

CARACTERIZACIÓN Y DINÁMICA ESTACIONAL DE LAS CUBETAS DEL SECTOR LLANO DE LA CUENCA DEL ARROYO DEL AZUL

CHARACTERIZATION AND SEASONAL DYNAMICS OF THE PONDS LOCATED IN THE FLAT SECTOR OF DEL AZUL CREEK BASIN

Micaela Agostina Chindamo ^{(1) (2) (7)}, María Soledad Fontanarrosa ^{(2) (3) (8)}, Ilda Entraigas ^{(1) (9)}, Claudia Fernanda Dávila ^{(1) (2) (10)}, Luisa Fernanda Fajardo González ^{(2) (4) (11)}, Ninoska Mayerlin Briceño Maldonado ^{(1) (5) (12)} y Natalia Vercelli ^{(1) (6) (13)}

⁽¹⁾ Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff", Azul, Argentina.

⁽²⁾ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

⁽³⁾ Instituto Multidisciplinario sobre Ecosistemas y Desarrollo Sustentable, Tandil, Argentina.

⁽⁴⁾ Instituto de Limnología "Dr. Raúl A. Ringuelet", La Plata, Argentina.

⁽⁵⁾ Facultad de Agronomía, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Azul, Argentina.

⁽⁶⁾ Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires.

⁽⁷⁾ e-mail: mchindamo@ihlla.org.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4804-8316>

⁽⁸⁾ e-mail: sfontanarrosa@ecosistemas.exa.unicen.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1071-4942>

⁽⁹⁾ e-mail: ilda@ihlla.org.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5730-4337>

⁽¹⁰⁾ e-mail: ferchidavila@ihlla.org.ar. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2238-4148>

⁽¹¹⁾ e-mail: lfajardo@ilpla.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0897-9455>

⁽¹²⁾ e-mail: nbriceno@ihlla.org.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7004-563X>

⁽¹³⁾ e-mail: nvercelli@ihlla.org.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3150-9905>

RESUMEN

La Pampa Deprimida, inmersa en la ecorregión Pampa, se caracteriza por la presencia de un gran número de cubetas esenciales para la regulación hídrica, la recarga de acuíferos y por ser hábitats para especies acuáticas. Con el objetivo de comprender la dinámica estacional de tres cubetas del sector llano de la cuenca del Azul, se realizaron nueve muestreos estacionales durante el período 2019-2022. Se midieron variables fisicoquímicas in situ (transparencia, temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto), en laboratorio (nitrógeno Kjeldahl, fósforo total, sólidos suspendidos) y biológicas (clorofila a), complementadas con cálculos de índices tróficos. Mediante imágenes satelitales y datos de campo, se calcularon las áreas de las cubetas y el índice de desarrollo de costa. Las cubetas mostraron marcadas variaciones de superficie, pero estabilidad morfométrica. Los valores de oxígeno disuelto y conductividad eléctrica coincidieron con rangos típicos de lagunas pampeanas. Presentaron altos niveles de nutrientes y sólidos suspendidos, principalmente en verano. El estado trófico, según los resultados, osciló entre eutrófico e hipertrofico, subestimado al emplear la clorofila-a como indicador. Estos resultados son clave para comprender la funcionalidad de estos sistemas y guiar acciones de manejo frente al uso del territorio y los cambios ambientales.

Palabras clave: Pampa Deprimida, Limnología, Estado trófico, Humedales.

ABSTRACT

The Flooding Pampa, located in the Pampa region, is characterized by a high number of depression ponds that are essential for water regulation, aquifer recharge, and as habitats for aquatic species. To understand the seasonal dynamics of three ponds in the flat sector of del Azul Creek basin, nine seasonal samplings were conducted from 2019 to 2022. Physicochemical variables were measured in situ (transparency, temperature, pH, electrical conductivity, dissolved oxygen), in the laboratory (Kjeldahl nitrogen, total phosphorus, suspended solids), and biological parameters (chlorophyll-a), complemented by trophic index calculations. Satellite imagery and field data were used to estimate the areas of the ponds and their shoreline development index. The ponds exhibited marked surface variations but morphometric stability. Dissolved oxygen and electrical conductivity values were within the typical ranges of Pampean lakes. They showed high levels of nutrients and suspended solids, particularly during summer. Trophic status, based on nutrients, ranged from eutrophic to hypertrophic, although it was underestimated when using chlorophyll-a as an indicator. These findings are crucial for understanding the functionality of these systems and guiding management actions in the context of land use and environmental changes.

Keywords: Flooding Pampa, Limnology, Trophic state, Wetlands.

INTRODUCCIÓN

Las grandes llanuras son relativamente escasas en el mundo. Cuando se encuentran en climas húmedos o subhúmedos, constituyen el sostén de actividades económicas de primer orden, siempre vinculadas al agua, ya sea como insumo o como factor impulsor o limitante (Usunoff et al., 1999). En Argentina, la ecorregión Pampa con 398966 km² constituye el ecosistema de praderas más importante del país (Matteucci, 2012). En los últimos dos siglos, esta ecorregión ha experimentado profundos cambios en su paisaje, con la reducción de pastizales naturales, reemplazados por cultivos y pasturas implantadas (Castro Berman et al., 2018).

La Pampa Deprimida, inmersa en la ecorregión Pampa, se ubica en el centro-este de la provincia de Buenos Aires y se caracteriza por un relieve plano y la ocurrencia de inundaciones extraordinarias periódicas, de magnitud y frecuencia muy variables interanualmente (Morello, 2012). Como parte del paisaje se observa la presencia de múltiples cubetas, muchas de ellas producto de la deflación eólica, y otras de la disolución del carbonato de calcio subyacente (Tricart, 1973). Las bajas pendientes del terreno y el drenaje interno deficiente de estas depresiones (debido a la naturaleza arcillosa e impermeable de su subsuelo) hacen que, en períodos de excesos hídricos, el agua de lluvia se acumule en ellas y permanezca más tiempo que en las áreas circundantes (Fuschini Mejía, 1994). De esta manera, las depresiones se interconectan a través de la microtopografía formando vías de flujo, mientras que durante los períodos secos permanecen aisladas y algunas incluso se secan.

Estos cuerpos de agua son esenciales para la regulación hídrica, la recarga de acuíferos y la provisión de hábitats para una gran diversidad de especies acuáticas (Baigún et al., 2017). Asimismo, son considerados centinelas del cambio climático global y de las transformaciones en el uso del suelo debido a su capacidad para responder a modificaciones ambientales en la cuenca asociada (Adrian et al., 2009).

De acuerdo con Nomdedeu et al. (2024), los humedales ocupan aproximadamente el 35% de la superficie de la provincia de Buenos Aires, dentro de los cuales Geraldí et al. (2011) estimaron la existencia de 13824 cuerpos de agua mayores a 10 ha y 146000 cuerpos de agua de entre 0.05 y 10 ha.

Las cubetas de deflación son reconocidas por poseer una forma redondeada y bien definida (Dangavs, 1998), un flanco este-noreste con un médano de 1 a 1.5 m de altura que evidencia la acción de vientos dominantes del oeste-suroeste durante su formación (Frenguelli, 1950; Dangavs y Reynaldi, 2008). Su profundidad rara vez supera los 4 m, siendo la mayoría menores a 2 m (Fidalgo, 1983). Debido a estas características, pocas veces experimentan estratificación térmica, salvo en períodos muy breves. De manera natural, estos cuerpos son eutróficos, aunque enfrentan un estrés ambiental creciente que incrementa la concentración de nutrientes en sus aguas e intensifica dicho proceso (Quirós, 2005; Izaguirre et al., 2015; O'Farrell et al., 2021). Además, experimentan marcadas variaciones en superficie, profundidad y salinidad de acuerdo con los ciclos de sequía e inundación característicos del paisaje pampeano (Quirós et al., 2002a; Quirós, 2005). En estas lagunas es frecuente la presencia de macrófitas emergentes como el junco (*Schoenoplectus californicus*) que forman comunidades de densidades y formas variables ubicadas en zonas marginales o centrales del cuerpo de agua, y le dan su fisonomía característica. Suelen estar acompañadas por especies sumergidas, flotantes y otras macrófitas emergentes de menor porte.

A pesar de su importancia ecológica, existe una notable carencia de estudios que caractericen limnológicamente y evalúen el estado trófico de las cubetas ubicadas en el sector llano de la cuenca del arroyo del Azul perteneciente a la Pampa Deprimida. Comprender la limnología de estos sistemas resulta crucial para interpretar los procesos que determinan la calidad del agua y la estructura de las comunidades biológicas que los habitan (Sánchez, 2021; Zunino, 2018). Asimismo, evaluar su estado trófico es esencial para analizar los niveles de eutrofización y su impacto sobre la biodiversidad acuática y la funcionalidad de los ecosistemas.

OBJETIVO

El presente artículo tiene como objetivo presentar una primera caracterización limnológica y evaluación del estado trófico de cubetas someras con gran variabilidad en su dinámica hídrica, inmersas en campos ganaderos y ubicadas en el sector llano de la cuenca del arroyo del Azul.

METODOLOGÍA

Zona de estudio

La cuenca del arroyo del Azul (Figura 1) se ubica en el centro de la provincia de Buenos Aires (Argentina) entre las latitudes 36°09' y 37°19' S, y las longitudes 58°51' y 60°10' O con una superficie total de 6237 km². Presenta una precipitación media anual de 940.65 mm y una temperatura media de 14.4 °C (1994-2024), y el clima de la región es subhúmedo-húmedo mesotérmico, según la clasificación de Thornthwaite y Mather (1955). Los anegamientos son comunes en otoño, invierno y principios de primavera (Chaneton et al., 2002), mientras que en verano

predominan los déficits hídricos, generalmente asociados con altas tasas de evaporación y evapotranspiración (Varni et al., 2014).

Es posible establecer dos ambientes en la cuenca: uno serrano (2237 km²), localizado en el límite sur, perteneciente al Complejo Sierras Bonaerenses, con altitudes por sobre los 200 msnm y donde se ubican las nacientes de los arroyos (cuenca alta); y otro llano, localizado en la zona noreste, perteneciente al Complejo Pampa Deprimida que ocupa el área restante (4000 km²) y en donde las altitudes no superan los 130 msnm. La zona de transición entre ambos, cuenca media, se caracteriza por suaves ondulaciones y es en donde se emplaza la ciudad de Azul.

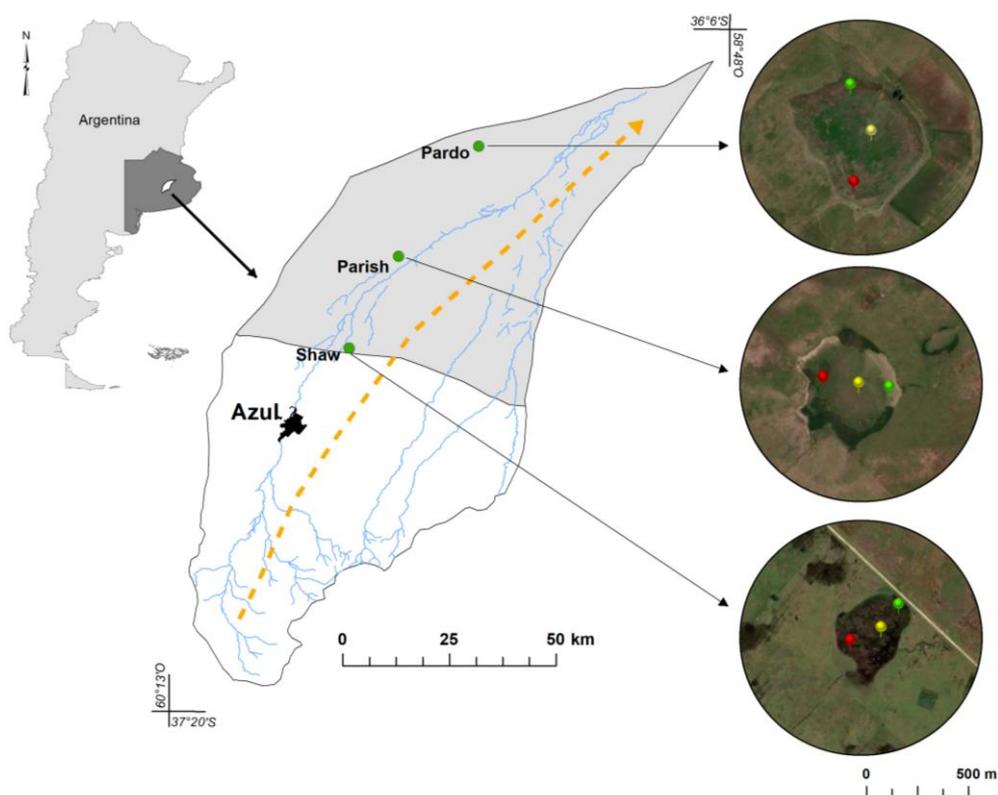


Figura 1. Cuenca del arroyo del Azul y la ubicación de las cubetas estudiadas en su sector llano (gris). Los puntos de colores indican los sitios de muestreo en cada cubeta: canal de entrada (rojo), centro (amarillo) y canal de salida (verde). Las flechas naranjas indican la dirección del gradiente de la Conductividad Eléctrica (CE) del agua subterránea.

El sector llano se caracteriza por tener una pobre expresión topográfica con suaves pendientes que oscilan entre 0.1 y 0.2% mostrando así, un escaso escurrimiento superficial, un nivel freático cercano a la superficie, entre 0.2 y 2.5 m (Entraigas et al., 2017) y un aumento de salinidad de las aguas subterráneas que siguen la dirección de flujo (suroeste a noreste) (Zabala et al., 2016). Las cubetas son abundantes en este sector y

experimentan cambios significativos según el régimen hídrico: en períodos de abundancia de agua, funcionan como reservorios y abrevaderos, mientras que en tiempos de sequía son ocupadas por el ganado que aprovecha las hierbas palatables que crecen en estos sitios.

De manera general las prácticas agropecuarias son actividades predominantes en la cuenca que

contribuyen de manera significativa al Producto Bruto Interno (PBI) nacional (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INDEC], 2024). En el sector llano, la ganadería extensiva es la actividad preponderante, con algunas áreas destinadas a cultivos intensivos.

Se seleccionaron 3 cubetas cercanas a los parajes de Shaw, Parish y Pardo ubicadas sobre una transecta paralela a la traza del arroyo del Azul, y siguiendo el gradiente regional de salinidad de las aguas subterráneas. Las tierras que conforman la matriz circundante de las cubetas analizadas están destinadas al uso ganadero, aunque el médano del flanco E-NE de Pardo se destina a la producción agrícola (Chindamo et al., 2024). La fisonomía general de estas cubetas está dada por las comunidades de vegetación que allí se manifiestan: se destaca la presencia de un anillo denso de macrófitas que cubre las zonas marginales y una carpeta de especies flotantes hacia el centro. En las cubetas de Shaw y Pardo, el anillo de macrófitas se encuentra dominado por *Schoenoplectus californicus* (junco), mientras que en Parish dicho anillo se encuentra constituido casi exclusivamente por la especie exótica *Iris pseudacorus* (lirio amarillo).

Metodología

Para caracterizar el régimen de precipitaciones se analizó la serie correspondiente al período de muestreo (2019-2022) registrada por la estación Azul Aero del Servicio Meteorológico Nacional. Con los datos de radiación, insolación, velocidad de viento, humedad y temperatura provenientes de la misma estación se estimó la evapotranspiración potencial mediante el método FAO Penman-Monteith (Allen et al., 2006) a través del software CROPWAT 8.0.

Se realizaron 9 muestreos estacionales en el período comprendido entre agosto de 2019 y agosto de 2022. Para determinar las áreas, los perímetros y el Índice de Desarrollo de Costa (IDC) de las cubetas en cada una de las ocasiones en que se llevaron a cabo los muestreos (o fechas próximas) se utilizaron imágenes satelitales Planet Scope, las cuales poseen una resolución espacial de 3 m y un sensor PS2 con 4 bandas espectrales (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano). Para identificar los límites entre agua libre y agua con vegetación se realizó una clasificación supervisada con el algoritmo Random Forest (complemento DZetsaka de QGIS, Alawathugoda et al., 2024). Los

resultados fueron validados mediante registros a campo. Una vez obtenidos los datos de área y perímetro con la calculadora de campo del software QGIS, se calculó el IDC según Timms (1992).

En cada cubeta se tomaron muestras de agua en 3 puntos (canal de entrada, canal de salida y centro) para analizar en laboratorio las concentraciones de nitrógeno Kjeldahl (NK), fósforo total (FT), y clorofila a fitoplanctónica (Cl-a), así como la determinación de sólidos totales suspendidos (STS). En cada sitio de muestreo se midió *in situ* la profundidad con varilla graduada, y se estimó la transparencia mediante el disco de Secchi (DS), mientras que la temperatura del agua (T), el pH, la conductividad eléctrica (CE) y el oxígeno disuelto (OD) se midieron con sensores de campo (Sonda multiparamétrica OAKTON Multi-Parameter PCSTestr 35, Oxímetro YSY Incorporated YSY MODEL 58). Los datos de Cl-a correspondiente a la primavera de 2020 no pudieron ser tomados. En el laboratorio, la misma se determinó siguiendo el método de Marker et al. (1980). Se filtró un volumen conocido de la muestra de agua a través de filtros de fibra de vidrio (GF/F). Los filtros se envolvieron inmediatamente en papel de aluminio y se congelaron (-20°C). La Cl-a se extrajo utilizando etanol al 90% en oscuridad. La concentración de pigmento se determinó espectrofotométricamente. Para la determinación del NK se utilizó el método Macro-Kjeldahl (SM 4500-Norg B), realizando una digestión ácida y posterior titulación del amoníaco. Para determinar el FT se utilizó el Método del Ácido Ascórbico (SM 4500-P E). Se realizó una digestión ácida, en muestra sin filtrar, capaz de oxidar la materia orgánica efectivamente para liberar el fósforo como ortofosfato y posteriormente se determinó por espectrofotometría UV-Visible (Espectrofotómetro Thermo Aquamate) a 880 nm. En cuanto a los STS se utilizaron filtros GF de 0.5 μm de tamaño de poro, los cuales se pesaron hasta peso constante. Luego se filtró un volumen conocido, se secaron entre 103 y 105 $^{\circ}\text{C}$ y, por diferencia de pesos, se calcularon los STS en el volumen filtrado.

Para la evaluación del estado trófico, se calcularon Índices de Estado Trófico (IET) según (a) Aizaki et al. (1981) y (b) el Departamento de Protección Ambiental de Florida (FDEP, 1996), considerando concentraciones de NK y FT. No se incluyó la transparencia por las limitaciones técnicas vinculadas con la poca profundidad y alta densidad de vegetación.

Análisis estadístico

Se evaluaron correlaciones no paramétricas de Spearman ($p \leq 0.05$), considerando NK como estimador de nitrógeno total ($r = 0.89$; $p < 0.05$). Se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) con las variables: área, pH, CE, NK, FT, STS y DS. Dichas variables fueron estandarizadas, y se excluyeron aquellas altamente correlacionadas ($r > 0.9$). Se trabajó con el promedio de los sitios para cada fecha. Los softwares utilizados fueron Infostat Estudiantil (Di Rienzo, 2020) y Past 4.17 (Hammer et al., 2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El periodo de estudio se caracterizó por su dinámica hídrica muy pronunciada, alternando entre periodos de exceso y déficit hídrico. El promedio anual de las precipitaciones estuvo un 5% por debajo de la media histórica, por lo cual el comportamiento de los años analizados fue definido como normal a ligeramente seco. En cuanto a la evapotranspiración, la misma reprodujo el patrón típico para la región, con valores máximos en verano y mínimos en invierno (Figura 2).

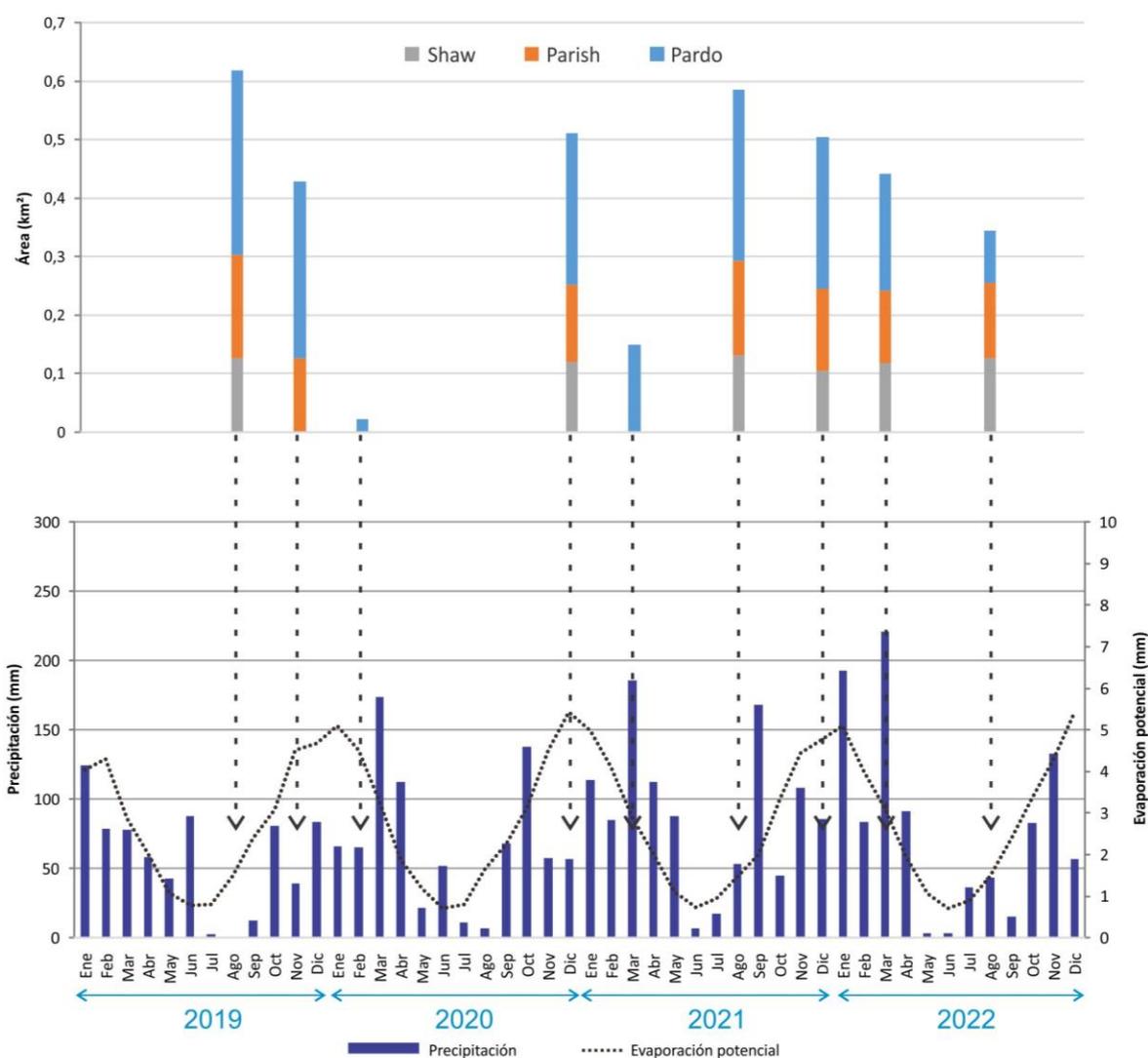


Figura 2. Precipitación (azul) y evapotranspiración (rojo) mensual durante el periodo de muestreo 2019-2022. En la parte superior, las barras indican el área de las cubetas en cada fecha: Shaw (gris), Parish (naranja) y Pardo (celeste).

Las máximas superficies de las cubetas se observaron durante el invierno de 2019 en Pardo y

Parish (31.5 ha y 17.6 ha, respectivamente) y el invierno de 2021 en Shaw (13.1 ha). En contraste,

durante los veranos, las cubetas se secaron por completo, excepto en el verano de 2022. De acuerdo con Briceño (2024) en esta región los periodos lluviosos coinciden con momentos de alta evapotranspiración, lo cual generalmente restringe aumentos significativos en el volumen de agua almacenada en las cubetas. En contraste, durante los períodos de escasas precipitaciones, las bajas tasas de evapotranspiración favorecen la retención de agua en las cubetas. Este comportamiento confirma la marcada dependencia de estos sistemas respecto del comportamiento cíclico que se manifiesta en periodos con exceso y déficit de lluvias (Quirós et al., 2002b; Quirós, 2005; Bohn et al., 2011).

Las formas de las cubetas se mantuvieron relativamente estables a lo largo del tiempo, con $IDC \leq 1.85$, salvo en Pardo durante el verano de 2021, ocasión en la que alcanzó un valor de 2.26. Estos valores se encuentran dentro del rango reportado para lagunas pampeanas, cuyo IDC oscila entre 1.3 y 3.5 (Quirós, 2004; Dangavs, 1976). La estabilidad morfométrica observada refuerza la hipótesis de que estos cuerpos de agua, aunque altamente dinámicos en superficie y volumen, mantienen patrones estructurales característicos.

En la Figura 3 se presentan los valores medios de las variables limnológicas analizadas en los sitios muestreados. La temperatura del agua mostró fluctuaciones asociadas a la estacionalidad climática, sin evidenciar marcadas diferencias a pesar de las variaciones en las áreas de las cubetas. Los valores de pH encontrados fueron básicos o neutros, y el OD superó los 5 mg/l en casi todos los muestreos, por lo que las aguas pueden calificarse como bien oxigenadas. Por su parte, la CE media registrada fue de 1145.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en Pardo, 762 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en Parish y 751 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en Shaw, valores que se encuentran dentro del rango registrado para la región. A fin de comparar los datos obtenidos para esas variables, es oportuno citar el estudio llevado a cabo por Sánchez et al. (2023) sobre 68 lagunas de la región pampeana durante el período 2015-2019, en el cual registraron valores de pH entre 8.09 y 9.40 y de OD entre 4.18-17.20 mg/l, mientras que de CE obtuvieron una media de 692 $\mu\text{S}/\text{cm}$ producto de valores que variaron entre 320 y 202100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual demuestra la gran variabilidad de este parámetro en la región. En cuanto a los máximos valores de STS, los mismos se registraron en Parish durante la primavera de 2020 (962 mg/l), seguido por un valor elevado en Shaw durante la misma estación (515 mg/l) y en

Pardo durante el verano de 2022 (413 mg/l). Estos valores extremos pueden explicarse considerando las condiciones climáticas de esos momentos. Durante los muestreos de primavera 2020 se registraron fuertes vientos y caída de granizo en los días previos, lo cual suele producir la resuspensión de los sedimentos en las cubetas, generando la mezcla de los mismos en toda la columna de agua. Por otro lado, el verano 2020 fue extremadamente seco, las cubetas de Shaw y Parish no contenían agua y en Pardo solo se pudo muestrear en un sitio muy restringido y muy poco profundo (<10 cm).

Exceptuando estos casos puntuales, los valores de STS fueron inferiores a 215 mg/l, mostrando una tendencia más estable en el resto del período de estudio. Las variaciones temporales observadas en todos los parámetros reflejan la influencia de las condiciones climáticas y las fluctuaciones en el régimen hídrico de las cubetas, destacando la marcada dinámica de estos sistemas.

En relación a las concentraciones de nutrientes, se observó que los valores de FT variaron entre 0.1 y 0.4 mg/l, aunque se registraron incrementos puntuales en verano y primavera de 2020, alcanzando registros cercanos a 1 mg/l. En cuanto al NK, los valores se mantuvieron entre 1 y 8 mg/l, con picos destacados en verano de 2020 (16 mg/l) y primavera de 2019 (12 mg/l). Tanto las concentraciones de FT como de NK (utilizado como estimador del NT) fueron elevadas indicando condiciones que variaron desde eutróficas hasta hipertróficas ($FT > 0.05$ mg/l y $NT > 0.7$ mg/l) en todas las cubetas a lo largo del período estudiado (de acuerdo con los valores límite propuestos por Aizaki et al., 1981 y Paulic et al., 1996). Este patrón se observa claramente en la Figura 4 al evaluar los índices de estado trófico que contemplan dichas concentraciones de nutrientes como indicadores.

En los últimos cien años de la historia de las lagunas pampeanas, se registró un aumento en las condiciones de eutrofización asociada al aumento de la agricultura, la cría de ganado y los asentamientos urbanos (Izaguirre et al., 2022). Dichos autores hallaron un aumento significativo en las concentraciones de nutrientes en las lagunas pampeanas durante el siglo XXI. En particular, observaron diferencias marcadas en las concentraciones de FT (las cuales variaron de una media de 0.27 mg/l en el siglo XX a 0.61 mg/l en el siglo XXI) y de NT (que duplicaron su valor al aumentar de 2.42 mg/l a 4.83 mg/l en el mismo período). Dicha tendencia también se observó en la

biomasa algal, la cual mostró un incremento significativo en sus niveles medios, desde 74.3 $\mu\text{g/l}$ en el siglo XX hasta 133.3 $\mu\text{g/l}$ en el siglo XXI. En las cubetas estudiadas se registraron valores de Cl-a inferiores a 15 $\mu\text{g/l}$ a lo largo de los tres años estudiados, contrariamente a lo observado para las

lagunas pampeanas (Sánchez et al., 2023; Izaguirre et al., 2022). De manera excepcional, se registraron picos en las concentraciones de la misma en la primavera de 2019 (139.3 $\mu\text{g/l}$ y 76.2 $\mu\text{g/l}$ en Shaw y Parish, respectivamente) y en el verano de 2020 (74.03 $\mu\text{g/l}$ en Pardo).

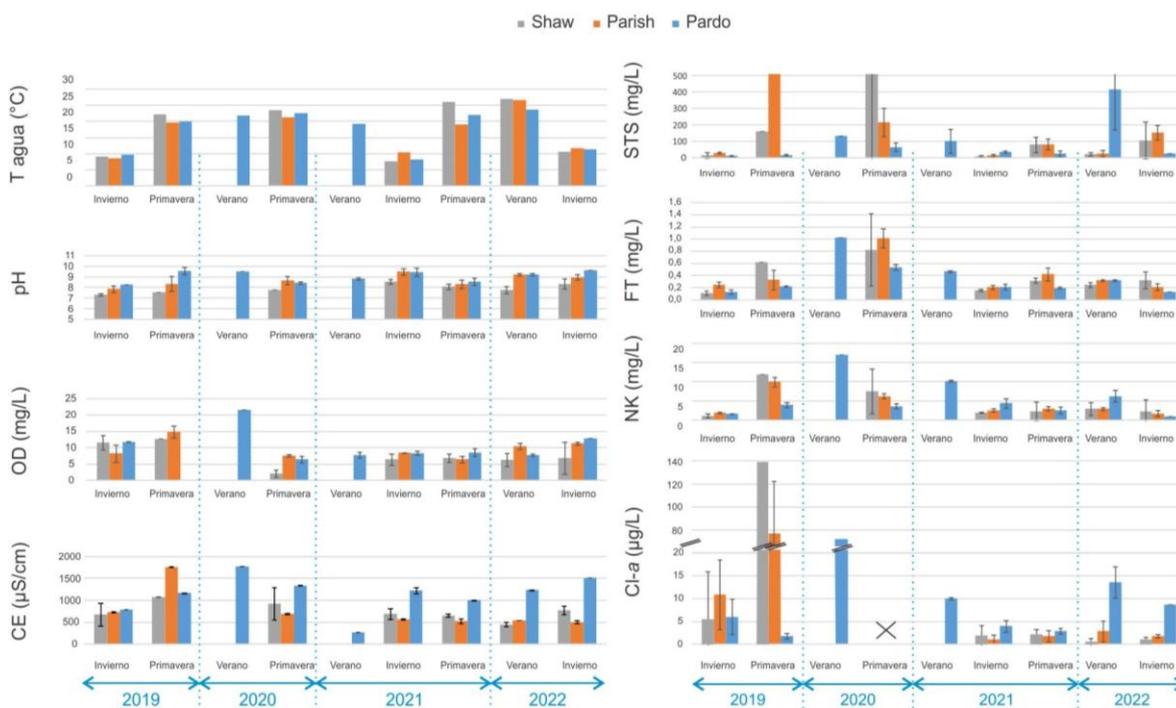


Figura 3. Variación de los parámetros físicos, químicos y biológicos en las fechas de muestreo. T agua: temperatura del agua; CE: conductividad eléctrica; OD: oxígeno disuelto; FT: concentración de fósforo total; NK: concentración de nitrógeno Kjeldahl; STS: sólidos totales suspendidos; Cl-a: concentración de clorofila a fitoplanctónica. La "X" marca las fechas donde no se obtuvieron datos.

Independientemente del índice de estado trófico utilizado, todas las cubetas presentaron condiciones desde eutrófica a hipertrófica al considerar la concentración de nutrientes (FT y/o NK) como indicador (Figura 4).

Sin embargo, al estimar dichos índices considerando la concentración de Cl-a, el rango se amplió desde ultra-oligotrófico a hipertrófico. Esto coincide con los aportes de Allende y Fontanarrosa (2023), donde los IET estimados con Cl-a mostraron un rango comprendido entre oligotrófico e hipertrófico, el cual resultó mucho más amplio que aquel obtenido considerando las concentraciones de nutrientes. Las condiciones de eutrofia e hipereutrofia son frecuentes en lagunas pampeanas debido a la influencia combinada de los aportes agrícolas y ganaderos y los procesos naturales de concentración de nutrientes en cuerpos

de agua someros (Izaguirre et al., 2015; Castro Berman et al., 2022). Estas diferencias halladas entre los IET calculados con los nutrientes y con la Cl-a pueden deberse a que las elevadas concentraciones de nutrientes no siempre redundan en un aumento de las concentraciones del fitoplancton. En estas cubetas se observa un desarrollo importante de macrófitas acuáticas que compiten con el fitoplancton por los nutrientes disponibles, limitando su desarrollo. Las plantas acuáticas y las algas planctónicas se vinculan a través de una serie de relaciones directas e indirectas. En particular, la presencia de macrófitas flotantes puede afectar el desarrollo del fitoplancton al limitar la luz y/o competir por nutrientes, lo que podría ocasionar una subestimación del estado trófico al utilizar su biomasa (Cl-a) como indicador (O'Farrell et al., 2009; Allende y Fontanarrosa, 2023).

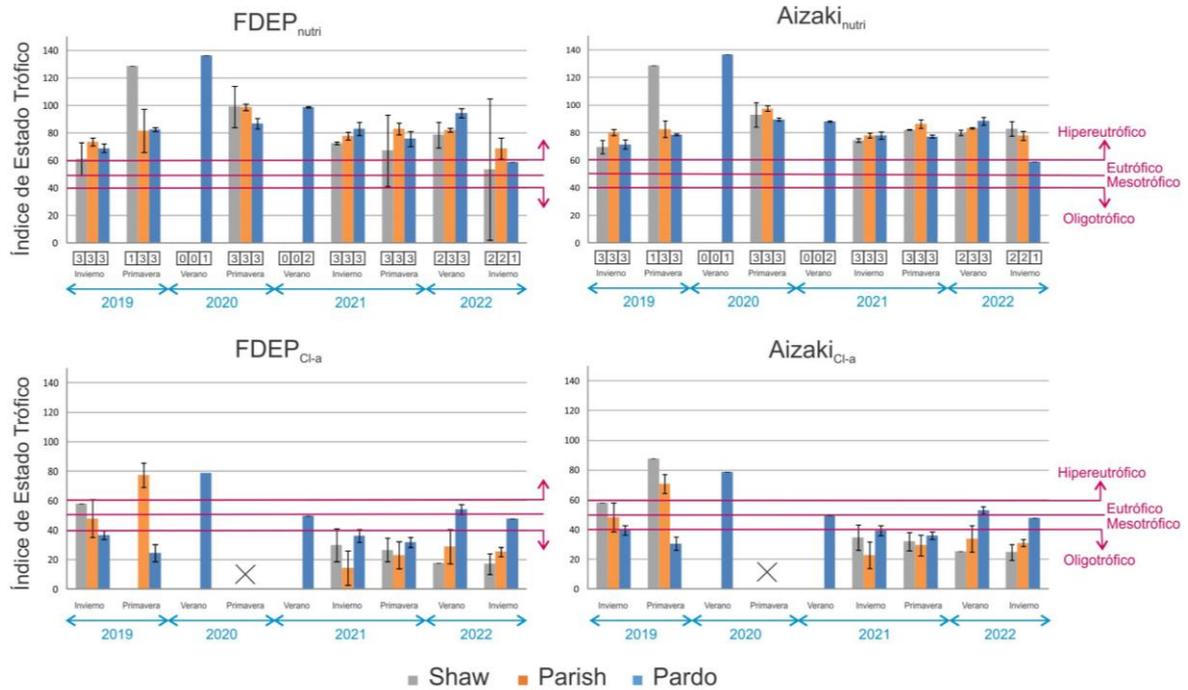


Figura 4. Índices de estado trófico FDEP y Aizaki. Los gráficos superiores muestran los índices basados en las concentraciones de nutrientes (nutri), y los inferiores en clorofila-a (Cl-a). Las líneas rojas representan los umbrales para cada condición trófica. Se grafican los valores medios (barras) \pm el error estándar (segmentos verticales). Los números con recuadro indican la cantidad de sitios muestreados de acuerdo a la condición hídrica del momento. La "X" indica ausencia de datos.

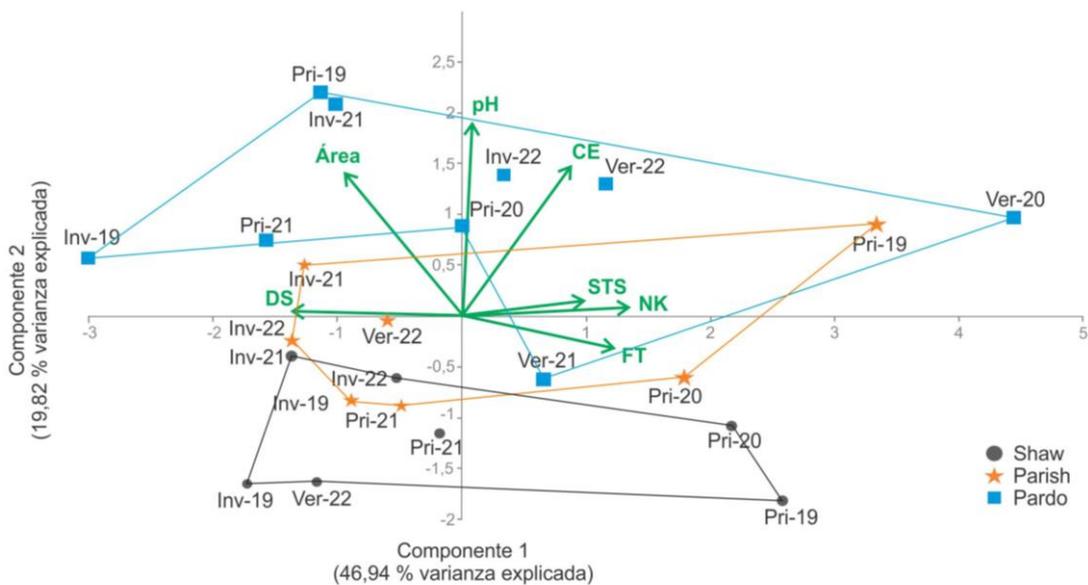


Figura 5. Biplot resultante del Análisis de Componentes Principales. Las flechas representan las variables ambientales más relevantes: Área, DS (transparencia según disco de Secchi), pH, CE (conductividad eléctrica), NK (nitrógeno Kjeldahl), FT (fósforo total), y STS (sólidos totales suspendidos). Los polígonos delimitan la variación temporal de cada cubeta según los muestreos realizados en invierno (Inv), primavera (Pri) y verano (Ver) de los años involucrados en el estudio (2019 a 2022).

En cuanto al ACP, los 2 primeros componentes (Figura 5). La primera dimensión captura la explican en conjunto el 66.7% de la varianza total variabilidad relacionada con la concentración de

nutrientes, la materia suspendida y la transparencia de las aguas (46.94%), permitiendo diferenciar las condiciones estacionales a lo largo del período analizado. La cubeta Pardo es la que presenta la mayor dispersión de sus muestras en este Componente, reflejando mayor concentración de nutrientes y solutos durante los veranos (asociado a una alta actividad biológica y a mayores tasas de evaporación) en comparación con los inviernos y las primaveras (cuando las aguas se presentan más transparentes). Las cubetas Shaw y Parish presentan dispersiones más restringidas en este sentido debido a que solo almacenaron agua en uno de los veranos del período estudiado. La segunda dimensión del ACP, por su parte, refleja diferencias en la composición iónica y la acidez de las aguas, y el área de las cubetas (19.82%), permitiendo caracterizar a las tres lagunas: Pardo es el cuerpo de agua que presentó valores más altos en estas variables con respecto a Parish (intermedios) y a Shaw (los más bajos), reflejando el mismo gradiente que Zabala et al. (2016) encontraron en esta región.

CONCLUSIONES

Las cubetas estudiadas se localizan en una región con una marcada dinámica hídrica y presentan una alta dependencia de los ciclos de exceso y déficit hídrico. Sin embargo, a pesar de las significativas variaciones en términos de superficie, mostraron estabilidad en su morfometría.

A su vez, presentaron condiciones ambientales favorables para el desarrollo de las comunidades biológicas, con valores de OD adecuados y de CE dentro del típico rango de variación de las lagunas pampeanas. También exhibieron altos niveles de nutrientes y STS, especialmente durante los veranos.

El ACP constituyó una herramienta útil para diferenciar las variables que determinan la dinámica estacional de las cubetas (concentración de nutrientes, materia suspendida y transparencia de las aguas) de aquellas que definen las características distintivas de cada cuerpo de agua (composición iónica, acidez y área de las lagunas).

Considerando a los nutrientes como indicadores, las cubetas analizadas se encuentran en un estado eutrófico con tendencia a la hiper-eutrofización en determinados períodos, condición que es subestimada al considerar como indicador a la Cl-a. Esta cuestión permite inferir que en estos ambientes

con alta carga de nutrientes las macrófitas compiten con el fitoplancton por los recursos.

La información obtenida en el presente trabajo es relevante no sólo para comprender la funcionalidad de estos sistemas, sino también para orientar futuras acciones de manejo y conservación en un contexto de cambios ambientales y uso intensivo del territorio. Los resultados subrayan la importancia de estos cuerpos de agua como centinelas de los cambios ambientales y climáticos. Su sensibilidad a los impactos antrópicos refuerza la necesidad de implementar estrategias de gestión basadas en un enfoque integral de su dinámica, así como de profundizar en investigaciones sobre las interacciones entre régimen hídrico, calidad del agua y biodiversidad, con el objetivo de garantizar la sostenibilidad de estos valiosos ambientes a largo plazo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado en parte por el Proyecto de Unidad Ejecutora N° 22920200100035CO. El contenido es parte del proyecto de investigación de Micaela Chindamo, tesista del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Argentina) y estudiante del Doctorado en Ciencias Aplicadas mención Ambiente y Salud (Facultad de Ciencias Exactas, UNCPBA, Argentina). Agradecemos a los dueños y encargados de los establecimientos rurales donde se ubican las cubetas analizadas por permitirnos el ingreso a las mismas. También los aportes de los técnicos de campo Enrique Queupán, Joaquín Rodríguez y Andrés Bentivegna y a las técnicas de laboratorio Fátima Altolaquirre, Natalia De Libano y Pamela Hernández.

REFERENCIAS

- Adrian, R., O'Reilly, C. M., Zagarese, H., Baines, S. B., Hessen, D. O., Keller, W., Livingstone, D. M., Sommaruga, R., Straile, D., Van Donk, E., Weyhenmeyer, G. A. y Winder, M. (2009). Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and oceanography*, 54(6part2), 2283-2297. https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283
- Aizaki, M., Otsuki, A., Fukushima, T., Hosomi, M. y Muraoka, K. (1981). Application of Carlson's trophic state index to Japanese lakes and relationships between the index and other parameters. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie*:

- Verhandlungen*, 21(1), 675-681. <https://doi.org/10.1080/03680770.1980.11897067>
- Alawathugoda, C., Hinge, G., Elkollaly, M. y Hamouda, M. A. (2024). Impact of Utilizing High-Resolution PlanetScope Imagery on the Accuracy of LULC Mapping and Hydrological Modeling in an Arid Region. *Water*, 16(16), 2356. <https://doi.org/10.3390/w16162356>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. *Estudio FAO: Riego y Drenaje*, 56(Parte A), 1-79. <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s.pdf>
- Allende L, Fontanarrosa, M. S. (2023) Addressing the trophic status in urban ponds: An evaluation of current trophic state indexes. *Austral Ecology*, 48(8). 1828–1847. <https://doi.org/10.1111/aec.13425>
- Baigún, C. R. M., Lombardo, R. (2017). Subregión lagunas de la Pampa Húmeda en Benzaquén, L., Blanco D., Bo, R., Kandus, P., Lingua, G., Minotti, P., Quintana, R. (Eds) *Regiones de Humedales de la Argentina* (pp. 207-222). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Fundación Humedales/Wetlands International. Universidad Nacional de San Martín y Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.
- Castro Berman, M., Marino, D. J. G., Quiroga, M. V. y Zagarese, H. (2018). Occurrence and levels of glyphosate and AMPA in shallow lakes from the Pampean and Patagonian regions of Argentina. *Chemosphere*, 200, 513-522. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.103>
- Castro Berman, M., O'Farrell, I., Huber, P., Marino, D. y Zagarese, H. (2022). A large-scale geographical coverage survey reveals a pervasive impact of agricultural practices on plankton primary producers. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 325(107740). <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107740>
- Bohn, V. Y., Perillo, G. M. y Piccolo, M. C. (2011). Distribution and morphometry of shallow lakes in a temperate zone (Buenos Aires Province, Argentina). *Limnetica*, 30(1), 89-102. <https://doi.org/10.23818/limn.30.08>
- Bricenón Maldonado, N. M. (2024). *Innovación de la formulación del proceso precipitación escorrentía en sistemas hidrológicos de llanura mediante la adaptación de metodologías existentes*. [Tesis doctoral, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires]. RIDAA UNICEN. <https://ridaa.unicen.edu.ar:8443/server/api/core/bitstreams/872dcdcf-5c02-485e-a656-c2828ae1eb5d/content>
- Chaneton, E. J., Perelman, S. B., Omacini, M. y León, R. J. C. (2002). Grazing, environmental heterogeneity, and alien plant invasions in temperate pampa grasslands. *Biological Invasions* 4. 7-24. <https://doi.org/10.1023/A:1020536728448>
- Chindamo, M. A., Entraigas, I., Vercelli, N., Ares, M. G. y Kandus, P. (2024). El paisaje como predictor de la presencia de humedales. Su expresión en una cuenca de la Pampa Deprimida (Argentina). *Revista de la Asociación Argentina de Ecología de Paisajes*, 12(1). 1-17.
- Dangavs, N. (1976). Descripción sistemática de los parámetros morfométricos considerados en lagunas pampásicas. *Linnobios*, 1(2), 35-39. https://www.researchgate.net/profile/Nauris-Dangavs/publication/284876681_Descripcion_sistemática_de_los_parametros_morfometricos_considerados_en_las_lagunas_pampasicas/links/5cd97a4d299bf14d9592cb07/Descripcion-sistemática-de-los-parametros-morfometricos-considerados-en-las-lagunas-pampasicas.pdf
- Dangavs, N. (1998). Los ambientes lénticos de la pampasia bonaerense, República Argentina. En A. Fernandez Cirelli (Comp.), *Agua. Problemática regional* (pp. 145-149). Editorial Universitaria Buenos Aires.
- Dangavs, N. V. y Reynaldi, J. M. (2008). Paleolimnología de la Laguna Cerrillo del medio, Monte, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 63 (1). 29-42. <https://revista.geologica.org.ar/raga/article/view/1272/1253>
- Di Rienzo J. A., Casanoves F., Balzarini M. G., Gonzalez L., Tablada M. y Robledo C. W. (2020) *InfoStat* (versión 2020) [Software de computadora]. <https://www.infostat.com.ar/>
- Entraigas, I., Vercelli, N., Ares, M. G., Varni, M. y Zeme, S. (2017). Flooding effects on grassland species composition in the Azul creek basin, Argentina. *The Rangeland Journal*, 39(3), 245–252. <https://doi.org/10.1071/RJ16034>
- Fidalgo, F. (1983). Algunas características de los sedimentos superficiales en la cuenca del Río Salado y en la Pampa Ondulada en M. C. Fuschini Mejía (Ed.), *Hidrología de las grandes llanuras Actas del Coloquio Internacional sobre Hidrología de Grandes Llanuras de Olavarría, abril 1983* (pp. 1045-1067).
- Frenquelli, J. (1950). Rasgos generales de la morfología y la geología de la provincia de Buenos Aires. *Laboratorio de Ensayo de Materiales e Investigaciones Tecnológicas, Serie II* (33). 1-72.
- Fuschini Mejía, M. C. (1994). *El agua en las llanuras*. Programa Hidrológico Internacional,

- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000159361>
- Geraldi, A. M., Piccolo, M. C. y Perillo, G. M. E. (2011). El rol de las lagunas bonaerenses en el paisaje pampeano. *Ciencia Hoy*, 21(123), 9-14. <http://hdl.handle.net/11336/21369>
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T. y Ryan, P. D. (2001). Past: paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia electronica*, 4(1), 1-9. https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (2024). Informe de avance del nivel de actividad. *Informes técnicos*, 8(284), 1-16. https://www.indec.gov.ar/uploads/informesdeprensa/pib_12_24BE4AAD8CFB.pdf
- Izaguirre, I., Miranda, L. A., Perillo, G. M. E., Piccolo, M. C. y Zagarese, H. E. (2015). Preface: Shallow lakes from the Central Plains of Argentina. *Hydrobiologia*, 752(1), 1-3. <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2214-4>
- Izaguirre, I., Zagarese, H. E. y O'Farrell, I. (2022). The limnological trace of contemporaneous anthropogenic activities in the Pampa Region. *Ecología Austral*, 32(2), 650-662. <https://doi.org/10.25260/EA.22.32.2.1.1884>
- Marker, A. F. H., Nusch, A., Rai, H. y Riemann, B. (1980) The measurement of photosynthetic pigments in freshwater and standardization of methods: conclusions and recommendations. *Archiv für Hydrobiologie*, 14, 91-106.
- Matteucci, S. D. (2012). Ecorregión pampa. En Morello, J., Matteucci, S. D., Rodríguez, A. F. y Silva, M. (Eds.), *Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos* (pp. 391-445). Orientación Gráfica Editora. https://www.researchgate.net/profile/Silvia-Matteucci-2/publication/268447092_Ecorregiones_y_complejos_ecosistemicos_Argentinos/links/598333be0f7e9b2ac353f62e/Ecorregiones-y-complejos-ecosistemicos-Argentinos.pdf
- Morello, J., Matteucci, S. D., Rodríguez, A. F. y Silva, M. (2012). *Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos*. Orientación Gráfica Editora, Buenos Aires. https://www.researchgate.net/profile/Silvia-Matteucci-2/publication/268447092_Ecorregiones_y_complejos_ecosistemicos_Argentinos/links/598333be0f7e9b2ac353f62e/Ecorregiones-y-complejos-ecosistemicos-Argentinos.pdf
- Nomdedeu, S. M., Orzanco, J. y Kandus, P. (2024). Wetlands distribution in the agricultural-livestock core of the South American temperate pampas landscape. Approach from soil cartography. *Wetlands Ecology and Management*, 32(2), 229-248. <https://doi.org/10.1007/s11273-023-09972-x>
- O'Farrell, I., de Tezanos Pinto, P., Rodríguez, P. L., Chaparro, G. y Pizarro, H. N. (2009) Experimental evidence of the dynamic effect of free-floating plants on phytoplankton ecology. *Freshwater Biology*, 54(2), 363-375. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.02117.x>
- O'Farrell, I., Sánchez, M. L., Schiaffino, M. R., Izaguirre, I., Huber, P., Lagomarsino, L. y Yema, L. (2021). Human impacted shallow lakes in the Pampean plain are ideal hosts for cyanobacterial harmful blooms. *Environmental Pollution*, 288, 117747. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117747>
- Paulic, M., Hand, J. y Lord, L. (1996). *Water Quality Assessment for the State 490 of Florida*. (Section 305(b) Main Report). Departamento de Protección Ambiental de Florida (FDEP). [https://hillsborough.waterratlas.usf.edu/upload/documents/1996%20Water-Quality%20Assessment%20for%20the%20State%20of%20Florida%20Section%20305\(b\)%20Main%20Report.pdf](https://hillsborough.waterratlas.usf.edu/upload/documents/1996%20Water-Quality%20Assessment%20for%20the%20State%20of%20Florida%20Section%20305(b)%20Main%20Report.pdf)
- Quirós, R. (2004). Sobre la morfología de las lagunas pampeanas. *Documento de trabajo del área de Sistemas de Producción Acuática*, 3. <https://www.agro.uba.ar/users/quiros/Working/LaMorfologia.pdf>
- Quirós, R. (2005). La ecología de las lagunas de las Pampas. *Investigación y Ciencia*, 1(6), 1-13. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_peces/piscicultura/11-ecologia_lagunas_pampas.pdf
- Quirós, R., Rennella, A. M., Boveri, M. B., Rosso, J. J. y Sosnovsky, A. (2002). Factores que afectan la estructura y el funcionamiento de las lagunas pampeanas. *Ecología austral*, 12(2), 175-185. <https://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/EcologiaAustral/article/view/1556>
- Quirós, R., Rosso, J. J., Rennella, A., Sosnovsky, A. y Boveri, M. (2002). Análisis del estado trófico de las lagunas pampeanas (Argentina). *Interciencia*, 27(11), 584-591. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33907402.pdf>
- Sánchez, M. L., Izaguirre, I., Zagarese, H., Schiaffino, M. R., Castro Berman, M., Lagomarsino, L., Chaparro, G., Baliña, S., Vera, M. S. y Spence Cheruvel, K. (2023) Drivers of planktonic chlorophyll a in pampean shallow

- lakes. *Ecological Indicators* 146(109834). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109834>
- Sánchez, M. L., Schiaffino, M. R., Graziano, M., Huber, M. P., Lagomarsino, L., Minotti, P. G., Zagarese, H. E. e Izaguirre, I. (2021). Effect of land use on the phytoplankton community of Pampean shallow lakes of the Salado River basin (Buenos Aires Province, Argentina). *Aquatic Ecology*, 55, 417-435. <https://doi.org/10.1007/s10452-021-09835-8>
- Thornthwaite, C. W. y Mather, Jr. (1955). *El balance de agua*. Laboratorio de Climatología, Centerton, Nueva Jersey, Estados Unidos.
- Timms, B. V. (1992). *Lake geomorphology*. Gleneagles Publishing, Adelaide
- Tricart, J. (1973). *Geomorfología de la Pampa Deprimida: base para los estudios edafológicos y agronómicos* (Vol. 12 de Colección científica del INTA, 202 p.). Secretaría de Estado de Agricultura y Ganadería de la Nación, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Usunoff, E., Varni, M., Weinzettel, P. y Rivas, R. (1999). Hidrogeología de grandes llanuras: La pampa húmeda argentina. *Boletín geológico y minero*, 110(4), 47-62. https://info.igme.es/biblioteca/ficheros/BGM/Boletin%20110_4_1999.pdf
- Varni, M., Zeme, S., Weinzettel, P. y Dietrich, S. (23, 24, 25 y 26 de septiembre de 2014). *Relación entre recarga al acuífero freático y otros términos del balance hídrico en Azul, centro de la provincia de Buenos Aires*. II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Santa Fe, Argentina. https://www.researchgate.net/publication/267764874_Relacion_entre_recarga_al_acuifero_freatico_y_otros_terminos_del_balance_hidrico_en_Azul_centro_de_la_Provincia_de_Buenos_Aires
- Zabala, M. E., Manzano, M. y Vives, L. (2016). Assessment of processes controlling the regional distribution of fluoride and arsenic in groundwater of the Pampeano Aquifer in the Del Azul Creek basin (Argentina). *Journal of Hydrology*, 541(B), 1067–1087. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.023>
- Zunino, J. (2018). *Lagunas someras como ecosistemas centinelas de la variabilidad climática: respuesta de las comunidades fitoplanctónicas* [Tesis de doctorado]. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca. https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/4391/Tesis%20Zunino_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Tipo de Publicación: ARTÍCULO

Trabajo recibido el 15/01/2025, aprobado para su publicación el 21/02/2025 y publicado el 14/03/2025.

COMO CITAR

Chindamo, M. A., Fontanarrosa, M. S., Entraigas, I., Dávila, C. F., Fajardo González, L. F., Briceño Maldonado, N. M. y Vercelli, N. (2025). Caracterización y dinámica estacional de las cubetas del sector llano de la cuenca del arroyo del Azul. *Cuadernos del CURIHAM, Edición Especial (2024): 40 Años del IHLLA*. e10. <https://doi.org/10.35305/curiham.ed24.e10>

ROLES DE AUTORÍA

MAC, MSF e IE elaboraron la conceptualización de la investigación, el diseño del estudio, la obtención de los datos, el análisis formal, la concepción de la idea del artículo, y la escritura, revisión y edición general del manuscrito. CFD, LFFG, NMBM y NV aportaron datos para la caracterización de la zona de estudio y recursos para la interpretación de ciertos resultados. Todas las autoras aprobaron la versión para ser publicada y son capaces de responder respecto a los distintos aspectos incluidos en el manuscrito.

LICENCIA

Este es un artículo de acceso abierto bajo licencia: Creative Commons Atribución -No Comercial -Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>)



Este trabajo se enmarca dentro de la EDICIÓN ESPECIAL (2024): 40 años del Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Jorge Usunoff" (IHLLA), de la revista Cuadernos del CURIHAM.