

ARTÍCULO

VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE CUERPOS DE AGUA SOMEROS EN UN ÁREA DE LA REGIÓN PAMPEANA

Spatio-temporal variability of shallow water bodies in an area of the Pampean region

Arce Cendoya, S. * 1 , Barragán, F. G. 1  & Geraldi, A. M. 1 2 

RESUMEN: Los cuerpos de agua en la Zona de Drenaje Indefinida Occidental Peripampeano (ZDIOP), ubicados en una región de baja energía morfogenética, exhiben una variabilidad espacial vinculada a las fluctuaciones en las precipitaciones. En esta área de la llanura pampeana, los cuerpos líticos están sujetos a la alternancia de períodos húmedos y secos, lo que ocasiona tanto instancias de inundaciones y un aumento en la superficie cubierta por agua, como momentos de sequía y reducción de dicha superficie. El objetivo de este trabajo es analizar la variabilidad espacial de los cuerpos de agua. Se trabajó con la colección histórica de imágenes Landsat para el periodo 1986-2024, utilizando el índice espectral NDWI y datos climáticos derivados del SPEI. De forma, se identificó al periodo 2008-2009 como el más crítico en cuanto a sequías intensas; mientras que 1997 y 2016 como periodo con una humedad moderada a intensa.

PALABRAS CLAVES: Dinámica hidrológica, teledetección óptica, sequía, monitoreo ambiental.

ABSTRACT: *The water bodies in the Western Peripampean Undefined Drainage Zone (ZDIOP), located in a region of low morphogenetic energy, exhibit spatial*

1 Depto. de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Argentina.

2 Instituto Argentino de Oceanografía, Argentina. CONICET-IADO, Bahía Blanca, Argentina.

* Autor de correspondencia. Sebastián Arce Cendoya. E-mail sebastian.arce@uns.edu.ar

Como citar este artículo: Arce Cendoya, S., Barragán, F. G. & Geraldi, A. M. (2025). Variabilidad espacio-temporal de cuerpos de agua someros en un área de la región pampeana. Revista FACENA 35(1), 19-41. Doi: <https://doi.org/10.30972/fac.3517770>

Recibido/Received: 03/02/2025. Revisión: 04/02/2025. Aceptado/Accepted: 13/03/2025.

Editor asociado: Félix Ignacio Contreras.

Publicado en línea: 04/07/2025. ISSN 1851-507X en línea.

variability linked to fluctuations in precipitation. In this area of the Pampas plain, lentic water bodies are subject to alternating wet and dry periods, leading to both instances of flooding and an increase in water-covered surface, as well as drought episodes that reduce their extent. This study aims to analyze the spatial variability of these water bodies. A historical collection of Landsat images from 1986 to 2024 was used, employing the NDWI spectral index and climate data derived from the SPEI. As a result, the period 2008-2009 was identified as the most critical in terms of severe droughts, while 1997 and 2016 were characterized by moderate to intense humidity levels.

KEYWORDS: *Hydrological dynamics, optical remote sensing, drought, environmental monitoring.*

INTRODUCCIÓN

Las extensas planicies que abarcan el centro y noreste de Argentina, forman parte de una vasta cuenca sedimentaria continental caracterizada por suaves pendientes y una significativa actividad neotectónica (Quiroz, 2002).

En gran parte de esta llanura, el drenaje es predominantemente endorreico o arreico, es decir sin una conexión directa con el mar; lo que genera alternancia entre períodos de inundaciones extensas y prolongadas y fases de sequía. Las áreas deprimidas tienden a albergar cuerpos de agua de carácter permanente o temporal (Quiroz, 2002; Aliaga *et al.*, 2014). La baja energía morfogenética del relieve, junto con procesos de deflación eólica y modelado fluvial (Quirós, 2004; Aliaga *et al.*, 2014), favorece la acumulación de agua superficial y da lugar a una gran diversidad de ambientes léticos, como bañados, charcas y lagunas. Estos ecosistemas se caracterizan por su dinamismo y la presencia de especies adaptadas a sus condiciones fluctuantes (Quiroz, 2002; Geraldi, 2011).

A pesar de su relevancia ecológica y funcional, los cuerpos de agua someros suelen ser subvalorados en términos de sus servicios ecosistémicos. Entre sus múltiples funciones, contribuyen a la regulación del régimen hídrico, la mitigación de los efectos del cambio climático y la conservación de la biodiversidad (Quiroz, 2002; Geraldi, 2009; Kandus & Minotti, 2019; Vidal Quini *et al.*, 2021, 2023). Su identificación y caracterización espacial resultan esenciales para su gestión

ambiental y su preservación en contextos de variabilidad climática (Kandus & Minotti, 2019; Vidal Quini, 2023).

La variabilidad de la precipitación es un factor clave en la dinámica de los recursos hídricos de la región, ya que determina la fluctuación de la superficie de los cuerpos de agua en respuesta a ciclos con alternancia de sequías e inundaciones (Quiroz *et al.*, 2006; Vidal Quini *et al.*, 2023).

En este sentido, la teledetección óptica representa una herramienta fundamental para el monitoreo espacio-temporal de estos sistemas, permitiendo el análisis de su evolución mediante parámetros biofísicos (Chuvieco, 2008; Shi, 2017; Vidal Quini *et al.*, 2021). La misión Landsat, debido a su extenso registro histórico, facilita la reconstrucción de series temporales y el análisis multitemporal de los cuerpos de agua (Huag *et al.*, 2018; Maestri *et al.*, 2019).

Vinculado a lo anterior, el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) favorece la identificación y monitoreo de cuerpos de agua, ya que permite diferenciar estas masas del resto de las coberturas del suelo a partir de la reflectancia en las bandas del verde e infrarrojo cercano (McFeeters, 1996). Su aplicación ha sido validada en estudios a escala global (Mueller *et al.*, 2016; Shi *et al.*, 2017; Hovsepian *et al.*, 2019) y regional (Zunino *et al.*, 2018; Páez Campo, 2021; Vidal Quini *et al.*, 2023), demostrando su utilidad para evaluar la variabilidad de los cuerpos de agua.

De manera complementaria, el Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado (SPEI) permite analizar episodios climáticos extremos, identificando la magnitud e impacto de sequías en distintas escalas temporales (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). La integración de información obtenida mediante sensores remotos con datos meteorológicos *in situ*, posibilita un análisis integral de la relación entre variabilidad climática y dinámica de los cuerpos de agua someros.

Desde una perspectiva metodológica, el estudio se inscribe en el marco de la geografía cuantitativa, que, apoyada en tecnologías de la información y la comunicación, ha promovido un enfoque geotecnológico en la gestión de la información espacial (Buzai & Humacata, 2016). La consolidación de la Geografía Automatizada ha potenciado el empleo de herramientas computacionales para

la modelización y análisis espacial, facilitando la interpretación de fenómenos ambientales (Buzai, 2005; Olaya, 2023).

En este marco, el presente trabajo tiene como objetivo analizar la variabilidad espacio-temporal de los cuerpos de agua en la Zona de Drenaje Indefinida Occidental Peripampeano (ZDIOP) durante un período de 38 años (1986-2024), mediante la aplicación de índices espectrales derivados de imágenes satelitales y datos meteorológicos in situ.

ÁREA DE ESTUDIO

La ZDIOP está inserta en los partidos de Puan, Adolfo Alsina, Saavedra y Tornquist (Figura 1), dando como resultado una superficie de 7258 km².

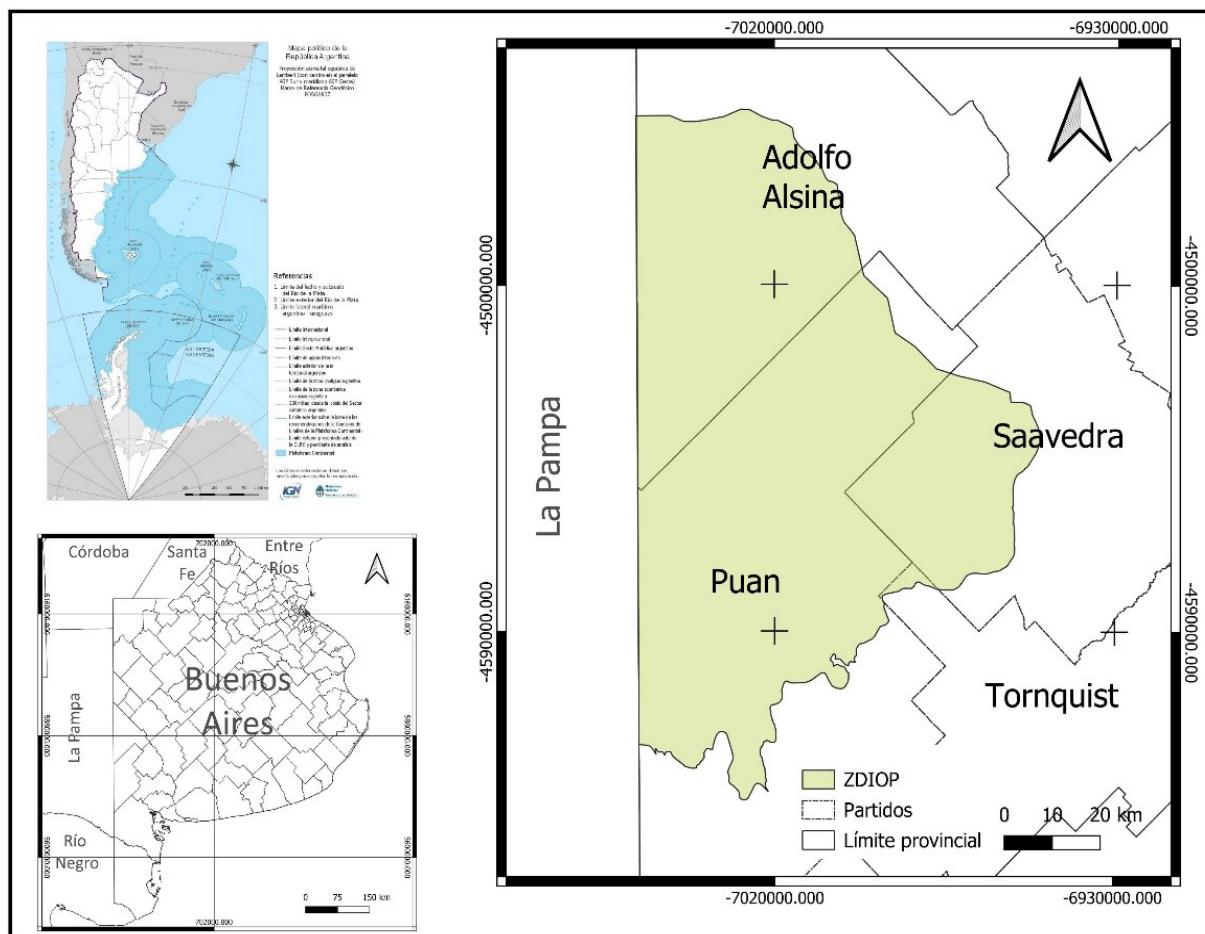


Fig. 1. Localización de la Zona de Drenaje Indefinida Occidental Peripampeano (ZDIOP), Provincia de Buenos Aires, Argentina. Fuente: elaboración propia.

Para su delimitación, se seleccionaron variables relevantes que permiten una caracterización precisa del área. En lo referente al clima se encuadra dentro de la clasificación de Köppen-Geiger (Strahler & Strahler 1989; Peel, 2007), en el tipo Bsk, caracterizado como seco, de estepa, con temperatura media anual inferior a 18° C y en cuanto al régimen climoedáfico es mésico y está en la transición de údico (en el norte) a ústico (al sur) (Van Wanbecke & Scoppa, 1980). El régimen pluviométrico se caracteriza por una marcada gradación con valores, de 700 mm/año en el noreste a menos de 500 mm/año en el sur.

La vegetación nativa de las unidades fitogeográficas “del espinal” y “pampeana” (Cabrera, 1976), la cual desempeña un papel fundamental en la dinámica de los humedales de la región. La mezcla de arbustos perennifolios, característicos del oeste, junto con los pastizales de gramíneas bajas y herbáceas predominantes en el este, no solo define la estructura ecológica del área, sino que también influye en los procesos hidrológicos y biogeoquímicos de los humedales. La persistencia de estas formaciones vegetales, como los montes de arbustos perennifolios asociados con vegetación psammófila en áreas arenosas y halófilas en depresiones salinizadas (Navarro y Uriarte, 2002), es crucial para mantener la biodiversidad y la funcionalidad de los humedales, los cuales actúan como reguladores del ciclo del agua y reservorios de carbono, además de proporcionar hábitats esenciales para numerosas especies.

En lo que hace al área de paisaje pampeano, la llanura comprende la mayor parte de la superficie con una amplitud del terreno que va desde los 100 a 300 msnm. Su relieve se inclina suavemente desde el noreste, donde se encuentran las estribaciones del cordón serrano de Puan, hacia el noroeste y sudoeste, con pendientes generalmente inferiores al 1% (Navarro y Uriarte, 2002).

MATERIALES Y MÉTODOS

La identificación y análisis de los cuerpos de agua en la ZDIOP se llevó a cabo mediante el preprocesamiento y procesamiento de imágenes satelitales (Figura 2). Para garantizar una cobertura temporal adecuada y la calidad de los datos, se

empleó la colección 2 de la serie de satélites Landsat, específicamente Landsat 5 y Landsat 8, la cual incluye correcciones radiométricas y geométricas. Además, se aplicó una máscara de nubes para minimizar interferencias atmosféricas en las imágenes (Tabla I).

Se elaboró un mosaico a partir de las escenas correspondientes a los paths y rows 227-086 y 227-087, seleccionando aquellas con mínima cobertura de nubes para garantizar la calidad de los datos. Posteriormente, se ajustó la extensión espacial del mosaico al área de estudio. La selección temporal abarcó dos períodos clave: enero-marzo, representativo de la temporada estival, y mayo-julio, característico de las condiciones invernales, permitiendo así un análisis estacional de la dinámica de los cuerpos de agua.

Tabla I. Datos satelitales utilizados

Satélite	Temporalidad	Nivel de Procesamiento	Resolución espacial	NDWI
Landsat 5 TM	1986-2013	Collection 2 atmospherically corrected surface reflectance.	30 * 30 metros	(Banda 2 - Banda 4) ----- (Banda 2 + Banda 4)
Landsat 8 OLI	2014-2024	Collection 2 atmospherically corrected surface reflectance.	30 * 30 metros	(Banda 3 - banda 5) ----- (Banda 3 + banda 5)

Para aplicar el método seleccionado, se tomaron muestras representativas del área de estudio teniendo en cuenta los criterios que se detallan a continuación:

- Accesibilidad: proximidad a rutas provinciales o nacionales y caminos secundarios en buen estado.
- Distribución Espacial: cobertura espacial uniforme para asegurar representatividad.
- Localización en Cuerpos de Agua: preferencia por sitios con cuerpos de agua estables para asegurar la consistencia de los datos.

Las muestras utilizadas en el proceso de clasificación fueron divididas en dos conjuntos para garantizar la fiabilidad del análisis. El 70% de las muestras se destinó al entrenamiento del modelo de clasificación, permitiendo que el algoritmo aprenda los patrones espectrales asociados a los cuerpos de agua y otras coberturas presentes en la región de estudio. El 30% restante se empleó para la validación, con el propósito de evaluar la precisión del modelo y cuantificar su capacidad para generalizar la clasificación en áreas no utilizadas en el entrenamiento. Esta segmentación de los datos asegura un balance adecuado entre el aprendizaje del modelo y la evaluación de su desempeño, reforzando la robustez de los resultados obtenidos.

Para la discriminación y monitoreo de cuerpos de agua, se utilizó el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI) (tabla II):

$$\text{NDWI} = (\text{GREEN} - \text{NIR}) / (\text{GREEN} + \text{NIR})$$

Este índice facilita la identificación de los cuerpos de agua dado que calcula la humedad superficial. Se incorporaron además, valores del Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado (SPEI) (Vicente-Serrano *et al.*, 2010) (tabla III), un índice multiescalar de sequías basado en datos climáticos, aplicado con una resolución temporal mensual.

Tabla II. Valores cuantitativos y cualitativos del NDWI. Fuente: elaborado sobre la base de McFeeters (1996).

Valor cuantitativo	Valor cualitativo
1	Muy alta presencia de agua
0.5	Alta presencia de agua
-0.2 y 0.2	Condición normal
-0.5	Sin agua
-1	Suelo

Tabla III. Valores cuantitativos y cualitativos del SPEI. Fuente: elaborado sobre la base de Vicente Serrano, *et al.* (2010).

Valor cuantitativo	Valor cualitativo
> 2	Extremadamente húmedo
1.5 a 1.99	Muy húmedo
1 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Casi normal
-1.49 a -1	Moderadamente seco
-1.5 a -1.99	Muy seco
-1.28	Seco
< -2	Extremadamente seco

Con base en el índice espectral obtenido, se realizó una clasificación supervisada basada en las muestras tomadas previamente, considerando dos clases: cuerpos de agua y otras coberturas.

Si bien el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) contrasta las áreas con presencia de agua, su aplicación puede generar ciertas imprecisiones en la delimitación de los cuerpos de agua someros. Específicamente, el NDWI tiende a incluir en su clasificación otras coberturas que reflejan características espectrales similares, como parcelas agrícolas con alta humedad, vegetación densa con contenido hídrico elevado y zonas anegadas temporalmente.

Para abordar esta limitación, se optó por una clasificación supervisada mediante el algoritmo Random Forest (Figura 2). Este enfoque permite mejorar la discriminación entre cuerpos de agua y otras superficies con alta respuesta espectral en las bandas utilizadas por el NDWI. A través de la selección de muestras de entrenamiento representativas, el modelo aprende patrones espectrales más precisos y es capaz de diferenciar con mayor fidelidad los cuerpos de agua permanentes y temporales.

El resultado de la clasificación consistió en la obtención de porcentajes (Figura 2) para cada una de las clases identificadas. Para convertir estos valores a

superficie (km^2), se consideró el área total de estudio como el 100%, mientras que la proporción correspondiente a cada clase representó una fracción de ese total. De esta manera, fue posible estimar la extensión en kilómetros cuadrados de cada categoría, permitiendo una comparación precisa de la distribución espacial de los cuerpos de agua en relación con el área de estudio.

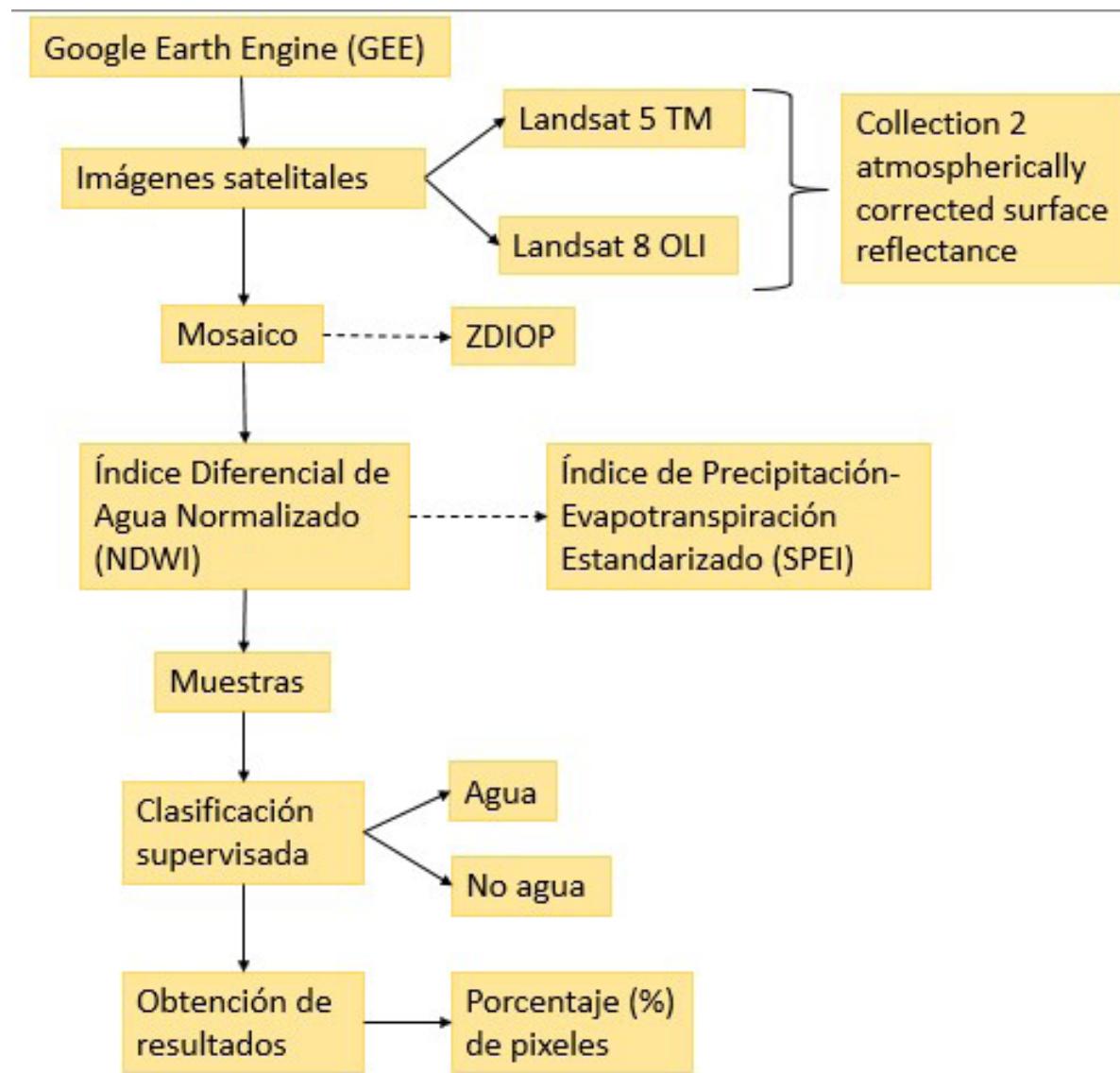


Fig. 2. Diagrama de flujo de los métodos empleados. Fuente: elaboración propia.

El procesamiento y análisis de datos se llevó a cabo con Google Earth Engine (GEE), una plataforma para el análisis geoespacial en la nube. GEE permite la integración de múltiples fuentes de datos y proporciona herramientas avanzadas para el procesamiento de imágenes, facilitando el manejo de grandes volúmenes de datos y el análisis temporal y espacial.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los datos obtenidos de los indicadores, SPEI y NDWI, se obtuvieron los años húmedos y secos para la estación de verano e invernal en un periodo que abarca desde 1986 a 2024. La temporada de verano se definió considerando los meses de enero a marzo, mientras que el invierno comprendió el periodo de mayo a julio. Esto permitió analizar la variabilidad de los cuerpos de agua en dos estaciones climáticamente opuestas dentro de un mismo año, proporcionando una perspectiva más completa sobre su dinámica temporal.

Durante el periodo seco, los valores del SPEI se sitúan entre -1.49 y -2, lo que indica una sequía de moderada a severa intensidad. A lo largo del intervalo temporal comprendido entre 1986 y 2024, se identifican cinco eventos en los que el SPEI cayó por debajo del umbral establecido, lo que indica sequías significativas. Estos eventos se caracterizan por variaciones en su duración e intensidad. Dos de los eventos más prolongados, ocurridos en los períodos 1988-1989 y 2012-2014 (Figura 3), tuvieron una duración máxima de dos años, lo que sugiere una persistencia notable de condiciones de sequía que podrían haber afectado tanto la disponibilidad de recursos hídricos como la capacidad de recuperación de los ecosistemas. Los otros tres eventos identificados fueron de menor duración, limitándose a un solo año.

El año 2009 destaca como el período más crítico, registrando el valor de SPEI más extremo dentro del intervalo estudiado, lo que sugiere un episodio de sequía excepcionalmente severo. Este evento extremo pudo haber generado un impacto considerable en la biodiversidad, los sistemas agrícolas y la disponibilidad de agua en la región, exacerbando el estrés hídrico y desencadenando posibles efectos a largo plazo en la estabilidad de los ecosistemas locales.

En ambos casos, los resultados obtenidos a partir del NDWI respaldan la identificación de los períodos secos en la región determinada por el SPEI, proporcionando una validación adicional de la variabilidad hídrica.

Durante el período húmedo, los valores del NDWI oscilan entre -0,1 y 0,5, mientras que el SPEI registra valores positivos que varían entre 1.49 y 2, lo que indica niveles de humedad de moderada a severa intensidad. En este contexto,

se identificaron once períodos que superan el umbral húmedo de 0,5, con una duración máxima de tres años, correspondiente al intervalo 2016-2019, y una duración mínima de un año. La intensidad de estos eventos húmedos alcanzó un valor máximo de 2 en el SPEI, reflejando condiciones excepcionalmente húmedas durante estos períodos. Estos eventos de alta humedad tienen un impacto significativo en la dinámica espacio-temporal de las lagunas y humedales de la región. La presencia de valores elevados de SPEI y NDWI durante los períodos húmedos sugiere una expansión de los cuerpos de agua superficiales, que se traduce en la regeneración y expansión de los ecosistemas acuáticos. Esta dinámica no solo mejora la disponibilidad de agua para actividades agrícolas, como el riego, y para el consumo humano, sino que también desempeña un papel crucial en la estabilidad ecológica de los humedales.

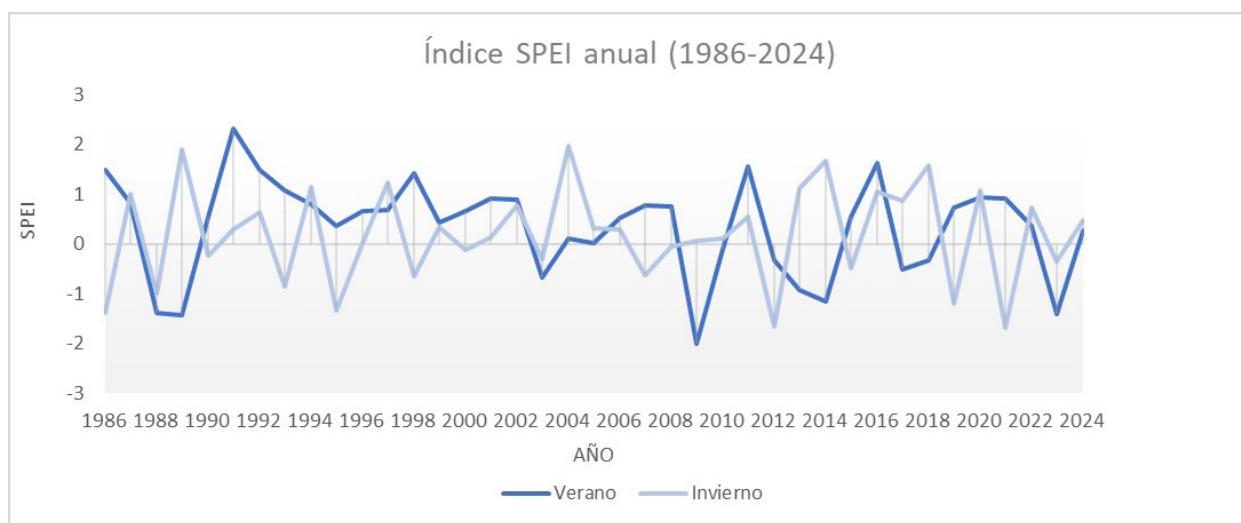


Fig. 3. SPEI para la estación estival. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con las clasificaciones supervisadas realizadas en los períodos secos y húmedos anteriormente mencionados, la presencia o ausencia de humedad influye significativamente en la extensión y distribución de los cuerpos de agua de la región, provocando aumentos o reducciones en su superficie. Este análisis, complementario al realizado mediante los índices espectrales, permite profundizar en la comprensión de la dinámica de estos sistemas hídricos, proporcionando una visión más detallada de su variabilidad espacio-temporal.

Para el periodo seco de verano, el mayor porcentaje de superficie de los cuerpos de agua se observó en 2023 (Figura 5.2), alcanzando un 5%, lo que equivale a 431 km². Mientras que, en 1989 (Figura 5.1), los cuerpos de agua ocupaban solo el 3%, representando 257 km² del total del área.

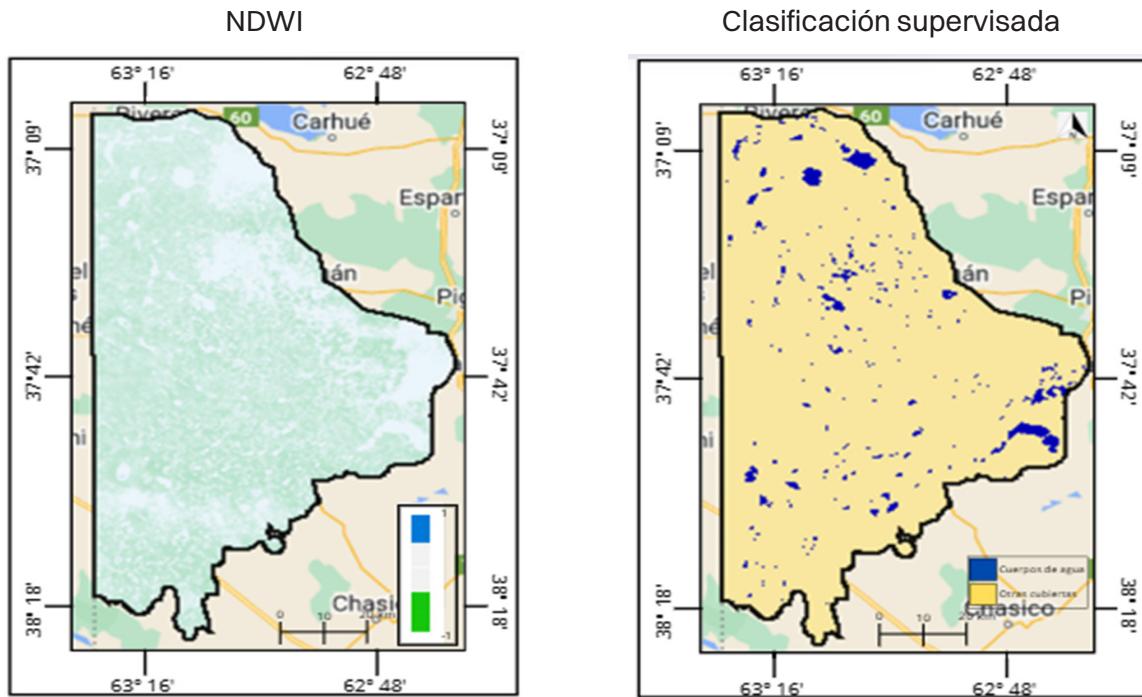


Fig. 5.1. Índice espectral y resultado de clasificación para verano de 1989. Fuente: elaboración propia.

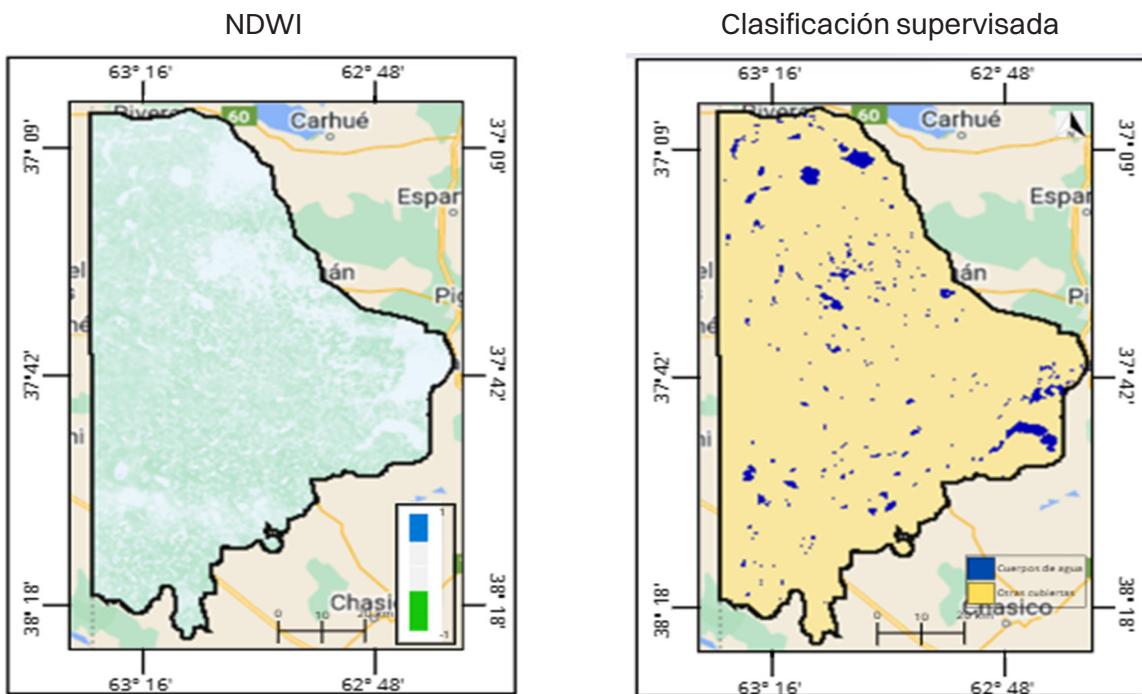


Fig. 5.2. Índice espectral y resultado de clasificación para verano de 2023. Fuente: elaboración propia.

En el mismo periodo, durante el invierno, la menor área de ocupación de los cuerpos de agua se registró en 2021 (Figura 6.2) con un 4% de la superficie, equivalente a 359 km². Mientras que el mayor porcentaje de ocupación, en el periodo seco, se observó en 1986 (Figura 6.1) con un 5%, cubriendo 406 km².

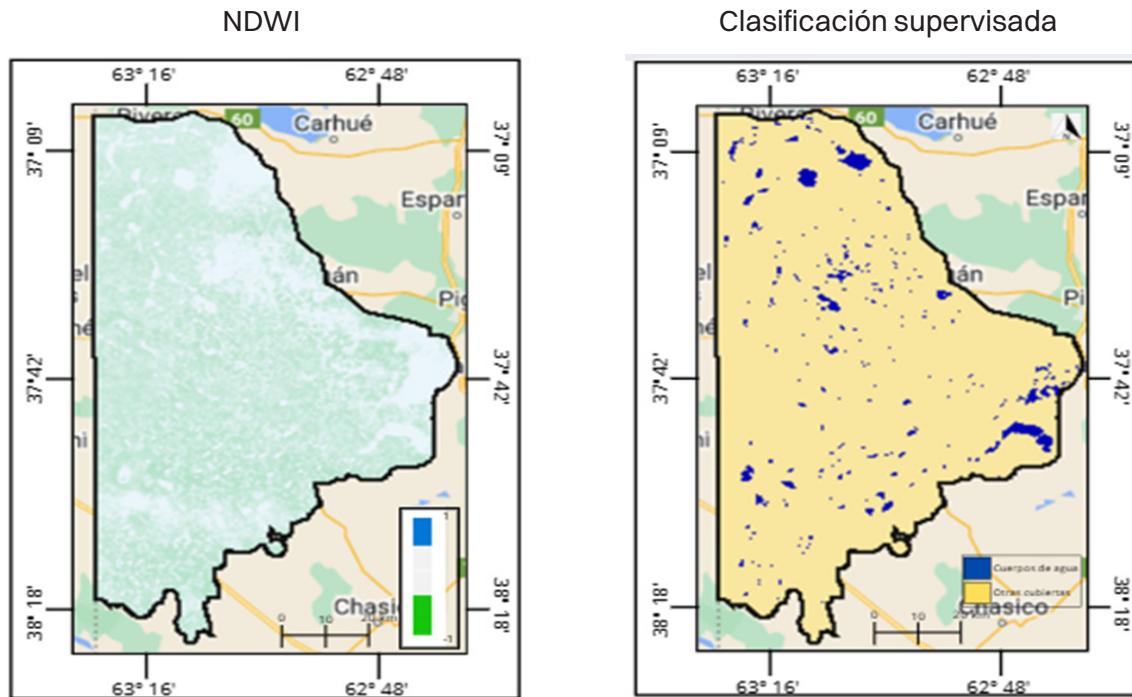


Fig. 6.1. Índice espectral y resultado de clasificación para invierno de 1986. Fuente: elaboración propia.

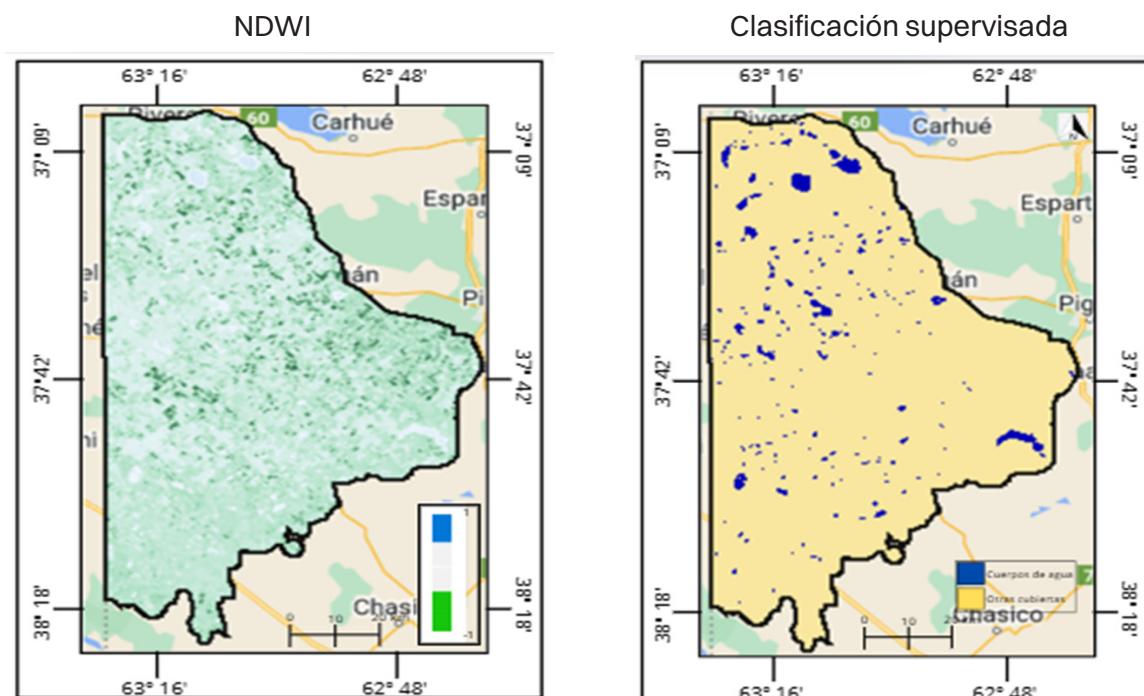


Fig. 6.2. Índice espectral y resultado de clasificación para invierno de 2021. Fuente: elaboración propia.

Para el periodo húmedo, en invierno, en 2018 (Figura 7.2), el porcentaje de píxeles correspondientes a cuerpos de agua representó 763 km² del total del área. Durante el verano de 2002 (Figura 7.1), los cuerpos de agua abarcaron 469 km², es decir, un 7% del total de los píxeles del área.

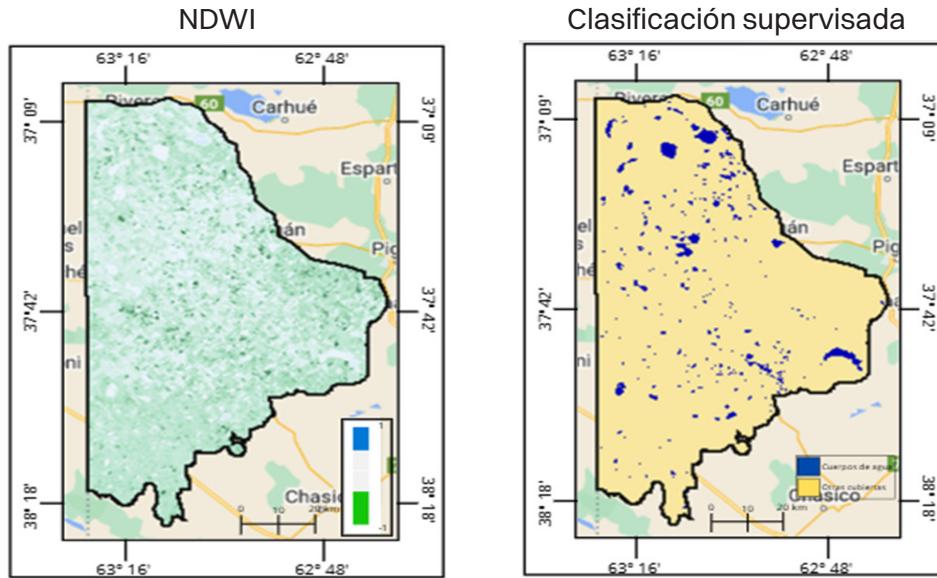


Fig. 7.1. Índice espectral y resultado de clasificación para verano de 2002. Fuente: elaboración propia.

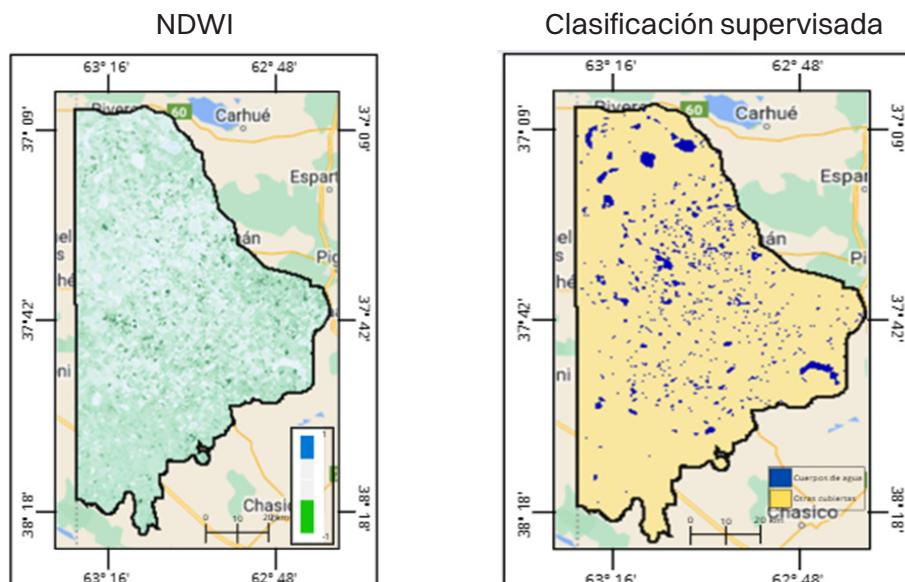


Fig. 7.2. Índice espectral y resultado de clasificación para invierno de 2018. Fuente: elaboración propia.

Para los años 2016, 1997 y 1987 (Figura 8) se registró un excedente de humedad en la región, siendo períodos donde durante todo el año prevaleció una estación más húmeda. En los mismos, se observa una humedad severa a extrema, donde los cuerpos de agua del área presentan una superficie de entre 430 km² a 780 km² con respecto al total, representan entre el 7% al 10% de los píxeles.

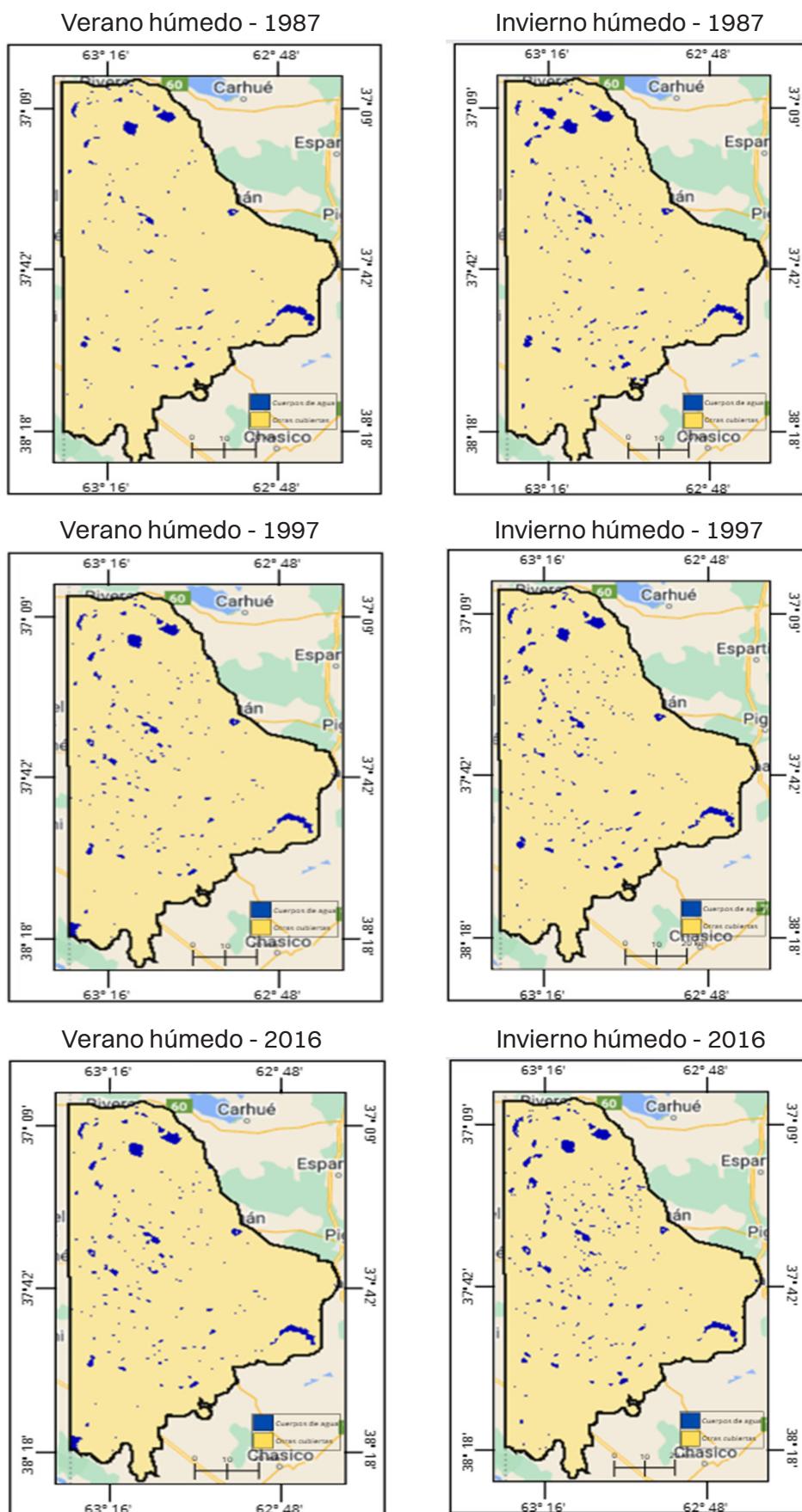


Fig. 8. Clasificación supervisada para 1987, 1997 y 2016, años húmedos. Fuente: elaboración propia.

Los años con mayor déficit hídrico, se caracterizaron por condiciones de sequía que oscilaron entre severas y extremas (Figura 9). Durante estos períodos, la superficie cubierta por cuerpos de agua se redujo significativamente, abarcando menos del 4.5% de los píxeles del área de estudio, lo que equivale a una superficie inferior a 350 km² del total regional. Esta disminución destaca el impacto crítico de las sequías en la disponibilidad y extensión de los cuerpos de agua en la zona.

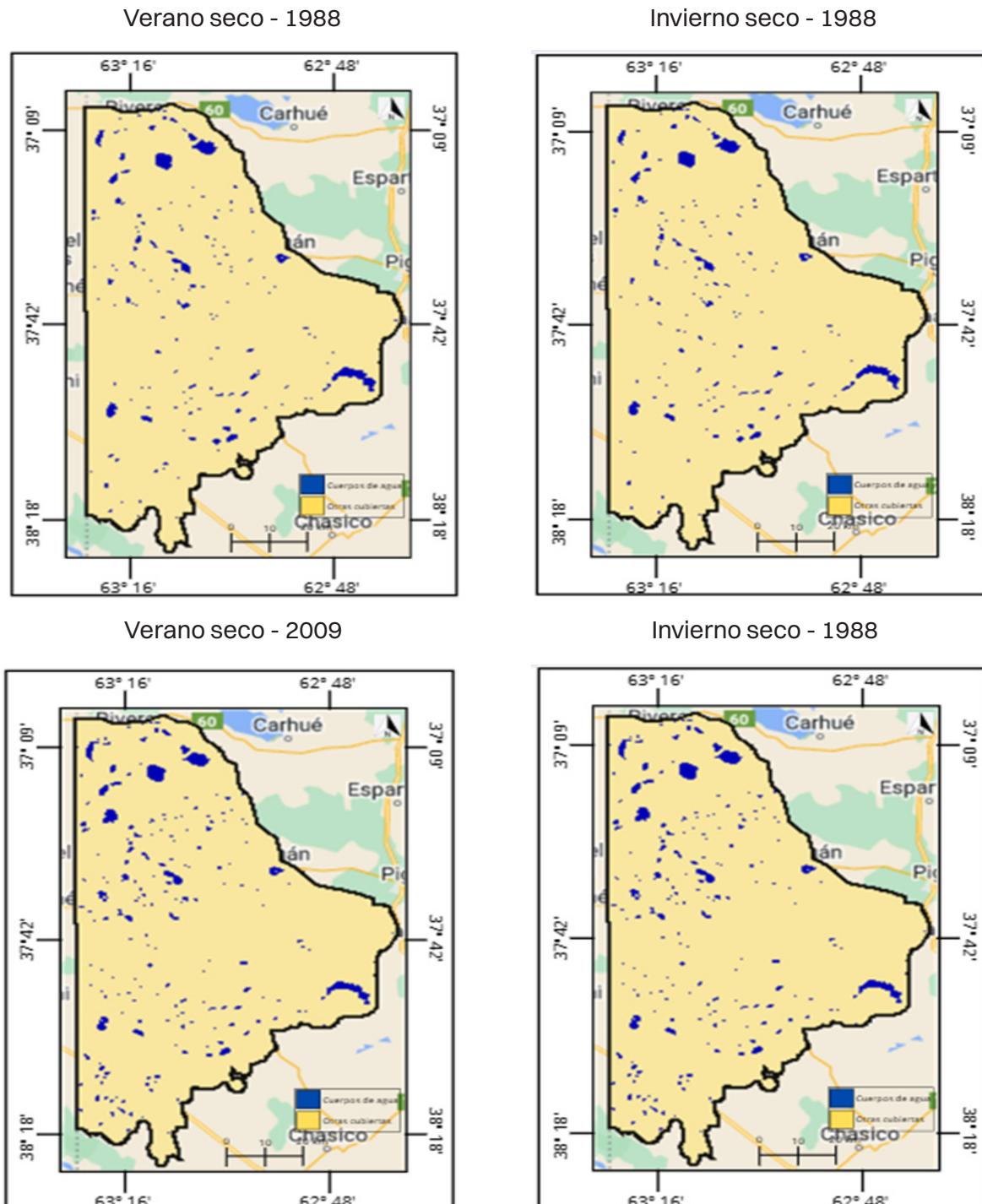


Fig. 9. Clasificación supervisada para 1988 y 2009, años secos. Fuente: elaboración propia.

Los cuerpos de agua someros del sudoeste bonaerense exhiben una notable respuesta a la variabilidad interanual y anual de las precipitaciones y temperaturas, reflejando así la dinámica climática de la región. Estas fluctuaciones generan una alternancia de eventos secos y húmedos de distinta duración, intensidad y frecuencia, con importantes implicaciones socioeconómicas (Barragán y Geraldi, 2018; Arias *et al.*, 2022).

La incorporación de una clasificación supervisada mediante árboles de decisión ha permitido cuantificar con mayor precisión los píxeles y superficies afectadas por la variabilidad en las precipitaciones, facilitando la identificación de la presencia o ausencia de agua en las depresiones del paisaje (Barragán y Geraldi, 2018). Asimismo, el análisis ha permitido reconstruir los patrones temporales de la dinámica hídrica (Gayol *et al.*, 2019), proporcionando una mayor precisión en la identificación, distribución y variación superficial de los cuerpos de agua someros. Esto contribuye a reducir las incertidumbres asociadas a los límites difusos de estos ecosistemas con respecto a otros ambientes (Borro *et al.*, 2014).

La variabilidad climática que influye en la dinámica de los cuerpos de agua puede estar vinculada al fenómeno ENSO, particularmente a las fases de El Niño (EN) y la Oscilación del Sur (SO). Según Shein (2007), los períodos más húmedos se concentraron entre 1970-1974 y 1977-1980, en concordancia con otros estudios en la región (Bhon *et al.*, 2011). En contraste, la sequía más prolongada en el oeste de la región se inició en 2005, coincidiendo con un año de precipitaciones inferiores a lo habitual en gran parte de América del Sur (Shein, 2007). Esta situación se extendió hasta 2009, con considerables pérdidas para la agricultura y una marcada escasez de agua en toda la región (Bhon *et al.*, 2011).

Por otro lado, entre 2001 y 2002, las precipitaciones fueron muy superiores a la media, lo que determinó un aumento en la superficie cubierta por agua en las lagunas del área (Bohn., 2016). En este sentido, los valores del índice SPEI reflejaron un predominio de valores positivos durante 2001-2002, 2004-2005 y 2007, mientras que valores negativos fueron predominantes en 2008 y 2009, evidenciando la correspondencia entre este índice y la dinámica de los cuerpos

de agua (Bohn *et al.*, 2016).

Más recientemente, los años 2014 y 2015 se caracterizaron por ser períodos húmedos con precipitaciones abundantes, mientras que 2010 y 2013 registraron índices de sequía significativos (Zunino, 2018). Estos patrones confirman la continua influencia de la variabilidad climática sobre los cuerpos de agua de la región, subrayando la importancia de un monitoreo constante y detallado para comprender mejor los impactos a largo plazo de estos fenómenos en los ecosistemas acuáticos y su interacción con las actividades humanas.

En definitiva, la región se caracteriza por la alternancia entre períodos de abundantes precipitaciones y temporadas de sequía, lo que modifica de manera significativa la extensión de los cuerpos de agua (Bohn, 2016).

CONCLUSIONES

La ZDIOP, ubicada en un clima templado con variaciones estacionales de temperatura y precipitación, ha experimentado pulsos de humedad y sequía entre 1986 y 2024. Sin embargo, en la mayor parte del período, las condiciones hídricas se han mantenido dentro de valores normales, lo que resulta crucial para la estabilidad de los ecosistemas locales.

Las fluctuaciones en la disponibilidad de agua han impactado significativamente la producción agrícola y la gestión hídrica, requiriendo ajustes en las prácticas productivas y estrategias de conservación. Además, afectan el acceso al agua para consumo y riego, resaltando la necesidad de un monitoreo constante y una gestión adaptable.

El análisis espacial y temporal de los cuerpos de agua permite prevenir y mitigar los efectos adversos de inundaciones y sequías. En particular, los datos obtenidos identificaron el período 2008-2009 como el más crítico en términos de sequía extrema, mientras que los años 1997 y 2016 presentaron condiciones de humedad moderada a intensa. Estas variaciones son indicadores clave de la dinámica climática y proporcionan información fundamental para la planificación de medidas de adaptación.

La metodología empleada, basada en imágenes satelitales Landsat, incluyó el uso del NDWI para la detección de cuerpos de agua y la integración con el índice SPEI para evaluar la influencia de las sequías. Este enfoque ha demostrado ser una herramienta eficaz para caracterizar la dinámica hídrica en la región.

Entre las limitaciones del estudio, la resolución espacial de los píxeles puede dificultar una caracterización detallada, aunque la disponibilidad temporal de las imágenes hace de esta la alternativa más viable. A pesar del uso de máscaras, la presencia de nubosidad y aerosoles en temporadas húmedas puede afectar la precisión del análisis. Asimismo, el procesamiento de grandes volúmenes de datos requiere infraestructura tecnológica avanzada, lo que podría limitar su implementación en ciertos contextos.

La continuidad de esta serie temporal de análisis sobre las variaciones espaciales de los cuerpos de agua es de gran relevancia, especialmente ante la amenaza latente que representa su pérdida debido a la expansión de la producción agrícola. Estos ecosistemas cumplen funciones clave en la regulación hídrica, la biodiversidad y el equilibrio ambiental, por lo que su monitoreo constante es fundamental para comprender su dinámica y mitigar los impactos negativos derivados de su degradación.

Es imprescindible que los tomadores de decisiones asuman un rol activo en la gestión y conservación de estos entornos, garantizando su permanencia en el tiempo y preservando los servicios ecosistémicos asociados. Además, su protección no solo contribuye a la estabilidad ambiental, sino que también ofrece ventajas estratégicas en términos de sostenibilidad productiva y adaptación al cambio climático.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

FINANCIACIÓN

El trabajo pertenece al Proyecto de Investigación PGI: “Aplicación de

Tecnologías de la información Geográfica al estudio integral y comparativo de problemáticas ambientales. Segunda Parte”.

Se agradecen a los miembros del Laboratorio de Geotecnologías del Departamento de Geografía y Turismo de la Universidad Nacional del Sur.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Arce Cendoya: Conceptualización, análisis formal, visualización, escritura borrador, redacción, edición.

Barragán: Metodología y asistencia de la metodología de obtención de la cartografía de usos y cobertura del suelo, revisión.

Geraldi: Financiación para equipamiento necesario, revisión y edición.

BIBLIOGRAFÍA

Aliaga, V. S., Bohn, V. Y., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2014). Efecto de la precipitación sobre la dinámica hidrológica de las lagunas de la cuenca inferior del Río Colorado (período 1981-2011). *Biología Acuática*, (30), 5-15.

Arias, J., Geraldi, A. M., Barragán, F. G., & Laffeuillade, L. M. (2022). Peligro de anegamiento en el partido de Tres Arroyos, provincia de Buenos Aires. *Estudios Geográficos*, 83(293), e119. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.2022125.125>

Barragán, F. G., & Geraldi, A. M. (2018). *Aplicación de teledetección para la determinación de zonas inundadas en la llanura Pampeana de Argentina*. X Congreso Internacional Geomática 2018. <http://www.informaticahabana.cu/sites/default/files/ponencias2018/GEO143.pdf>

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. *Environ Earth Sci* 75, 818 <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5569-6>

Bohn, V. Y., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2011). Análisis de los períodos secos y húmedos en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina).

- Borro, M., Morandeira, N., Salvia, M., Minotti, P., Perna, P., & Kandus, P. (2014). Mapping shallow lakes in a large South American floodplain: A frequency approach on multitemporal Landsat TM/ETM data. *Journal of Hydrology*, 512, 39-52. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.057>
- Brendel, A. S., Ferrelli, F., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2021). Efectos de la variabilidad pluviométrica sobre la morfometría de los recursos hídricos de una cuenca hidrográfica de la Región Pampeana (Argentina).
- Briceño, N., Entraigas, I., & Scioli, C. (2019). *Hidrodinámica de una cubeta de deflación característica de la Pampa Deprimida*. X Congreso de Ecología y Manejo de Ecosistemas Acuáticos Pampeanos (Azul, 20-22 de noviembre de 2019).
- Buzai, G. D., & Humacata, L. (2016). Implementación de Tecnologías de la Información Geográfica en la enseñanza de la Geografía. *MCA Libros*.
- Cabrera, A. L. (1976). Territorios fitogeográficos de la República Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 4(1-2).
- Chuvieco Salinero, E. (2008). Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio.
- Geraldi, A. M., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2011). El rol de las lagunas bonaerenses en el paisaje pampeano. *Revista Ciencia Hoy*, 21(123), 16-22. <http://www.cienciahoy.org.ar/ch/ln/hoy123/lagunas.htm>
- Gayol, M.P., Morandeira, N., & Kandus, P. (2019). Dynamics of shallow lake cover types in relation to Paraná River flood pulses: assessment with multitemporal Landsat data. *Hydrobiologia*, 833(1), 9-24. <https://doi.org/10.1007/s10750-018-3847-x>
- Huang, C., Chen, Y., Zhang, S., & Wu, J. (2018). Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: A review. *Reviews of Geophysics*, 56, 333-360. <https://doi.org/10.1029/2018RG000598>
- Kandus, P., & Minotti, P. (2019). Propuesta de un marco conceptual y lineamientos metodológicos para el inventario Nacional de Humedales. *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33517.95201>

Laffeuillade, L. M., Barragán, F. G., Geraldí, A. M., & Arias, J. (2020). Modelo de localización óptima de balnearios mediante análisis espacial. *Cuadernos Geográficos*, 59, 330-348. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v59i2.9810>

Maestri, M. L., Castets, F., Bayala, M., & Canziani, G. (2019). Análisis comparativo de cinco métodos de procesamiento para calcular el área de lagunas pampeanas a partir de imágenes satelitales Landsat. *Biología Acuática*.

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

Navarro, E., & Uriarte, M. G. (2002). Caracterización de las condiciones del drenaje y del suelo basada en la geomorfología y el tratamiento digital de imágenes (partido de Puán, Buenos Aires, Argentina). *Boletim Paranaense de Geociências*, 51.

Olaya, V. (2023). Sistemas de Información Geográfica. Recuperado de <http://volaya.github.io/libro-sig/>

Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633-1644, <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>

Quirós, R. (2004). Sobre la morfología de las lagunas pampeanas. *Documento de trabajo del área de Sistemas de Producción Acuática*, (3).

Quirós, R., Boveri, M. B., Petracchi, C. A., Rennella, A. M., Rosso, J. J., Sosnovsky, A., & Von Bernard, H. T. (2006). Los efectos de la agriculturización del humedal pampeano sobre la eutrofización de sus lagunas.

Quirós, R., Rennella, A., Boveri, M., Rosso, J., & Sosnovsky, A. (2002). Factores que afectan la estructura y funcionamiento de las lagunas pampeanas. *Ecología Austral*, 12, 175-185. http://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia_Austral/article/view/1556

Shein, K. A. (2007). Estado del clima 2005. *Organización Meteorológica Mundial*.

Shi, Y., Feng, L., & Gong, J. (2017). Four decades of the morphological dynamics of the lakes in the Jianghan Plain using Landsat observations. *Water and Environment Journal*, 31(3), 353-359.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

Vidal Quini, N. E., & Geraldí, A. M. (2021). Sinergia de imágenes Sentinel 1 y Sentinel 2 A. *Cuadernos Geográficos*, 60(3), 233-252. <http://dx.doi.org/10.30827/cuadgeo.v60i3.18039>

Vidal Quini, N. E., & Geraldí, A. M. (2023). Metodología para el análisis de la frecuencia de cuerpos de agua someros en la región pampeana, Argentina. *Investigaciones Geográficas. Advance online publication*. <https://doi.org/10.14198/INGEO.23410>