



Dinámica morfosedimentaria del río Salado, variabilidades hidroclimáticas y sus alteraciones debido a la construcción de la presa en General Belgrano, Buenos Aires.

Antonella MONTI¹, Silvia MARCOMINI^{1,2}, Rubén LÓPEZ^{1,2,3}

¹Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Buenos Aires, Argentina.

²CONICET – Universidad de Buenos Aires. Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires (IGEBA), Buenos Aires, Argentina.

³Universidad Nacional de Avellaneda (UNDAV)

email: antonella-monti@outlook.com, scm@gl.fcen.uba.ar, rlopez@gl.fcen.uba.ar

Editor: Ricardo A. Astini

Recibido: 15/03/2025

Aceptado: 02/12/2025

RESUMEN

En la llanura pampeana, el riesgo de inundaciones ha recibido atención por su impacto socioambiental, mientras que el problema de las sequías ha sido subestimado. Estas también generan consecuencias económicas, sociales y ecológicas, por lo que resulta necesario abordar ambos extremos del régimen hídrico de manera integral. Este trabajo examina los cambios geomorfológicos y ambientales ocurridos en dos tramos del río Salado, su variabilidad climática y las consecuencias derivadas de la construcción de dos presas en la localidad de General Belgrano durante la sequía extrema de 2023. El tramo comprendido entre las presas (estancado) presentó en el pico de la sequía (enero 2023) un ambiente anóxico, con sedimentos fangosos, alta materia orgánica y eutrofización. Estas condiciones, junto con el aumento de salinidad, temperatura y pH, provocaron mortandad de fauna acuática y afectaron al turismo. Los testigos tomados en la planicie aluvial de ambos tramos evidenciaron cambios sedimentarios y ambientales significativos posteriores a la construcción de las presas. Se estimó una tasa de sedimentación máxima de ~15 cm/año para el río Salado y una tasa media de 1,6 cm/año para el sector endicado. El análisis histórico del clima y de las inundaciones permitió identificar cuatro fases: una etapa de sequías prolongadas (1932–1957), un período neutro (1958–1979), una alternancia de eventos extremos (1980–2002) y, desde 2003, un predominio de sequías prolongadas con breves ciclos húmedos intensos. Se recomienda regular los niveles de agua ante posibles sequías y evitar el vertido de efluentes domésticos para prevenir la eutrofización del sistema.

Palabras clave: sequía, inundación, región pampeana, riesgo geológico, impacto ambiental.

ABSTRACT

Morphosedimentary dynamics of the Salado River, hydroclimatic variability, and alterations caused by the dam at General Belgrano, Buenos Aires.

In the Pampean plain, flood risk has received considerable attention due to its socio-environmental impact, while drought has been comparatively underestimated. Yet droughts also cause significant economic, social, and ecological consequences, making it essential to address both extremes of the hydrological regime in an integrated manner. This study analyzes geomorphological and environmental changes in two sections of the Salado River, their hydroclimatic variability, and the environmental impacts associated with two dams near the town of General Belgrano during the extreme drought of 2023. During the peak of this drought (January 2023), the dam-impounded reach developed an anoxic environment characterized by muddy sediments, high organic-matter content, and pronounced eutrophication. These conditions, coupled with increased salinity, temperature, and pH, led to widespread aquatic fauna

mortality and negatively affected tourism. Sediment cores collected from the floodplain of both river sections revealed clear sedimentary and environmental changes following dam construction, reflected in shifts in sediment texture, color, and compaction. The Salado River showed an estimated maximum sedimentation rate of ~15 cm/year, while the impounded sector averaged 1.6 cm/year. A historical analysis of climate and flood records identified four phases: a period of prolonged drought (1932–1957), a neutral phase (1958–1979), an alternation of extreme events (1980–2002), and, since 2003, a predominance of extended droughts punctuated by short but intense wet episodes. To reduce future impacts, it is recommended that water levels be regulated prior to expected droughts and that the discharge of domestic effluents be avoided to prevent eutrophication.

Keywords: drought, flood, Pampean region, geological risk, environmental impact.

INTRODUCCIÓN

La dinámica sedimentaria de los sistemas fluviales pampeanos está estrechamente vinculada a las oscilaciones hidroclimáticas, que afectan la frecuencia de inundaciones y modifican la morfología del canal y la funcionalidad de la planicie de inundación (Hooke, 2003). Estas variaciones, influenciadas por forzantes regionales y globales como ENSO y la Oscilación Antártica, generan respuestas hidrológicas y geomorfológicas detectables en el registro sedimentario pampeano (Guerra et al., 2019; Aravena y Luckman, 2009). Del mismo modo, Blum y Törnqvist (2000) han demostrado que los cambios climáticos influyen en la arquitectura de los depósitos fluviales y en los modelos de facies de Fielding et al. (2018) y así como también en el análisis morfodinámico en función de los rasgos morfológicos fluviales aportando una herramienta para evaluar la condición y evolución de los ríos, integrando procesos y formas en distintos contextos ambientales (Knighton, 2014 y Brierley y Fryirs, 2005).

La región pampeana ha experimentado alternancia de ciclos climáticos húmedos y secos desde el Holoceno hasta la actualidad (eg. Ameghino, 1984; Dangavs, 2008; Fucks et al., 2015). Estudios paleoclimáticos basados en registros sedimentarios fluviales, lacustres, edáficos y eólicos revelan importantes cambios ambientales durante el Holoceno tardío (Cioccale, 1999; Kröhling e Iriondo, 1999; Tonni et al., 1999; Piovano et al., 2002; 2004; Deschamps y Tonni, 2007; Iriondo y Kröhling, 2007). Durante la Pequeña Edad de Hielo (1500 – 1850 d.C.), prevalecieron condiciones áridas y frías en la región pampeana. Hacia fines del siglo XIX, un aumento de temperatura marcó el inicio del Período Cálido Actual (Bird et al., 2011; Thompson et al., 2013). Las primeras décadas del siglo XX fueron secas, con bajos niveles fluviales y lacustres, seguidas por un periodo de alta humedad entre los años 1970 y 2003 en el sudeste de Sudamérica (Giorgi, 2002; Pasquini et al., 2006; Piovano et al., 2009; Troin et al., 2010, 2015; Córdoba et al., 2014). Los modelos climáticos indican cambios positivos significativos en los valores medios de los índices

de estacionalidad entre los periodos 1961 – 1985 y 1986 – 2010, junto con una tendencia creciente. En la mayoría de los casos, esto resulta en una transición de un régimen moderadamente estacional con una estación seca corta hacia un régimen con una estacionalidad más marcada (Doyle, 2020).

En el actual contexto hidroclimático de la llanura pampeana, la inundación se ha considerado como el principal riesgo geológico (Centro de Estudios Sociales y Ambientales, 2004). Por esta razón, la mayoría de las obras hidráulicas han sido diseñadas considerando parámetros de escurrimiento y caudal asociados a eventos húmedos extremos.

Si bien los efectos de las inundaciones suelen ser más significativos, resulta igualmente crucial atender a las consecuencias de las sequías. Estas incluyen impactos en el ambiente como la degradación del suelo, la eutrofización de los sistemas acuáticos con alteraciones significativas en los ecosistemas y mortandad de especies, así como impactos socioeconómicos relevantes, como las pérdidas en los sectores agrícola, ganadero, pesquero y turístico (Monti et al., 2023). Desde una perspectiva económica, los años de sequía causan una reducción promedio de 6000 millones de dólares en ingresos de divisas, mientras que los excesos hídricos generan pérdidas de alrededor de 3000 millones de dólares (Comellas, 2018).

Las intervenciones humanas para reducir inundaciones, como el dragado de canales, pueden tener efectos negativos en el ambiente durante periodos secos. En el cauce del río Salado, se realizaron numerosas obras civiles, especialmente dragados, para ampliar y profundizar el canal principal y así reducir el desborde en eventos de inundación extrema (Plan Maestro Integral, 1999). En General Belgrano (Figuras 1 y 2), ante las recurrentes inundaciones, se construyó a principios de los años 1990 un sistema de compuertas para mitigar sus efectos (Fig. 1). Esta obra consistió en la construcción de dos presas de regulación con compuertas ubicadas en la zona de La Baguala (Compuerta No.1) y Playa Azul (Compuerta No.2) (Amarilla et al., 2007), y de un canal aliviador que cortó el meandro del río en dirección E-O (Fig. 2). La construcción del

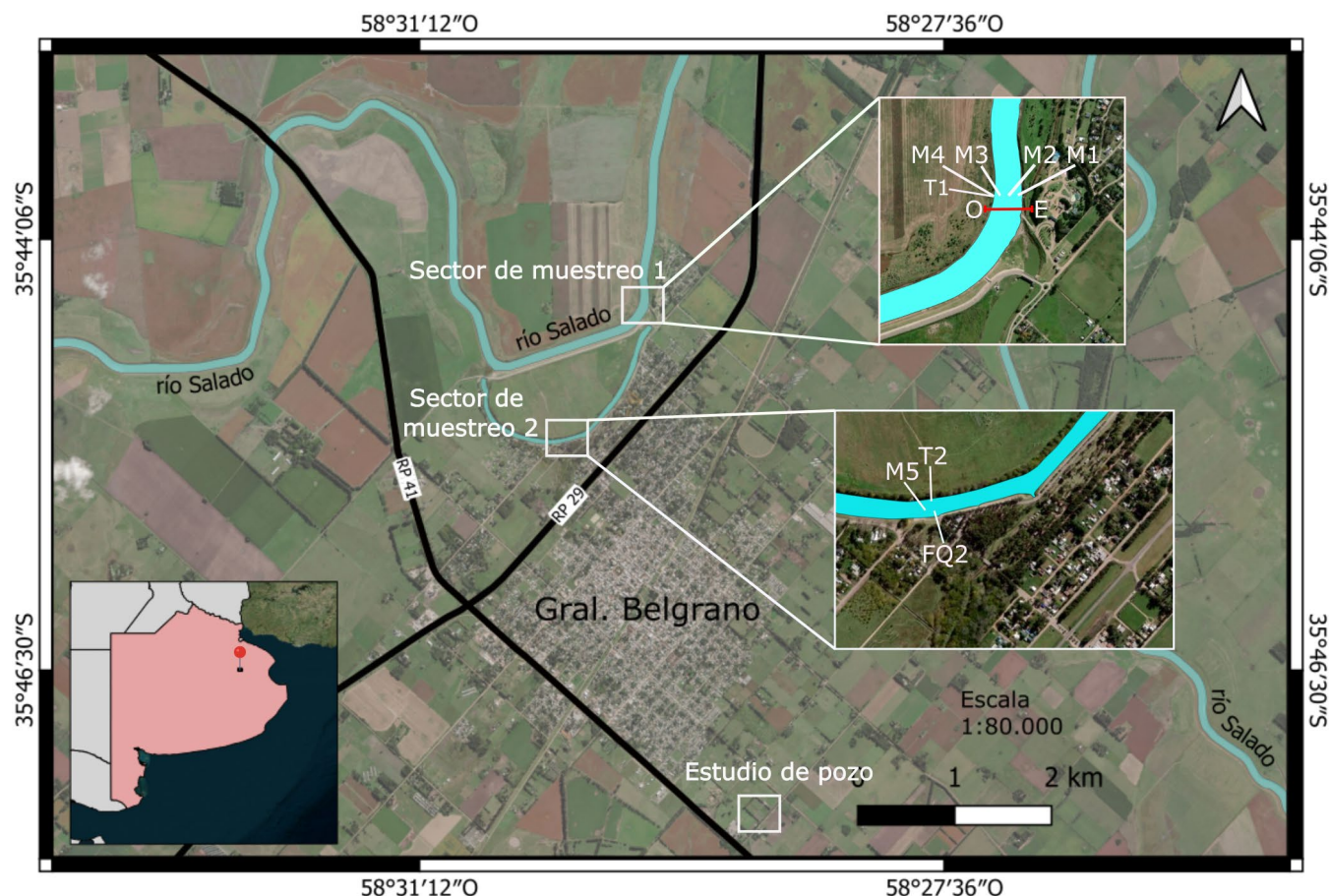


Figura 1. Mapa de ubicación de la localidad de General Belgrano. Ver la posición de los sectores de muestreo 1 y 2 junto con el detalle de la posición de cada muestra superficial, testigo, perfil topográfico y la ubicación del estudio de pozo realizado por Silva Busso (2015).

sistema de compuertas permite desconectar temporalmente el meandro del río Salado, regulando el caudal pico para evitar la inundación de la localidad de General Belgrano, que se asienta inmediatamente en sus márgenes. Con caudales normales ($146 \text{ m}^3/\text{seg}$) es posible el paso de agua entre ambos tramos, lo que asegura la circulación del río. Sin embargo, en enero de 2023, el caudal llegó a $2.76 \text{ m}^3/\text{seg}$ y el nivel del agua quedó por debajo del sistema de compuertas, lo que hizo imposible regular el caudal, desconectándose así del sistema fluvial principal.

Si bien, esta obra funcionó correctamente para minimizar el riesgo de inundación durante los episodios húmedos previos (1991 - 1993, 2000 - 2002, 2012 - 2015), ha provocado impactos ambientales de gran relevancia en las últimas épocas de sequía.

El presente trabajo tiene como finalidad evaluar las consecuencias ambientales y el riesgo geológico derivado de las variabilidades hidroclimáticas a partir de la construcción del sistema de presas, en un tramo del río Salado asociado a la localidad de General Belgrano.

El trabajo aborda diferentes escalas temporales de análisis.

Por un lado, se realiza un estudio a escala holocena, con el objetivo de estimar la evolución del sistema fluvial. Este análisis incluye la evaluación de la geomorfología, la cronología de las terrazas fluviales, datos provenientes de perforaciones hidrogeológicas y el análisis e interpretación del registro sedimentario expuesto en escarpas que contienen depósitos holocenos. Por otro lado, se lleva a cabo un análisis a escala histórica. Para ello, establecen los siguientes objetivos específicos:

- Analizar estadísticamente las precipitaciones anuales históricas, con el fin de identificar tendencias y variabilidades climáticas en la región.
- Recopilar y documentar la ocurrencia de eventos de inundaciones y sequías.
- Caracterizar las condiciones hidrodinámicas y sedimentológicas de los sedimentos de fondo del cauce del río Salado.
- Evaluar los cambios en las condiciones ambientales registrados en los sedimentos del lecho del río Salado, mediante el análisis de testigos geológicos.

En consecuencia, el estudio tiene como objetivo realizar una evaluación detallada del impacto ambiental y de los ries-



Figura 2. Imagen previa a la construcción de las presas (Imagen Landsat/Copernicus del año 1985, tomada de Google Earth. b) Imagen posterior a la construcción de las presas (Imagen Landsat/Copernicus del año 2023, tomada de Google Earth. 1: Compuerta N°1; 2: Compuerta N°2; 3: Canal aliviador; 4: Tramo endicado. c) Fotografía de la construcción del sistema de compuertas en la localidad de General Belgrano, facilitada por el Museo Histórico Municipal "Alfredo Enrique Múlgura".

gos asociados a las obras hidráulicas, considerando escenarios tanto de inundación como de sequía. Asimismo, busca desarrollar propuestas integradas de mitigación que permitan minimizar los efectos ambientales adversos y gestionar de manera eficiente el riesgo de inundación.

Hasta el momento, son escasas las investigaciones geológicas que abordan la problemática ambiental desde este enfoque en la zona de estudio (Díaz Apella, 2023; Pommarés, 2020). Se espera que los resultados de este trabajo contribuyan con datos concretos y precisos para dar respuesta al manejo ambiental en eventos extremos, y demostrar la nece-

sidad de abordar en forma integrada el manejo de los sistemas hidrológicos de la llanura pampeana, considerando tanto las consecuencias de los ciclos húmedos como de los secos extremos.

MARCO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO

La zona de estudio se sitúa en la localidad de General Belgrano, provincia de Buenos Aires, dentro del tramo medio



Figura 3. Fotografías del río Salado en la zona de la Compuerta N°2 donde se puede observar la desconexión ocurrida entre el tramo estancado y el tramo natural.

de la cuenca del río Salado, contigua a sus márgenes aluviales. En términos estratigráficos, el subsuelo está constituido predominantemente por facies fluviales asignadas a la Formación Luján (Pleistoceno Superior–Holoceno Medio). Estos depósitos se disponen en contacto erosivo sobre las unidades loésicas del Pampeano (Fucks, 2015).

En las escarpas de erosión de la terraza fluvial inferior queda expuesta la sucesión estratigráfica de la zona, a una cota de 15 metros sobre el nivel del mar (msnm). A partir de un perfil (Fig. 4) realizado en el sector de muestreo 1 del área de estudio, se reconocieron cinco unidades litoestratigráficas, las cuáles fueron correlacionadas con las descripciones detalladas realizadas por Fucks (2015) en las cercanías de General Belgrano (Fig. 4): La unidad 1 (Pleistoceno superior, según Fucks et al., 2015) está integrada por limos de color castaño claro a oscuro con intercalaciones de bancos de calcretes de 10 cm. La unidad 2 (Holoceno inferior-medio, según Fucks et al., 2015) está conformada por limos arenosos de color gris claro, con abundantes calcretes aislados y restos de gastrópodos *Heleobia parchappi*. La unidad 3 (Holoceno medio-superior, según Fucks et al., 2015) corresponde a un banco tabular compuesto por sedimentos negros fango-arenosos de aproximadamente 20 cm de espesor, con estructura en bloques y restos de *Heleobia parchappi*. La unidad 4 (Holoceno superior, según Fucks et al., 2015) está integrada por bancos limosos de color gris claro, con numerosos restos de

gastrópodos como *Heleobia parchappi* y *Pomacea canaliculata*. En el sector superior del perfil se reconoce la Unidad 5 (Holoceno superior, según Fucks et al., 2015), compuesta por fangos de color negro oscuro y de estructura granular, con restos de *Pomacea canaliculata* y *Heleobia parchappi*. Las unidades 3 y 5 corresponden a paleosuelos.

Al sur de la zona de estudio (Fig. 1) Silva Busso (2015) realizó una perforación a una cota de 20 msnm en la que identificó una sucesión estratigráfica correlacionable con las descritas en este trabajo (Fig. 4). Los sedimentos fluviales asignables a la Formación Luján alcanzaron una gran extensión en el área, conformando una amplia planicie aluvial con características predominantemente depositacionales. La naturaleza fango-arenosa de los sedimentos y la presencia de paleosuelos indican que se trataba de un ambiente de baja energía, en el cual, en algunos momentos, predominaba la exposición subaérea.

A nivel geomorfológico se reconoce un paisaje poligenético dominado principalmente por los procesos eólicos y fluviales. El río Salado actualmente tiene un régimen permanente, presenta una pendiente longitudinal baja y una dirección de drenaje O-E. En la zona de estudio el hábito es sinuoso y el cauce se encuentra actualmente incidido en sedimentos correspondientes a la Formación Luján.

Se han reconocido tres niveles de terrazas fluviales a una cota de 15 msnm (T3), a 18 msnm (T2); y a 20 msnm (T1)

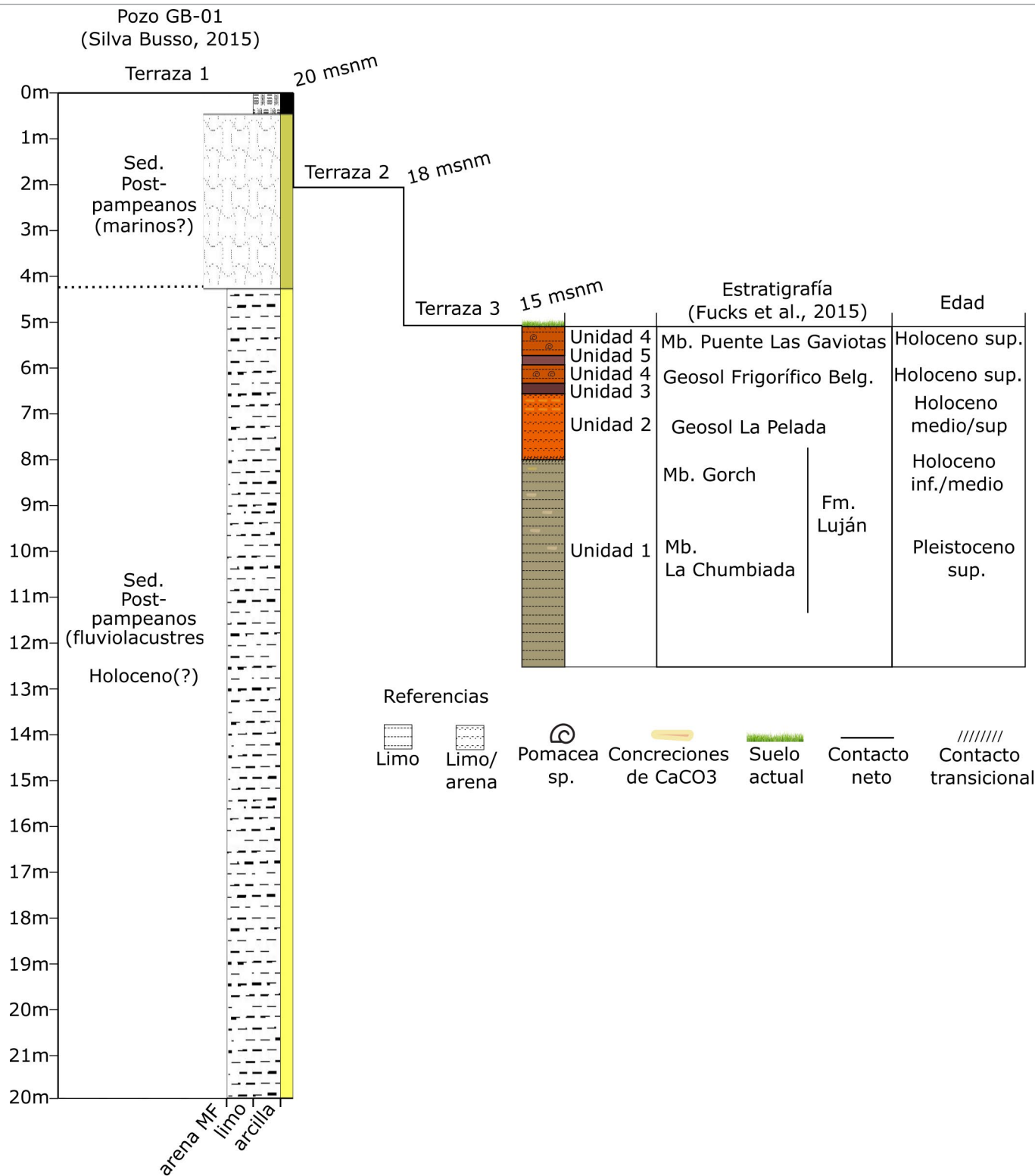


Figura 4. Perfil estratigráfico relevado en el margen sur del río Salado y su correlación con las unidades definidas por Silva Busso (2015) y Fucks et al. (2015).

(Fig. 5). La superficie de estas terrazas presenta numerosas cubetas y bajos de deflación de pequeño tamaño (20 a 120 m), conformando áreas mal drenadas con frecuentes lagunas efímeras (Monti, 2024). En otros casos, existen bajos de mayor dimensión que pueden albergar lagunas permanentes,

como la laguna del Siasgo. Muchas veces, estas áreas tienen cotas topográficas inferiores al río Salado y, en ocasiones, pueden generar un escurrimiento inverso desde el río hacia las lagunas durante eventos de mayores caudales (Pommarés, 2020). La planicie de inundación tiene un ancho máxi-

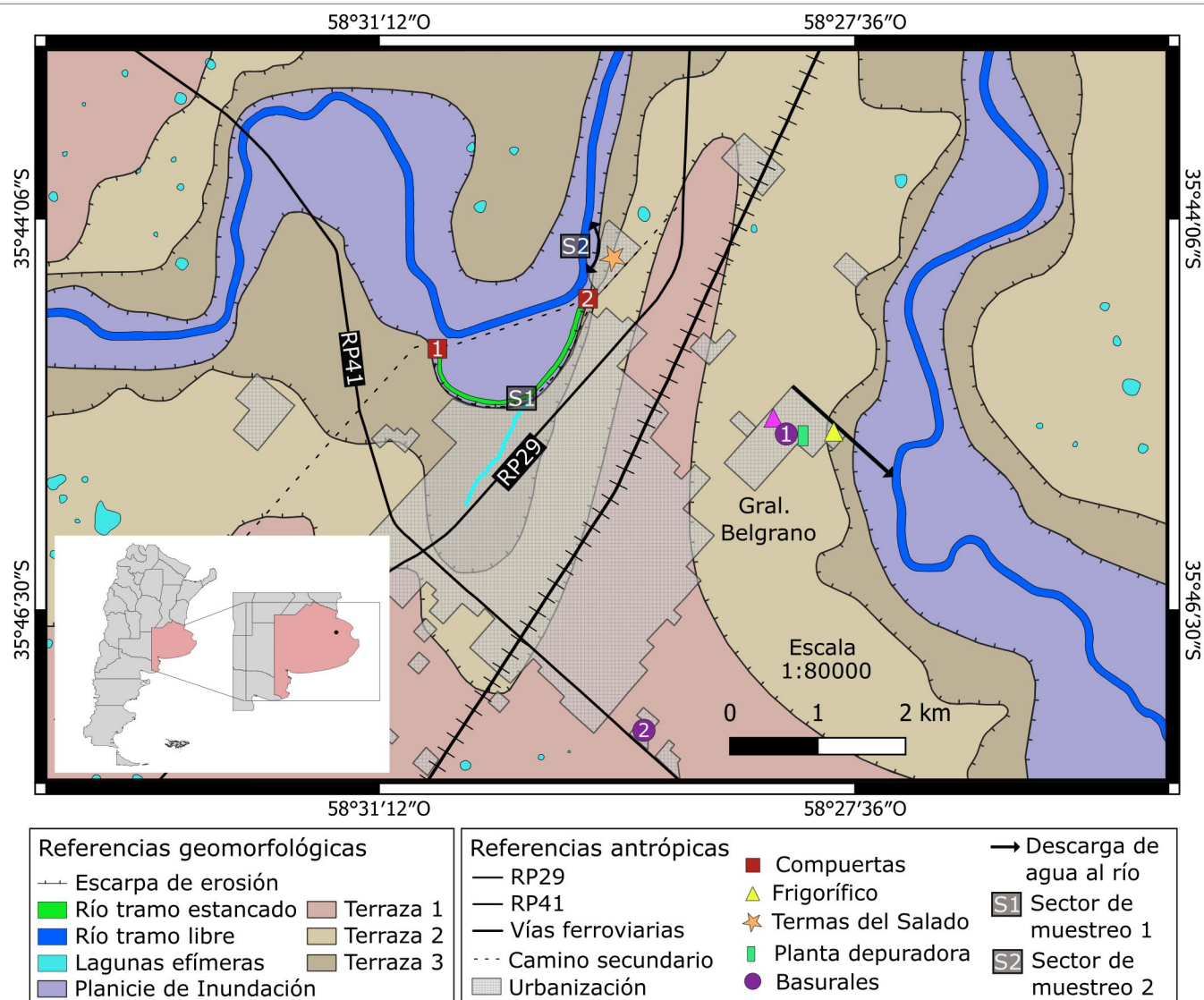


Figura 5. Mapa geomorfológico de la zona de estudio. Notar los elementos antrópicos marcados en el mismo junto con la ubicación de los sectores de muestreo 1 y 2.

mo de 1500 m, coincidente con el nivel alcanzado por la inundación de 2015. Sin embargo, la planicie activa es angosta.

Dada la sinuosidad del cauce, se distinguen zonas erosivas y de acumulación a lo largo del mismo, como consecuencia de la incidencia del flujo de descarga (Fig. 6). Los márgenes acumulativos presentan barras en punta (*point bars*) generadas a partir de la migración lateral del río Salado. Sobre estas barras se asientan asociaciones vegetales que muestran una sucesión ecológica: cerca del cauce predominan pajonales húmedos, en la zona intermedia pastizales hidrófilos con arbustos aislados, y en las áreas más altas pastizales xerófilos, indicando mayor estabilidad (Fig. 6).

En los laterales del canal principal se observan escarpas de erosión de entre 2 y 5 metros de altura con pendientes muy altas (80 °, aproximadamente). En estas escarpas son frecuentes las geoformas asociadas al proceso de remoción

en masa, como taludes y deslizamientos. Además, se observó la presencia de carcavamientos en algunas de ellas.

Otro rasgo morfológico erosivo son las superficies de abrasión generadas sobre sedimentitas fluviales del Holoceno (Fig. 7). Estas presentan una pendiente de 22 ° y se encuentran cortadas por escarpas de erosión de 1.30 m. En el tramo estancado se observan únicamente rasgos morfológicos de acumulación asociados al endicamiento y a eventos alternados de exposición subárea, como grietas de desecación en la planicie aluvial (Fig. 7b).

METODOLOGÍA

Análisis del registro hidroclimático

Como parte del trabajo en gabinete se recopilaban datos



Figura 6. Geoformas asociadas al río Salado. 1: Superficie de abrasión 2: Escarpa de erosión. 3. Sucesión ecológica asociada a la acreción de barras en punta en el margen de acumulación. 4: Depósitos de margen de canal. 5: Terraza fluvial.

de precipitaciones anuales provenientes de las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) más cercanas a la localidad de Belgrano, debido a la falta de registros propios en dicha zona. Las estaciones seleccionadas fueron Dolores, con datos disponibles desde 1931 hasta 2023, y Las Flores, con registros desde 1988 hasta 2023. A partir de estos datos, se realizó un análisis estadístico para identificar y delimitar períodos caracterizados por condiciones secas y húmedas. Finalmente, estos períodos fueron contrastados con registros históricos documentados de sequías e inundaciones, con el fin de evaluar la relación entre ambas variables.

Para garantizar la calidad estadística de los datos utilizados en el análisis de precipitaciones, se evaluó la homogeneidad de las series de las estaciones meteorológicas de Dolores y Las Flores (Provincia de Buenos Aires). La prueba de homogeneidad se realizó utilizando el software AnClim (v5.025), el cual aplica el Test de Homogeneidad Normal Estándar desarrollado por Alexandersson (1986). Se tomaron como referencia recíproca las estaciones Dolores y Las Flores, ya que eran las únicas de la cuenca con mayor tiempo de registro. Se aplicó el test para detectar cambios abruptos o graduales no atribuibles a variabilidad climática natural. Este método calcula, para cada año, un estadístico denominado To , que mide cuánto difieren las medias antes y después de un posible punto de quiebre con respecto a la media global. La fórmula del estadístico es:

$$To(t) = \frac{n}{s^2} [(\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + (\bar{x}_2 - \bar{x})^2]$$

donde n es la cantidad total de años en la serie, \bar{x}_1 y \bar{x}_2 son las medias de los períodos anteriores y posteriores al año t , \bar{x} es la media total de la serie y s^2 su varianza. El valor máximo de To a lo largo de la serie se compara con un valor crítico para determinar si existe una ruptura significativa en la media. Los umbrales críticos para el estadístico To fueron establecidos con un nivel de confianza del 95 %, y se consideraron significativas aquellas rupturas donde el valor de To excedió dicho umbral. Además, se analizó el coeficiente de correlación entre ambas estaciones, y se aplicaron ajustes locales alrededor de los años identificados como posibles puntos de cambio.

Se utilizaron datos de caudal correspondientes a la estación hidrométrica RP41, ubicada en el río Salado en las proximidades de la localidad de General Belgrano. Los registros fueron obtenidos del Sistema Nacional de Información Hídrica (SNIH) para el período comprendido entre 2015 y 2023, ya que no se disponía de información previa a esa fecha. Estos datos de caudal se relacionaron con la precipitación promedio mensual entre las estaciones de Dolores y Las Flores desde 2015, para que el análisis sea consistente con el período disponible de caudales.

Sedimentología

El trabajo de campo se llevó a cabo el 8 de febrero del 2023, durante un evento de sequía extrema que ocurrió entre finales del año 2019 y mediados del 2023. Durante esta jornada, se relevó un perfil topográfico transversal al río Salado utilizando una estación total, con el fin de conocer las características morfosedimentarias, topográficas y ecológicas del sistema fluvial en condiciones naturales (Fig. 5, Sector de muestreo 1). Se extrajeron muestras superficiales de sedimentos en los distintos subambientes del río Salado en dos puntos estratégicos: uno en el canal natural (Sector de muestreo 1) y otro en el sector endicado por las presas (Fig. 5, Sector de muestreo 2). También se extrajeron testigos de ambos sectores de aproximadamente 70 cm de profundidad. En la tabla 1 se detallan los diferentes tipos de muestras tomadas, junto con su ubicación y los ensayos que se les realizaron. Los testigos se extrajeron hincando un tubo de PVC de aproximadamente 10 cm de diámetro en el sustrato, y se les introdujo espuma de poliuretano expandido para generar vacío y para evitar disturbar la muestra. Posteriormente, los testigos se almacenaron en el laboratorio de sedimentología del Departamento de Ciencias Geológicas (FCEN, UBA), a 4 grados, con el fin de preservar las propiedades de los sedimentos. Finalmente, los testigos fueron abiertos y cortados para proceder al análisis de las muestras.

Además, se realizaron mediciones de parámetros físi-



Figura 7. Imágenes de la sequía extrema del verano de 2023. a) Tramo natural del río Salado. Nótese el lecho erosivo meteorizado y la escarpa de erosión en el margen derecho sobre sedimentos fluviales del Holoceno. b) Foto del sector endicado donde se observa la eutrofización del canal y el crecimiento de plantas vasculares en el lecho del margen izquierdo.

co-químicos del agua *in-situ* con un analizador multiparamétrico HANNA como pH, ORP, salinidad, TSD y temperatura para identificar las diferencias entre ambos sectores. Las muestras de sedimentos recolectadas fueron observadas bajo la lupa para obtener un reconocimiento más detallado de la granulometría y sedimentología, además de identificar la presencia de organismos o estructuras.

Las muestras fueron tamizadas en húmedo en el laboratorio de sedimentología del Departamento de Ciencias Geológicas (FCEN, UBA). El análisis granulométrico se realizó empleando los tamices de 4.75 mm, 2 mm, 0.85 mm, 0.425 mm, 0.3 mm, 0.15 mm, 0.075 mm y 0.063 mm para calcular los porcentajes de las fracciones grava (mayores a 2 mm), arena (entre 2 mm y 0.063 mm) y fango (menores a 0.063 mm), según la escala granulométrica de Udden-Wentworth. Posteriormente, las muestras fueron clasificadas según Blott y Pye (2012).

Con los tamaños de granos máximos y mínimos obtenidos mediante el ensayo de granulometría se estimaron las velocidades máximas y mínimas de flujo utilizando la curva de Hjulström (1935).

Para la determinación del contenido de fango, se emplearon los ensayos de límites de Atterberg en el laboratorio de suelos de la Dirección de Obras en Apoyo al Desarrollo Nacional del Ejército Argentino, donde, a partir del límite líquido y límite plástico, se calculó el índice de plasticidad para estimar los porcentajes de las fracciones limo o arcilla. Para calcular el porcentaje de materia orgánica se realizó el ensayo de LOI (*Loss of Ignition*) (Heiri et al., 2001).

El mapa geomorfológico fue confeccionado empleando el programa QGIS sobre la base de imágenes Bing Aerial 1, el DATUM *World Geodetic System* 1984 (WGS 84) y la proyección Pseudo-Mercator EPSG:3857. Para la delimitación de las terrazas se utilizó un modelo de elevación digital basado en datos del *Shuttle Radar Topography* (SRTM).

RESULTADOS

Variabilidades hidroclimáticas

A partir del test de homogeneidad SNHT aplicado a las series mensuales de precipitaciones de Dolores y Las Flores, se pudo ver que la serie de Dolores presentó una ruptura significativa en 1990 ($T_0 = 12.5$) (Tabla 2), la cual fue corregida en función de los datos de la estación Las Flores (correlación $r = 0.815$). El resto de las rupturas detectadas no alcanzó significancia estadística. Por su parte, la serie de Las Flores no mostró rupturas significativas, lo que indica que ambas series pueden considerarse homogéneas y comparables. A partir de esta validación, se procedió con el análisis de precipitaciones. El análisis de las precipitaciones históricas en Dolores (Fig. 8) revela una tendencia al aumento de 0.47 mm por año, con una precipitación media anual acumulada de 936.7 mm. No obstante, el elevado valor del error obtenido ($R^2 = 0.0214$) sugiere que esta tendencia podría no ser representativa, por lo que sería más adecuado considerar la existencia de variabilidades climáticas, ya que la tendencia podría cambiar según el período analizado. A partir de los valores de la desviación estándar obtenidos, se define que cuando la precipitación anual supera los 1080 mm es factible la ocurrencia de ciclos húmedos, mientras que cuando las precipitaciones son inferiores a 793.8 mm, ocurrirían ciclos secos. Los años con precipitaciones mayores al límite máximo (media + desviación estándar) corresponden a períodos húmedos (H), mientras que los años con valores menores al límite mínimo (media - desviación estándar) son considerados a períodos

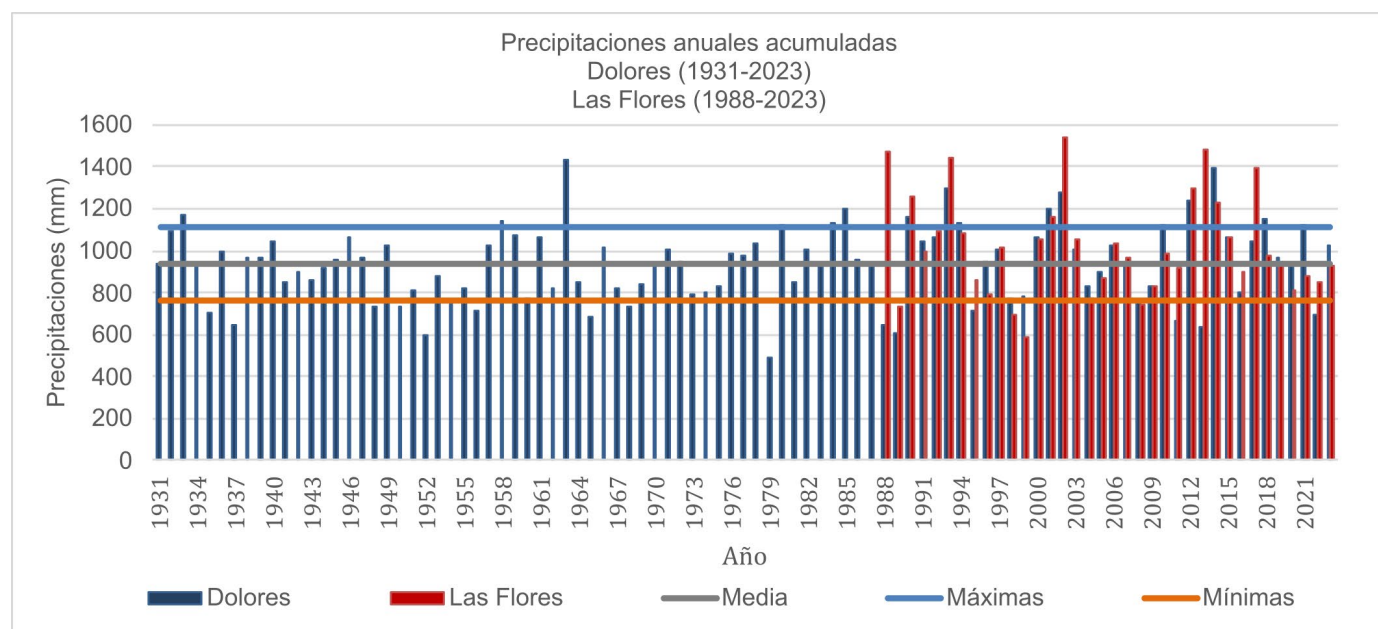


Figura 8. Variación de las precipitaciones anuales desde 1931 para las estaciones de Dolores y Las Flores.

secos (S). Los valores intermedios se clasifican como períodos normales (N).

Es evidente que, a partir de la década de 1980, la desviación estándar ha aumentado de 142 a 202, lo que indica la presencia de ciclos húmedos y secos de mayor amplitud.

En la tabla 3 se comparan los resultados obtenidos con los registros históricos de eventos de inundación y sequía en la región pampeana, evidenciándose una correlación significativa en los eventos extremos. Sin embargo, es importante también considerar otros factores en el análisis, como la intensidad de las precipitaciones, el tiempo de permanencia, el nivel freático, la capacidad de retención de agua del suelo, la topografía, eventos climáticos extremos como El Niño o La Niña, la temperatura, la evapotranspiración, la humedad natural del suelo y la acción humana.

Los registros de caudales medios mensuales del río Salado permitieron conocer la respuesta del mismo ante eventos de precipitaciones extremas y su correlación con los eventos de inundaciones o sequías.

En la figura 9 se observa un pico simultáneo de precipitación y caudal (superiores a 600 m³/s) en 2015, coincidente con el evento de inundación registrado.

A partir de 2016 y hasta el 2023, se reconoce un descenso generalizado tanto en las precipitaciones como en los caudales, con la excepción de algunos picos máximos intermedios. Un caso particular es del año 2017, cuando se registró el caudal medio mensual más alto de todo el período analizado. Sin embargo, este máximo, no estuvo acompañado de eventos de inundación reportados, lo que sugiere una posible regula-

ción eficiente por parte de la presa ubicada aguas arriba. Es decir que la infraestructura hidráulica permitió amortiguar el impacto. A partir de 2020, se evidencia una fuerte disminución en los valores de precipitación, con registros mensuales que en muchos casos no superan los 50 mm. En paralelo, el caudal medio del río presenta valores bajos, inferiores a los 200 m³/s. Esta situación refleja las condiciones de sequía.

En general, los datos muestran una correlación positiva entre la precipitación mensual y el caudal medio del río Salado, aunque con un posible desfase temporal de hasta un mes, como consecuencia del retardo en el registro del caudal pico del escurrimiento superficial y a las características geomorfológicas.

A partir del análisis de los datos obtenidos, se pueden definir cuatro fases hidroclimáticas (tabla 3) para la zona en estudio:

Periodo de sequías (1932 - 1957): Las precipitaciones anuales fueron inferiores a la media, con alternancia entre periodos secos y neutros. Solo se registró un evento húmedo en 1933 y siete secos. Este período corresponde a una época de sequía prolongada de 25 años.

Período normal (1958 - 1979): Aumentó la precipitación anual, pero no se registraron eventos de sequías ni inundaciones extremas. Se evidenció el dominio de años neutros, con dos años húmedos y tres secos (21 años neutros sin eventos extremos).

Periodo con alternancia de eventos extremos (1980 - 2002): Las inundaciones y sequías fueron extensas y duraderas, con inundaciones que permanecieron durante tres años

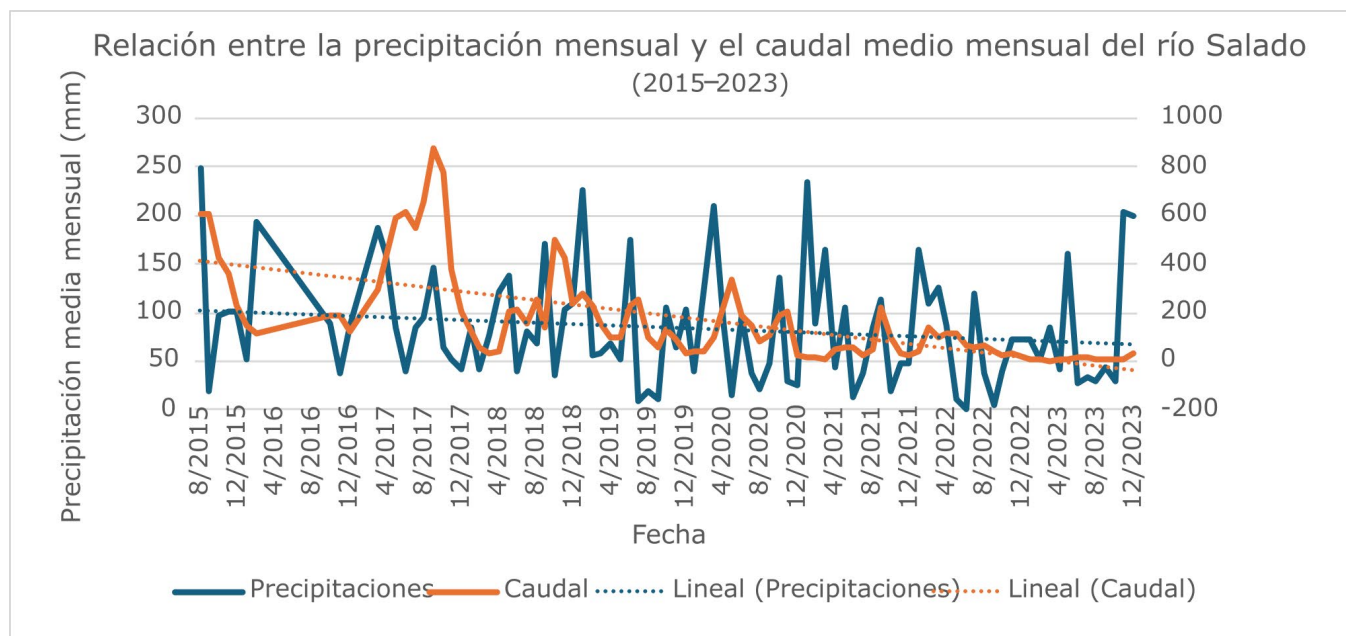


Figura 9. Relación entre valores de precipitación mensual para la región de estudio y el caudal medio mensual del río Salado (2015 – 2023).

y sequías de 1 a 2 años. Los eventos extremos fueron bien marcados, especialmente durante los picos de inundación. Se trata de un periodo con una duración de 22 años.

Periodos con alternancia de eventos extremos de mayor duración temporal (desde 2003): En este período, si bien las precipitaciones anuales alcanzaron valores elevados en los ciclos húmedos, se comenzó a registrar una mayor alternancia y duración de las sequías.

Con respecto a la ocurrencia de los eventos, las primeras 4 décadas se caracterizaron por un largo período de sequía, y a partir de la década de 1980 se incrementó la presencia de inundaciones, las cuales se manifestaron durante 3 o 4 años consecutivos cada 7 a 10 años aproximadamente. En cambio, las sequías ocurrieron de manera más dispersa, registrándose un máximo de dos años consecutivos intercalados con años “normales”, con excepción de las primeras década-

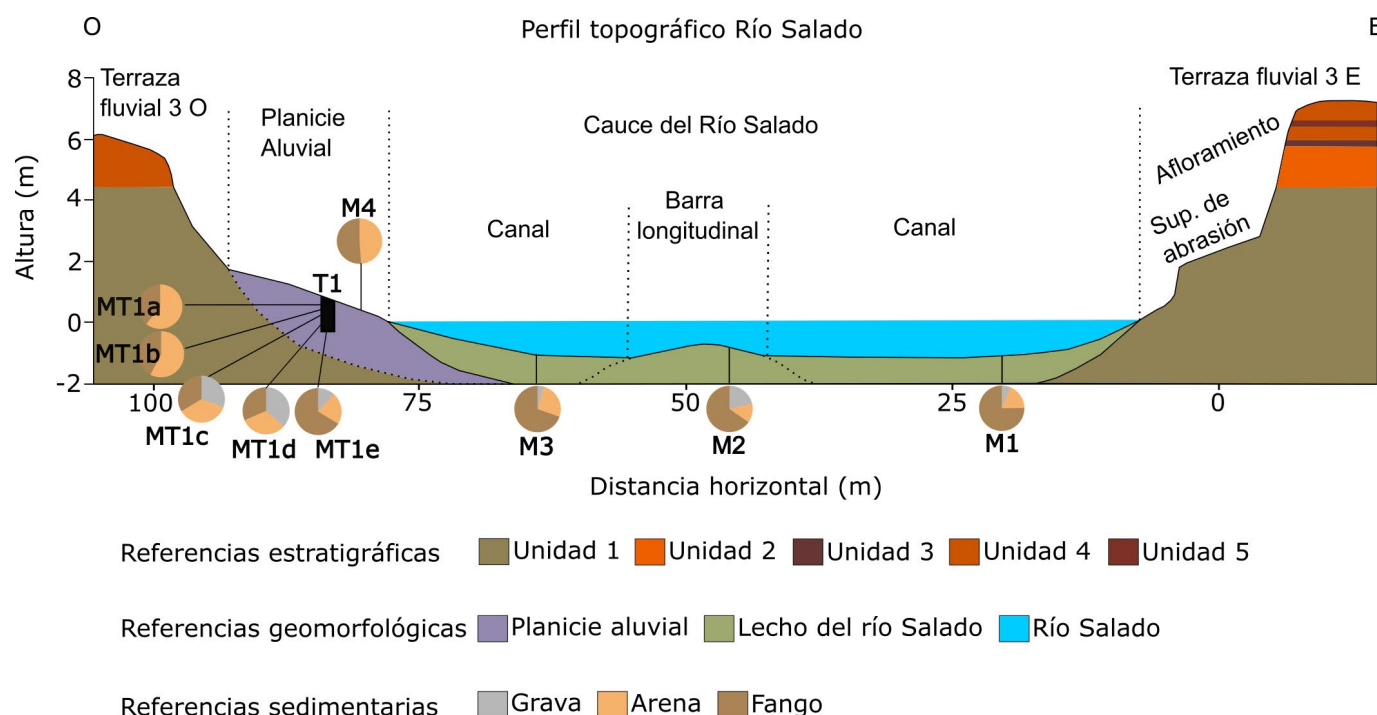


Figura 10. Rasgos geomorfológicos y sedimentarios del tramo natural del río Salado (Sector de muestreo 1).

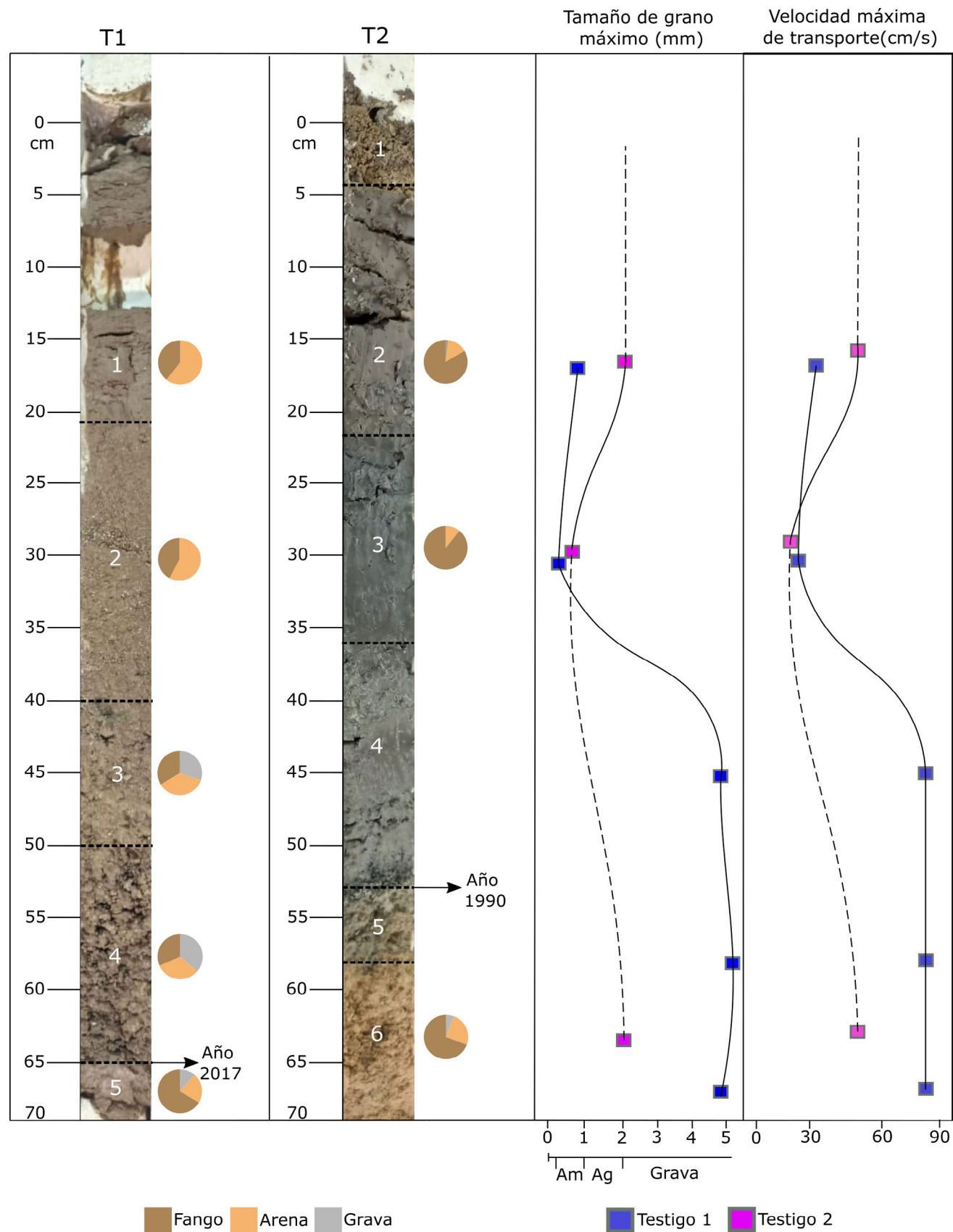


Figura 11. Fotografías de los testigos 1 y 2, granulometría y representación gráfica del tamaño de grano máximo y velocidad de flujo para cada unidad.

Lugar de muestreo	Tipo de muestra	Nombre	Ubicación	Profundidad	Ensayo realizado/ mediciones
Sector de muestreo 1	Muestra recogida con barreno	M1	Lecho del río 35°44'24.39"S 58°29'38.25"O	Superficie	Granulometría, Límites de Atterberg, Observación en lupa, LOI
	Muestra recogida con barreno	M2	Lecho del río 35°44'24.32"S 58°29'39.01"O	Superficie	Granulometría, Límites de Atterberg, Observación en lupa, LOI
	Muestra recogida con barreno	M3	Lecho del río 35°44'24.27"S 58°29'39.85"O	Superficie	Granulometría, Límites de Atterberg, Observación en lupa
	Muestra recogida con barreno	M4	Planicie aluvial 35°44'24.13"S 58°29'40.61"O	Superficie	Granulometría, Límites de Atterberg, Observación en lupa
	Muestra del testigo 1	MT1a	Planicie aluvial 35°44'24.13"S 58°29'40.61"O	0 – 21 cm	Granulometría, Límites de Atterberg, Observación en lupa, LOI
	Muestra del testigo 1	MT1b	Planicie aluvial 35°44'24.13"S 58°29'40.61"O	21 - 40 cm	Granulometría, Límites de Atterberg, Observación en lupa
	Muestra del testigo 1	MT1c	Planicie aluvial 35°44'24.13"S 58°29'40.61"O	40 - 50 cm	Granulometría, Límites de Atterberg, Observación en lupa
	Muestra del testigo 1	MT1d	Planicie aluvial 35°44'24.13"S 58°29'40.61"O	50 - 65 cm	Granulometría, Límites de Atterberg, Observación en lupa
	Muestra del testigo 1	MT1e	Planicie aluvial 35°44'24.13"S 58°29'40.61"O	65 - 70 cm	Granulometría, Límites de Atterberg, Observación en lupa, LOI
	Medición de parámetros fisicoquímicos	FQ1	Curso de agua 35°44'24.81"S 58°29'38.01"O	Pelo de agua	pH, ORP, TSD, PSU, PSI, Salinidad, Temperatura
Sector de muestreo 2	Muestra recogida con barreno	M5	Lecho del río 35°45'13.87"S 58°30'23.36"O	Superficie	Granulometría, Observación en lupa, LOI
	Muestra del testigo 2	MT2b	Planicie aluvial 35°45'12.56"S 58°30'23.35"O	4 - 22 cm	Granulometría, Observación en lupa
	Muestra del testigo 2	MT2c	Planicie aluvial 35°45'12.56"S 58°30'23.35"O	22 - 36 cm	Granulometría, Observación en lupa, LOI
	Muestra del testigo 2	MT2f	Planicie aluvial 35°45'12.56"S 58°30'23.35"O	57 - 70 cm	Granulometría, Observación en lupa
	Medición de parámetros fisicoquímicos	FQ2	Curso de agua 35°45'13.87"S 58°30'23.36"O	Pelo de agua	pH, ORP, TSD, PSU, PSI, Salinidad, Temperatura

Tabla 1. Muestras extraídas de agua y sedimentos y procedimientos técnico empleado, LOI (Loss of Ignition), pH (potencial de hidrógeno), ORP (Potencial de óxido reducción), TSD (Total de sólidos disueltos).

das, donde se registró un extenso período seco, y de la última sequía extrema, que se extendió durante 4 años, retomando condiciones “normales” hacia la actualidad.

Finalmente, se concluye que durante las últimas décadas ha aumentado la amplitud entre los valores extremos de precipitación anual (Fig. 8). Se observa una importante variabilidad climática desde 1931 con un periodo seco entre 1930 a 1960, un periodo con precipitaciones normales entre 1960 y 1980, un periodo húmedo del 1978 a 1987 y periodo con fuerte alternancia entre sequías e inundaciones extremas (desde

1987 a la actualidad). Si bien las precipitaciones anuales han aumentado levemente, también se observa un incremento en la ocurrencia de períodos secos.

Dinámica sedimentaria actual

Para caracterizar la dinámica sedimentaria y morfológica de los depósitos fluviales actuales se analizaron muestras tomadas en 2 tramos: sector de muestreo 1 (S1) y sector de muestreo 2 (S2).

En el canal actual del Salado (Sector de muestreo 1, Fig. 1

Tabla 2. Resultados del Test de Homogeneidad.

Año de posible cambio	To (estadístico)	Ajuste aplicado	Correlación con estación de referencia
1989	4.052	-0.8	0.419
1990	12.500	+0.3	0.815
2011	3.890	-2.4	0.407
2012	11.279	+0.1	-0.062
2018	1.636	0.0	0.867

y Fig. 10) se reconocieron geoformas asociadas a margen de canal (barras en punta) y formas de lecho (canales y barras longitudinales), en las facies de canal predomina el fango (51 a 92 %) y en menor medida la fracción arenosa (7 a 26 %) (Tabla 4). El contenido de grava se incrementa en las muestras más cercanas a los márgenes erosivos del canal, debido al aporte de las sedimentitas asociadas a la erosión de los sedimentos limosos de las escarpas y superficies de abrasión.

La mayor concentración de gravas (21 %) se distingue en la barra longitudinal subácuea, que se encuentra depositada en el centro del canal, separando ambos canales subácueos. Las gravas alcanzan un tamaño máximo de 4.75 mm, lo que indica velocidades de flujo relativamente altas (hasta 83 cm/s) (Tabla 4 y 5). La barra lateral (barra en punta) que conforma el margen acrecional está conformada por cantidades semejantes de fango y arena (arena mediana), lo que sugiere condiciones de menor energía (margen deposicional del meandro). Esto provoca una tendencia a la estabilización de los depósitos, dando lugar a una sucesión ecológica. Los canales subácueos están compuestos por fangos arenosos levemente gravosos que indicarían condiciones energéticas intermedias. En todas las muestras del cauce natural del Salado se reconoce transporte por tracción, suspensión y saltación, lo que indica la alta energía del medio y la diversidad de los materiales aportados. El aporte del material de tracción es local y proviene de la removilización de sedimentos correspondientes a la Formación Luján. La mayor carga es de sedimentos fango-arenosos, constituyendo la carga de sedimentos de la cuenca.

Los sedimentos correspondientes al meandro abandonado por la presa (Sector de muestreo 2, Fig. 1) están compuestos en un 93 % por fango (mayormente arcilla, según el índice de plasticidad > 11; Tabla 4), con escaso porcentaje de arena (7 %, hasta 0.3 mm, es decir, arena mediana) y carecen de gravas. Esto indica el dominio de condiciones de muy baja energía (máximo de 22 cm/s) (Tabla 5), con una tendencia a la depositación de los sedimentos en suspensión y un escaso transporte por saltación (Sector de muestreo 2, Fig. 1).

Tabla 3. Resultados de las precipitaciones para las estaciones meteorológicas de Dolores y Las Flores y comparación con los registros históricos, donde: H = años húmedos; S = años secos; N = años "normales".

Año	REGISTRO	Dolores	Las Flores	Año	REGISTRO	Dolores	Las Flores
1931		N	x	1978	Inundación	N	x
1932			x	1979	N	S	x
1933		H	x	1980	Inundación	H	x
1934		N	x	1981			x
1935		S	x	1982	N	N	x
1936		N	x	1983			x
1937		S	x	1984		H	x
1938			x	1985	Inundación	H	x
1939			x	1986			x
1940			x	1987	N	N	x
1941			x	1988		S	H
1942			x	1989	Sequía	S	S
1943		N	x	1990	N	H	H
1944	Sequía		x	1991		N	N
1945			x	1992	Inundación		
1946			x	1993		H	H
1947			x	1994	N	H	
1948		S	x	1995		S	
1949		N	x	1996	Sequía		N
1950		S	x	1997			
1951		N	x	1998	N	N	S
1952		S	x	1999	Sequía		S
1953		N	x	2000			N
1954		S	x	2001	Inundación	H	H
1955		N	x	2002		H	H
1956		S	x	2003	N		
1957		N	x	2004	Sequía		
1958		H	x	2005		N	N
1959			x	2006			
1960			x	2007	N		
1961		N	x	2008	Sequía	S	S
1962			x	2009	N	N	N
1963		H	x	2010		H	
1964		N	x	2011	Sequía	S	
1965		S	x	2012		H	H
1966			x	2013	Inundación	S	H
1967		N	x	2014		H	H
1968	N	S	x	2015			N
1969			x	2016		N	
1970			x	2017	N		H
1971			x	2018		H	
1972			x	2019			
1973		N	x	2020	Sequía	N	
1974			x	2021		H	N
1975			x	2022		S	
1976			x	2023	N	N	
1977			x				

Tabla 4. Textura de los sedimentos superficiales para las diversas geoformas de lecho en el perfil transversal del Salado relevado.

Muestra	Sub-ambiente	Grava (%)	Arena (%)	Fango (%)	Clasificación (Blott and Pye, 2012)	Límite Plástico	Límite Líquido	Índice de plasticidad	Tamaño de grano	MO (% en peso)
M1 (Sector 1)	Fondo de canal	6.22	18.56	75.23	Fango ligeramente gravoso y ligeramente arenoso	21.72	42.05	20.33	arcilloso	3.78
M2 (Sector 1)	Barra longitudinal	21.07	13.66	65.27	Fango gravoso ligeramente arenoso	21.32	43.33	22.01	arcilloso	4.01
M3 (Sector 1)	Fondo de canal	4.40	26.00	69.60	Fango arenoso muy ligeramente gravoso	20.56	31.98	11.42	arcilloso	
M4 (Sector 1)	Margen de canal	0.00	48.84	51.16	Fango arenoso	18.12	29.5	11.38	arcilloso	
M5 (Sector 2)	Margen canal endicado	0	7.16	92.84	Fango muy ligeramente arenoso					11.42

Análisis de los testigos y evolución reciente

Los resultados de los análisis texturales y de la composición detrítica de los testigos 1 y 2 se detallan en las tablas 6 y 7, respectivamente y en la figura 11. En el testigo T1 se reconocieron cinco secciones con características diferentes (Tabla 6). La sección basal (unidad 5 – MT1e) es una arcilla limo-arenosa de color castaño oscuro con muy bajo contenido de gravas. Hacia el techo (unidades 3 y 4 - MT1d, MT1c) el tamaño de grano aumenta, formando gravas fango-arenosas o arenas gravosas con aproximadamente un 30 % de fango. En las secciones 2 y 1 (MT1b, MT1a) los sedimentos disminuyen nuevamente de tamaño, formando arenas fangosas con una alta proporción de fango (40 %). El nivel superior presenta una coloración más oscura y un contenido de materia orgánica de 5.27 %. En todo el testigo, la fracción arena gruesa y grava está integrada por clastos limosos y de calcretes provenientes de la erosión del margen del canal.

Como resultado, se concluye que el nivel 4 (MT1d) es el de mayor energía y, por lo tanto, las velocidades de flujo son más altas (100 cm/s) (Tabla 8). Este nivel podría corresponderse con uno de los eventos de mayor caudal registrado en el río Salado, como el ocurrido en el año 2017, cuando se alcanzaron valores de hasta 872.94 m³/s. Durante estos eventos, el aumento del caudal provoca una intensa erosión en los márgenes y la superficie de abrasión, lo que resulta en significativo aumento en el aporte de clastos limosos y calcretes de la Formación Luján. Dado que este nivel se encuentra entre los 65 y los 50 cm de profundidad en el testigo del tramo natural, y considerando su vinculación con la crecida de 2017, se estima una tasa máxima de sedimentación de aproxima-

damente 15 cm/año, reflejando un proceso episódico y de alta energía asociado a dicho evento. No se estimaron tasas de sedimentación para los niveles superiores (0 – 50 cm), dado que presentan características sedimentológicas diferenciadas que sugieren una acumulación episódica en distintos eventos posteriores a 2017, sin un control temporal preciso de los caudales asociados.

Las unidades 5, 2 y 1, por otro lado, indican condiciones de menor energía (24 cm/s a 32 cm/s) (Tabla 8) y períodos de caudal bajo asociado con sequías, lo que favorece la decantación del fango.

El testigo tomado en el meandro endicado (T2) presenta un comportamiento muy diferente. Se diferenciaron 6 secciones (Tabla 7): en la base (Unidad 6 - MT2f), la granulometría es mayor, reconociéndose sedimentos fango-arenosos con gravas de composición limosa de 2 a 3 mm. La sucesión continúa con un contacto transicional con la unidad 5 (MT2e),

Tabla 5. Tamaño de grano máximo y mínimo junto con las velocidades máximas y mínimas correspondientes según Hjølström (1935), para las muestras de fondo de canal del Sector de muestreo 1 (M1, M2, M3), de la planicie aluvial del Sector de muestreo 1 (M4) y de planicie aluvial del Sector de muestreo 2 (M5).

Muestra	Tamaño mínimo	Velocidad mínima de transporte (cm/s)	Tamaño máximo	Velocidad de máxima de transporte (cm/s)
M1 (Sector 1)	<0.0039	0	4.75	83
M2 (Sector 1)	<0.0039	0	4.75	83
M3 (Sector 1)	<0.0039	0	4.75	83
M4 (Sector 1)	<0.0039	0	0.85	32
M5 (Sector 2)	<0.0039	0	0.3	22

Tabla 6. Caracterización del testigo 1 del lecho del río Salado.

Testigo 1							
Unidad	Características texturales	Clasificación	Composición	Textura (G:A:F)	Procesos de transporte y deposición	IP (fango)	Energía del medio de transporte
1 – MT1a (0 – 21 cm)	Arena muy fina limosa, color castaño oscuro a grisáceo. Materia orgánica del 5.27%	Arena fangosa	Fracción arenosa integrada por cuarzo, mica y agregados de fango.	0:61:39	Saltación y alternancia de decantación de material en suspensión	4.1	Media
2 – MT1b (21 – 40 cm)	Arena limosa de color castaño	Arena fangosa	Fracción arenosa integrada por cuarzo, mica y agregados de fango. Remanentes de semillas, raíces. Abundantes conchillas y gasterópodos hasta 4 mm de ambientes dulceacuícolas. (Pomacea).	1:57:42	Saltación con alternancia de decantación de material en suspensión	7.1	Media
3 – MT1c (40 – 50 cm)	Grava areno-arcillosa de coloración castaño con clastos de hasta 4 mm	Arena gravosa fangosa	Gravas de calcretes y de líticos de color grisáceo. Arenas compuestas por cuarzo y fango aglutinado. Restos de ramas, remanentes de raíces y de conchillas de gasterópodos de hasta 3 mm	30:36:34	Saltación y tracción con alternancia de decantación	11.6	Alta
4 – MT1d (50 - 65 cm)	Grava areno arcillosa de color castaño oscuro. Gravos con mayores tamaños de hasta 7 mm	Grava fangosa arenosa	Gravas de calcretes y de líticos de color grisáceo. Arenas compuestas por cuarzo y fango aglutinado. Conchillas fragmentadas	36:32:32	Tracción y saltación con alternancia saltuaria de decantación	11.5	Muy alta
5 – MT1e (65 - 70 cm)	Arcilla limo-arenosa muy levemente gravosa de coloración pardo oscura. Materia orgánica del 4.37%.	Fango arenoso ligeramente gravoso	Las gravas son limolitas y calcretes, la fracción arena de cuarzo y micas. Se observan restos de conchillas fragmentadas y ramas pequeñas.	12:22:66	Procesos de decantación con alternancia de saltación y tracción	21.5	Baja

formada por fango con una coloración levemente más oscura. Luego en los niveles 4 y 3 (MT2d – MT2C) se observan sedimentos fangosos, de coloración muy oscura. Las unidades suprayacentes son fangos o fangos arenosos de coloraciones grisáceas a negras con abundantes restos de gasterópodos y ramas; tienen un color castaño y presentan gran número de raíces, semillas y gasterópodos bien conservados. La arena en estos niveles es muy fina. Las características texturales, composicionales y el color de la unidad 6 (MT2e) son semejantes a los sedimentos reconocidos en el fondo de canal (Tabla 4), lo que indica que esta unidad representaría las condiciones del lecho previo a la construcción de las presas. Posteriormente, se da una transición (Unidad 5 – Mt2f) hacia ambientes más reductores y con mayor contenido de materia orgánica. A partir de los 53 cm de profundidad, se observa un cambio notable en la granulometría, caracterizada por sedimentos mucho más finos y un aumento significativo en la materia orgánica, como en la unidad 4 (MT2d) y particularmente la unidad 3 (MT2c) que representaría el máximo nivel del pelo del agua luego del endicamiento, como lo indica su coloración más oscura. Este cambio sugiere que dicho nivel corresponde al momento en que se construyó la presa, en 1990, lo que

provocó que el río quedara estancado, modificando las condiciones de sedimentación. Tomando como referencia este marcador, se calculó una tasa promedio de sedimentación de aproximadamente 1.6 cm/año, considerando los 53 cm acumulados desde 1990 hasta 2023.

Hacia el techo, la coloración se torna más clara y aparece gran contenido de gasterópodos, asociados a la mortandad provocada por la sequía. Las raíces de los últimos niveles corresponden a las plantas vasculares que comienzan a crecer en el margen del canal por la desecación.

La mayor tasa de sedimentación observada en el tramo libre del río se explica por la continuidad en la circulación del agua, que permite el constante aporte de sedimentos. En cambio, en el sector aislado por las compuertas, la escasa circulación de flujo limita el aporte de nuevos materiales.

El porcentaje en peso de materia orgánica (MO) correspondiente al testigo del tramo natural varía entre 4.37 % y 5.27 %, mientras que el testigo del meandro presenta valores de aproximadamente 12 %. Esto, sumado a la coloración gris oscura de los sedimentos indicaría condiciones más reductoras del ambiente por la falta de circulación del agua.

Tabla 7. Caracterización del testigo 2 del lecho del río Salado.

Testigo 2						
Unidad	Características texturales	Clasificación	Composición	Textura (G:A:F)	Procesos de transporte y depositación	Energía del medio de transporte
1 – MT2a (0 - 4 cm)	Fango de color pardo	Fango	Abundantes restos de hojas, ramas, raíces, semillas y conchillas de gastrópodos		Decantación de fangos y ambiente subaéreo	Muy baja
2 – MT2b (4 - 22 cm)	Fango de color castaño oscuro	Fango ligeramente arenoso	Remanentes de raíces y fragmentos de conchillas	2:15:83	Decantación de fangos	Muy baja
3 – MT2c (22 - 36 cm)	Fango de coloración gris muy oscuro a negro. 11,26%	Fango ligeramente arenoso	Materia orgánica particulada	0:11:89	Decantación de fangos	Muy baja
4 – MT2d (36 - 53 cm)	Fango levemente arenoso de coloración gris oscuro	Fango muy ligeramente arenoso	Abundantes restos de conchillas de gastrópodos de 2 mm de largo y de pequeñas ramas		Decantación de fangos y eventos de saltación	Muy baja
5 – MT2e (56 - 57 cm)	Fango color castaño con tonalidades grisáceas	Fango	Mica y cuarzo con restos de raíces		Decantación de fangos con alternancia de saltación	Baja
6 – MT2f (57 - 70 cm)	Fango arenoso color castaño claro ligeramente gravoso	Fango arenoso ligeramente gravoso	Mica y cuarzo con clastos de calcretes de 8 mm de diámetro y raíces	6:25:69	Decantación con alternancia de saltación y tracción	Baja

Parámetros físico-químicos del agua.

La comparación de los parámetros fisicoquímicos medidos en el agua entre el tramo de libre circulación y el tramo estancado durante la sequía extrema del verano de 2023 se muestra en la tabla 9.

En el sector natural del Salado (sector 1), el agua presenta un pH ligeramente alcalino ($\text{pH} = 8.21$), (1968 uS/cm) y un potencial de reducción-oxidación (ORP) (98.7 mV). Estos valores indican un ambiente con moderada actividad biológica y una ligera alcalinidad, propia de un sistema fluvial con condiciones aeróbicas.

Por otro lado, en el sector endicado, se generó un ambiente anóxico, con valores de ORP de 27 mV , lo que indica condiciones reductoras. En este sector se observó una alta degradación orgánica y un alto grado de eutrofización (Fig. 7b). Los valores de pH fueron más alcalinos (9.28), la salinidad aumentó considerablemente, alcanzando el doble del valor del tramo natural (4908 uS/cm). Además, el total de sólidos disueltos se incrementó significativamente (3387 ppm), y la temperatura del agua fue superior ($32.84 \text{ }^{\circ}\text{C}$) en comparación con el tramo natural (Tabla 9).

Evolución dinámica reciente

La terraza fluvial más antigua (cota 20 m) labrada sobre sedimentos fluviales del del Holoceno, sugieren que el río Salado en este periodo formaba una amplia planicie aluvial, con una elevación aproximada de 20 msnm (Terraza 1). La superficie de esta terraza y los sedimentos reconocidos a partir

de la perforación realizada por Silva Busso (2015) indicarían también un intenso proceso eólico en la planicie aluvial, generando dunas y fenómenos deflacionarios, sumados a eventos de estabilización (paleosuelos). Posteriormente, el valle experimentó dos pulsos de rejuvenecimiento, asociados a un descenso del nivel de base (Terraza 2 y 3). Finalmente, el río sufrió un nuevo descenso abrupto en su nivel, incidiendo en su lecho, lo que resultó en un aumento de la velocidad de flujo y una disminución de la carga sedimentaria. Este cambio dio lugar a la generación de geoformas fluviales erosivas en varios sectores. Estos cambios se relacionarían con las variaciones eustáticas del nivel del mar con posterioridad al máximo transgresivo del Holoceno.

Con respecto a la evolución histórica registrada a partir de la interpretación de los registros sedimentarios obtenidos de los testigos y de su correlación con los eventos climáticos ocurridos hasta la actualidad (Tabla 3), se concluye lo siguiente:

El nivel de más alta energía registrado en el río Salado (T1) correspondería, por sus características texturales al evento 4 y podría asociarse con el pico de la inundación ocurrido en 2017 ($872.94 \text{ m}^3/\text{s}$) (Tabla 3) (Fig. 9), a una profundidad entre 50 y 65 cm . dando una tasa de sedimentación de 15 cm/año para dicho evento. La inundación abarcó los intervalos 3 y 4 del testigo, completando un registro sedimentario de 25 cm .

Posteriormente, ocurre un periodo de estabilidad climática y a partir de allí inicia una etapa seca, evidenciada por la depositación de material más fino (arena fangosa) con alto contenido de gastrópodos bien conservados, los cuales evi-

Tabla 8. Tamaño de grano máximo y mínimo junto con las velocidades máximas y mínimas que le corresponde a cada uno según Hjulström (1935), para las muestras del Testigo 1 (MT1a, MT1b, MT1c, MT1d, MT1e) y del Testigo 2 (MT2b, MT2c y MT2f).

Muestra	Tamaño mínimo	Velocidad mínima de transporte (cm/s)	Tamaño máximo	Velocidad máxima de transporte (cm/s)
MT1a (Sector 1)	<0.063	0.42	0.85	32
MT1b (Sector 1)	<0.063	0.42	0.37	24
MT1c (Sector 1)	<0.0039	0	4.75	83
MT1d (Sector 1)	<0.0039	0	7	100
MT1e (Sector 1)	<0.0039	0	3	68
MT2b (Sector 2)	<0.0039	0	2	51
MT2c (Sector 2)	<0.0039	0	0.063	20
MT2f (Sector 2)	<0.0039	0	2	51

dencian la mortandad producida por la desecación del curso del Salado durante estos períodos de sequía.

Los eventos de inundaciones extremas en el río Salado se caracterizan por facies deposicionales de grava fango-arenosas con mala selección y predominio de arcilla en la fracción fangosa, formadas en ambientes oxidantes con coloraciones castaño claro a amarillentas. Por otro lado, los eventos de sequías se caracterizan por facies areno-fangosas, con predominio de limos en el fango, mejor seleccionadas, mayor contenido de materia orgánica, coloración castaño oscuro y abundancia de gasterópodos de agua dulce.

Se estima que durante los picos de inundación la velocidad podría llegar a los 100 cm/s.

El tramo endicado del Salado muestra un cambio marcado en la sedimentación desde el nivel 5. Los sedimentos de la base del testigo extraído (Unidad 6 - MT2f) tienen coloración y características texturales semejantes a los sedimentos actuales de fondo de canal en eventos de baja energía (condiciones secas). El nivel superior (Unidad 5 - MT2e) marca la transición hacia unidades fangosas, indicando el periodo de regulación del Salado por las compuertas. El nivel de máxima profundidad de la presa se manifiesta en el nivel 2 (MT2c) por la coloración oscura, el ambiente reductor y la naturaleza fina de la textura sedimentaria. A partir de aquí, se observa una textura levemente arenosa, con intervalos tractivos y un cambio en la coloración hacia tonos castaño-amarillentos, lo que indica nuevamente un ambiente oxidante y un nivel más bajo del pelo de agua. También se incrementa en los registros

Tabla 9. Parámetros fisicoquímicos medidos en la sequía extrema del verano de 2023.

Parámetro/Muestra	FQ1 (Sector 1)	FQ2 (Sector 2)
pH	8.21	9.28
ORP (mV)	98.7	27
Salinidad (µS/cm)	1968	4908
TSD (ppm)	1358	3387
Temperatura (°C)	30.38	32.84

sedimentarios el contenido de raíces de plantas vasculares que comienzan a crecer en el lecho desecado, junto con gasterópodos enteros que mueren por la desecación o anoxia del ambiente.

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Del trabajo realizado se destaca la importancia de incorporar los esquemas morfosedimentarios en los modelados hidráulicos, además de los datos de precipitaciones y caudales de la cuenca. Estos modelos son herramientas clave para comprender la dinámica del río y sus fluctuaciones frente a los cambios climáticos recientes.

Los eventos de inundaciones extremas en el río Salado se caracterizan por facies deposicionales de gravas fango-arenosas, con mala selección y predominio de arcilla en la fracción fangosa. En contraste, los eventos de sequía se caracterizan por facies areno-fangosas, con predominio de limos en el fango, mejor seleccionadas, con mayor contenido de materia orgánica, coloración castaño oscura y abundancia de gasterópodos de agua dulce bien conservados. Se estima, que, durante los picos de inundación, la velocidad de flujo podría haber llegado a los 100 cm/s.

El análisis de los datos climáticos históricos y de las inundaciones permitió identificar cuatro fases climáticas diferentes:

1932-1957: Sequías prolongadas, con precipitaciones por debajo de la media.

1958-1979: Período neutro, sin eventos climáticos extremos.

1980-2002: Alternancia de sequías e inundaciones extremas.

2003-actualidad: Mayor predominio y duración de sequías, con ciclos húmedos cortos, poco frecuentes y de gran intensidad.

Este comportamiento corresponde a una tendencia local, que, si bien es consistente con los patrones generales observados en la región pampeana, puede haber diferencias regionalmente en los límites de los ciclos interanuales. Por

ejemplo, en la Pampa Norte–Chaco Austral el año 2003 no fue seco (Pedersen et al., 2022), y en el noreste de Argentina diversos autores indican que el aumento en la frecuencia de eventos secos se manifestaría recién a partir de 2008 (Lovino et al., 2022; Muller et al., 2018). Por lo tanto, los ciclos identificados deben considerarse válidos para la escala local analizada.

A pesar de que las precipitaciones medias anuales han aumentado ligeramente, también se ha observado un incremento en la frecuencia de los períodos secos. Por lo tanto, es fundamental planificar a futuro para mitigar las consecuencias ambientales asociadas a estos cambios.

La presa de General Belgrano demostró ser altamente eficiente durante las inundaciones posteriores a su construcción. Sin embargo, produjo problemas ambientales en el período de sequía de enero de 2023, cuando el pelo de agua quedó por debajo del nivel del vertedero principal. Por lo tanto, es crucial considerar en el plan de manejo ambiental no sólo los picos de caudal durante las inundaciones, sino que también los caudales mínimos durante las sequías.

La construcción de la presa ha alterado la sedimentación en el canal, generando un cambio en el tipo de sedimento, un aumento en el contenido de materia orgánica (11.42 %) y un ambiente anóxico y reductor. Estos cambios han dado lugar a una alta degradación orgánica, eutrofización y alteraciones químicas, tales como un pH alcalino (9.28), un aumento de la salinidad (49.08 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y temperaturas más altas, afectando la calidad del agua y generando impactos negativos en el ecosistema acuático. En el verano de 2023 estos factores afectaron gravemente al turismo local.

Se recomienda establecer alertas de monitoreo para el nivel del agua y almacenar agua en el meandro antes de los períodos secos, especialmente durante el verano. Además, es crucial evitar el vertido de efluentes cloacales tratados en la zona afectada, ya que contribuyen a la eutrofización del cuerpo de agua. Esta medida es especialmente importante durante el verano, cuando también se registra una mayor afluencia turística.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo fue financiado con fondos aportado por la Universidad de Buenos Aires mediante los subsidios UBACYT 20020170100389BA y 20020220200079BA. Se agradece a la Dirección de Obras en Apoyo al Desarrollo Nacional del Ejército Argentino por permitir el uso del laboratorio de suelos para la realización de los ensayos y a la revista el trámite editorial.

REFERENCIAS

- Amarilla, B., Conti, A. L., Molinari, G. A., Coletti, R., Mariñelarena, P.I.M., Mostrada, J. y Bellesi, P. 2007. Municipio de General Belgrano. Estrategias para un desarrollo turístico sustentable. Laboratorio de Investigación del Territorio y el Ambiente (LINTA). 47 p.
- Atterberg, A. 1911. Über die physikalischen Eigenschaften der Tone. *Internationale Zeitschrift für Bodenkunde* 11(1): 121-134.
- Ameghino, F. 1884. Las secas y las inundaciones en la Provincia de Buenos Aires. Obras de retención y no de desagüe. Ministerio de Asuntos Agrarios de la Provincia de Buenos Aires, Buenos Aires.
- Alexandersson, H. 1986. A homogeneity test applied to precipitation data. *International Journal of Climatology* 6(6): 661-675.
- Aravena, J.C. y Luckman, B.H. 2009. Spatio-temporal rainfall patterns in southern South America. *International Journal of Climatology* 29(14): 2106-2120.
- Bird, B.W., Abbott, M.B., Vuille, M., Rodbell, D.T., Stansell, N.D. y Rosenmeier, M.F. 2011. A 2,300-year-long annually resolved record of the South American summer monsoon from the Peruvian Andes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108 (21): 8583-8588.
- Blott, S.J. y Pye, K. 2012. Particle size scales and classification of sediment types based on particle size distributions: review and recommended procedures. *Sedimentology* 59 (7): 2071-2096.
- Blum, M.D. y Törnqvist, T.E. 2000. Fluvial responses to climate and sea-level change: a review and look forward. *Sedimentology*, 47(Supl. 1): 2-48.
- Brierley, G. y Fryirs, K. 2005. *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework*. Blackwell Publishing, Oxford.
- Casagrande, A. 1932. Research on the Atterberg limits of soils. *Public Roads*, 13(8): 121-136.
- Centro de Estudios Sociales y Ambientales. 2004. Capítulo V – Estudio de caso: Cuenca del Salado. Informe Final IAI 2004 ENSO-Argentina.
- Cioccale, M.A. 1999. Climatic fluctuations in the Central Region of Argentina in the last 1000 years. *Quaternary International* 62 (1): 35-47.
- Comellas, E.A. 2018. La gestión de los recursos hídricos en el área pampeana central y su incidencia en las herramientas de política macroeconómica de Argentina. En: *Infraestructura y Futuro de los Recursos Hídricos 2018*, Actas. Instituto Nacional del Agua (INA), Buenos Aires.
- Córdoba, F.E., Guerra, L., Rodríguez, C. C., Sylvestre, F. y Piovano, E. L. 2014. Una visión paleolimnológica de la variabilidad hidroclimática reciente en el centro de Argentina: desde la pequeña edad de hielo al siglo XXI. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 21(2): 139-163.
- Dangavs, N. y Reynaldi, J. 2008. Paleolimnología de la laguna Cerrillo del Medio, Monte, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 64: 29-42.
- Deschamps, J.R., Otero, O. y Tonni, E.P. 2003. Cambio climático en la

- pampa bonaerense: las precipitaciones de los siglos XVIII al XX. Documentos de Trabajo N° 109. Departamento de Investigación, Universidad de Belgrano, 18 p.
- Díaz Apella, B. L. 2023. Geología y geomorfología del tramo medio e inferior de la Cuenca del Río Salado: variabilidad hidroclimática y su aplicación al manejo ambiental (Tesis doctoral). Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires (IGEBA), Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Doyle, M. E. 2020. Observed and simulated changes in precipitation seasonality in Argentina. *International Journal of Climatology* 40(3): 1716–1737.
- Fielding, C.R., Allen, J.P., Alexander, J. y Gibling, M.R. 2018. Facies model for fluvial systems in the sedimentary record. *Sedimentology* 65(1): 1–42.
- Fucks, E., Pisano, M.F., Huarte, R.A., Di Lello, C.V., Mari, F. y Carbonari, J.E. 2015. Estratigrafía de los depósitos fluviales de la cuenca del río Salado, provincia de Buenos Aires: litología, cronología y paleoclima. *Revista de Ciencias de la Tierra Sudamericana* 60: 129-139.
- Giorgi, F. 2002. Variabilidad y tendencias del clima superficial a escala subcontinental en el siglo XX. Parte I: observaciones. *Climate Dynamics* 18: 675–691.
- Guerra, L., Gómez, E.A., Pousa, J.L. y Codignotto, J.O. 2019. Multi-annual response of a Pampean shallow lake from central Argentina to regional and large-scale climate forcings. *Climate Dynamics* 52(11): 6847-6861.
- Heiri, O., Lotter, A. F. y Lemcke, G. 2001. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology* 25(1): 101–110.
- Hooke, J. 2003. Coarse sediment connectivity in river channel systems: a conceptual framework and methodology. *Geomorphology*, 56(1-2): 79-94.
- Hjulström, F. 1935. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. Tesis doctoral, Geological Institute, University of Uppsala, 221 p., Uppsala.
- Iriondo, M. y Krohling, D. 2007. Geomorfología y sedimentología de la cuenca superior del río Salado (sur de Santa Fe y noroeste de Buenos Aires, Argentina). *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 14(1): 1-23.
- Knighton, D. 2014. *Fluvial Forms and Processes: a new perspective*. 2a ed. Routledge, Londres.
- Kröhling, D. M. e Iriondo, M. 1999. Upper Quaternary palaeoclimates of the Mar Chiquita area, North Pampa, Argentina. *Quaternary International* 57: 149-163.
- Lovino, M.A., Müller, G.V., Pierrestegui, M.J., Espinosa, E. y Rodríguez, L. 2022. Extreme precipitation events in the Austral Chaco region of Argentina. *International Journal Climatology* 42(11): 5985-6006.
- Monti, A.C., Marcomini, S.C. y Lopez, R. 2023. Variaciones geoambientales por la construcción de un sistema de compuertas en el río Salado, General Belgrano, Buenos Aires. XVIII Reunión Argentina de Sedimentología – IX Congreso Latinoamericano de Sedimentología, Actas: 341, Buenos Aires.
- Monti, A. 2024. Estudio geoambiental y de riesgo geológico de la localidad de General Belgrano, Buenos Aires. Tesis de licenciatura, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias Geológicas, Buenos Aires, Argentina.
- Müller, O.V., Müller, G.V., Sgroi, L.C. y Baethgen, W.E. 2018. Interannual-to-multidecadal hydroclimate variability and its sectoral impacts in northeastern Argentina. *Hydrology and Earth System Sciences* 22 (6): 3155–3174.
- Pasquini, A., Lecomte K.L., Piovano, E.L. y Depetris, P.J. 2006. Recent rainfall and runoff variability in central Argentina. *Quaternary International* 158:127–139.
- Pedersen, O., Brunetto, E., Kröhling, D.M., Thalmeier, M.B. y Zalazar, M.C. 2022. Palaeohydrology from the Northern Salado River, a lower Parana River tributary (Argentina). *Journal of South American Earth Sciences* 120: 104050.
- Piovano, E., Ariztegui, D., Córdoba, F., Cioccale, M. y Sylvestre, F. 2009. Hydrological variability in South America below the Tropic of Capricorn (Pampas and eastern Patagonia, Argentina) during the last 13.0 ka. En: Vimeux, F., Sylvestre, F. y Khodri, M. (Eds), *Past climate variability from the Last Glacial Maximum to the Holocene in South America and Surrounding regions*. Springer, *Developments in Paleoenvironmental Research Series*: 323-351.
- Piovano, E.L., Ariztegui, D. y Moreira, S.D. 2002. Recent environmental changes in Laguna Mar Chiquita (central Argentina): a sedimentary model for a highly variable saline lake. *Sedimentology* 49 (6): 1371–1384.
- Piovano, E.L., Larizzatti, F.E., Fávoro, D.I., Oliveira, S.M., Damatto, S.R., Mazzilli, B.P. y Ariztegui, D., 2004b. Geochemical response of a closed-lake basin to 20th century recurring droughts/wet intervals in the subtropical Pampean Plains of South America. *Journal of Limnology* 63 (1): 21–32.
- PMI. 1999. Plan Maestro Integral Cuenca del río del Salado. Unidad Ejecutora Provincial. Ministerio de Economía de la Provincia de Buenos Aires-Halcrow-Banco Mundial, 1999, 1300 pp., La Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Pommarés, N. N. 2020. Estudios estratigráficos y geomorfológicos en la cuenca media del Río Salado, provincia de Buenos Aires. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina.
- Servicio Meteorológico Nacional 2023. <https://www.smn.gob.ar>
- Silva Busso, A. 2015. Informe Hidrogeológico del Pozo GB-01. Ciudad Gral. Belgrano, Partido de Gral. Belgrano, Provincia de Buenos Aires. CCDRILL - ABSA (Inédito). 39p.
- Sistema Nacional de Información Hídrica, 2023. <https://snih.hidricosar-gentina.gob.ar>
- Thompson, L.G., Mosley-Thompson, E., Davis, M.E., Zagorodnov, V.S.,

- Howat, I.M., Mikhaleiko, V.N. y Lin, P.N. 2013. Annually resolved ice core records of tropical climate variability over the past~ 1800 years. *Science*, 340(6135): 945-950.
- Tonni, E.P., Cione, A.L. y Figini, A.J. 1999. Predominance of arid climates indicated by mammals in the pampas of Argentina during the Late Pleistocene and Holocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 147(3-4): 257-281.
- Troin, M., Vallet-Coulomb, C., Sylvestre, F. y Piovano, E. 2010. Hydrological modeling of a closed lake (Laguna Mar Chiquita, Argentina) in the context of 20th century climatic changes. *Journal of Hydrology* 393:233-244.
- Velázquez, J. A., Troin, M., Caya, D. y Brissette, F. 2015. Evaluación de la hipótesis de invariancia temporal en la corrección de sesgos de modelos climáticos: implicancias para estudios de impacto hidrológico. *Journal of Hydrometeorology* 16 (5): 2013–2026.