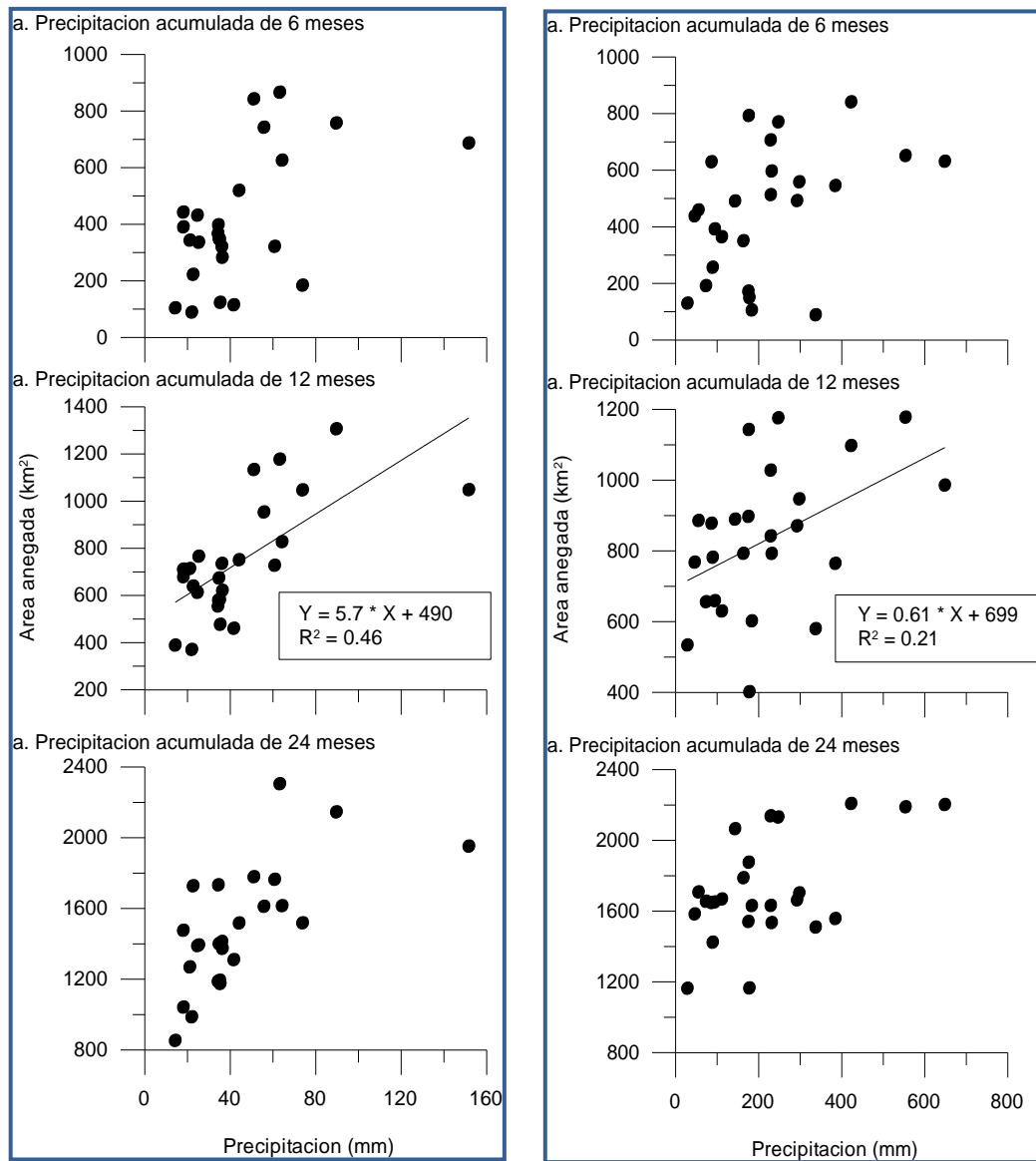


Figura 15. Relación entre área anegada y precipitación acumulada de 6, 12 y 24 meses, para las cuencas hidrológicas 3 (izq.) y 4 (der), excluyendo los años 2016 y 2017.

DISCUSIÓN

La reconstrucción del régimen de inundaciones se caracterizó por la alta variabilidad interanual en las áreas anegadas. Se destacaron las anomalías hídricas registradas en los años 2016 y 2017 ($> 16\%$ del área total) las cuales superaron de manera notable los registros observados en otros años. Se observó una tendencia cíclica de inundaciones con una recurrencia de aproximadamente 12 años, pero de corta duración (~ 2 años). Estas se alternaron con periodos en los cuales las superficies anegadas fueron muy bajas ($< 2\%$ del área total), más prolongados en el tiempo. Sin bien este patrón fue general para toda el área de estudio, las unidades políticas del norte y este de la provincia de La Pampa y el oeste de Buenos Aires mostraron mayores superficies anegadas y mayor correlación temporal en la dinámica hídrica. En La Pampa, se observó una alta interconexión hídrica entre los Departamentos de Realicó, Chapaleufú, Trenel, Maracó, Quemú Quemú, Catriló y en menor medida Conhelo. Este resultado confirma la presencia de una depresión topográfica natural localizada al oeste de la localidad de Quemú Quemú, hacia donde se han realizado trabajos de drenaje del agua en superficie (Jansen *et al.*, 2000).

La relación entre áreas anegadas y pluviometría guarda cierta correspondencia con un modelo lineal para precipitaciones acumuladas de 12 meses, siempre que se excluyan los años 2016-2017. Sin embargo, el modelo general para la región y los generados para las principales cuencas de drenaje sólo explican un porcentaje menor de la variabilidad observada ($> 50\%$), siempre que se excluyan de la serie de anegamiento los años 2016 y 2017. El bajo ajuste del modelo puede ser consecuencia de la complejidad del balance hídrico y la importancia que tienen otras variables climáticas, como temperatura ambiente e intensidad del viento en el control de la

evaporación del agua superficial. Sin embargo, la poca predictibilidad de los modelos estaría principalmente determinada por la existencia de fuentes de agua de origen externo a la región que contribuyen a la acumulación en superficie, como se discute más adelante. Por otra parte, es probable que la relación entre superficie anegada y precipitación acumulada de 12 meses se corresponda con un modelo exponencial negativo y no lineal, con un valor umbral de precipitación acumulada. Este tipo de modelo se observa claramente para precipitaciones locales acumuladas de 6 y 24 meses y parcialmente para las de 12 meses.

La importancia del aporte alógeno de agua a la región puede inferirse en base a: (1) la falta de relación entre precipitaciones y anegamientos observada en los años 2016 y 2017, (2) el bajo poder predictivo de los modelos de respuesta a la precipitación cuando se excluyen estos años (3) las respuestas tipo umbral entre anegamiento y precipitación acumulada. Es altamente probable que este aporte de agua corresponda al ingreso del caudal del Río Quinto en el sector norte de la RSP. Éste río con un régimen de alimentación pluvial, presenta escurrimientos intermitentes con periódicas crecientes excepcionales. Durante períodos húmedos el Río Quinto sobrepasa ampliamente los bañados en el sur de Córdoba conformando cauces pocos precisos (Dornes *et al.*, 2015), pudiendo existir una conexión hídrica con las superficies inundadas dentro del área de estudio. Los desbordes del Río Quinto han sido tema de controversias interjurisdiccionales entre las provincias afectadas.

De acuerdo a los resultados de este trabajo, el desarrollo de modelos predictivos de superficie inundada debería incluir como predictor la dinámica hídrica del Río Quinto, además del régimen de precipitaciones. En tal sentido, sería necesario considerar la interconexión entre el área anegada de la RSP con las precipitaciones ocurridas en las nacientes del Río Quinto en la provincia de San Luis. Otras variables explicativas importantes serían las relacionadas con las

modificaciones antrópicas, principalmente las que ocurrieron en los últimos años. Estas incluyen los cambios de uso de la tierra que produjeron el remplazo de vegetación leñosas por cultivos y la intensificación de la agricultura (Jensen *et al.*, 2000). Estos impactos ecológicos redujeron la eficiencia del uso del agua de la cobertura vegetal con el consiguiente aporte del exceso hídrico a las aguas subterráneas (Viglizzo *et al.*, 2011).

La serie temporal de áreas anegadas generada en este estudio permite visualizar la variabilidad del patrón espacio-temporal de la superficie anegada en la RSP. Esto determina numerosas dificultades en la implementación de medidas de mitigación. Si bien se han propuesto soluciones a escala regional, como fue en su momento la construcción de un sistema de canales (canal de los Daneses) que drenan el agua hacia la depresión del Departamento de Quemú Quemú. Más allá de que sólo se realizó una parte del proyecto original, es probable que esta obra resultaría insuficiente ante eventos extremos como el de la inundación del 2016 y 2017. Sería importante considerar el patrón espacial histórico de inundaciones para construir drenajes locales que permitan mitigar áreas del paisaje de mayor vulnerabilidad (poblaciones, rutas, etc.). Por otra parte, el manejo agronómico debería tener en cuenta las áreas con altas probabilidades de sufrir anegamientos con el fin de realizar manejos específicos preventivos y no actuar sobre hechos consumados.

CONCLUSIONES

La reconstrucción del patrón espacio-temporal de la superficie anegada en los últimos 27 años en la RSP permitió identificar el comportamiento cíclico de las inundaciones y la presencia de anomalías hídricas. La información generada en este estudio contribuye al desarrollo de

estrategias de mitigación y la toma de decisiones de manejo agronómico. El mapeo de áreas anegadas presentado en este trabajo aporta información valiosa sobre las áreas de paisaje de mayor vulnerabilidad a las anomalías hídricas. Estas anomalías no pudieron explicarse considerando como variable predictiva el régimen de precipitaciones. Para el desarrollo de modelos predictivos es necesario desarrollar modelos más complejas que incluyan entre otras variables el aporte alógeno de agua a la región.

BIBLIOGRAFÍA

Betelú M. 1999. Evaluación cuantitativa de áreas inundadas en la provincia de La Pampa, Dirección de Agricultura, Gobierno de La Pampa.

CARBAP. 2017. El impacto de las inundaciones en Buenos Aires y La Pampa. <http://www.carbap.org/sitio/imgotras/InundacioesAgosto2017.pdf> (acceso 10/2017)

Dornes PF, Mariño EE, Schulz CJ. 2015. Inventario de los recursos hídricos de la provincia de La Pampa. UNLPam-Consultora.

Instituto Nacional de Tecnología agropecuaria, Provincia de La Pampa, Universidad Nacional de La Pampa. 1980. Inventario Integrado de los Recursos Naturales. Buenos Aires. <https://recursosnaturales.lapampa.edu.ar/index2.html> (acceso 10/2017).

Jensen R., Marazzi M, Savioli J, Brea J, Tavecchio H. 2000. Diagnóstico de la situación de Inundación en la región noreste de la Provincia de La Pampa, Argentina. Informe final. <http://www.lapampa.gov.ar/images/stories/Archivos/RecursosHidricos/ReporteFinal.pdf> (acceso 10/2017).

Magrin, GO, Travasso, MI, López, GM, Rodríguez GR, Lloveras, AR. 2009. Vulnerabilidad de la producción agrícola en la Región Pampeana Argentina. 12da COMUNICACIÓN NACIONAL SOBRE EL CAMBIO CLIMATICO. <http://www.ecopuerto.com/Bicentenario/informes/VulnerabilidadProdAgr.pdf> (acceso 10/2017)

Taboada M, Damiano F, Lavado R. 2012. Inundaciones en la región pampeana. Consecuencias sobre los suelos. Fuente: FAUBA - INTA EEA Castelar. <https://docplayer.es/17260748-Inundaciones-en-la-region-pampeana-consecuencias-sobre-los-suelos.html> (acceso 10/2017)

Vergara G, Casagrande E, Sierra E, Pérez S, Brevedan E. 2005. Comportamiento de las precipitaciones (1991/2000) en el este de la provincia de La Pampa, Argentina. Rev. Fac. Agronomía. UNLPam 16: 3-13.

Viglizzo EF, Carreño L, Pereyra H, Ricard F, Clatt J, Pincén D. 2011. Dinámica de la frontera agropecuaria y cambio tecnológico. En: E. Viglizzo & E. Jobbágy (Eds.). Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico ambiental. Ediciones INTA pp 9-16.