

## Efectos antrópicos sobre la calidad del agua del curso inferior del río Chubut: resultados preliminares

Domínguez, Maite Lucía<sup>1,2@</sup>, Fiorda Giordanino, María Valeria<sup>2,3@</sup>, Palloni, Leila<sup>1@</sup>, Torres, María Florencia<sup>1@</sup>, Maldonado, Alejandro Andrés<sup>1@</sup> y Apollonia, Federico Daniel<sup>1@</sup>

1 Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Facultad de Ciencias Naturales y Ciencias de la Salud. Chubut, Argentina.

2 Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Facultad de Ingeniería. Chubut, Argentina.

3 Secretaría de Ambiente y Control del Desarrollo Sustentable, Provincia de Chubut, Argentina.

@ maiteidominguez@yahoo.com.ar

Recibido: 29/04/2025

Aceptado: 28/07/2025

**Resumen.** El río Chubut atraviesa la provincia homónima desde la cordillera hasta su desembocadura en el océano Atlántico. Durante su trayecto atraviesa mayormente zonas despobladas hasta llegar al Embalse Ameghino, donde el caudal es regulado y a partir del cual se desarrolla el Valle Inferior del Río Chubut (VIRCh). A lo largo de éste, el río es canalizado para abastecer al sistema de irrigación que funciona entre octubre y marzo y se constituye en la principal fuente de agua potable. En la ribera del río se desarrollan actividades productivas que incluyen, entre otras, la ganadería y la agricultura. A raíz de la multiplicidad de usos y servicios que este bien común proporciona a las comunidades, y de las proyecciones de reducción de caudal debido al cambio climático, se plantea este trabajo en el que se busca implementar un programa de monitoreo de la calidad del agua del río. A este fin se diseñó un muestreo sistemático con la intención de determinar parámetros físicos, químicos y biológicos de manera estacional durante dos años para a posteriori evaluar diferencias temporales y espaciales mediante estadística no paramétrica y, mediante técnicas de análisis multivariado (Análisis de Componentes Principales seguido de análisis de conglomerados no jerárquico), explorar y sintetizar la estructura de los datos y analizar posibles agrupamientos. Los resultados preliminares muestran una diferencia temporal en la mayoría de los parámetros determinados, evidenciando un impacto del sistema de irrigación sobre la calidad del agua del río. Por otra parte, se identifican tres grupos: uno correspondiente al invierno y dos en primavera, correspondientes a los sitios de dos tramos separados espacialmente y vinculados a diferentes actividades ribereñas. Estos resultados reflejan no sólo un impacto del sistema de irrigación sobre la calidad del agua sino también de las actividades productivas y urbanas desarrolladas en las márgenes del río.

**Palabras clave:** perifiton; parámetros físico-químicos; parámetros biológicos; monitoreo.

**Abstract. Anthropogenic effects on water quality in the lower course of the Chubut River: preliminary results.** Chubut River crosses the same name province, from its mountain range to its mouth in the Atlantic Ocean. Along its course, it runs across unpopulated areas until it reaches Embalse Ameghino, where its flow gets regulated and from where the Lower Valley of the Chubut River (VIRCh) develops. In this region, the river is channeled to supply the irrigation system that operates from October to March and serves as the main source of drinking water. Productive activities such as livestock farming and agriculture take place along the riverbanks. Given the multiple uses and services this common good provides to communities and considering future projections of reduced flow due to climate change, this study aims to implement a monitoring program to control river water quality. The program involves systematic sampling and seasonal assessment of physical, chemical, and biological parameters over two years. Subsequently, temporal and spatial differences are to be assessed using non-parametric statistics, and data structure and potential groupings are to be explored and synthesized through multivariate analysis techniques (Principal Component Analysis followed by non-hierarchical cluster analysis). Preliminary results show temporal differences in most of the parameters measured, indicating an impact of the irrigation system on river water quality. Additionally, three groups are identified: one corresponding to winter and two to spring, associated with sites from two spatially separated sections linked to different riverbank activities. Present findings reflect the influence of the irrigation system on water quality and of productive and urban activities along the river margins.

**Key words:** periphyton; physicochemical parameters; biological parameters; monitoring.

## INTRODUCCIÓN

El río Chubut tiene sus nacientes en los sectores cordilleranos de las provincias de Chubut y Río Negro. La cuenca abarca una superficie de 53.234 km<sup>2</sup> extendiéndose hasta el Océano Atlántico, donde encuentra su desembocadura, luego de atravesar la meseta patagónica sin recibir aportes de ningún tributario permanente. Solamente durante las esporádicas tormentas,

### Cómo citar este trabajo:

Domínguez, M. L., Fiorda Giordanino, M. V., Palloni, L., Torres, M. F., Maldonado, A. A. y Apollonia, F. D. (2025). Efectos antrópicos sobre la calidad del agua del curso inferior del río Chubut: resultados preliminares. *Semiárida*, 35(Supl.), 5-18.

los arroyos efímeros se activan y descargan torrencialmente al río (Kaless et al., 2008). En el extremo oriental de Chubut, 190 km aguas arriba de la desembocadura, se encuentra la presa Florentino Ameghino que regula las aguas del río Chubut y los aportes temporarios del río Chico, que conflúan a pocos kilómetros aguas arriba, antes de crearse el embalse. Aguas abajo, a lo largo de 75,5 km, el río transita por un estrecho valle flanqueado por numerosas cuencas torrenciales que se desarrollan en un área de 92.402 ha y aportan importantes volúmenes líquidos y sólidos al río Chubut cuando se producen intensas tormentas de corta duración (ibid.). Al final del tramo, el valle se ensancha abruptamente para constituir el Valle Inferior del Río Chubut -VIRCh (ibid.), donde el agua posee diversos usos que incluyen no sólo la provisión de agua potable para las localidades de Dolavon, Gaiman, Trelew, Rawson, Puerto Madryn y Puerto Pirámides (estas últimas ubicadas a más de 60 km del río), sino también la irrigación, recreación (navegación deportiva, pesca y kayaquismo) y bebida de ganado, entre otras.

El VIRCh constituye la segunda zona productiva de la Patagonia, generando alrededor del 50 % de la producción agropecuaria de la provincia y albergando el 12 % de la población patagónica (Pascual, 2020), contando con un sistema de canales de riego y una red de drenaje asociada que se inicia cerca de la localidad de 28 de Julio, en Boca Toma. Allí se originan dos canales principales que recorren las márgenes norte y sur del valle, de los cuales se derivan 10 canales secundarios, 4 canales terciarios, y más de 500 canales comuneros (Díaz et al., 2021). La longitud de los canales de la red es aproximadamente de 350 km, siendo la de los comuneros más del doble de este valor (ibid.). En este sentido, el agua que demanda el sistema de riego sobre el total de agua utilizada anualmente es del 84 %, según Pascual et al. (2020), siendo las principales actividades agrícolas la producción de forrajes y en menor medida la horticultura y la fruticultura. Por otra parte, el consumo industrial -concentrado entre el parque industrial de Trelew y el procesamiento de aluminio en Puerto Madryn- y el consumo doméstico, a pesar de tener escasa relevancia cuantitativa, tienen una importancia estratégica en aumento, debido principalmente al crecimiento poblacional (Salvadores et al., 2022). Asimismo, el río ha sido y es utilizado para verter efluentes líquidos de distinta naturaleza, entre los que se encuentran líquidos cloacales, pluviales e industriales. Actualmente, las descargas puntuales sobre el río con diferentes grados de tratamiento, caudal e intermitencia se originan en descargadores de fondo del Dique, una planta caolinera, retrolavado de filtros de plantas potabilizadoras, retorno de canales de riego, descarga de canales de drenajes, pluviales de Trelew, cloacales tratados de Rawson, y dos industrias pesqueras. Entre las fuentes difusas se incluyen la actividad portuaria, la escorrentía agrícola-ganadera y la escorrentía natural. En relación con esto, Pessacg et al. (2021) proponen que tanto la dinámica poblacional creciente como la evolución de las actividades productivas implican una mayor presión sobre el agua actual y futura.

A raíz de la situación previamente descripta surge la necesidad de obtener datos que reflejen el estado del sistema e integrarlos a través de una herramienta que sea útil para la comprensión y comunicación de dicha información sobre el estado y evolución del recurso, tal como lo proponen las autoridades de otras cuencas patagónicas (AIC, 2011). En este sentido, Pessacg et al. (2021) resaltan la inexistencia de registros públicos y abiertos de parámetros de calidad del agua que permitan realizar análisis cuantitativos, estimar tendencias y realizar proyecciones, parte de lo cual ha sido subsanado en los últimos años desde la Secretaría de Ambiente y Control del Desarrollo Sustentable (SAyCDS) de la provincia de Chubut al habilitar una base de datos con los resultados de monitoreos ambientales generados por el laboratorio de este organismo (Sistema Provincial de Información Ambiental - SPIA). Sin embargo, prevalece la necesidad de sistematizar y hacer asequible la información existente, motivo por el cual la utilización de diversos índices de calidad de agua (ICA), índices de contaminación (ICO), índices de estado trófico (IET) y el uso de bioindicadores representa un camino eficiente para el diseño o revisión de planes de monitoreo y la interpretación de los resultados obtenidos. Los ICO constituyen una herramienta valiosa que permite cuantificar el grado de contaminación de las aguas respecto a su condición general, comprendiendo propiedades que regularmente se determinan y que a veces no son contempladas en la legislación (Ramírez et al., 1999). Por su parte, se ha propuesto el uso de perifiton como indicador

para el biomonitoreo en ríos, que junto con macroinvertebrados y peces, se reportan como los organismos más utilizados (Domínguez et al., 2020). Los microorganismos que crecen con relación a sustratos naturales o artificiales reciben el nombre de biofilms (Cohero et al., 2021; Nicolosi Gelis et al. 2021; 2024) o perifiton (González et al., 2019; Rodríguez et al., 2012; 2015, Sánchez et al., 2017), siendo este último el término que utilizaremos en este trabajo, respetando la conceptualización realizada por la metodología adoptada. El perifiton resulta muy útil para evaluar los efectos de los contaminantes en agua dado que su abundancia y composición dependen de la calidad de la misma (APHA, AWWA, WEF, 2023) y es posible, a partir de la determinación de su biomasa (peso seco libre de cenizas) y la concentración de clorofila *a*, calcular el Índice Autotrófico (IA) para conocer la naturaleza trófica de la comunidad, lo que se vincula con la calidad del agua y permite describir cambios entre sitios de muestreo (Singh et al., 2017). Asimismo, la evaluación de las distintas fracciones de su masa (autótrofa, heterótrofa e inorgánica) como aspectos estructurales permite inferir aspectos funcionales de la comunidad (Pizarro et al., 2005). Las categorías de Lakatos (1989), además, permiten clasificar al perifiton en base a relaciones entre el peso seco, el contenido de materia orgánica y el contenido de clorofila *a*.

Con el fin de estudiar el efecto de la descarga de los canales de drenaje y del retorno de los canales de riego en la calidad del agua del curso inferior del río Chubut, se diseñó un programa estacional de muestreo en el que se determinaron parámetros físico-químicos y bacteriológicos, así como la biomasa y clorofila *a* en muestras del perifiton fijado en sustratos artificiales dispuestos a tal fin. A su vez, a partir de los datos obtenidos, se compararon los resultados con niveles guía normados y se calcularon índices de calidad de agua, de contaminación y de estado trófico.

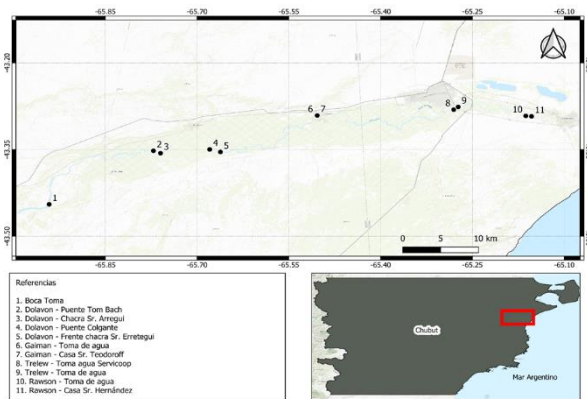
## METODOLOGÍA

### *Muestreo*

Se seleccionaron 11 sitios de muestreo de agua y perifiton, ubicando perifitómetros en seis del total de los sitios (en coincidencia con las zonas de mezcla de descargas de canales de riego o drenaje). La selección de la ubicación de los sitios de muestreo (Figura 1) se basó en la cercanía a las áreas de mayor densidad poblacional, la presencia de tomas de agua de las plantas potabilizadoras, los sitios de desarrollo de actividades agrícolas e industriales preponderantes y las descargas de canales de riego y drenajes, como se detalla en la Tabla 1. Se estableció una frecuencia de muestreo estacional, durante un período de 24 meses, considerando la operatividad del sistema de riego (de septiembre a abril), estableciendo dos meses de muestreo durante la apertura de los canales (noviembre y febrero) y dos durante el cierre (mayo y julio/agosto). Los resultados preliminares que se presentan corresponden a las campañas de invierno y primavera del año 2024. Los perifitómetros, cuyo diseño se muestra en el Figura 2, se desarrollaron según las recomendaciones tomadas de Sládečková (1962), Austin (1981) y APHA, AWWA, WEF (2023). Estos fueron colocados semanas antes del muestreo del agua para permitir la fijación del perifiton y colectados junto con las muestras de agua. Dado que estudios previos evidencian diferencias estacionales en las tasas de acumulación de perifiton (Tóth, 2013), se realizaron pruebas preliminares y se establecieron tiempos variables de exposición según la estación, siendo de dos semanas en verano, cuatro en otoño y primavera, y seis en invierno.

### *Parámetros analizados*

En los 11 sitios de muestreo se tomaron muestras puntuales sobre las que se realizaron diversos análisis físico-químicos y bacteriológicos, de los cuales pH, conductividad, temperatura y oxígeno disuelto fueron medidos in situ mediante el uso de una sonda YSI ProQuatro y los demás en el laboratorio (Tabla 2). Por su parte, cada perifitómetro contó con 10 láminas de fijación del material biológico, de las cuales 3 se utilizaron para determinar el peso seco libre de cenizas, 3 para la determinación de clorofila *a* y 3 se fijaron para futuros análisis cualitativos y cuantitativos de perifiton (Tabla 3). A partir de los resultados obtenidos se calcularon diversos índices según se muestra en la Tabla 4.



**Figura 1.** Ubicación de los sitios de muestreo en el Valle Inferior del Río Chubut, Argentina (VIRCh).

**Figure 1.** Sampling sites location in the Chubut River Lower Valley, Argentina (VIRCh).

**Tabla 1.** Descripción de potenciales estresores ambientales que pueden impactar sobre los sitios de muestreo.

**Table 1.** Description of potential environmental stressors at sampling sites.

Sitio	Descripción	Potenciales estresores sobre el sitio*
1. Boca Toma	Inicio del sistema de irrigación (punto de control)	
2. Dolavon - Puente Tom Bach	Aguas arriba del retorno del Canal Secundario II Sur	Cria intensiva de ganado en las inmediaciones. Retorno de canal, cria intensiva de ganado en las inmediaciones.
3. Dolavon - Chacra Sr. Arregui	Aguas abajo del retorno del Canal Secundario II Sur	
4. Dolavon - puente Colgante	Aguas arriba del Drenaje Sur Tir Halen	Descarga de drenaje
5. Dolavon - frente a chacra de Erreategui	Aguas abajo del Drenaje Sur Tir Halen	
6. Gaiman - Toma de agua	Aguas arriba del Drenaje Norte	Cria intensiva de ganado. Descarga de drenaje, zona residencial sin sistema cloacal.
7. Gaiman - Casa Sr. Teodoroff	Aguas abajo del Drenaje Norte	
8. Trelew - Toma de Agua Servicio (para la ciudad de Puerto Madryn)	Aguas arriba del retorno del Canal Principal Sur y aguas abajo de la descarga del pluvial Muster (esporádica).	Descarga esporádica del pluvial, zona residencial sin sistema cloacal.
9. Trelew - Toma de Agua	Aguas abajo del retorno del Canal Principal Sur	
10. Rawson - Toma de Agua	Aguas arriba del retorno del Canal Secundario V Sur	Alejadas, aguas arriba y a la vera de ambas márgenes del canal se encuentran lagunas de tratamiento de efluentes de lanera, cria intensiva de ganado. Descarga de canal, zona residencial sin sistema cloacal.
11. Rawson - Casa Sr. Hernández	Aguas abajo del retorno del Canal Secundario V Sur	

\*Además de las actividades agrícolas que se desarrollan a lo largo de todo el Valle Inferior del Río Chubut. Las celdas en blanco indican sólo el desarrollo de actividades agrícolas como principal estresor.

### Análisis estadísticos

Los análisis estadísticos fueron realizados empleando el software R versión 4.3.1 (R Core Team, 2023). Se realizó una prueba estadística no paramétrica de Kruskal-Wallis usando el paquete stats (ibid.) para determinar si existen diferencias significativas en los rangos promedio de los parámetros determinados entre los sitios y entre las estaciones del año, a los fines de asegurar la obtención de resultados robustos ante la ausencia de homogeneidad de varianzas o normalidad. Por otra parte, para explorar y sintetizar la estructura subyacente en los datos multivariados de calidad de agua, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) usando el paquete FactoMineR

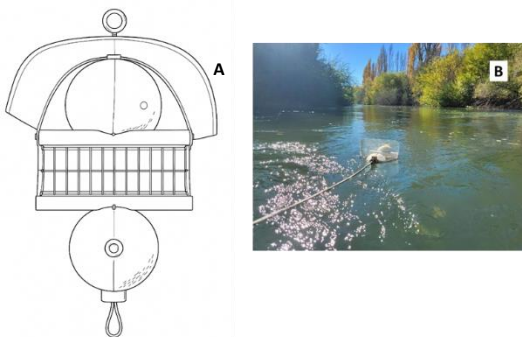
(Lê et al., 2008), escalando todas las variables (centrándolas y estandarizándolas) para evitar la influencia del orden de magnitud en los resultados, considerando que las variables involucran diferentes unidades y escalas. Se consideraron las dos primeras componentes principales (Dim 1 y Dim 2), que explicaron conjuntamente un porcentaje sustancial de la varianza total. Posteriormente, para identificar posibles agrupamientos naturales entre los sitios por estación del año, se aplicó un análisis de conglomerados no jerárquico mediante la función k-means del paquete stats (R Core Team, 2023). El número de clusters óptimo fue determinado mediante el método del codo, usando el paquete factoextra (Kassambara & Mundt, 2020), asegurando una partición robusta de los datos. La visualización conjunta de las observaciones, las variables originales y los grupos resultantes se realizó a través de un biplot con codificación por color según los clústeres, utilizando el paquete ggplot2 (Wickham, 2016).

**Tabla 2.** Parámetros determinados en las muestras de agua tomadas en las diferentes campañas.

± Tomados de APHA, AWWA, WEF (2023); \* modificado.

**Table 2.** Parameters determined from water samples obtained in different campaigns. ± Taken from APHA, AWWA, WEF (2023); \* modified.

Parámetro	Norma/Método	Parámetro	Norma/Método
Temperatura	SM 2550 B <sup>±</sup>	Sólidos Suspendedos Totales	SM 2540 D <sup>±</sup>
Oxígeno Disuelto (OD)	SM 4500-O G <sup>±</sup>	Sólidos Totales Disueltos	SM 2540 C <sup>±</sup>
pH	SM 4500-H <sup>±</sup> B <sup>±</sup>	Amonio	SM 4500-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> D <sup>±</sup>
Conductividad eléctrica (CE)	SM 2510 B <sup>±</sup>	Fosfato (fósforo reactivo)	SM 4500-P D <sup>±</sup>
Turbidez	SM 2130 B <sup>±</sup>	Clorofila <i>a</i>	SM 10150 B <sup>±</sup>
DBO <sub>5</sub>	SM 5210 B <sup>±</sup>	Coliformes totales	SM 9221 B <sup>±</sup> *
Sólidos Totales	SM 2540 B <sup>±</sup>	Coliformes fecales	SM 9221 E <sup>±</sup> *
Sólidos Fijos y Volátiles Totales	SM 2540 E <sup>±</sup>	<i>E. coli</i>	SM 9221 F <sup>±</sup> *
Sólidos Sedimentables	SM 2540 F <sup>±</sup>	Enterococos	SM 9230 B <sup>±</sup> *



**Figura 2.** Representación esquemática del perifitómetro (panel A) y aplicación del dispositivo en condiciones de campo en uno de los sitios de muestreo (panel B).

**Figure 2.** Schematic representation of the periphytometer (panel A) and deployment of the device under field conditions at one of the sampling sites (panel B).

Parámetro	Norma/Método
Clorofila <i>a</i>	SM 10300 C-10150 B <sup>±</sup>
Peso seco libre de cenizas	SM 10300 C <sup>±</sup>

**Tabla 3.** Parámetros determinados en las muestras de perifiton tomadas en las diferentes campañas. ± Tomados de APHA, AWWA, WEF (2023); \* modificado.

**Table 3.** Parameters determined in periphyton samples obtained in different campaigns. ± Taken from APHA, AWWA, WEF (2023); \* modified.

**Tabla 4.** Índices calculados a partir de los parámetros analizados.

**Table 4.** Indexes calculated from analyzed parameters.

	Índice	Parámetros involucrados
Aguas	Índice de contaminación por mineralización (ICOMI) (Ramírez <i>et al.</i> , 1997)	CE, Dureza, Alcalinidad (se utilizó un valor histórico)
	Índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO) (Ramírez <i>et al.</i> , 1997)	DBO <sub>5</sub> , Coliformes totales y OD (Porcentaje de saturación)
	Índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS) (Ramírez <i>et al.</i> , 1997)	Sólidos suspendidos
	Índice de contaminación por pH (ICOpH) (Ramírez <i>et al.</i> , 1999)	pH
	Índice de contaminación trófico (ICOTRO). (Ramírez <i>et al.</i> , 1997)	Fósforo total (se utilizó fósforo reactivo)
	Índice de Estado Trófico (IET) (Carlson, 1977 adaptado por Lamparelli, 2004, en CETESB, 2020)	Fósforo total (se utilizó fósforo reactivo) y Clorofila <i>a</i>
Perifiton	Índice Autotrófico (SM 10300C)	Peso seco libre de cenizas Clorofila <i>a</i>
	Tipo en función del contenido de cenizas (Lakatos, 1989)	Cenizas
	Tipo en función del contenido de clorofila <i>a</i> (Lakatos, 1989)	Clorofila <i>a</i>

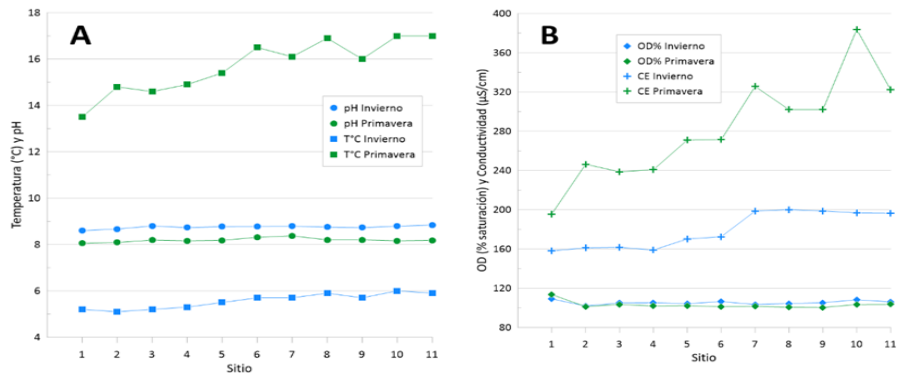
## RESULTADOS

### Parámetros físico-químicos y bacteriológicos

Las temperaturas del agua fueron significativamente más bajas en invierno ( $p<0,001$ ) que en primavera (Figura 3A), siendo la media de 5,6 °C en el primero (con una mínima de 5,1 °C en cercanías de Dolavon y una máxima de 6 °C en cercanías de Rawson) y de 15,7 °C en la segunda (con una mínima de 13,5 °C en Boca Toma y una máxima de 17 °C en cercanías de Rawson). Lo opuesto puede observarse con el pH, con valores más altos (media de 8,75) en invierno que en primavera (media de 8,19,  $p<0,001$ ). Por su parte, los porcentajes de saturación de oxígeno (Figura 3B) se mantuvieron cercanos o superiores a 100 % en las dos estaciones, siendo levemente superiores en invierno ( $p<0,01$ ), a la vez que la conductividad mostró un aumento significativo en primavera ( $p<0,001$ ), cuando los canales se encuentran abiertos. De manera similar, los sólidos disueltos totales (Figura 4) fueron significativamente más bajos en invierno (155-205 mg l<sup>-1</sup>, Figura 4A) que en primavera (171-225 mg l<sup>-1</sup>, Figura 4B), en coincidencia con la apertura de canales ( $p<0,05$ ). Lo mismo puede mencionarse de los sólidos suspendidos (5,4-13,8 mg l<sup>-1</sup> en invierno y 3-28 mg l<sup>-1</sup> en primavera) y los sólidos totales (siendo 168,2-213,3 mg l<sup>-1</sup> el rango invernal y 174-250 mg l<sup>-1</sup> el primaveral), siendo estas diferencias significativas sólo para los últimos ( $p<0,05$ ).

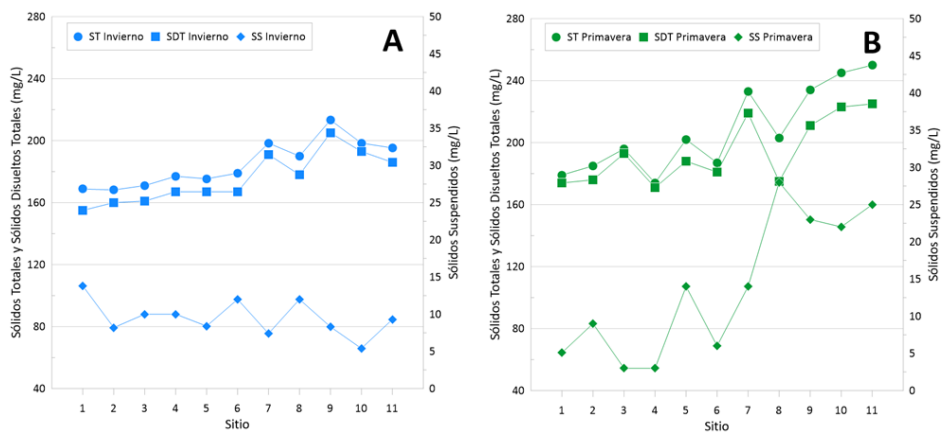
Al analizar las concentraciones de clorofila *a* y fósforo (Figura 5), se observa que tanto los valores de clorofila *a* como de fósforo fueron más elevados en invierno (en ambos casos  $p<0,001$ ).

Respecto de las determinaciones bacteriológicas realizadas, y de manera similar que, para los parámetros físico-químicos, se registraron valores más elevados durante el muestreo de primavera ( $p<0,05$  para *E. coli* mientras que para los demás  $p<0,01$ ), en coincidencia con la apertura de los canales de riego (Figura 6). En el caso particular del sitio 7 (ubicado en una zona residencial de la localidad de Gaiman sin red cloacal, aguas abajo de un drenaje) se registró un valor elevado de coliformes totales y *E. coli* (2400 y 930 NMP/100 ml, respectivamente) en primavera (Figura 6, panel A).



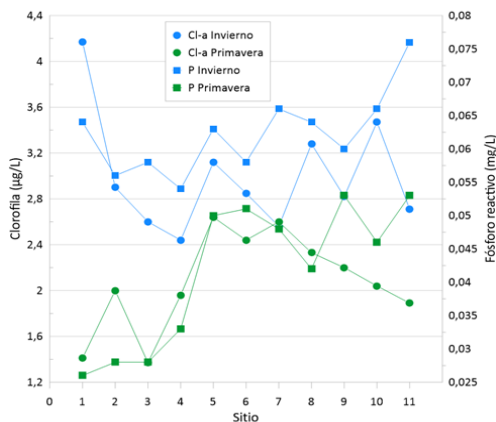
**Figura 3.** Temperatura (T°C) y pH (panel A), OD (oxígeno disuelto como porcentaje de saturación) y conductividad (CE, panel B) medidos *in situ* en cada uno de los sitios de muestreo.

Figure 3. Temperature (T°C) and pH (panel A), DO (dissolved oxygen saturation) and conductivity (CE, panel B) measured *in situ* at each.



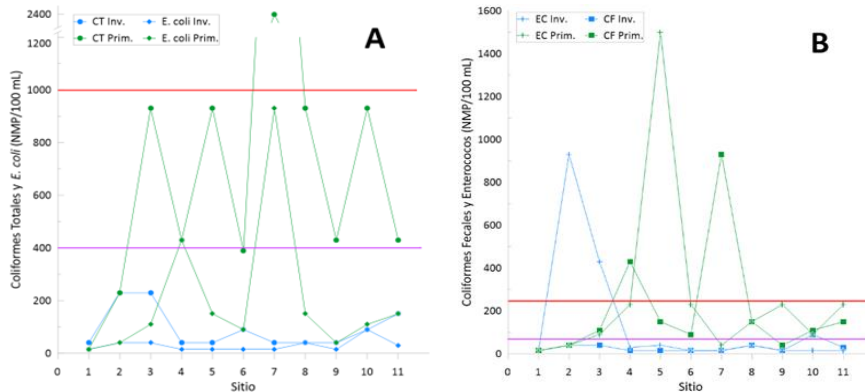
**Figura 4.** Sólidos disueltos totales (SDT), sólidos suspendidos (SS) y sólidos totales (ST) en invierno (panel A) y primavera (panel B) para cada uno de los sitios de muestreo.

**Figure 4.** Total dissolved solids (SDT), suspended solids (SS), and total solids (ST) in winter (panel A) and spring (panel B).



**Figura 5.** Clorofila a (Cl-a) y fósforo reactivo (P) medidos para cada uno de los sitios de muestreo.

**Figure 5.** Chlorophyll a (Cl-a) and reactive phosphorus (P) measured at each sampling.

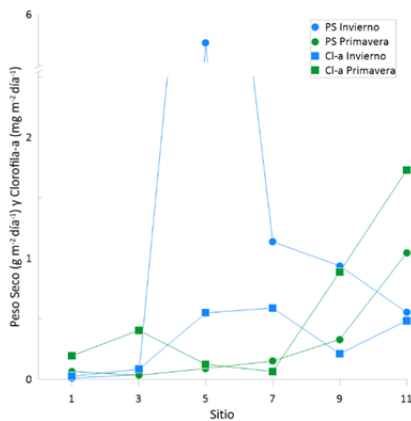


**Figura 6.** Número más probable (NMP) de coliformes totales (CT) y *E. coli* (Panel A), y de coliformes fecales (CF) y enterococos (EC, Panel B) para cada uno de los sitios de muestreo. Las líneas rojas marcan los niveles guía (NG) de coliformes totales (Panel A) y fecales (Panel B) mientras que las lilas representan los NG de *E. coli* (Panel A) y enterococos (Panel B). Nótese además el corte de eje entre 1200 y 2200 para el Panel A.

**Figure 6.** Most Probable Number (MPN) of total coliforms (CT) and *E. coli* (Panel A), and of fecal coliforms (CF) and enterococci (EC, Panel B) at each sampling site. Red lines indicate the guide level values for total coliforms (Panel A) and fecal coliforms (Panel B), while purple lines represent the guide level values for *E. coli* (Panel A) and enterococci (Panel B). Note the axis break between 1200 and 2200 units in Panel A.

### Perifitómetros

El peso seco libre de cenizas acumulado diariamente en los perifitómetros (Figura 7) presentó valores más altos, aunque no significativos, en la mayoría de los sitios en invierno ( $0,01-5,82 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ , mostrando un valor máximo en el sitio 5), mientras que en primavera varió entre  $0,03$  y  $1,04 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ , aumentando a lo largo del curso.



**Figura 7.** Peso seco (PS) y Clorofila a (Cl-a) diarios medidos en cada perifitómetro.

**Figure 7.** Daily dry weight (PS) and Chlorophyll a (Cl-a) measured for each perifitometer.

### Cálculo de índices

En base al cálculo de los índices de contaminación (Tablas 5 y 6), el río no mostró para los sitios y estaciones monitoreadas contaminación asociada a materia orgánica (ICOMO) y a sólidos suspendidos (ICOSUS). La contaminación por mineralización (ICOMI) resultó más baja en invierno ( $p < 0,001$ ) para todos los sitios evaluados mientras que en primavera fue baja en el sitio 1, media en los sitios 2 a 6, 8 y 9, y alta para los sitios 7, 10 y 11, estando los valores elevados relacionados con el aumento de la conductividad y dureza a lo largo del curso. Según el Índice de Contaminación por pH (ICOpH), los sitios 2 a 11 en invierno mostraron contaminación baja,



mientras que los demás sitios por estación no mostraron deterioro en su condición, siendo estas diferencias significativas ( $p < 0,001$ ). El índice de contaminación trófico (ICOTRO) caracteriza al río como eutrófico en todos los sitios y para las dos estaciones. El Índice de Estado Trófico (IET) propuesto por Carlson (1977) y adaptado por Lamparelli (2004, en CETESB, 2020) clasifica al río como mesotrófico en todos los sitios por estación, excepto en el sitio 1 en primavera donde lo caracteriza como oligotrófico.

**Tabla 5.** Índice de Contaminación por Mineralización (ICOMI), Índice de Contaminación por Sólidos Suspendedos (ICOSUS), Índice de Contaminación por Materia Orgánica (ICOMO) e Índice de Contaminación por pH (ICOpH) (Ramírez et al., 1997; 1999).

**Table 5.** Mineralization Contamination Index (ICOMI), Suspended Solids Contamination Index (ICOSUS), Organic Matter Contamination Index (ICOMO), and pH Contamination Index (ICOpH) (Ramírez et al., 1997; 1999).

ICOMI. Índice de contaminación por mineralización (CE, Dureza y Alcalinidad)											
Sitio de muestreo											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Invierno											
Primavera											

ICOSUS. Índice de contaminación por sólidos suspendidos (SST)											
Sitio de muestreo											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Invierno											
Primavera											

ICOMO. Índice de contaminación por materia orgánica (DBO5, coliformes totales y % saturación del oxígeno)											
Sitio de muestreo											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Invierno											
Primavera											

ICOpH. Índice de contaminación por pH											
Sitio de muestreo											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Invierno											
Primavera											

Referencias:		ICO	Contaminación
	0-0.2	Ninguna	
	> 0.2-0.4	Baja	
	> 0.4-0.6	Media	
	> 0.6-0.8	Alta	
	> 0.8-1	Muy alta	

**Tabla 6.** Índice de Contaminación Trófico (ICOTRO) (Ramírez et al., 1997; 1999) e Índice de Estado Trófico (IET) (Carlson, 1977)

**Table 6.** Trophic Contamination Index (ICOTRO) (Ramírez et al., 1997; 1999) and Trophic State Index (TSI) (Carlson, 1977).

ICOTRO. Índice de contaminación trófico (fósforo total)											
Sitio de muestreo											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Invierno											
Primavera											

Referencias:		
Oligotrófico	<0,01	
Mesotrófico	0,01-0,02	
Eutrófico	0,02-1,00	
Hipereutrófico	>1,00	

IET. Índice de estado trófico (fósforo total y clorofila a)											
Sitio de muestreo											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Invierno											
Primavera											

Referencias:		
Ultraoligotrófico	≤47	
Oligotrófico	47-52	
Mesotrófico	52-59	
Eutrófico	59-63	
Supereutrófico	63-67	
Hipereutrófico	>67	

Al examinar los parámetros analizados a partir de los perifitómetros, los valores obtenidos para el Índice autotrófico - IA (SM 10300C) resultan en su mayoría normales, es decir, presentan una proporción esperable entre organismos autótrofos y organismos heterótrofos y/o detritos orgánicos (Tabla 7). Se observan dos sitios en invierno y uno en primavera que muestran una mayor proporción de organismos autotróficos, mientras que en uno en invierno se observa mayor proporción de organismos heterotróficos y/o detritos orgánicos.

Según el porcentaje de ceniza (Lakatos, 1989) el tipo de perifiton se clasifica como inorgánico e inorgánico-orgánico mientras que en base al porcentaje de clorofila a en primavera fue mayormente heterotrófico (con la excepción de los sitios 1 y 3 que mostraron características hetero-autotróficas), a la vez que en invierno el tipo de perifiton muestra una mayor variación entre las distintas categorías en los distintos sitios.

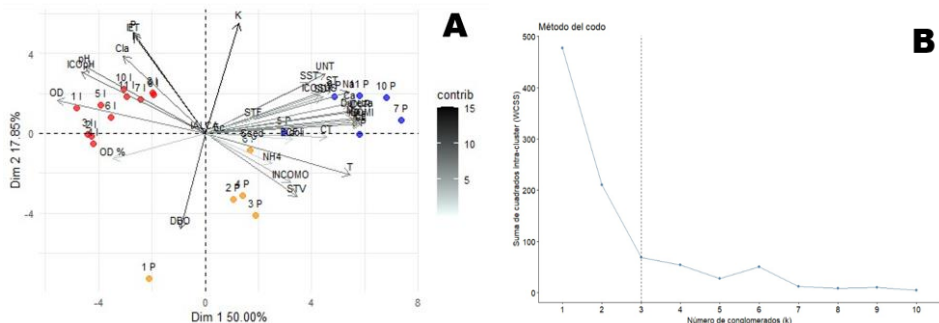
**Tabla 7.** Índice autotrófico y análisis del tipo de perifiton en base al porcentaje de ceniza y de clorofila a

**Table 7.** Autotrophic index and analysis of the type of periphyton based on the percentage of ash and chlorophyll a.

IA. Índice autotrófico (peso seco y clorofila a).					Tipo de perifiton en base al % de clorofila a.					Tipo de perifiton en base al % de ceniza.				
Sitio de muestreo					Sitio de muestreo					Sitio de muestreo				
	1	3	5	7	9	11		1	3	5	7	9	11	
Invierno							Invierno							
Primavera							Primavera							
Referencias:					Referencias:					Referencias:				
Bajo							Autotrófico							
Normal							Auto-heterotrófico							
Alto							Hetero-autotrófico							
Sin dato							Heterotrófico							

### Análisis multivariado

El ACP permitió reducir la dimensionalidad del conjunto de datos y visualizar patrones subyacentes en la composición físico-química y microbiológica de las muestras analizadas. Las dos primeras dimensiones explicaron conjuntamente el 67,29 % de la varianza total (Dim 1: 51,00 %; Dim 2: 16,29 %), lo cual representa una buena síntesis de la estructura multivariada de los datos (Figura 8). A partir del biplot, la distribución espacial de las observaciones y los clusters obtenidos mediante el análisis por conglomerados no jerárquico, se identificaron tres grupos bien diferenciados, cuya caracterización revela distintos tipos de presiones ambientales y fuentes de contaminación: el primer grupo, ubicado en los cuadrantes izquierdo superior e inferior, está formado por todos los sitios en invierno y se asocia a bajas temperaturas y valores altos de fósforo reactivo, clorofila a, oxígeno disuelto e índice de estado trófico. El grupo 2, por su parte, se ubica en el cuadrante superior derecho, formado por los sitios 5 y 7 a 11 en primavera y se caracteriza por valores altos de temperatura, turbidez, conductividad, sólidos e índices ICOMI, ICOSUS y dureza. Finalmente, el tercer grupo se ubica en los cuadrantes inferiores derecho e izquierdo, formado por los sitios 1 a 4 y 6 en primavera, caracterizado por una alta carga bacteriana, temperaturas elevadas y valores altos de sólidos volátiles y parámetros asociados a contaminación orgánica (ICOMO, amonio y DBO5).



**Figura 8.** Análisis de Componentes Principales y posterior análisis de conglomerados no jerárquico realizado a partir de los datos obtenidos (panel A) y determinación del número óptimo de clústeres mediante el método del codo (panel B). La escala de grises muestra la contribución de cada variable a cada dimensión del análisis (Panel A).

**Figure 8.** Principal Component Analysis and subsequent non-hierarchical cluster analysis performed on the collected data (Panel A), and determination of the optimal number of clusters using the elbow method (Panel B). The grayscale scale shows the contribution of each variable to each dimension of the analysis.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La disponibilidad de agua es fundamental para el desarrollo de actividades productivas y para el consumo por parte de las comunidades asentadas en la zona. En particular, el río Chubut, que se desarrolla bajo un régimen climático semiárido en la mayor parte de su trayecto (Márquez et al., 2022), supone un bien común cuya preservación es vital para el desarrollo sustentable de la región.

A nivel local, muchos de los parámetros analizados se encuentran regulados en la provincia de Chubut mediante el Decreto Provincial N° 1540/2016 para diversos usos, entre los que se cuentan abastecimiento de agua, vida acuática y recreación. En este sentido los valores obtenidos se hallan dentro de los niveles guía (NG) para el uso de abastecimiento de agua. Sin embargo, al comparar los valores registrados con los NG establecidos para los dos usos restantes, se detectan valores por encima de estos niveles en parámetros bacteriológicos para uso recreativo del curso de agua (Tabla 9) mientras que ninguno excede los fijados para la protección de la vida acuática (Tabla 8). En relación con el mismo uso y teniendo en cuenta las concentraciones de fósforo reactivo, el curso de agua es calificado como mesoeutrófico para los sitios 1 a 4 en la estación primavera y como eutrófico en los restantes para la misma estación del año, mientras que en invierno todos los sitios son categorizados como eutróficos.

**Tabla 8.** Análisis de los resultados obtenidos en relación con los niveles de calidad de agua dulce superficial para la protección de la vida acuática (según Decreto Provincial N° 1540/2016).

**Table 8.** Results analysis compared to surface freshwater quality levels for the protection of aquatic life (according to Provincial Decree N° 1540/2016).

Oxígeno disuelto (OD), NG $\geq 5,5$ mg/L											
Sitio de muestreo											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Invierno											
Primavera											

N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NG $\leq 13$ mg/L											
Sitio de muestreo											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Invierno											
Primavera											

Fósforo reactivo											
Sitio de muestreo											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Invierno											
Primavera											

Referencias:											
Por encima del NG											
Por debajo del NG											

Referencias:											
Mesotrófico	0,010-0,020 mg/L										
Mesoeutrófico	0,020-0,035 mg/L										
Eutrófico	0,035-0,100 mg/L										
Hipereutrófico	> 0,100 mg/L										

**Tabla 9.** Análisis de los resultados obtenidos en relación con los niveles de calidad de agua dulce, salada, salobre para uso recreativo en contacto primario y secundario (según Decreto Provincial N° 1540/2016).

**Table 9.** Results analysis compared to freshwater, saltwater, and brackish water quality levels for the recreational use in primary and secondary contact (according to Provincial Decree N° 1540/2016).

Coliformes Totales, NG $\leq 1000$ NMP/100mL											
Sitio de muestreo											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Invierno											
Primavera											

Coliformes Fecales, NG $\leq 250$ NMP/100mL											
Sitio de muestreo											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Invierno											
Primavera											

Referencias:											
Por debajo del NG											
Por encima del NG											

Escherichia coli, NG $\leq 400$ NMP/100mL											
Sitio de muestreo											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Invierno											
Primavera											

Enterococos, NG $\leq 70$ NMP/100mL											
Sitio de muestreo											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Invierno											
Primavera											

El presente trabajo muestra resultados preliminares que señalarían una influencia del sistema de irrigación sobre la calidad del agua del tramo inferior del río Chubut. Al realizar el análisis estadístico de los datos obtenidos, los valores más significativos se encuentran para el factor

estación del año ( $p < 0.001$ ) en los parámetros medidos *in situ*, Clorofila a, fósforo reactivo y los índices ICOPH, IET, ICE, ICOMI, dureza y valores  $p < 0,01$  para parámetros bacteriológicos, y porcentaje de oxígeno. A las diferencias observadas en los parámetros e índices mencionados se suma el cambio observado en la composición del perifiton en base al porcentaje de clorofila, siendo predominantemente heterotrófico a lo largo de todo el trayecto estudiado en primavera, cuando se produce la apertura del sistema de irrigación, en comparación con la presencia de perifiton de tipos autotrófico y heterotrófico en invierno. Los resultados presentados en este trabajo guardan relación con aquellos obtenidos por Ivanissevich et al. (1993), quienes trabajando con fitoplancton como organismos bioindicadores en el río Chubut resaltaron la presencia de especies indicadoras de contaminación y valores de abundancia y de biomasa característicos de ambientes eutróficos y sugirieron el rol del aporte de nutrientes por parte de uno de los canales como uno de los responsables. De manera similar, Sastre et al. (1998) encontraron un aumento en la concentración de nutrientes asociada a la temporada de irrigación. Nuestros resultados muestran, a partir del análisis multivariado, una clara diferenciación entre las observaciones de invierno y de primavera, momento de apertura del sistema de irrigación, reforzando la hipótesis de afectación por parte de este sobre la calidad del agua del río Chubut. El análisis multivariado muestra también que el impacto analizado no solo es temporal: en primavera, se diferencian claramente dos zonas en el trayecto analizado, mostrando diferentes grados de afectación. Estos datos cobran relevancia en el contexto de aumento poblacional y disminución del caudal esperado por acción del cambio climático. Trabajos anteriores han resaltado la necesidad de estudiar los cambios que se producen en el uso que se realiza del río aguas arriba, dado que resulta en el compromiso de la calidad y cantidad del agua, disminuyendo la oportunidad de utilización posterior (Márquez et al., 2022). El estudio de la calidad del agua del río no sólo es importante en la gestión de este bien común, sino que resulta vital para comprender el impacto que su deterioro tendría sobre los ecosistemas acuáticos y ribereños.

## AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer a la Compañía de Riego del VIRCh y en particular al Tec. Pedro Tagliabué por la predisposición para proveer información y acceso a los sitios de muestreo, y a la SAyCDS por el acceso al SPIA. También agradecemos a los propietarios de las chacras y casas particulares, Sres. Arregui, Erretegui, Teodoroff y Hernández por permitirnos el acceso al río. Además, expresamos nuestro agradecimiento a la Dra. María Eva Góngora por su valioso asesoramiento en los análisis estadísticos. Este trabajo se financió parcialmente por el subsidio de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNPSJB.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APHA, AWWA, WEF. (2023). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. APHA Press.
- Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los Ríos Limay, Neuquén y Negro. (2011). Índices de calidad del agua y síntesis de la situación ambiental de la cuenca. Secretaría de Gestión Ambiental. <https://www.aic.gob.ar/sitio/publicaciones-ver?a=44&z=245432950>
- Austin, A., Lang, S., & Pomeroy, M. (1981). Simple methods for sampling periphyton with observations on sampler design criteria. *Hydrobiologia*, 85(1), 33-47. <https://doi.org/10.1007/BF00011343>
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes 1. *Limnology and oceanography*, 22(2), 361-369. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>
- Cochoero, J., Gelis, M. M. N., Donadelli, J., & Gomez, N. (2021). Translocation of epipellic biofilms and their short-term responses to urbanization impacts in nutrient rich streams. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 93, 1-14. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202102010379>
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, CETESB. (2020). Apêndice D Índices de Qualidade das Águas. <https://cetesb.sp.gov.br/aguasinteriores/wp-content/uploads/sites/12/2020/09/Apendice-D-Indices-de-Qualidade-das-Aguas.pdf>
- Díaz, L. D., Raguileo, D. A., Hernández, M., y Salvadores, F. J. (2021). *Caracterización del sistema de riego del Valle Inferior del Río Chubut: análisis desde las representaciones y opiniones de quienes riegan*. Ediciones INTA. <http://hdl.handle.net/11336/245265>

- Domínguez, E., Giorgi, A. y Gómez, N. (2020). *La bioindicación en el monitoreo y evaluación de los sistemas fluviales de la Argentina: bases para el análisis de la integridad ecológica*. Eudeba. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/126383>
- González, D., Juárez, A. B., Krug, C. P., Santos, M., & Vera, M. S. (2019). Freshwater periphyton response to technical-grade and two commercial formulations of glyphosate. *Ecología Austral*, 29(01). [http://hdl.handle.net/20.500.12110/ecologiaaustral\\_v029\\_n01\\_p020](http://hdl.handle.net/20.500.12110/ecologiaaustral_v029_n01_p020)
- Ivanisovich, M. E., Sastre, V., Otaño, S., Santinelli, N., Ayestarán, M. G., Pángaro, M. F., Rivera S. y Reinoso, R. (1993). Influencia de los canales colectores de riego en el curso inferior del río Chubut [Resumen de poster]. XVI Reunión Argentina de Ecología. Puerto Madryn, Argentina.
- Kaless, G., Matamala, F. M., Montero, B. y Greco, W. (2008). Cambios hidrológicos y morfológicos en el río Chubut aguas abajo de la presa Florentino Ameghino [Resumen de ponencia]. V Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos, Tucumán. <https://www.repositorio.cenpat-conicet.gob.ar/handle/123456789/609>
- Kassambara, A. & Mundt, F. (2020). factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R package version 1.0.7. <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>
- Lakatos, G. 1989. Composition of reed periphyton (biotecton) in the Hungarian part of lake Fertő. *Biologisches Forschungsinstitut für Burgenland*, 71, 125-134.
- Lê, S., Josse, J., & Houson, F. (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1-18. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>
- Márquez, M. I., Vázquez, P. S. y Ricardo, G. Z. D. (2022). Caracterización regional de los usos del suelo y problemáticas ambientales asociadas en la cuenca inferior del Río Chubut, Argentina. *Papeles de Geografía*, (68), 97-114. <https://doi.org/10.6018/geografia.504921>
- Nicolosi Gelis, M. M., Cocherio, J., Sathicq, M. B., & Gómez, N. (2021) Effect of pollution on early diatom colonization on artificial substrata in urban lowland streams. *Marine and Freshwater Research*, 72(3), 365-375.
- Nicolosi Gelis, M. M., Cocherio, J., Mujica, M. A., Donadelli, J. L., Astoviza, M. J., & Gómez, N. (2024). Agricultural land-use effects on the colonization dynamics of the benthic diatom assemblage of lowland streams. *Limnology*, 25(2), 171-187. <https://doi.org/10.1007/s10201-023-00738-1>
- Pascual, M., Olivier, T., Brandizi, L., Rimoldi, P., Malnero, H. A., y Kaless, G. (2020). Cuenca del Río Chubut. Análisis de Factibilidad para Fondo de Agua. Alianza Latinoamericana de Fondos de Agua. <https://www.repositorio.cenpat-conicet.gob.ar/handle/123456789/1271>
- Pessacq, N., Flaherty, S., Solman, S., & Pascual, M. (2020). Climate change in northern Patagonia: critical decrease in water resources. *Theoretical and Applied Climatology*, 140(3-4), 807-822. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03104-8>
- Pizarro, H. E. y Alemanni, M. E. (2005). Variables físico-químicas del agua y su influencia en la biomasa del perifiton en un tramo inferior del Río Luján (Provincia de Buenos Aires). *Ecología Austral*, 15(1), 73-88. [https://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia\\_Austral/article/view/1477](https://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia_Austral/article/view/1477)
- Ramírez, A., Restrepo, R. y Viña, G. (1997). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. *Formulaciones y aplicación, Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(3), 135-153. <https://doi.org/10.29047/01225383.593>
- Ramírez, A., Restrepo, R. y Cardeñosa, M. (1999). Índices de contaminación para caracterización de aguas continentales y vertimientos. *Formulaciones. Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(5), 89-99. <https://doi.org/10.29047/01225383.572>
- R Core Team (2023). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rodríguez, P., Vera, M. S., & Pizarro, H. (2012). Primary production of phytoplankton and periphyton in two humic lakes of a South American wetland. *Limnology*, 13(3), 281-287. <https://doi.org/10.1007/s10201-012-0373-9>
- Rodríguez, P., & Pizarro, H. (2015). Phytoplankton and periphyton production and its relation to temperature in a humic lagoon. *Limnologia*, 55, 9-12. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2015.10.003>
- Salvadores, F. J., Raguileo, D. A., Díaz, L. y Cittadini, E. (2022). Caracterización y análisis multidimensional en torno a la gobernanza del agua en el Valle Inferior del Río Chubut (Argentina). *Párrafos Geográficos*, 21(2), 56-65. <http://www.revistas.unp.edu.ar/index.php/parrafosgeograficos/article/view/876>
- Sánchez, M. L., Rodríguez, P., Torremorell, A. M., Izaguirre, I., & Pizarro, H. (2017). Phytoplankton and periphyton primary production in clear and turbid shallow lakes: influence of the light environment on the interactions between these communities. *Wetlands*, 37(1), 67-77. <https://doi.org/10.1007/s13157-016-0840-x>
- Sastre, A. V., Santinelli, N. H., Otaño, S. H., & Ivanisovich, M. E. (1998). Water quality in the lower section of the Chubut River, Patagonia, Argentina. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 26(3), 951-955. <https://doi.org/10.1080/03680770.1995.11900859>
- Singh, S., James, A., & Bharose, R. (2017). Biological Assessment of Water Pollution Using Periphyton Productivity: A Review. *Nature Environment & Pollution Technology*, 16(2), 559-567.
- Sládečková, A. (1962). Limnological investigation methods for the periphyton ("Aufwuchs") community. *The Botanical Review*, 28(2), 286-350. <https://doi.org/10.1007/BF02860817>

Domínguez, M. L., Fiorda Giordanino, M. V., Palloni, L., Torres, M. F., Maldonado, A. A. y Apollonia, F. D

Tóth, V. R. (2013). The effect of periphyton on the light environment and production of *Potamogeton perfoliatus* L. in the mesotrophic basin of Lake Balaton. *Aquatic Sciences*, 75(4), 523-534. <https://doi.org/10.1007/s00027-013-0297-4>

Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. <https://ggplot2.tidyverse.org>