

Influencia de las precipitaciones y los cambios en el uso del suelo sobre la frecuencia y extensión de anegamientos en la Cuenca del Río Salado

Rainfall influence and land use changes on the flooding frequency and extent in the Salado River Basin

^{1,2}Sofía Salese y ^{1,2}Bruno Lara,

¹Laboratorio de Biología Funcional y Biotecnología (BIOLAB-CICBA-INBIOTEC)

²CONICET, Facultad de Agronomía, UNCPBA

E mail: sofiasalese@azul.faa.unicen.edu.ar

Salese, S. y Lara, B. (2024). Influencia de las precipitaciones y los cambios en el uso del suelo sobre la frecuencia y extensión de anegamientos en la Cuenca del Río Salado. *Revista Estudios Ambientales*, 12 (1), 5-26.

Recibido: 22/12/2023 - **Aceptado:** 19/04/2024 - **Publicado:** 31/07/2024

RESUMEN

Este estudio aborda el aumento de las precipitaciones anuales y el reemplazo de pastizales naturales por cultivos anuales en paisajes llanos con deficiencias en el drenaje fluvial, factores que generan anegamientos prolongados afectando la economía local y regional en la cuenca del Río Salado. Durante 2001-2020, se emplearon imágenes satelitales Landsat en Google Earth Engine para determinar el área anegada. Se utilizaron estimaciones del IMERG para las precipitaciones anuales y datos del reemplazo de pastizales del proyecto MapBiomás Pampa. Se analizó la relación entre la evolución de las precipitaciones y el reemplazo de pastizales con la superficie anegada. Las precipitaciones anuales aumentaron con patrón oeste-este, afectando la cuenca de manera significativa. El reemplazo de pastizales por cultivos creció alarmantemente, alterando la hidrología debido a la escasa pendiente. Las precipitaciones anuales explicaron mejor el aumento del área anegada, seguido por el reemplazo de pastizales. Se evidenció una linealidad en el sistema hidrológico, donde la combinación de ambos factores resultó en un impacto mayor que cada uno por separado. La conjunción de factores climatológicos y antropogénicos contribuye a anegamientos frecuentes en sistemas llanos, donde las fuerzas de flujo vertical predominan y el nivel freático está cerca de la superficie. En resumen, este estudio

revela la interacción compleja entre cambios climáticos y actividades humanas, destacando la necesidad de gestionar adecuadamente el uso del suelo para mitigar los impactos de los anegamientos en la región.

PALABRAS CLAVE: anegamientos, ecosistemas llanos, precipitaciones anuales, cambio de usos del suelo, sensores remotos.

ABSTRACT

This study addresses the increase in annual precipitation and the replacement of natural grasslands by annual crops in flat landscapes with deficient fluvial drainage. These factors generate extended flooding which affects the local and regional economy in the Salado River basin. During 2001-2020, we used Landsat satellite images in Google Earth Engine to determine the flooded area and IMERG estimates for annual precipitation and grassland replacement data from the MapBiomass Pampa project. We analyzed the relationship between the evolution of precipitation and grassland replacement and the area flooded. Annual precipitation increased in a west-east pattern, affecting the watershed significantly. The replacement of grasslands by crops grew alarmingly, altering the hydrology due to the low slope. Annual precipitation best explained the increase in flooded areas, followed by grassland replacement. A linearity in the hydrological system was evidenced, where the combination of both factors resulted in a more significant impact than the impact caused by the factors separately. The conjunction of climatological and anthropogenic factors contributes to frequent flooding in flat systems, where vertical flow forces predominate and the water table is close to the surface. In summary, this study reveals the complex interaction between climatic changes and human activities, highlighting the need for proper land use management to mitigate the impacts of flooding in the region.

KEYWORDS: flooding, flat ecosystems, annual rainfall, land use change, remote sensing.

INTRODUCCIÓN

A escala global, el reemplazo, la modificación y/o la fragmentación de los pastizales naturales por la agricultura, la forestación, la invasión de especies exóticas, la modificación de los regímenes de incendios, el pastoreo y pisoteo por el ganado doméstico (Gibson, 2009), han desencadenado efectos independientes e interactivos sobre la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, que pueden impactar en la provisión de servicios ecosistémicos (SE) relevantes, especialmente en aquellos de regulación (Nosetto et al., 2015).

En los últimos años, la actividad humana ha puesto en riesgo la prestación de SE de los pastizales provocando impactos en el suelo, en el balance hidrológico y en la biodiversidad (Nosetto et al., 2015).

En paisajes sedimentarios hiperplanos, con pendiente regional menor a 0,1%, en donde las redes fluviales están poco desarrolladas y los flujos de agua verticales dominan sobre los horizontales, los resultados hidrológicos de los cambios de vegetación son menos evidentes y generalmente, según la bibliografía, mediada por el sistema de aguas subterráneas (Ameghino, 1884; Usunoff, 2009).

Actualmente, inmersos en un contexto consciente de la creciente variabilidad climática y de los SE en competencia, comprender el papel que cumple la vegetación en la topografía plana y la baja densidad fluvial de estos paisajes combinados con un clima subhúmedo, podrían definir el frágil equilibrio hidrológico existente; donde los años secos conducen a niveles freáticos profundos y secas, mientras que los excesos de agua se convierten fácilmente en prolongados episodios de inundación con lentas crecidas (Viglizzo y Frank, 2006; Aragón et al., 2010).

La retracción de los anegamientos principalmente es debido a la evaporación

directa de lagunas y cuerpos de agua esporádicos, la evaporación del suelo y la descarga transpiratoria de la vegetación cuando el nivel freático es lo suficientemente poco profundo como para ser alcanzadas por los sistemas de raíces (Aragón et al., 2010; Florio et al., 2014). Por lo tanto, la vegetación tiene un papel clave en la hidrología de estos paisajes, ya que puede afectar no sólo las tasas de recarga de aguas subterráneas (Kim y Jackson, 2012), como en la mayoría de los paisajes, sino también las tasas de descarga (Nosetto et al., 2007).

En muchas de las regiones del mundo de pastizales húmedos y subhúmedos de llanura, se comparte la misma característica ecohidrológica de poseer niveles freáticos cercanos a la superficie, lo que favorece la inundación por anegamiento cuando se acumulan excesos hídricos, provocando impactos considerables sobre la producción y la economía local y nacional (Centenera, 2017).

La hiperllanura Pampa Argentina posee un clima subhúmedo y se caracteriza por sus inundaciones recurrentes y episodios de sequía que han amenazado históricamente la producción agrícola y el bienestar social (Viglizzo y Frank, 2006). La expansión de los sistemas de producción de granos sobre sistemas mixtos implicó un reemplazo extensivo de pastos perennes, por cultivos anuales (Paruelo et al., 2006; Gibson, 2009). Es decir, que se ha registrado un fuerte aumento del área destinada a cultivos agrícolas anuales en detrimento de áreas destinadas a ganadería (Viglizzo et al., 2011; Baeza et al., 2022; Lara et al., 2020).

Dado que las condiciones que facilitan la recarga al acuífero son las altas precipitaciones, que han aumentado según los registros en los últimos 50 años (García et al., 2018), la baja pendiente, el suelo permeable y la abundante vegetación (Kroes et al., 2019), es esencial entender su comportamiento para

la gestión de estrategias que velen por la seguridad hídrica y ambiental en los sistemas hidrológicos no típicos. Según Pinilla et al. (2019), conservar las coberturas que no empobrezcan las propiedades físicas de los suelos juega un papel importante en la distribución del agua cuando ocurren eventos de excesos hídricos.

En el caso de la Cuenca del Río Salado, un área hiperllana inmersa en la Pampa Argentina, se reportan inundaciones y sequías recurrentemente, siendo los eventos de inundación más frecuentes durante la última parte del siglo XIX y comienzos del siglo XX (Seager et al., 2010).

Como se mencionó anteriormente, la fuerte impronta que tiene la vegetación en el balance hidrológico y el efecto que los cambios en el uso de la tierra pueden tener en los servicios hídricos de los ecosistemas, invitan a estudiarlos de manera retrospectiva y en consecuencia, evolutivamente. En relación a ello, cada vez es mayor el número de sistemas satelitales que observan la Tierra y hoy en día, los datos de sensores remotos se utilizan para la cartografía y el monitoreo de la cobertura terrestre. La combinación de datos ópticos de distintos sensores contribuye al seguimiento, caracterización y mapeo de las diferentes coberturas de la superficie terrestre (Antes et al., 2014). Respecto a la detección de cambios, la capacidad de diferenciación de imágenes, análisis de componentes principales y post-clasificación son los métodos más comunes utilizados (Lu et al., 2004). Según Antes et al. (2019), la aplicación de técnicas de teledetección en conjunto con SIG (Sistemas de Información Geográfica) para la identificación, estudio y análisis de los cambios de coberturas de suelo ha supuesto un importante avance para analizar determinada área de estudio. La interpretación y análisis de los productos de sensores remotos ha permitido realizar de manera más eficiente la planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de

proyectos optimizando el aprovechamiento de los recursos y su sostenibilidad (Antes et al., 2019). Por esta razón, el objetivo en el cual se enmarca este trabajo es analizar la relación entre los cambios en el registro de las precipitaciones anuales y el reemplazo de pastizales naturales durante el período 2001-2020, con la frecuencia, ocurrencia y extensión de anegamientos en la cuenca del Río Salado.

Área de estudio

La cuenca del Salado está ubicada en el centro-este de la Provincia de Buenos Aires, inmersa casi en su totalidad en el Complejo Ecosistémico de la Pampa Deprimida (subregión de la Pampa Húmeda) dentro de la Ecorregión Pampa (Matteucci, 2012). Abarca una superficie aproximada de 7,5 millones de ha y comprende 22 departamentos: General Lavalle, General Mar Madariaga, Mar chiquita, Ayacucho, Tordillo, Dolores, Rauch, Azul, Tapalqué, Alvear, Saladillo, Las Flores, Pila, General Guido, Castelli, Chascomús, General Belgrano, Magdalena, Punta Indio, Villa Gesell, Pinamar y La Costa (Figura 1; INTA, 2022).

Además de abarcar el Complejo Ecosistémico Pampa Deprimida también ocupa una pequeña porción de los Complejos Ecosistémicos Pampa Ondulada, Sierras Bonaerenses y Pampa Arenosa (Figura 2). Se trata de una depresión muy ancha y de muy escasa pendiente que oscila entre un 0,025% y 0,5%, lo cual dificulta el drenaje y promueve la generación de un sistema de tipo endorreico o arreico. Desde el punto de vista geomorfológico, posee una estructura en mosaico intrincado, caracterizada por pastizales y cuerpos de agua (temporarios y permanentes) que es consecuencia de la influencia topográfica de cubetas de deflación dejadas por los procesos eólicos que actuaron durante el paleoclima árido del Cuaternario (Matteucci, 2012).

De acuerdo a Matteucci (2012), el clima es templado subhúmedo, las temperaturas medias anuales varían entre 14-16 °C de sur a norte, las medias mensuales del mes más frío (Julio) varían entre 7 y 10 °C y las del mes más cálido entre 23 y 25 °C. Las heladas son frecuentes en invierno, hay un promedio de 200 días sin heladas y ningún año sin ellas. Las precipitaciones medias anuales varían entre 850 y 1000 mm de sur a norte. Las lluvias se distribuyen a lo largo de todo el año, frecuentemente con excesos de lluvia en invierno y déficit en verano, siendo de mayor intensidad durante el período primavera-estival (IHLLA, 2003). El balance hídrico anual no es homogéneo y los vientos predominantes son del norte y noreste y en menor medida del sudeste y sudoeste. En la región, predominan los suelos con horizontes A muy poco desarrollados, y horizontes B con signos de hidrohalomorfismo (Natracuales y Natracualfes) arcillosos, sódicos y cercanos a la superficie, por debajo de

este último horizonte es posible hallar un horizonte petrocálcico, también conocido como tosca. Su material parental corresponde a finos sedimentos de origen eólico (loess) que han sido depositados a finales del Pleistoceno y Holoceno. Como norma general, esta zona presenta planicies y microrrelieves conformados por pequeñas lomas y cubetas con un drenaje deficiente, en las cuales se acumula el agua proveniente de sectores más elevados; en este contexto es importante mencionar además, que la Pampa Deprimida, en conjunto con la Pampa Arenosa, son unas de las zonas con mayor riesgo de inundación (Matteucci, 2012; Kuppel et al. 2015). En la primera, que es de nuestro interés particular, se debe a que ocurren inundaciones rápidas impulsadas por la acumulación de agua durante semanas o meses. El agua es superficial y los niveles freáticos tienen una conexión limitada, por ende, la precipitación y la evapotranspiración están fuertemente vinculadas entre sí.

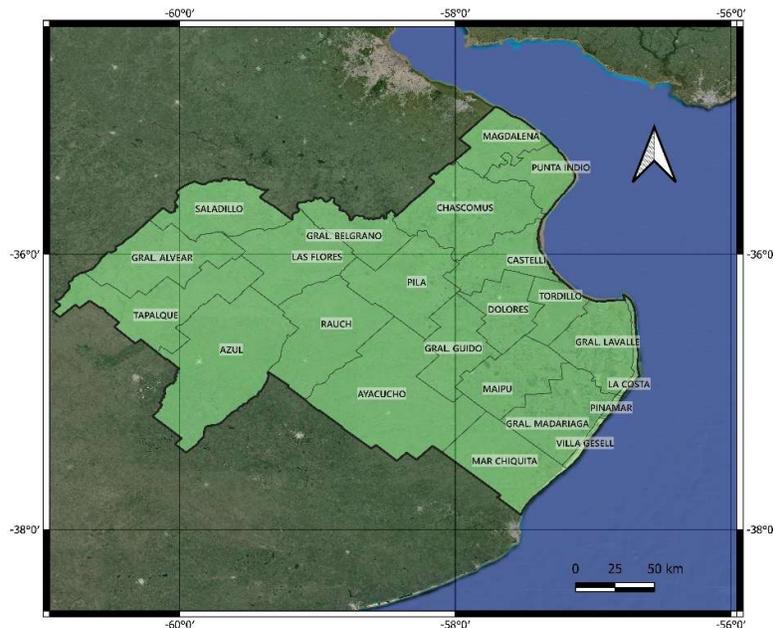


Figura 1. Partidos integrantes de la Cuenca del Salado.

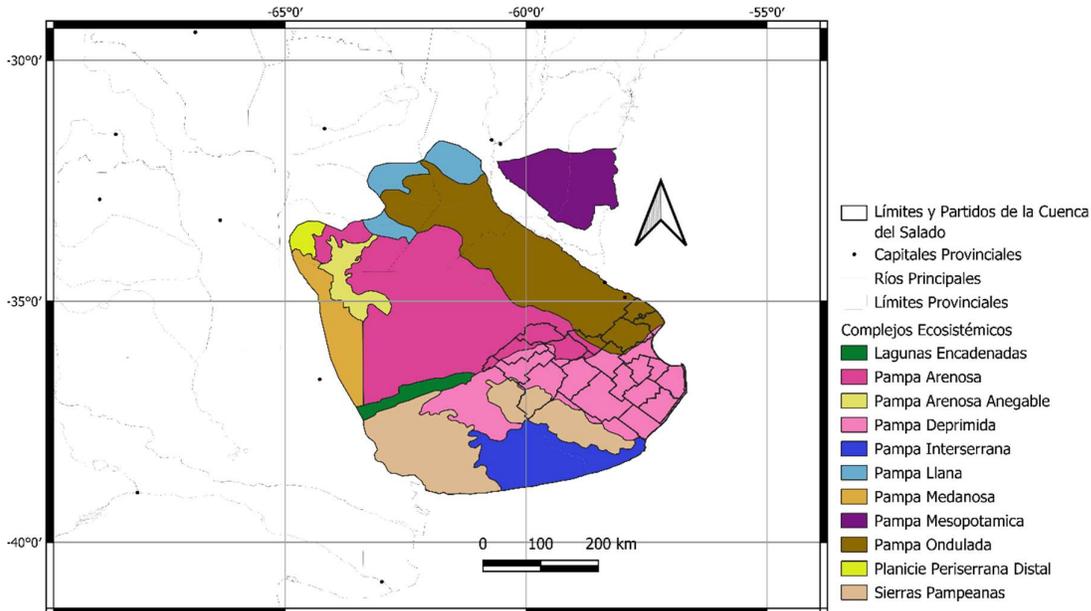


Figura 2. Ecorregión Pampa y sus Complejos Ecosistémicos según Matteucci (2012).

METODOLOGÍA

Evolución de los patrones de precipitaciones anuales en la Cuenca del Salado

Se utilizaron datos de estimaciones satelitales de precipitación mensual provistas por la NASA (the Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM –IMERG) para el período 2001-2020 del área de estudio en la plataforma Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017) para analizar la variación en los patrones de precipitaciones.

Para el período de estudio, se obtuvieron los datos de precipitación mensuales a partir de la colección de imágenes satelitales. Una vez recortado el producto satelital al área de estudio, se obtuvo la precipitación anual acumulada (mm/año), es decir, un total de 20 imágenes que se exportaron para realizar el análisis espacial con el software libre QGIS (QGIS Development Team, 2022).

Posteriormente, se calculó la precipitación media para el período 2001-2020 y la desviación estándar como una medida de variabilidad interanual. Derivado de los datos anuales se aplicó un modelo de regresión lineal para analizar la tendencia en los patrones de precipitación para el período estudiado. Los datos de precipitación, además, se utilizaron para identificar los períodos de extremos hídricos con condiciones de máximo anegamiento.

Caracterización de las coberturas y usos del suelo y sus principales cambios en el período 2001-2020

Para la caracterización de las coberturas y usos del suelo en la cuenca del Salado, se emplearon los productos elaborados por el proyecto MapBiomás Pampa (2022). Este proyecto se desprende de una iniciativa que envuelve a una red colaborativa de especialistas de Argentina, Brasil y Uruguay, en temas como uso del suelo, teledetección satelital, SIG y programación y busca entender los procesos de

transformación que ocurren en el territorio a partir del monitoreo anual de la cobertura y uso del suelo. Utiliza procesamiento en la nube y clasificadores automatizados desarrollados y operados desde la plataforma de Google Earth Engine para generar una serie histórica de mapas anuales de cobertura y uso del suelo del bioma Pampa Sudamericano, obteniendo mapas en formato ráster con píxeles de 30 m de resolución espacial con acceso libre y gratuito.

De tales productos, se identificaron y caracterizaron las distintas coberturas del suelo para el período 2001-2020, con el fin de obtener un total de 20 mapas. Los cambios de coberturas fueron evaluados mediante tabulación cruzada, en un análisis pixel a pixel, para obtener luego un mapa único que refleje los cambios de cobertura entre el momento inicial y final del período estudiado. Posteriormente, se estimó la superficie de pérdida de pastizales naturales con una periodicidad anual.

El análisis y procesamiento de los productos cartográficos de usos del suelo también se realizó en la plataforma Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017) y el análisis espacial se realizó con el software libre QGIS (QGIS Development Team, 2022).

Identificación de la ocurrencia, frecuencia y extensión de los anegamientos en la Cuenca del Salado

Para la identificación de las áreas anegadas, se utilizaron imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8 de acuerdo al período específico analizado: para los años 2001 y 2002, Landsat 7; para el período 2003-2012, Landsat 5; para el período 2013-2020, Landsat 8. Para cada uno de los años, se seleccionaron las imágenes del período abril-julio debido a que coinciden con los períodos de menor evapotranspiración (Pinilla et al., 2019), principal proceso que controla la salida del agua de estos sistemas. En primer lugar, se aplicó a la serie de imágenes una

función para enmascarar nubes y sombra de nubes basada en la banda de calidad brindada por los datos Landsat (banda QA). A partir de ellas, se realizó la identificación de las áreas anegadas mediante un índice espectral derivado para evaluar su comportamiento en el área de estudio:

$$\text{NDWI}_{\text{Gao}} \text{ (Índice de agua de diferencia normalizada -Gao, 1996-)} \\ \text{NDWI}_{\text{Gao}} = \frac{\text{IRC} - \text{IRM}}{\text{IRC} + \text{IRM}}$$

Donde *IRC* representa a la banda del infrarrojo cercano (banda 4 para Landsat 5 y 7, banda 5 para Landsat 8) y *IRM* al infrarrojo de onda corta o infrarrojo medio (banda 5 para Landsat 5 y 7, banda 6 para Landsat 8).

El rango del índice está normalizado entre los valores -1 y 1 (Passucci et al., 2017) y expresa el contenido de humedad. Su uso principal es detectar y controlar los cambios leves en la cantidad de agua en la superficie. Más allá del espectro visible, hacia el infrarrojo, el agua no refleja prácticamente nada de luz. El NDWI aprovecha esta propiedad para identificar con éxito las masas de agua en el mapa y controlar la turbiedad del agua; el NDWI_{Gao} resulta efectivo para resaltar la presencia de agua y el comportamiento de los cuerpos de agua y las áreas anegadas.

Una vez aplicado el NDWI a cada imagen que formó parte del análisis, se calculó la mediana y sobre ella se aplicó un valor umbral de 0,35 para binarizar las imágenes. Dicha binarización consistió en destacar las zonas anegadas asignándole valor de 1, de las no anegadas con valor 0. La aplicación del umbral fue necesaria para determinar con mayor precisión las áreas anegadas.

Una vez que se obtuvieron los mapas binarizados de las dos décadas seleccionadas, se realizó un nuevo mapa en la plataforma QGIS superponiendo los mapas anuales de identificación de área anegada para observar la frecuencia de anegamiento, es decir, la cantidad de

veces (en este caso, años) que un determinado pixel es clasificado como anegado del total de imágenes analizadas en el período global. Así, se estimó la frecuencia de anegamiento mediante un análisis pixel a pixel.

Análisis de la evolución espacio-temporal de los anegamientos en la Cuenca del Salado y su relación con la pérdida de pastizales naturales y la variación de los patrones de precipitaciones

Mediante una función de impacto (*fi*) se analizó la relación existente entre la pérdida de superficie de pastizales naturales y la extensión superficial de áreas anegadas en el área de estudio. La *fi* consiste en averiguar la relación cuantitativa y/o cualitativa del vínculo de interés que se pretende estudiar, entre el nivel de oferta de un servicio ecosistémico (SE) como en este caso es la regulación de los anegamientos realizada por los pastizales naturales (Nossetto et al., 2015) y que pueden ser también variables o funciones y, un factor de estrés o perturbación asociado al uso del territorio como los cambios en el uso del suelo con fines agrícolas en este caso; pudiendo ser una alteración en la estructura o función del paisaje. Estas funciones deben describir cómo varía la oferta de un SE a través de un gradiente de intensidad en el uso de recursos determinado por una o varias actividades (Paruelo & Laterra, 2019). En detalle, en esta instancia se representará el efecto del reemplazo anual de pastizales naturales en la superficie o cantidad de agua anegada. Cabe aclarar que las precipitaciones no forman parte de esta *fi* porque no son antropogénicas, aunque podría inferirse que tiene implicancias antrópicas el cambio climático que causa una mayor intensidad de precipitaciones. En cambio, el uso del

suelo si corresponde a una actividad antrópica directa. Por esta razón, se analiza tal *fi*, ya que cambia la capacidad de regulación de los anegamientos, evidenciándolo como un aumento del área anegada.

La frecuencia de anegamientos a nivel de pixel también fue evaluada en función del reemplazo de pastizales naturales. De esta manera, esta metodología permitió estimar el grado de influencia de los cambios en el uso del suelo y, particularmente, el reemplazo de pastizales naturales sobre los anegamientos en la Cuenca del Salado.

Por otro lado, se analizó la relación, mediante un análisis de regresión lineal, entre la superficie anegada y los patrones de precipitación anual estimados para la Cuenca del Salado.

Por último, mediante un análisis de regresión lineal múltiple, se analizó cómo actúan las variables independientes (precipitaciones medias anuales y reemplazo de pastizales naturales) en relación a la variable dependiente (área anegada), para luego poder analizar su comportamiento actuando de modo sinérgico.

RESULTADOS

Evolución de los patrones de precipitaciones anuales en la Cuenca del Salado

Los datos de precipitaciones anuales para la Cuenca del Salado mostraron gran variabilidad a lo largo del período estudiado (Figura 3). La precipitación media anual para el período 2001-2020 osciló entre 958 mm y 1.461 mm (Figura 4a) con un claro patrón oeste-este y el desvío estándar entre 210 mm y 270 mm (Figura 4 b, c).

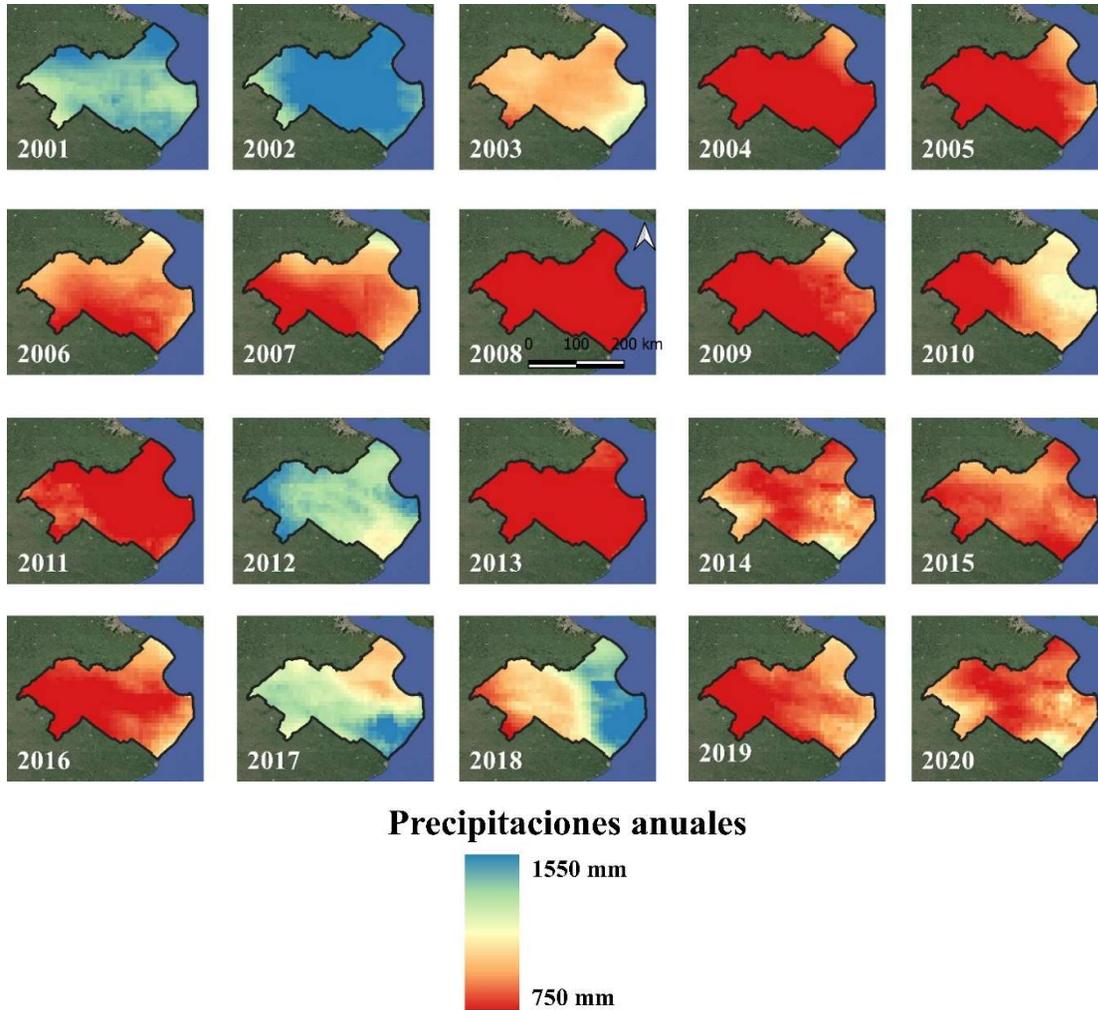


Figura 3. Precipitaciones anuales (mm/año) en el período 2001-2020 en la Cuenca del Salado.

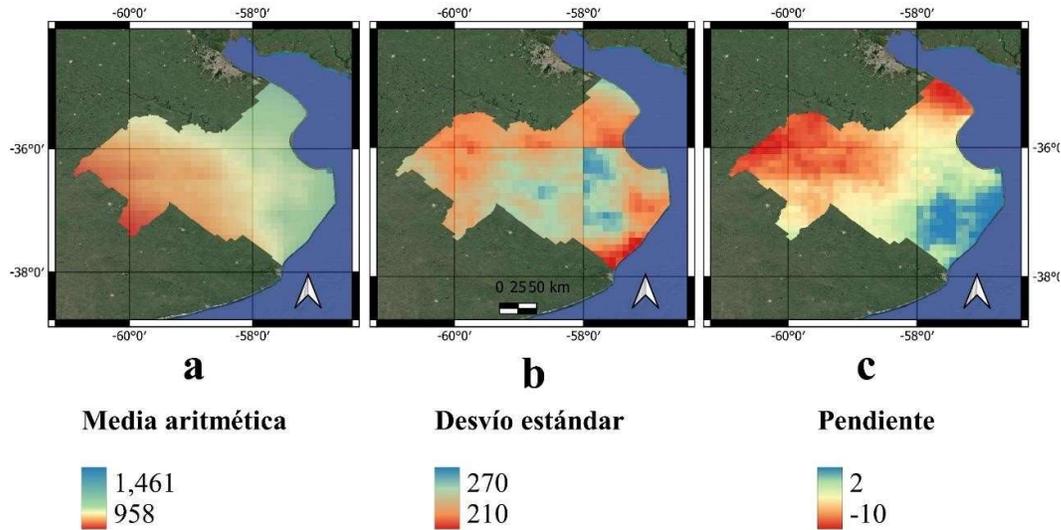


Figura 4. a) Precipitación media para el período 2001-2020, b) desvío estándar de las precipitaciones y, c) pendiente para el período 2001-2020, en la Cuenca del Salado.

Caracterización de las coberturas y usos del suelo y sus principales cambios en el período 2001-2020

En el área de estudio, el principal proceso de cambio de cobertura y uso del suelo durante el período 2001-2020 está relacionado con el reemplazo de pastizales naturales a áreas agrícolas (Figura 5). Un total de 327.592,9 ha de pastizal natural fueron transformadas en área agrícola sin un patrón espacial

característico, aunque algo más concentrado en el sector oeste de la Cuenca del Salado. Al mismo tiempo, la evolución de la superficie de pastizales naturales respondió a un patrón descendente que se mantuvo en todo el período de estudio, mientras que la evolución de la superficie agrícola, aunque con algunos picos descendentes en los años 2005 y 2013, respondió ascendentemente (Figura 6).

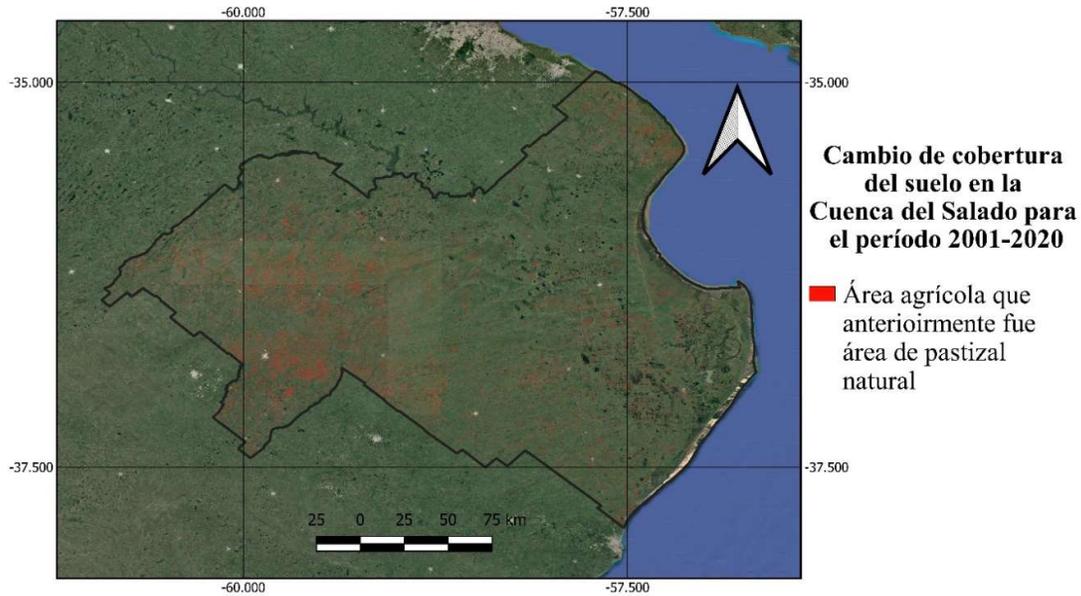


Figura 5. Cambio de cobertura de pastizal natural a área agrícola en el período 2001-2020 en la Cuenca del Salado.

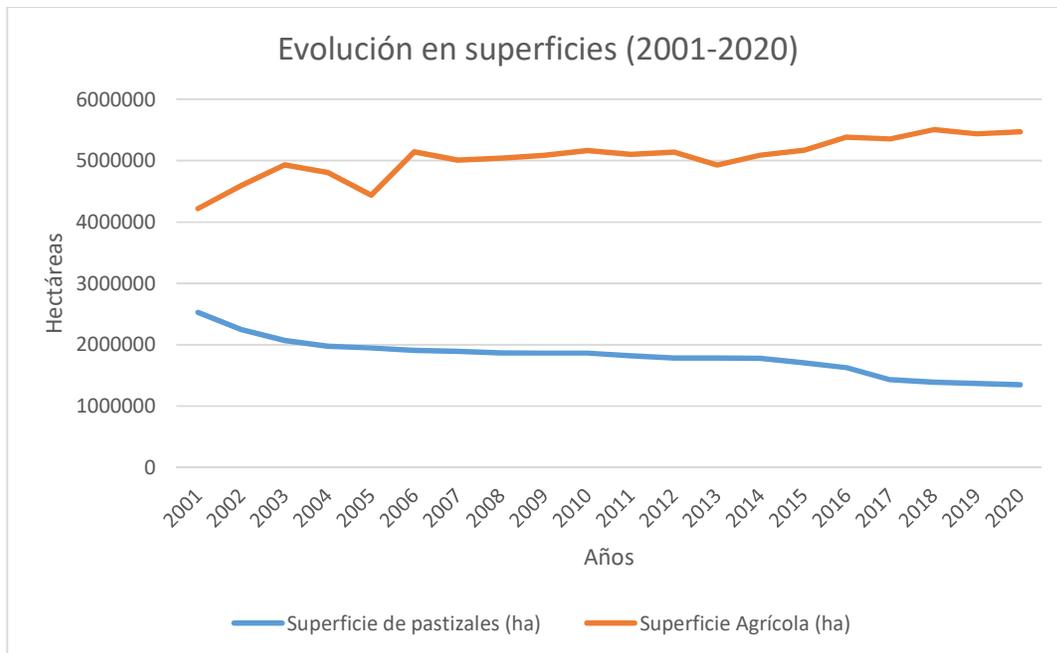


Figura 6. Evolución de las superficies agrícolas y de pastizales naturales en el período 2001-2020 en la Cuenca del Salado

Identificación de la ocurrencia, frecuencia y extensión de los anegamientos en la Cuenca del Salado

La aplicación del NDWI de Gao (1996) resultó adecuado al discriminar las áreas anegadas en la región ya que el agua representa baja reflectividad, especialmente en las bandas del infrarrojo cercano y medio (Bustamante, 2005; Salese & Lara, 2022), pudiendo identificar con certeza las áreas anegadas.

Los resultados mostraron diferentes patrones espaciales a lo largo del período analizado (Figura 7). Los años de mayores

anegamientos fueron el 2002 y el 2014 con 2.065.999,7 ha y 1.607.472,5 ha, respectivamente, mientras que los años 2005 y 2011 fueron de menor superficie anegada con 123.763,8 ha y 66.876,4 ha, respectivamente. La frecuencia de anegamiento, es decir, la cantidad de años que un determinado pixel estuvo anegado, varió espacialmente. Un 52,6% de la cuenca estuvo anegada al menos una vez en estos últimos 20 años, donde la frecuencia de 1 a 3 años representa el 79,3% de esa área anegada (Tabla 1; Figura 8).

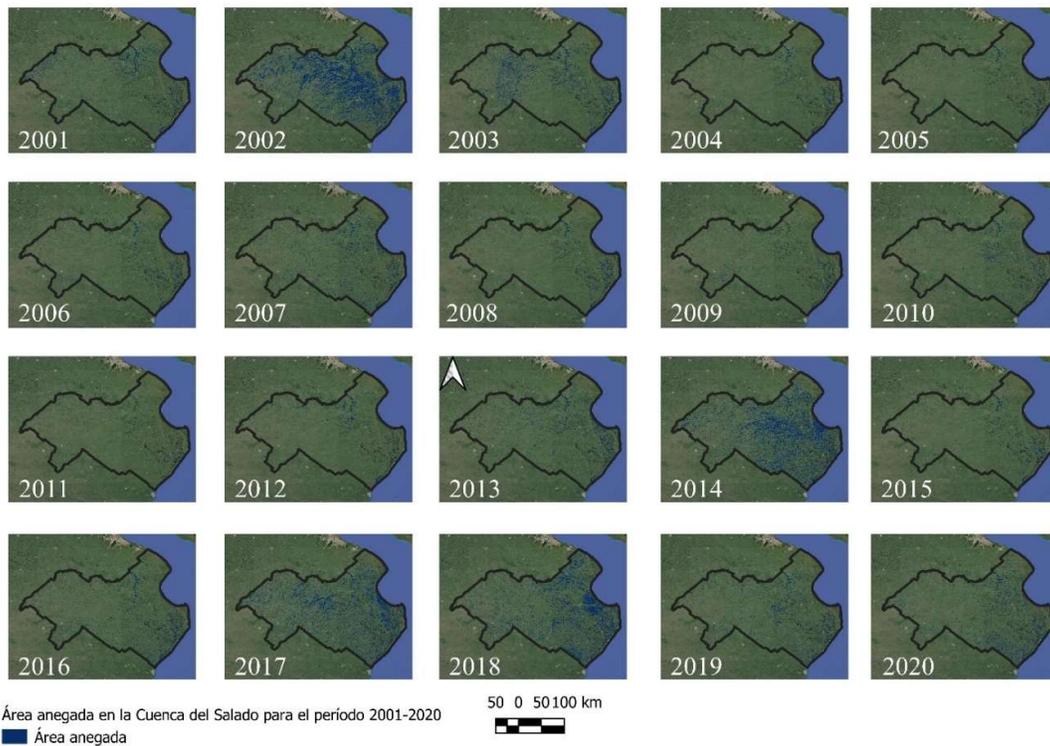


Figura 7. Representación del área anegada a través de la aplicación del NDWI (Gao, 1996) en la Cuenca del Río Salado para el período 2001-2020.

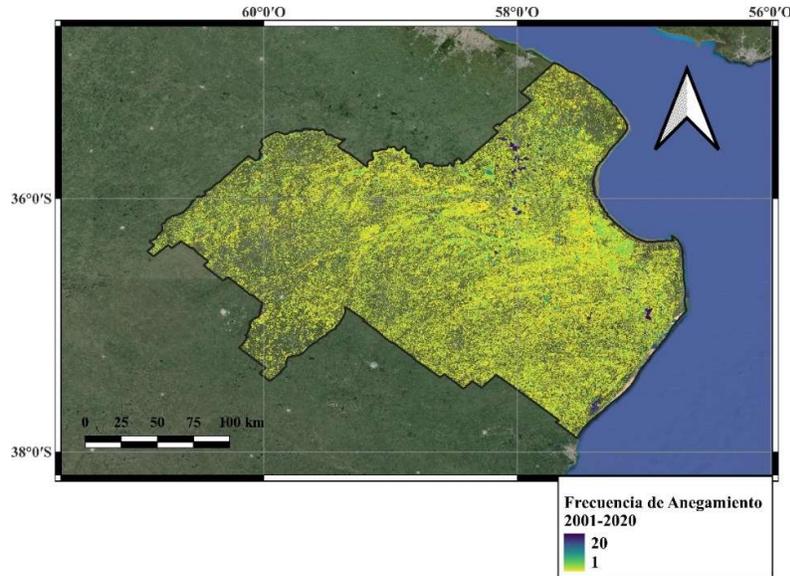


Figura 8. Frecuencia de anegamiento para la Cuenca del Salado en el período 2001-2020.

Tabla 1. Frecuencia de anegamientos en la Cuenca del Salado, área afectada y sus porcentajes relativos y absolutos. Se puede observar como la frecuencia de 1 a 3 años representa casi el 80% de los datos.

Frecuencia de anegamientos (años)	Área anegada (ha)	Área Anegada Relativa (%)	Área Anegada Acumulada (%)
1	1742916,7	41,7	41,7
2	984175,8	23,5	65,2
3	590354,0	14,1	79,3
4	321901,3	7,7	87,0
5	174779,4	4,2	91,2
6	99397,7	2,4	93,5
7	59949,6	1,4	95,0
8	39551,0	0,9	95,9
9	27449,4	0,7	96,6
10	20741,9	0,5	97,1
11	16775,5	0,4	97,5
12	14130,2	0,3	97,8
13	12440,7	0,3	98,1
14	11489,3	0,3	98,4
15	11500,6	0,3	98,6
16	12660,5	0,3	98,9
17	14831,2	0,4	99,3
18	17169,7	0,4	99,7
19	9627,4	0,2	99,9
20	2403,5	0,1	100

Análisis de la evolución espacio-temporal de los anegamientos en la Cuenca del Salado y su relación con la pérdida de pastizales naturales anuales y la variación en las precipitaciones anuales

Al analizar las relaciones de las áreas de cambio de uso del suelo con la frecuencia de anegamientos en la región, se encontró que el 92,1% estuvo anegado en una frecuencia de 1 a 3 años principalmente los últimos años, es decir, que anteriormente no formaban parte de áreas anegables.

La superficie de anegamiento y las precipitaciones anuales mostraron una alta correlación ($r = 0,75$). Las precipitaciones anuales explicaron el 56,2% de la variación total del área anegada en la Cuenca del Salado ($r^2 = 0,562$; $p < 0,0001$). Esta correlación positiva entre estas dos variables indica un aumento de la superficie anegada en la Cuenca del Salado con un aumento en las precipitaciones anuales (Figura 9, Tabla 2).

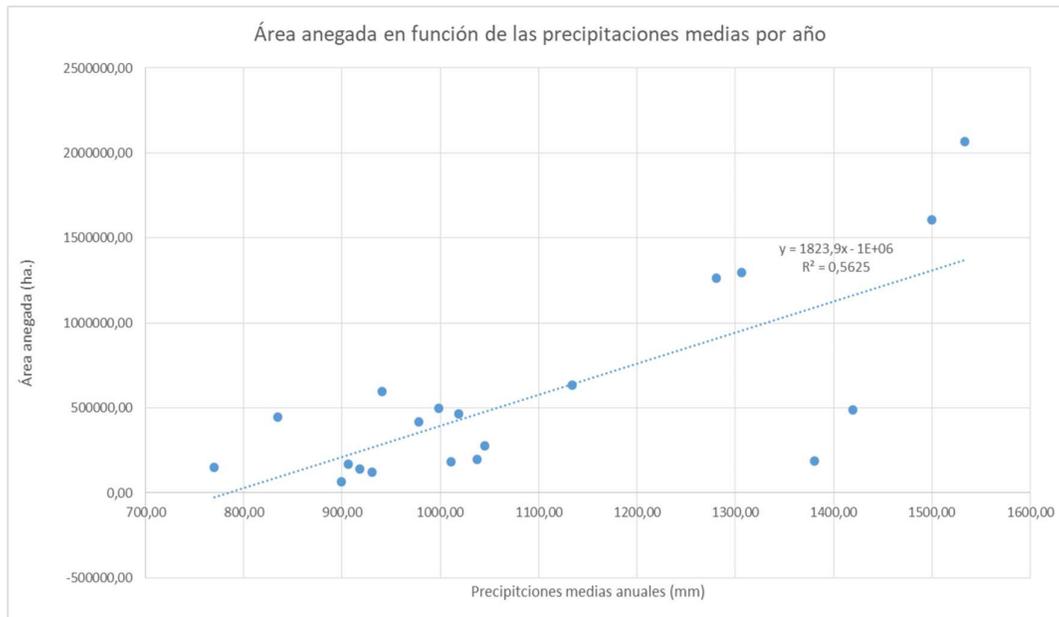


Figura 9. Regresión lineal entre la variable independiente precipitaciones medias anuales (mm) y la variable dependiente área anegada (ha) para el período 2001-2020 en la Cuenca del Salado.

Tabla 2. Análisis de varianza para el área anegada en función de las precipitaciones medias anuales en el período 2001-2020 en la Cuenca del Salado.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3.307.482.476.850,03	1	3.307.482.476.850,03	23,15	0,0001
Precipitación anual media	3.307.482.476.850,03	1	3.307.482.476.850,03	23,15	0,0001
Error	2.572.147.494.802,53	18	142.897.083.044,59		
Total	5.879.629.971.652,56	19			

Por otro lado, la superficie de anegamiento y el reemplazo anual de pastizales naturales también mostró una correlación positiva ($r = 0,58$), lo que indica que un aumento en el cambio de uso del suelo, particularmente el reemplazo de pastizales naturales, está relacionado con un

aumento del área anegada en la Cuenca del Salado. La pérdida anual de áreas de pastizal natural explicó el 33,3% de la variación total de la superficie de anegamiento en el área de estudio ($r^2 = 0,333$; $p < 0,0078$; Figura 10, Tabla 3).

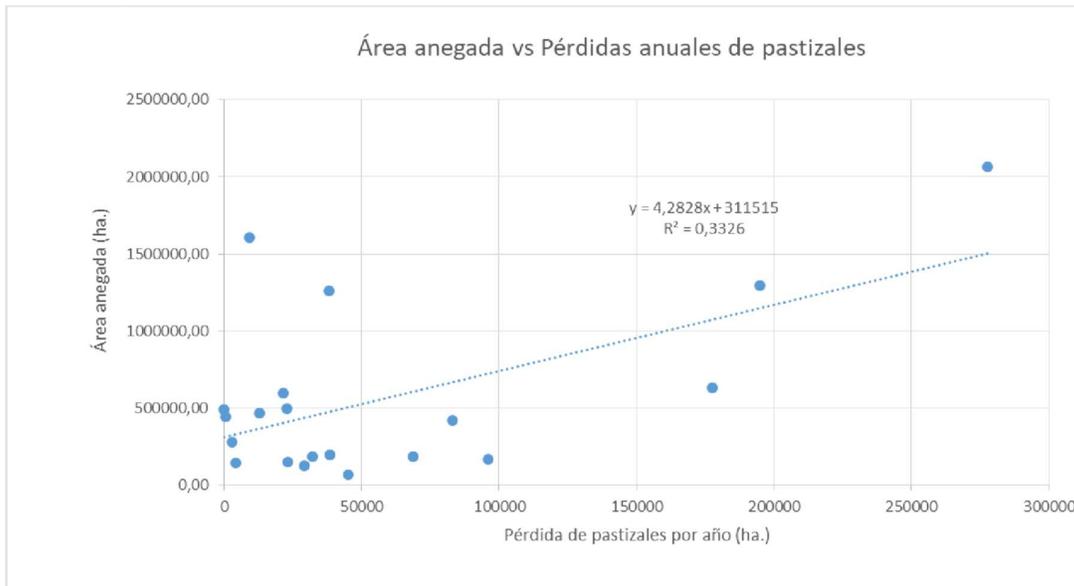


Figura 10. Regresión lineal entre la variable independiente pérdida de pastizales anuales (ha) y la variable dependiente área anegada (ha) para el período 2001-2020 en la Cuenca del Salado.

Tabla 3. Análisis de varianza para el área anegada en función de la pérdida de pastizales anuales en el período 2001-2020 en la Cuenca del Salado.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)				
F.V.	SC	gl	CM	F
-Valor				
Modelo	1.955.748.866.549,99	1	1.955.748.866.549,99	8,97
0,0078				
Pérdida Anual pastizales	1.955.748.866.549,99	1	1.955.748.866.549,99	8,97
0,0078				
Error	3.923.881.105.102,57	18	217.993.394.727,92	
Total	5.879.629.971.652,56	19		

La combinación de ambos efectos, explicó un 66% de la variación total del área anegada (Tabla 4). Estos efectos aparentemente independientes, en

realidad es probable que funcionen de modo sinérgico, aumentando el efecto del otro.

Tabla 4. Regresión lineal múltiple.

Análisis de regresión lineal							
Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC	
Área anegada	20	0,66	0,62	199.557.899.550,72	571,57	575,55	
Selección Stepwise. Máximo p-valor para entrar: 0,15. Máximo p-valor para retener: 0,15							
Número original de regresoras: 2, regresoras retenidas en el modelo 2							
Coeficientes de regresión y estadísticas asociados							
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallow
IF							
const	-1.224.672,13	397.184,25	-2.062.657,61	-386.686,65	-3,08	0,0067	
Precipitaciones medias anuales	1.504,61	376,71	709,83	2.299,40	3,99	0,0009	16,95
Pérdida de pastizales anuales	2,47	1,15	0,04	4,89	2,14	0,0467	5,60

Error cuadrático medio: 119.075.849.064,515900

DISCUSIÓN

Evolución de los patrones de precipitaciones anuales en la Cuenca del Salado

A diferencia de lo encontrado por García et al. (2018), quien analizó la evolución de las precipitaciones en un período de 93 años, partiendo desde el año 1911 al 2004, la tendencia en las precipitaciones no presentó un aumento significativo en la región, solamente se apreció una tendencia positiva alrededor de 2 mm/año situado en el sector sudeste (Figura 4c). Diversos autores Haylock et al. (2000) y Vargas et al. (2002) coinciden con García et al. (2018), postulando que desde 1970 se ha observado un aumento sostenido en las precipitaciones anuales. En este caso, particularmente en la Cuenca del Salado, los datos demuestran que el aumento es notorio en una serie de al menos 50 años, pero en estos últimos 20, no se observaron aumentos significativos.

Caracterización de las coberturas y usos del suelo y sus principales cambios en el período 2001-2020

Estos resultados reflejan el proceso de agriculturización al que está sometida la región pampeana, lo cual es coincidente con trabajos previos (Baeza y Paruelo, 2020; Guerschman et al., 2003; Lara et al., 2018, 2020). Incluso es un proceso que es anterior al período de estudio (Matteucci, 2012), pero que llamativamente se ha extendido significativamente a la Cuenca del Salado, una región que presenta serias limitaciones para la actividad agrícola (Gandini et al., 2019; Lara y Gandini, 2014). Esta información coincide también con que en las últimas décadas los cultivos se han expandido a lo largo de la llanura pampeana, desplazando pastizales y pasturas (Navarrete et al., 2009; Nosetto et al., 2015).

Identificación de la ocurrencia, frecuencia y extensión de los anegamientos en la Cuenca del Salado

Respecto al área anegada, Vázquez et al. (2009) y Passucci et al. (2017) encontraron valores relativamente semejantes a los

aquí obtenidos, pese a trabajar en un rango temporal y espacial diferente.

Análisis de la evolución espacio-temporal de los anegamientos en la Cuenca del Salado y su relación con la pérdida de pastizales naturales anuales y la variación en las precipitaciones anuales

Las intervenciones humanas para el aprovechamiento productivo de los ecosistemas, alteran la capacidad de éstos para ofrecer servicios (Paruelo & Laterra, 2019). Los resultados ponen de manifiesto que, además del factor de las precipitaciones, el cambio de uso del suelo por su efecto sobre la cobertura vegetal cumple un rol altamente significativo tal como propone Nosetto et al. (2015).

Siguiendo esta línea, García et al. (2018) encontraron que el aumento de las precipitaciones es el fenómeno que explica en mayor medida el incremento observado en los niveles freáticos, pero que la vegetación también juega un rol altamente significativo. Por lo tanto, si se considera que el ascenso de los niveles freáticos es clave para la generación de anegamientos en la Cuenca del Salado, los resultados encontrados en este trabajo son comparables ya que el aumento de las precipitaciones fue quien mostró un efecto de mayor importancia en la superficie anegada, pero que el cambio de uso del suelo, particularmente el reemplazo de pastizales naturales por el uso agrícola también tuvo un impacto significativo en la generación de anegamientos, tal como lo ha demostrado Pinilla et al. (2019) al modificar el proceso de evapotranspiración.

Tanto las precipitaciones como el cambio de uso del suelo en la región tienen efectos sobre la superficie anegada. Estos efectos aparentemente independientes, en realidad es probable que funcionen de modo sinérgico, aumentando el efecto del otro. En este sentido, se conoce que el reemplazo de áreas de pastizal natural por cultivos disminuye el potencial de evapotranspiración (Nosetto et al., 2015) lo

que provoca un ascenso del nivel freático y, de esta manera, el aumento de las precipitaciones podría generar mayores impactos en los patrones de anegamientos.

Sin dudas, la incorporación de simulaciones y modelado hidrológico podría aportar mayores evidencias sobre distintos parámetros del balance hidrológico (García et al., 2018; Pinilla et al., 2019) ya que existen trabajos precedentes que, a partir del análisis de observaciones históricas y modelación hidrológica, establecieron que la combinación de los aumentos de precipitación y los cambios en el uso de la tierra desde la década de 1970 han inducido un aumento progresivo en el nivel de napa, que como consecuencia ha incrementado los riesgos de inundación (García et al., 2018).

CONCLUSIONES

En este trabajo se demostró que, en la Cuenca del Salado, una zona extremadamente llana y tradicionalmente dedicada a la actividad ganadera, se ha producido un significativo aumento de la actividad agrícola durante los últimos 20 años reemplazando una superficie de 327.592,9 ha de pastizales naturales. En el mismo período, las precipitaciones anuales no mostraron un aumento significativo generalizado. Sin embargo, la precipitación anual fue la variable que mejor explicó la superficie anegada en el área de estudio. El reemplazo anual de pastizales naturales, si bien tuvo un efecto menor, explicó también un porcentaje considerable de la superficie anegada. El progresivo reemplazo de pastizales por secuencias de cultivos agrícolas es en

gran medida responsable de los cambios observados, ya que el exceso hídrico en la llanura no es sólo producto de los ingresos de agua al sistema, sino el resultado de la diferencia entre aquellos y las pérdidas por evapotranspiración, que son fuertemente reguladas por la vegetación. Esto permitió identificar a la expansión agrícola como uno de los factores de estrés o perturbación que afectan la oferta de los servicios ecosistémicos de regulación.

Las actividades antrópicas que transforman la superficie terrestre representan una fuerza directriz importante. Por esta razón, es importante mencionar que el desarrollo metodológico empleado con herramientas de análisis geoespacial y procesamiento en la nube resulta adecuado para analizar de manera retrospectiva la evolución de usos del suelo y la dinámica hídrica a una escala regional amplia, transformándose en clave para la gestión integral de planes de ordenamiento territorial que delinee aportes sobre los usos del suelo más adecuados, contribuyendo al sostén de la infraestructura y al bienestar humano en general, siendo que el uso de la tierra es visto como una herramienta de gestión hidrológica que ofrece un camino prometedor.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se hizo gracias al financiamiento de dos becas recibidas: Beca de Estímulo a las Vocaciones Científicas (EVC) del Consejo Interuniversitario Nacional (CIN) y a la Beca de Entrenamiento de la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) de la provincia de Buenos Aires, Argentina, entre los años 2021 y 2023.

BIBLIOGRAFÍA

Ameghino, F. (1884). *Las secas y las inundaciones en la provincia de Buenos Aires*. 5ª edición. Ministerio de Asuntos Agrarios de la provincia de Buenos Aires. Obtenido de:

<https://es.scribd.com/doc/274933020/Las-Secas-y-Las-Inundaciones-en-La-Prov-de-Bs-as-Florentino-Ameghino> (acceso: 23/05/2024)

Antes, M. E., Cuello, A. R., Sedeño, A. A., Raed, M. A., Gari, J. M. y B. L. (2014). Cartografía Temática de distintos ambientes en El Parque Nacional Los Glaciares (Argentina) mediante la utilización de datos radar y Ópticos. *Revista Ud y la Geomática*, Núm. 8. URL: <http://hdl.handle.net/11349/21256>

Antes, M., Cuello, A., Ortone Lois, A., & Cook, L. (2019). Remote sensing and GIS applied to monitoring Campo Mar Chiquita, *Defense Natural Reservoir*. Obtenido de: [https://www.researchgate.net/publication/334785599 Remote sensing and GIS applied to monitoring Campo Mar Chiquita Defense Natural Reservoir Teledeteccion y SIG aplicados al monitoreo de la Reserva Natural de la Defensa Campo Mar Chiquita](https://www.researchgate.net/publication/334785599_Remote_sensing_and_GIS_applied_to_monitoring_Campo_Mar_Chiquita_Defense_Natural_Reservoir_Teledeteccion_y_SIG_aplicados_al_monitoreo_de_la_Reserva_Natural_de_la_Defensa_Campo_Mar_Chiquita) (acceso 23/05/2024).

Aragón, R. M, Jobbágy, E. G. y Viglizzo, E. F., (2010). Dinámica de las aguas superficiales y subterráneas en las llanuras sedimentarias de la Pampa Occidental (Argentina). *Ecohidrología* 4, 433-447. DOI: <https://dx.doi.org/10.1002/eco.149>

Baeza, S., y Paruelo J. (2020). Land use/land cover change (2000-2014) in the Rio de la Plata grasslands: an analysis based on MODIS NDVI time series. *Remote Sensing* 12: 381. DOI: doi.org/10.3390/rs12030381

Baeza, S., Vélez-Martin, E., De Abelleira, D., Bancharo, S., Gallego, F., Schirmbeck, J., Veron, S., Vallejos, M., Weber, E., Oyarzabal, M., Barbieri, A., Petek, M., Guerra Lara, M., Sarraillhé, S.S., Baldi, G., Bagnato, C., Bruzzone, L., Ramos, S. & Hasenack, H. (2022). Two decades of land cover mapping in the Río de la Plata grassland region: The MapBiomass Pampa initiative. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 28. DOI: [10.1016/j.rsase.2022.100834](https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100834)

Bustamante, J., Díaz-Delgado, R., y Aragonés, D. (2005). Determinación de las características de masas de agua someras en las marismas de Doñana mediante teledetección. *Revista de Teledetección*, 24, 107-111. URL: <http://hdl.handle.net/10261/60245>

Centenera, M. (2017, 18 de Enero). Las inundaciones golpean el centro de Argentina y amenazan la cosecha de soja. *Diario El País*. Obtenido de: https://elpais.com/internacional/2017/01/17/argentina/1484690353_751154.html (acceso: 23/05/2024).

Florio, E. L., J.L. Mercau, E.G. Jobbágy & M.D. Nosetto. (2014). Interactive effects of water-table depth, rainfall variation, and sowing date on maize production in the Western Pampas. *Agricultural Water Management*. 146. 75-83. DOI: [10.1016/j.agwat.2014.07.022](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.022)

Gandini, M., B. Lara, L. Moreno, A. Cañibano & P. Gandini. (2019). Trends in fragmentation and connectivity of *Paspalum quadrivium* grasslands in the Buenos Aires province, Argentina. *PeerJ*, 7, e6450. DOI: [10.7717/peerj.6450](https://doi.org/10.7717/peerj.6450)

Gao, B. (1996). NDWI-a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 256-266.

García, P. E., N. Badano, A., Menéndez, F., Bert, G., García, G., Podestá, S., Rovere, A., Verdin, B., Ragopalan, B. y Arora, P. (2018). Influencia de los cambios en el uso del suelo y la precipitación sobre la dinámica hídrica de una cuenca de llanura extensa. Caso de estudio: Cuenca del Río Salado, Buenos Aires, Argentina. *Ribagua* 5(2): 92-106.

Gibson, D. J. (2009). *Grasses and grassland ecology*. Oxford University Press. DOI: [10.2989/10220111003703542](https://doi.org/10.2989/10220111003703542)

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. y Moore, R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202: 18-27. DOI: [10.1016/j.rse.2017.06.031](https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031)

Guerschman, J. P., Paruelo, J. M. y Burke, I. C. (2003). Land use impacts on the normalized difference vegetation index in Temperate Argentina. *Ecological Applications* 13(3): 616-628. Obtenido de: <https://www.agro.uba.ar/users/staiano/jose%20paruelo/Publicaciones/2003-2002-2001/Guerschman%20J.P.%20Paruelo.%20J.M.%20Sala%20O.E.%20y%20Burke%20I.C.%202003.%20Land%20use%20in%20temperate%20Argentina.%20Environmental%20controls%20and%20impact%20on%20ecosystem%20functioning.%20Ecological%20Applications%2013.616-628.pdf> (acceso: 23/05/2024).

Haylock MR, Peterson MC, Alves LM, et al. (2006). Trends in total and extreme South American rainfall in 1960–2000 and links with Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*: 19: 1490-1512. DOI: [10.1175/JCLI3695.1](https://doi.org/10.1175/JCLI3695.1)

IHLLA, (Instituto de Hidrología de Llanuras). (2003). Sistema de soporte para la gestión eficiente de los recursos hídricos en la llanura bonaerense. Informe final.

INTA, (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). (2022). Estación Experimental Agropecuaria Cuenca del Salado. Buenos Aires, Argentina. Obtenido de: <https://inta.gob.ar/cuencadelsalado> (acceso 23/05/2024).

Kim, JH, Jackson, RB, (2012). Un análisis global de la recarga de agua subterránea para vegetación, clima y suelos. *Zona Vadose J.* 11. DOI: [10.2136/vzj2011.0021RA](https://doi.org/10.2136/vzj2011.0021RA)

Kroes, J., van Dam, J., Supit, I., De Abelleira, D., Verón, S., de Wit, A., Wesseling, J. (2019). Agrohydrological analysis of groundwater recharge and land use changes in the Pampas of Argentina. *Agricultural water management*, 213, 843, 857. DOI: [10.1016/j.agwat.2018.12.008](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.12.008)

Kuppel S, Houspanossian J, Noretto MD, et al. (2015). What does it take to flood the Pampas?: Lessons from a decade of strong hydrological fluctuations. *Water Resources Research.* ; 51(4): 2937-2950. DOI: [10.1002/2015WR016966](https://doi.org/10.1002/2015WR016966)

Lara, B. y Gandini, M. (2014). Quantifying the land cover changes and fragmentation patterns in the Argentina Pampas in the last 37 years (1974–2011). *GeoFocus (Artículos)*, 14: 163-180. Obtenido de: <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/306> (acceso: 23/05/2024).

Lara, B., Gandini, M., Gantes, P. y Matteucci, S. (2018). Regional patterns of ecosystem functional diversity in the Argentina Pampas using MODIS time-series. *Ecological Informatics* 43: 65-72. DOI: [10.1016/j.ecoinf.2017.11.004](https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.11.004)

Lara, B., Gandini, M., Gantes, P. y Matteucci, S. (2020). Trends and land surface phenological responses to climate variability in the Argentina Pampas. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 46(2): 581-602. DOI: [10.18172/ciq.4310](https://doi.org/10.18172/ciq.4310)

Lu, D.; Mausel, P.; Brondizio, E. y E. Morán (2004). Change detection techniques. *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 25, No. 12, 2365-2407. DOI: [10.1080/0143116031000139863](https://doi.org/10.1080/0143116031000139863)

Matteucci, S. (2012). *Ecorregión Pampa*. En Morello, J., S. Matteucci, A. Rodríguez & M. Silva, editores. Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos. Buenos Aires: Orientación Gráfica Editora. Pp. 391-446. Obtenido de: <http://hdl.handle.net/11336/161889> (acceso: 23/05/2024).

Navarrete, M.D., Gallopín G.C., Blanco M., et al. (2009). Multi-causal and integrated assessment of sustainability: the case of agriculturization in the Argentine Pampas [journal article]. *Environment, Development, and Sustainability.*; 11(3):621-638. DOI: [10.1007/s10668-007-9133-0](https://doi.org/10.1007/s10668-007-9133-0)

Nosetto, M.D., Paez, R.A., Ballesteros, S.I., et al. (2015). Higher water-table levels and flooding risk under grain vs. livestock production systems in the subhumid plains of the Pampas. *Agriculture, Ecosystems & Environment.*; 206: 60-70. DOI: [10.1016/j.agee.2015.03.009](https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.009)

Nosetto, M. D., Jobbágy, E. G., Toth, T., Di Bella, C. M. (2007). Los efectos del árbol establecimiento sobre la dinámica del agua y las sales en pastizales naturalmente afectados por la sal. *Ecología* 152, 695-705. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/279596737_The_ecohydrological_challenge_of_woody-herbaceous_transitions_in_the_chaco-pampas_plains (acceso: 23/05/2024).

Paruelo, J. M. y Littera, P. (2019). El lugar de la naturaleza en la toma de decisiones: servicios ecosistémicos y ordenamiento territorial rural. 1a ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Fundación CICCUS. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/338434791_El_lugar_de_la_naturaleza_en_la_toma_de_decisiones_Servicios_ecosistemicos_y_Ordenamiento_Territorial_Rural (acceso: 23/05/2024)

Paruelo, J.M.; Guerschman, J.P.; Piñeiro, G.; Jobbágy, E.G.; Verón, S.R.; Baldi, G. y Baeza, S. (2006). Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: Marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia*, Vol. X, N° 2, p. 47 - 61. Obtenido de: <http://hdl.handle.net/10625/47410> (acceso: 21/12/2023).

Passucci, V., Carmona, F. y Rivas, R. (2017). Identificación de zonas anegadas y no anegadas mediante técnicas de teledetección. *Revista Estudios Ambientales*, 5(2), 51-78. Obtenido de: <http://ojs.fch.unicen.edu.ar/index.php/estudiosambientales/article/view/150> (acceso: 23/05/2024)

Pinilla, A., Guevara, C, Lara, B. y Kruse, E. (2019). Impactos de los cambios de uso del suelo sobre la recarga subterránea en una zona de llanura. Caso de estudio, cuenca superior del arroyo Del Azul. *Revista de la Asociación Argentina de Ecología de Paisajes*, 9, 40-44. Obtenido de: <https://www.asadep.com.ar/impacto-de-los-cambios-de-uso-del-suelo-sobrela-rec> (acceso: 23/05/2024)

Proyecto MapBiomias Pampa Sudamericana. (2022). Colección 1 de la Serie Anual de Mapas de Cobertura y Uso del Suelo del Pampa Sudamericano. Obtenido de: https://pampa.mapbiomas.org/QGIS_Development_Team_2022_QGIS_Geographic_Information_System_Open_Source_Geospatial_Foundation_Project_http://qgis.osgeo.org/

Salese, S. & Lara, B. 2022. La problemática de los anegamientos en la Cuenca del Salado: ¿aumento de las precipitaciones o efectos de los cambios de usos del suelo? Libro de Resúmenes de las VI Jornadas Nacionales de Investigación en Geografía Argentina. Obtenido de: https://cig.fch.unicen.edu.ar/wp-content/uploads/2002/03/LIBRO_RESUMENES-1.pdf (acceso 23/05/2024).

Seager, R., Naik, N., Baethgen, W., Robertson, A., Kushnir, Y., Nakamura, J., & Jurburg, S. (2010). Tropical Oceanic Causes of Interannual to Multidecadal Precipitation Variability in Southeast South America over the Past Century. *Journal of Climate*, 23(20), 5517-5539. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3578.1>

Usunoff, E.J., (2009). Hidrogeología de grandes llanuras. En: Silveira, L., Usunoff, EJ (Eds.), *Agua subterránea. Enciclopedia de sistemas de soporte vital*. EOLSS Publishers Co., Ltd., págs. 308–325. Obtenido de: <http://eolss.net/SampleChapters/C07/E2-09-02-06.pdf> (acceso: 21/12/2023).

Vargas, W. M., Minetti, J.L., Poblete AG. (2002). Low-frequency oscillations in climatic and hydrological variables in southern South America's tropical-subtropical regions. *Theoretical and Applied Climatology*; 72 (1-2):29-40. DOI: <https://doi.org/10.1007/s007040200010>

Vázquez, P., Cabria, F., Rojas, M. y Calandroni, M. 2009. Riesgo de anegamiento: estimaciones para la Cuenca Baja del Río Salado. *Ciencia del Suelo*, 27(2): 237246. Obtenido de: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672009000200010&script=sci_arttext&lng=en (acceso: 23/05/2024)

Viglizzo, E.F., Frank, F.C., Carreño, L.V., et al. (2011). The ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology*; 17 (2):959-973. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2010.02293.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02293.x).

Viglizzo, E. y Frank, F. (2006). Interacciones ecológicas, retroalimentaciones, umbrales y colapsos en la pampa argentina en respuesta al clima y la agricultura durante el último siglo. *Cuaternalario Internacional*, 158 (1), 122-126. DOI: [10.1016/j.quaint.2006.05.022](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.05.022)