

CUADERNOS DEL CURIHAM

REVISTA DE ESTUDIOS SOBRE LA CUESTION HIDROAMBIENTAL



Volumen 29 y Edición Especial: Bajante del río Paraná
Año 2023

CURIHAM - FCEIA (UNR)
Rosario - Santa Fe
República Argentina



Universidad
Nacional
de Rosario

ISSN 2683-8168 (en línea)

Temario

Volumen 29 - Artículos

- Diseño de un sistema de indicadores para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) en la cuenca del Arroyo Ludueña, Santa Fe
- Cartografía multitemporal y estrategias para la prevención de inundaciones en una cuenca con predominio agrícola de Argentina
- Cuenca experimental Arroyo Sagmata: monitoreo de crecidas torrenciales en arroyos efímeros de la Patagonia Semiárida (Pcia. del Chubut, Argentina)
- Amenaza en el riesgo de inundaciones en sistemas hidrológicos de llanura ante escenarios de cambio climático: aplicación al sistema "Las Encadenadas"

Edición Especial (2023): Bajante del río Paraná

- Sequía, bajante y efectos de los incendios en suelos del Delta del Paraná, Argentina
- Impactos generados por la sequía 2019-2023 en la región del Litoral Argentino
- Análisis de caudales del río Paraná y contextualización de las bajantes en los años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22
- Agronegocio y crisis hídrica en la cuenca del río Paraná
- Modelación hidrodinámica en el tramo km 232-480 del río Paraná durante la bajante 2020 a 2022

Editada por



Centro Universitario Rosario de
Investigaciones Hidroambientales

CUADERNOS DEL CURIHAM / Volumen 29 y Edición Especial: Bajante del río Paraná / Año 2023

CUADERNOS DEL CURIHAM

REVISTA DE ESTUDIOS SOBRE LA CUESTIÓN HIDROAMBIENTAL

ISSN 2683-8168 (En línea)

CUADERNOS DEL CURIHAM

REVISTA DE ESTUDIOS SOBRE LA CUESTION HIDROAMBIENTAL

**Volumen 29 y Edición Especial: Bajante del río Paraná
Año 2023**

Editada por:

**Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura**

Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Santa Fe, Argentina

**Riobamba 245 bis. Ciudad Universitaria.
S2000EKE. Rosario. Santa Fe. Argentina.**

Tel: 54-341-4808541

e_mail: revistac@fceia.unr.edu.ar.

Sitio web: <https://cuadernosdelcuriham.unr.edu.ar>

CUADERNOS DEL CURIHAM

Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales
Volumen 29 y Edición Especial: Bajante del río Paraná, Año 2023

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO

Rector: Lic. Franco Bartolacci
Vicerrector: Od. Héctor Darío Masía

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, INGENIERÍA Y AGRIMENSURA

Decano: Ing. Mauro Soldevila
Vicedecana: Mg. Ing. Yolanda Galassi

Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales

Directores: Dr. Ing. Hernán Stenta / Dra. Ing. Marina García



CUADERNOS DEL CURIHAM (Revista de Estudios sobre la Cuestión Hidroambiental) Volumen Nro. 29 y Edición Especial: Bajante del río Paraná – Año 2023

CONSEJO EDITORIAL

Editora responsable:

Adelma Mancinelli, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario. Argentina.
e-mail: adelma@fceia.unr.edu.ar - revistac@fceia.unr.edu.ar

Miembros del Consejo Editorial:

Gerardo Riccardi, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
Carlos Scuderi, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
Marina García, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
Alfredo Trento, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral, Argentina.
Sergio Montico, Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Rosario, Zavalla. Argentina.
Erik Zimmermann Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
Luis Vives, Instituto de Hidrología de Llanuras, Azul, Buenos Aires, Argentina.
José Rodríguez, University of Newcastle, Australia.
Javier Heredia, Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, España.
Juan Weber, Facultad Regional Córdoba. Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.
Mario Castiglioni, Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Argentina.
Patricia Saco, University of Newcastle, Australia.
Pedro Basile, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
Juan Serra, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Chubut, Argentina.

CONSEJO REVISOR

Hernán Stenta, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
Armando Brizuela, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos. Argentina.
Carlos García, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.
Víctor Lallana, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos. Argentina.
José Vargas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile.
Leopoldo Génova, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata. Argentina.
Virginia Pacini, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
Leticia Rodríguez, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Argentina.
Mónica Blarasin, Facultad de Ciencias Exactas, Físico - Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina.
Nora Pouey, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
Eduardo Zamanillo, Universidad Tecnológica Nacional y Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina.
Mariano Re, Instituto Nacional del Agua, Buenos Aires, Argentina.
Sandra Fernández, Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Buenos Aires, Argentina.
Carlos Scioli, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.
Raúl Navarro, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
Catalina Romy, Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Argentina.
Leandro Vestena, Universidade Estadual do Centro-Oeste. Brasil.
Alberto Vich, CONICET Mendoza, Argentina.
Maria Emilia Zabala, Instituto de Hidrología de Llanuras, Azul, Buenos Aires, Argentina.
Steven Sandi Rojas, University of Newcastle, Australia.
Tomás Rodríguez, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones, Oberá. Argentina.
Sebastián Dietrich, Instituto de Hidrología de Llanuras, Azul, Buenos Aires, Argentina.
Claudio de Francesco, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, Universidad Nacional de Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.
Lucía Odicini, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.
Rodolfo Iturraspe, Universidad Nacional de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur, Ushuaia, Argentina.
María Alejandra Gómez Paz, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
Franco Trivisonno Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y Sistemas (CIFASIS). Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

SOPORTE TECNICO

Gisela Chiappero, Universidad Nacional de Rosario, Santa Fe, Argentina.

CUERPO DE TRADUCTORES

Universidad Nacional de Rosario.

ACERCA DE LA REVISTA

La Revista CUADERNOS DEL CURIHAM, ISSN 2683-8168 (En línea), es una publicación editada por el Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (CURIHAM), Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

La revista tiene como objetivo la divulgación de trabajos de investigación básica y aplicada, como así también innovaciones tecnológicas en el campo concerniente a la disciplina hidroambiental. Además, esta publicación puede incluir resultados de investigaciones de campo, estudios interdisciplinarios como así también trabajos acerca de estado del arte en la temática.

Las temáticas comprendidas son: Hidráulica Fundamental, Fluvial e Hidrodinámica; Hidrología Superficial y Subterránea; Hidrología Urbana; Ingeniería Sanitaria, Hidráulica Experimental, Sistemas de provisión de agua, Estocástica; Planeamiento y Manejo de Recursos Hídricos; Evaluación Ambiental; Contaminación y Calidad de aguas; Política y Legislación de Aguas; Gerenciamiento Hidroambiental Regional; Obras Hidráulicas, Métodos y Técnicas Constructivas; y todos aquellos temas relacionados con las ciencias hidroambientales. El contenido de la revista está dirigido a investigadores, docentes, estudiantes de posgrado y grado y profesionales de las áreas afines a la temática de la misma.

Los artículos y notas técnicas que se propongan para su publicación deberán ser originales y no haber sido publicados previamente, y no estar simultáneamente propuestos para tal fin en otra publicación. La responsabilidad del contenido, originalidad y autenticidad de los artículos o notas técnicas corresponde a los autores.

La Revista CUADERNOS DEL CURIHAM recibe trabajos en español; portugués y/o inglés.

Los autores no pagan ningún costo por el procesamiento; envío y publicación de los artículos y notas técnicas a la revista.

Todos los artículos / notas técnicas recibidos cumplen con los siguientes pasos. En primera instancia, los artículos son revisados por el Consejo Editorial y sólo aquellos artículos / notas técnicas que cumplen con los estándares científicos y editoriales de la Revista, con sus objetivos y el enfoque, pasan a la siguiente etapa. En segunda instancia se realiza la revisión por parte del Consejo Revisor. La Revista CUADERNOS DEL CURIHAM utiliza para la Evaluación de cada artículo o nota técnica el protocolo de arbitraje tipo simple ciego. Cada artículo o nota técnica debe ser analizado por expertos de alto nivel y de reconocido prestigio nacional e internacional en su ámbito profesional, quienes recomiendan su aceptación, provisoriamente aceptado, provisoriamente no aceptado o no aceptado. Por último, el Consejo Editorial de la revista será el responsable de la decisión final para la publicación o no del artículo o nota técnica. Adicionalmente, los autores deberán aprobar las pruebas finales de sus textos.

La Revista CUADERNOS DEL CURIHAM se encuentra indizada a partir de los criterios de calidad editorial establecidos por el sistema Latindex. Referencia: Catálogo LATINDEX 2.0 (a partir del año 2018) y en Núcleo Básico de Revistas Científicas Argentinas (NBR) (CAICYT - CONICET) (a partir del año 2020). A partir del año 2023, la Revista Cuadernos del CURIHAM adopta el modelo de publicación continua de manera que cada artículo es publicado una vez que ha sido aprobado y editado sin esperar a que se conforme el volumen de manera completa.

La Revista se publica bajo política de acceso abierto. Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).

Sitio web: <https://cuadernosdelcuriham.unr.edu.ar/>

ÍNDICE

VOLUMEN 29

- Diseño de un sistema de indicadores para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) en la cuenca del Arroyo Ludueña, Santa Fe**
Lía Martín y Sergio Montico.....28p.
(Artículo)
- Cartografía multitemporal y estrategias para la prevención de inundaciones en una cuenca con predominio agrícola de Argentina**
María Ximena Solana, Asunción Romanelli y Orlando Mauricio Quiroz Londoño.....18p.
(Artículo)
- Cuenca experimental Arroyo Sagmata: monitoreo de crecidas torrenciales en arroyos efímeros de la Patagonia Semiárida (Pcia. del Chubut, Argentina)**
Gabriel Kales, Oscar Frumento, Héctor Andrés Malnero y Miguel Alberto Pascual.....14p.
(Artículo)
- Amenaza en el riesgo de inundaciones en sistemas hidrológicos de llanura ante escenarios de cambio climático: aplicación al sistema “Las Encadenadas”**
Magalí V. Soria, Pedro A. Basile y Gerardo A. Riccardi.....26p.
(Artículo)

EDICIÓN ESPECIAL (2023): BAJANTE RÍO PARANÁ

- Bajante del río Paraná 2019-2022. Causas e impactos**
Sección Editorial.....1p.
- Sequía, bajante y efectos de los incendios en suelos del Delta del Paraná, Argentina**
Sergio Montico, Néstor Cristian Di Leo y José Alberto Berardi13p.
- Impactos generados por la sequía 2019-2023 en la región del Litoral Argentino**
Rosana Mazzón y Silvia Rafaelli20p.
- Análisis de caudales del río Paraná y contextualización de las bajantes en los años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22**
Pedro A. Basile y Gerardo A. Riccardi22p.
- Agronegocio y crisis hídrica en la cuenca del río Paraná**
Álvaro Álvarez11p.
- Modelación hidrodinámica en el tramo km 232-480 del río Paraná durante la bajante 2020 a 2022**
Gerardo A. Riccardi y Pedro A. Basile.....30p.

DISEÑO DE UN SISTEMA DE INDICADORES PARA LA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS (GIRH) EN LA CUENCA DEL ARROYO LUDUEÑA, SANTA FE

DESIGN OF AN INDICATOR SYSTEM FOR INTEGRATED WATER RESOURCES MANAGEMENT (IWRM) IN THE LUDUEÑA STREAM BASIN, SANTA FE

Lía Martín ^{(1)(*)} y Sergio Montico ⁽²⁾

⁽¹⁾ Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario. Zavalla, Argentina.

^(*)e-mail: limart742@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5120-0540>.

⁽²⁾ Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario. Zavalla, Argentina.

e-mail: smontico@unr.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8053-7734>.

RESUMEN

El presente trabajo seleccionó e integró un conjunto de indicadores que evaluaron los recursos hídricos de la cuenca del arroyo Ludueña, Santa Fe, República Argentina. Se utilizó un abordaje multiescalar, sistémico y complejo a escala de cuenca mediante la combinación del método GEO orientado a la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) y del modelo FPEIR (Fuerzas motrices – Presión – Estado – Impacto - Respuesta). La Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) considera la intervención humana como parte esencial del ciclo hidrológico a nivel de cuenca y lo considera un ciclo hidrosocial. Se detectaron veintiséis (26) puntos críticos que podrían permitir la implementación de políticas públicas orientadas a la sustentabilidad. Esta metodología puede adaptarse y replicarse en cuencas hídricas similares. Este trabajo constituye un aporte al diagnóstico ambiental integrado y resulta útil como insumo para los Organismos Públicos que deben velar por la conservación de los recursos hídricos de la cuenca del arroyo Ludueña.

Palabras clave: Recurso Hídrico, Gestión Integrada, Indicadores, Cuenca, FPEIR.

ABSTRACT

This essay evaluated the water resources of the Ludueña's stream-basin (Santa Fe, Argentina) through several indicators that were selected and integrated in a sustainable indicators's system. It used a multiscalar, systematic, and a complex approach on basin-scale through the GEO method applied to Integrated Water Resources Management (IWRM) combined with the DPSIR model (Driving forces – Pressure – State – Impact – Responses). The Integrated Water Resources Management (IWRM) considers anthropic intervention as an essential part of the hydrological cycle in a basin-scale, this results in a water-social cycle. It detected twenty-six (26) critical points which could allow a development for criteria destined for a sustainable management's territory political. This approach can be adapted and replied in similar basins. This work constitutes a contribution to the integrated environmental diagnosis and is useful as an input for Public Organizations that must ensure the conservation of water resources in the Ludueña stream basin.

Keywords: Water Resource, Integrated Management, Indicator, Basin, DPSIR.

INTRODUCCIÓN

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) es una posible solución a las problemáticas vinculadas a la administración pública del agua, la cual incorpora diversos sectores actuando en conjunto con los organismos encargados de resolver los conflictos desde el ordenamiento territorial. La GIRH incorpora una gestión integrativa del territorio desde una dinámica hidrológica incluyendo a la participación ciudadana, la cual es clave para reducir los conflictos sociales, ambientales y económicos, y contempla mecanismos de reasignación de los recursos hídricos.

En la actualidad, los Estados en su mayoría son los responsables actuales de gestionar los bienes hídricos (Estados-dueño) donde no siempre están coordinados y muchas veces resultan ineficientes, generándose conflictos sociales y ecológicos (Dourojeanni *et al.*, 2002; Martín y Justo, 2015). En el mismo año, surge como respuesta a la deficiente gestión y a los intereses meramente económicos, el Enfoque Basado en Derechos Humanos (EBDH) donde los mismos deben entenderse como bienes colectivos ya que han sido declarados un derecho humano. Es por ello que, la GIRH contempla este enfoque donde la gobernanza debe ser participativa, es decir, que incluya a la sociedad en la toma de decisiones (Martín y Justo, 2015).

En el país, existen numerosas normativas que regulan y sirven de apoyo a la administración pública para la gestión de los recursos hídricos. Santa Fe tiene una gran cantidad de normativas vigentes que abordan dicha gestión y el cuidado del ambiente, las cuales responden a las normativas nacionales.

Con respecto a la participación ciudadana, la misma se encuentra cumpliendo un rol fundamental pero parcial (insuficiente) junto con las instituciones reguladoras y ambas son las encargadas de dar un marco de sustentabilidad a las acciones que impactan en el territorio (Cap- Net, 2005; Montico, 2011; Martín y Justo, 2015; OECD, 2020).

En la región pampeana argentina se producen esquemas de apropiación de la tierra para la producción de bienes primarios (actividad agrícola) que han aumentado considerablemente los cambios y la intensidad del uso del suelo durante los últimos 60 años. La expansión urbana, industrial y agropecuaria (las últimas dos localizadas en zonas periurbanas) que ha tenido desde la década del 60' del spp y acrecentada en los 90', se ha realizado en ausencia de

una planificación territorial estratégica, implicando el aumento del consumo de recursos naturales locales trayendo aparejado la afectación de los servicios ecosistémicos vinculados a los cuerpos de agua (Montico y Pouey, 2001; Vitta *et al.*, 2001; Montico, 2004; Paruelo *et al.*, 2005; Jobbágy, 2011; Maguna y Montico, 2013; Montico *et al.*, 2020).

Al abordar situaciones complejas o problemáticas asociadas al territorio y a la continuidad de los procesos ecológicos que se dan allí, en los recursos hídricos y asociados a la integridad ecológica, como se menciona anteriormente, es esencial tener en consideración la escala espacial donde las dinámicas hidrológicas se relacionan desde su origen. Es por ello que, el abordaje desde la Ecología del Paisaje puede ser una opción apropiada para el estudio y contribución a la GIRH desde la dimensión ambiental.

Las cuencas hidrográficas son consideradas como unidades básicas para la planificación y gestión de los recursos hídricos, la cual facilita la interacción entre diferentes actores y el análisis del territorio (Montico, 2011; Ordoñez Gálvez, 2011; GWP, 2013).

Para planificar y tomar decisiones que se orienten a la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, y por ende, hacia el desarrollo sustentable, es necesario comprender qué ocurrió, qué ocurre y qué podría ocurrir en un futuro en las cuencas hidrográficas. Para ello, el diagnóstico es una estrategia que puede identificar aspectos clave que mejoren, mitiguen y/o solucionen y sirvan de apoyo a los Organismos públicos responsables de gestionar el territorio.

Para diagnosticar la GIRH en una cuenca hídrica es posible recurrir a indicadores, los cuales son "parámetros o valores derivados de otros parámetros". Estos son una herramienta eficiente que permiten evaluar el estado actual de un espacio determinado (OCDE, 1993).

Por otro lado, las ventajas de disponer de indicadores que valoren la gestión, radican en mejorar y optimizar las condiciones del territorio, proveyendo información compleja de una forma comprensible a aquellos que no son especialistas en la temática, y permiten comparar información en sitios diferentes (Aguirre, 2002).

Existen esquemas abordados como el Método GEO y el Modelo FPEIR que pueden ser una opción importante para identificar puntos críticos actuales y

potenciales en las cuencas, y para proponer líneas de acción para los Organismos públicos de gestión de los recursos hídricos, tales como en las cuencas de Chile, Brasil, Colombia y Argentina (Volpedo y Fernández Cirelli, 2011; Molina, 2013; Porto *et al.*, 2019; González Arriagada, 2021).

OBJETIVO

Este trabajo propone elaborar un sistema de indicadores para la gestión hídrica de la cuenca del arroyo Ludueña (Santa Fe, Argentina) y aplicarlos en tres distritos (Ibarlucea, Roldán y Zavalla) con el propósito de evaluar su estado actual, y definir algunos lineamientos que contemplen el gerenciamiento del agua orientados al desarrollo sustentable.

METODOLOGÍA

Sitio de estudio

Se seleccionó la cuenca del arroyo Ludueña de la provincia de Santa Fe, República Argentina. Está ubicada al sureste de la provincia (32° 45' y 33° 08' S; 61° 04' y 60° 39' O) (Figura 1). El clima en esta región es subhúmedo mesotermal, la temperatura media anual es de 17° C y la precipitación es 1.110 milímetros al año (Zimmermann *et al.*, 2001; Montico *et al.*, 2020).

La cuenca se ubica dentro de la ecorregión Delta e Islas del Paraná y de la Pampa Húmeda (Morello *et al.*, 2012).

La geomorfología está condicionada por la neotectónica formando un suelo elevado e inclinado hacia el noreste, formando paisajes como cañadas y paleocauces, y desembocando hacia el río Paraná. La misma posee aproximadamente 720 km² (Montico *et al.*, 2020). Es una cuenca de tipo lítica y exorreica, con movimientos superficiales de agua lentos ya que siguen una pendiente correspondiente a una superficie llana (Biasatti *et al.*, 2016). En la Figura 1, se muestra su red hídrica principal y sus principales tributarios: el arroyo Ludueña y los Canales La Legua, Media Legua, Interconector, Salvat e Ibarlucea, donde el arroyo desemboca en el río Paraná.

En la cuenca hay quince localidades: San Lorenzo, Fray Luis Beltrán, Capitán Bermúdez, Ricardone,

Luis Palacios, Roldán, Pujato, Coronel Arnold, Ibarlucea, Granadero Baigorria, Rosario, Funes, Zavalla, Pérez y Soldini (Pouey, 2008; Montico *et al.*, 2020). Los tres distritos que se evaluaron por el sistema de indicadores fueron: Ibarlucea, Roldán y Zavalla (Figura 2). Estos representan ambientes hidrológicos contrastantes, como así también diferentes esquemas de urbanización, demografía y desarrollo agroindustrial.

Método GEO (GIRH) FPEIR

Para la identificación de los indicadores, se seleccionó el método GEO (Global Environmental Outlook, Perspectivas del Medioambiente Global, por sus siglas en inglés) adaptado a la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), principalmente por su enfoque dimensional y escalár. Es un marco conceptual que consiste en indagar sobre los escenarios pasados, actuales y futuros, tanto de la población humana como del ambiente en estudio (Pouey, 2008; PNUMA, 2009). Está diseñado para contemplar las relaciones entre el ambiente y las sociedades, y puede ser utilizada a escala global, nacional, regional, local (PNUMA, 2002; 2009), o nivel de cuenca (Díaz *et al.*, 2012). Este método consta de cinco interrogantes que en el presente trabajo fueron adaptados a la GIRH. Los interrogantes del método GEO corresponden a cada aspecto del modelo FPEIR [Fuerzas Motrices (F) - Presión (P) - Estado (E) - Impacto (I) - Respuesta (R)]. El FPEIR es un sistema de indicadores de mediana a alta complejidad dentro de los propuestos para evaluar el desarrollo sustentable de un territorio y posibilita identificar aspectos críticos a tomar en cuenta en un territorio dado (Guttman Sterimberg *et al.*, 2004; Polanco, 2006) (Tabla 1). Las Fuerzas Motrices (contexto humano pasado y actual) determinan las Presiones (acciones humanas directas e indirectas sobre el ambiente) que influyen en el Estado (condición ambiental actual), el cual genera Impactos tanto en aspectos socio-económicos, productivos, culturales y naturales. El aspecto Respuesta refiere a las acciones a realizar, teniendo en cuenta la finalidad de una óptima gestión del recurso hídrico orientado a la sustentabilidad (PNUMA, 2002, 2009; Montico *et al.*, 2020).

Los resultados producidos por el modelo FPEIR son entendidos como: “información organizada, jerarquizada y contextualizada”, por lo que una vez comprendidos, se transforman en conocimiento y brindan la capacidad de emitir juicios acerca de la temática analizada (Quiroga Martínez, 2009).

Relevamiento de información

La selección de indicadores se realizó priorizando la disponibilidad y la facilidad de acceso a la información recopilada, así como también del tiempo de recolección durante su búsqueda y su forma de medición (OCDE, 1993; Quiroga Martínez, 2009). Con el objetivo de obtener información actualizada, integral (multidisciplinar) para la selección y propuesta de indicadores y para su aplicación en los

tres distritos, se realizó un relevamiento exhaustivo de información a partir de: recopilación bibliográfica, pedidos formales de información a Organismos públicos, entrevistas informales a actores clave y especialistas y cuestionarios a especialistas vía correo electrónico. Para la construcción, sistematización y análisis de los indicadores se utilizó el software Excel (2010). Así como también, se complementó la caracterización territorial a través de la información brindada por el *software* Google Earth Pro.

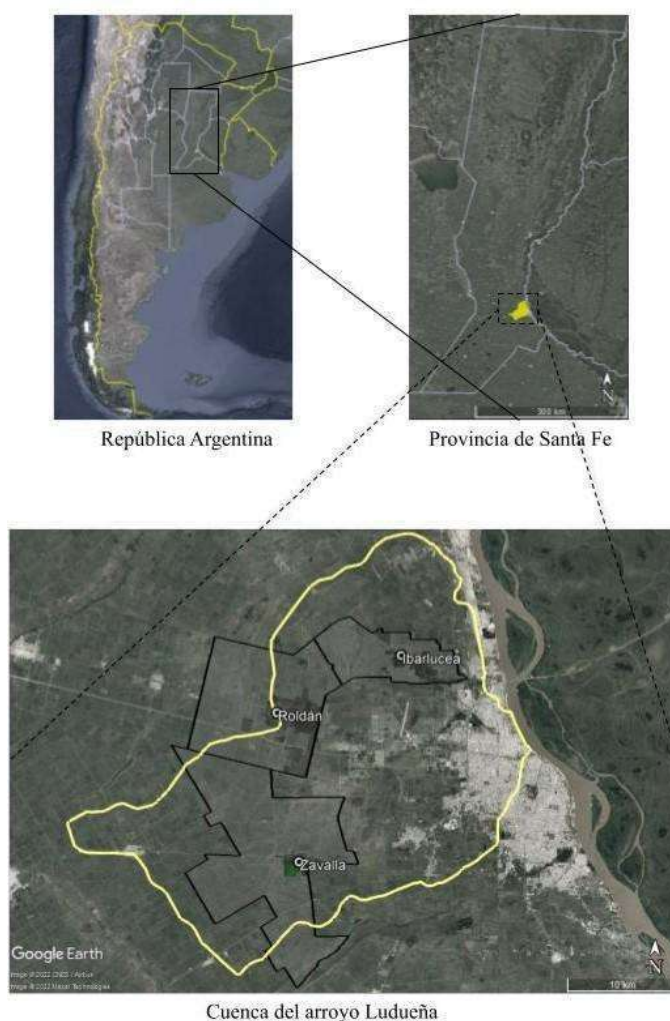


Figura 1: Ubicación de la cuenca del arroyo Ludueña y los tres distritos en estudio.

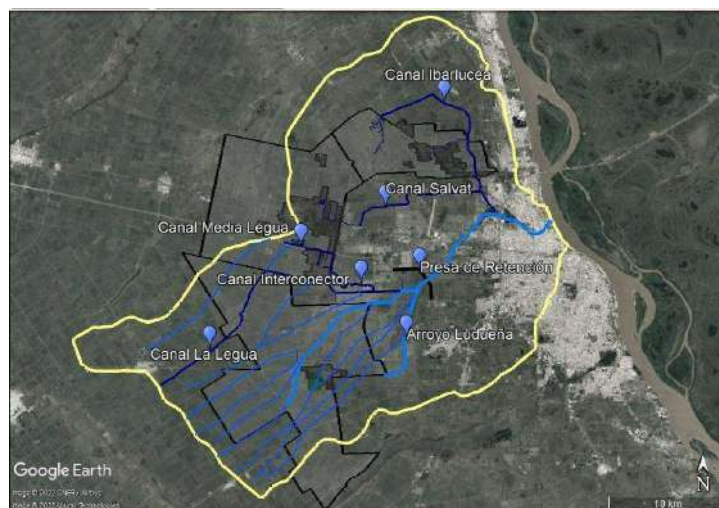


Figura 2: Ubicación de la red hídrica, sus principales tributarios y la Presa de Retención de Crecidas del arroyo Ludueña y de los tres distritos en estudio.

Tabla 1. Adaptación de los interrogantes GEO a la GIRH.

Interrogantes GEO	Interrogantes GEO (GIRH)	Aspecto FPEIR
¿Por qué está ocurriendo?	¿Por qué está ocurriendo?	Fuerzas Motrices (F)
	¿Por qué está ocurriendo con los recursos hídricos?	Presión (P)
¿Qué está ocurriendo con el medio ambiente?	¿Qué está ocurriendo con los recursos hídricos?	Estado (E)
¿Cuál es el impacto?	¿Cuál es el impacto en los recursos hídricos?	Impacto (I)
¿Qué se está haciendo al respecto?	¿Qué se está haciendo al respecto en términos de la administración pública?	Respuesta (R)
¿Qué pasará si no actuamos ahora? ¿Qué más podemos hacer en términos de políticas y respuestas?		Se aborda en este trabajo.

RESULTADOS

Sistema de indicadores GEO (GIRH) FPEIR

El diseño del sistema de indicadores GEO (GIRH) FPEIR, se concretó en una Hoja Metodológica (Quiroga Martínez, 2009), según: Nombre, Descripción, Pertinencia, Tendencia, Direccionalidad, Alcance, Limitaciones, Fórmula, Definición de variables, Escala y Periodicidad.

Cada aspecto FPEIR se compone de ejes que

comprenden dimensiones y estas, a su vez, a los indicadores. Los ejes y dimensiones se muestran en la Figura 3. El sistema de indicadores es multidisciplinar, focalizado en sistemas complejos, multiescalar y cuantitativo.

En la Tabla 2 se muestra el sistema de indicadores propuesto ajustado a la GIRH y a una escala de cuenca, cada aspecto FPEIR con el eje, dimensión e indicadores, la Escala (L: local, C: cuenca, D: departamental, Re: regional, Pr: provincial, Ec: ecorregional) y el Tipo (cuant.: cuantitativo y cualit.: cualitativo).

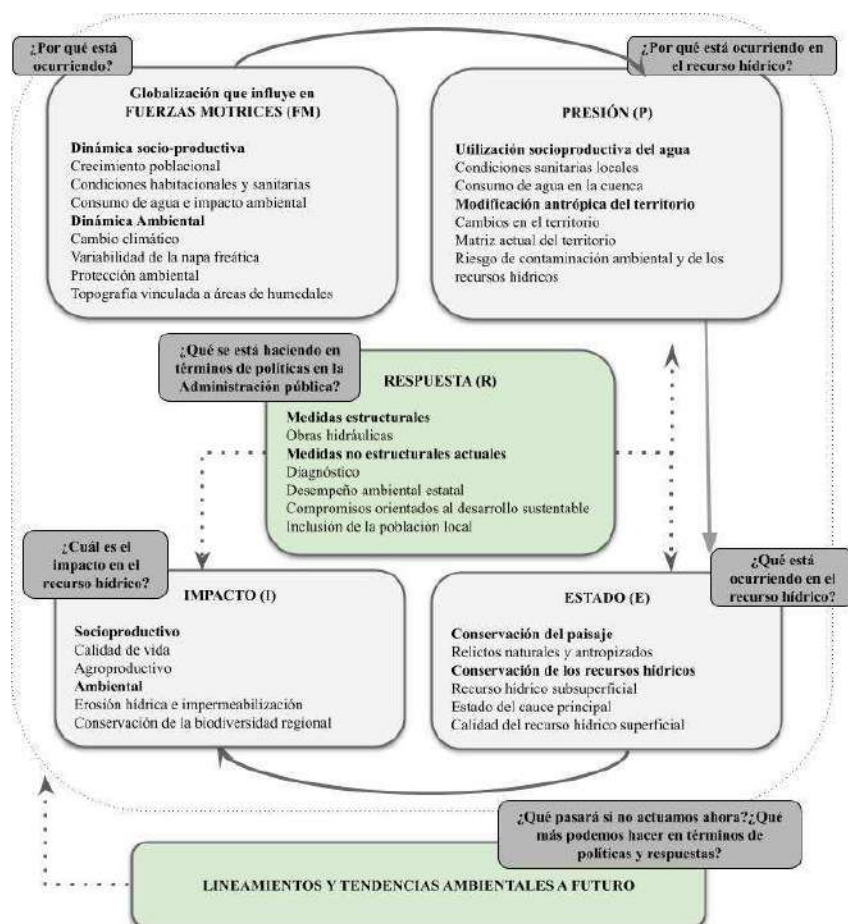


Figura 3: Esquema conceptual de los ejes y dimensiones propuesto para el sistema de indicadores GEO (GIRH) FPEIR ajustado a cuencas de llanura.

Dado que los indicadores se obtuvieron de fuentes muy diversas y pertenecen a diferentes áreas del conocimiento, por lo tanto, son muy heterogéneos en tipo y unidad de medida, donde los del tipo cualitativo se expresaron de modo cuantitativo. Por ello, a cada indicador se le asignó un valor para su medición, los cuales se encuentran en la Tabla 3. Los máximos y mínimos valores de medición son: cinco (5), el más deseado y de menor impacto negativo, y uno (1), el menos deseado y de mayor impacto negativo.

Para el análisis e identificación de los puntos críticos más simple, se implementó la estandarización de los valores de los indicadores, según la ecuación (1):

$$Pn = \frac{(V_p - V_{min})}{(V_{max} - V_{min})} \quad (1)$$

donde el Parámetro normalizado (Pn) es igual al cociente entre la diferencia entre el Valor del indicador relevado (V_p) y Valor mínimo del indicador (V_{min}), y la diferencia entre el Valor máximo (V_{max}) y Valor mínimo de dicho indicador (V_{min}). Los valores máximos y mínimos son fijados por los valores de la Tabla 3. El resultado es un valor entre 0 (mayor impacto) y 1 (menor impacto). Cada aspecto FPEIR se compuso de indicadores estandarizados, los cuales se promediaron en cada sitio y en la cuenca. Los indicadores y aspectos FPEIR que tuvieron valores iguales y mayores a 0.66 fueron “sustentables” (color verde), valores entre 0.33 y 0.66 indicaron “sustentabilidad media” (color amarillo), y valores iguales y menores a 0.33 fueron “no sustentables o críticos” (color rojo), y representaron los puntos críticos en este sistema de indicadores.

Tabla 2. Sistema de indicadores GEO (GIRH) FPEIR propuesto.

FUERZAS MOTRICES (F)				
Eje	Dimensión	Indicador	Escala	Tipo
Dinámica socioproductiva	Crecimiento poblacional	-Índice de Presión Demográfica (IPD) provincial	Pr	cuant.
	Condiciones habitacionales y sanitarias	-Porcentaje de hogares provinciales con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	Pr	cuant.
		-Porcentaje de hogares provinciales con acceso agua de red	Pr	cuant.
		-Porcentaje de hogares provinciales con cloacas	Pr	cuant.
	Consumo de agua e impacto ambiental de la producción	-Cantidad promedio de agua potable consumida <i>per cápita</i> en la región	Re	cuant.
		-Cantidad promedio de agua consumida por sector en la región ⁽¹⁾	Re	-
Dinámica ambiental	Cambio climático	-Porcentaje de la superficie provincial con uso de suelo agropecuario	Pr	cuant.
		-Indicador de Impacto Relativo (IIR) industrial provincial	Pr	cuant.
	Variabilidad de la napa freática	-Aumento de la cantidad de las precipitaciones anuales en la región	Re	cuant.
		-Aumento de la concentración de las lluvias en la región	Re	cualit.
	Protección ambiental regional	-Existencia de registros del aumento del nivel freático regional asociado a cambios del uso del suelo	Re	cualit.
		-Porcentaje de protección de la/s ecorregión/es de la cuenca en estudio	Ec	cuant.
Dinámica ambiental	Topografía vinculada a áreas de humedales	-Existencia de áreas hídricas protegidas aledañas	Re	cualit.
		-Pendiente media de la cuenca en estudio	C	cuant.

Tabla 2 (continuación). Sistema de indicadores GEO (GIRH) FPEIR propuesto.

PRESIÓN (P)				
Eje	Dimensión	Indicador	Escala	Tipo
Utilización socioproductiva del agua	Condiciones sanitarias locales	-Porcentaje de hogares de cada localidad con acceso a agua de red	L	cuant.
		-Porcentaje de hogares de cada localidad con acceso a cloaca	L	cuant.
		-Porcentaje de hogares de cada localidad sin acceso a agua de red, cloaca ni pozo séptico	L	cuant.
	Consumo de agua en la cuenca	-Cantidad promedio de agua potable consumida <i>per cápita</i> por localidad	L	cuant.
-Cantidad promedio de agua consumida por sector por localidad ⁽¹⁾		L	-	
Modificación antrópica del territorio	Cambios en el territorio	-Cambio de la cobertura vegetal natural	C	cuant.
		-Índice de Presión Demográfica (IPD) local	L	cuant.
		-Expansión urbana-industrial local	L	cuant.
	Matriz actual del territorio	-Porcentaje de superficie local con uso de suelo agrícola	L	cuant.
		-Porcentaje de superficie local con uso de suelo urbano e industrial	L	cuant.
		-Densidad de infraestructura de transporte local	L	cuant.
Actividades antrópicas	Riesgo de contaminación ambiental y del recurso hídrico	-Intervención del escurrimiento natural por obras hídricas regulares	L	cualit.
		-Cantidad de asentamientos irregulares locales en zonas inundables	L	cualit.
		-Cantidad de canales irregulares locales	L	cuant.
		-Existencia de áreas agropecuarias locales con riesgo alto de contaminación ambiental por agroquímicos	L	cualit.
		-Riesgo de contaminación ambiental local por cantidad de tambos locales	L	cuant.
Actividades antrópicas	Riesgo de contaminación ambiental y del recurso hídrico	-Cantidad de industrias no agrícolas locales con riesgo alto y medio de contaminación ambiental	L	cuant.
		-Riesgo de contaminación del Recurso Hídrico Superficial (RHS) por efluentes cloacales urbanos	L	cuant.
		-Riesgo de contaminación del Recurso Hídrico Superficial (RHS) por disposición final de Residuos Sólidos Urbanos (RSU)	L	cualit.
		-Riesgo de contaminación del Recurso Hídrico Superficial (RHS) por existencia de basurales a cielo abierto	L	cualit.
		-Riesgo de contaminación del Recurso Hídrico Superficial (RHS) por existencia de basurales a cielo abierto	L	cualit.

Tabla 2 (continuación). Sistema de indicadores GEO (GIRH) FPEIR propuesto.

ESTADO (E)				
Eje	Dimensión	Indicador	Escala	Tipo
Conservación del Paisaje	Relictos naturales y antropizados	-Existencia de áreas naturales que protejan cuerpos de agua	C	cualit.
		-Espacios verdes locales proporcionales al área urbanizada	L	cualit.
		-Índice de Vegetación Remanente (IVR) actual	C	cuant.
		-Índice de Calidad de la Ribera Pampeana (ICAP) ⁽²⁾	C	cuant.
Conservación de los Recursos Hídricos	Recurso hídrico subsuperficial	-Variación histórica de la altura de la napa freática ⁽¹⁾	C	-
		-Existencia de nitratos de origen antrópico en la napa freática ⁽¹⁾	C	-
	Estado del cauce principal	-Variación hidrológica del cauce principal ⁽¹⁾	C	-
		-Exceso de metales pesados en sedimentos del cauce principal ⁽¹⁾	C	-
	Calidad del recurso hídrico superficial	-Eutrofización en agua superficial ⁽²⁾	C	-
		-Exceso de niveles fisicoquímicos en agua superficial	C	cualit.
		-Exceso de metales pesados en agua superficial	C	cualit.
		-Exceso de hidrocarburos totales en agua superficial	C	cualit.
		-Existencia de sustancias emergentes en agua superficial ⁽¹⁾	C	-
		-Exceso de Coliformes Totales en agua superficial	C	-
		-Exceso de Coliformes Fecales en agua superficial	C	cualit.
		-Exceso de <i>Escherichia coli</i> en agua superficial	C	cualit.
IMPACTOS (I)				
Eje	Dimensión	Indicador	Escala	Tipo
Socioproductivo	Calidad de vida	-Cantidad de inundaciones por localidad en zonas urbanas	L	cualit.
		-Cantidad de casos locales asociadas a enfermedades relacionadas con el agua	L	cualit.
		-Cantidad de casos locales asociadas a enfermedades transmitidas por el agua	L	cualit.
		-Calidad de agua superficial local para uso recreativo, turístico y deportivo	L	cualit.
	Agroproductiva	-Cantidad de eventos que declaren emergencia agropecuaria por excesos hídricos	D	cuant.
		-Cantidad de áreas rurales impermeabilizadas	C	cualit.
Ambiental	Erosión hídrica e impermeabilización antrópica	-Pérdidas anuales de suelo estimadas por erosión superficial	C	cuant.
		-Existencia de registros de cambio en el escurrimiento hídrico superficial asociado a la impermeabilización del suelo	C	cuant.
	Conservación de la biodiversidad regional	-Índice de Calidad de Agua (ICA) ⁽²⁾	C	-
		-Existencia de especies de peces amenazados en la región -Existencia de especies amenazadas de anfibios, reptiles, aves y mamíferos asociados a ecosistemas húmedos en la región	Re Re	cualit.

Tabla 2 (continuación). Sistema de indicadores GEO (GIRH) FPEIR propuesto.

RESPUESTA (R)				
Eje	Dimensión	Indicador	Escala	Tipo
Medidas estructurales	Obras hídricas	-Frecuencia de actualización de obras hídricas	C	cualit.
Medidas no estructurales actuales	Diagnóstico	-Existencia de monitoreo de la calidad del agua superficial	C	cualit.
		-Existencia de monitoreo de la napa freática y otras capas profundas no destinadas a consumo humano ⁽¹⁾	L	cualit.
		-Existencia de monitoreo de aguas de red de distribución en las localidades	L	cualit.
		-Existencia de monitoreo del punto de vertimiento de los efluentes cloacales urbanos	C	cualit.
	Desempeño ambiental estatal	-Existencia de monitoreo de la biota acuática	Re	-
		-Efectividad de las áreas naturales protegidas ⁽¹⁾		
	Compromisos orientados al desarrollo sustentable	-Presupuesto actual destinado a la mejora del recurso hídrico	L	cualit.
	-Respuesta de Organismos públicos a problemáticas de índole hídrica	L	cualit.	
	Compromisos orientados al desarrollo sustentable	-Presupuesto actual destinado a la mejora del recurso hídrico	L	cualit.
		-Respuesta de Organismos públicos a problemáticas de índole hídrica	L	cualit.
	Inclusión de la población local	-Políticas ambientales orientadas al desarrollo sustentable	L	cualit.
		-Políticas orientadas a la mejora del recurso hídrico	L	cualit.
		-Políticas locales de concientización ambiental	L	cualit.
	- Políticas de diagnóstico de las comunidades biológicas	C	cualit.	
	-Participación de actores intervinientes en la temática hídrica local	L	cualit.	

Tabla 3. Valores que pueden tomar los indicadores GEO (GIRH) FPEIR relevantes.

Valor indicador	Indicadores pertenecientes a Fuerzas motrices, Presión e Impacto	Indicadores pertenecientes a Estado y Respuesta
5	Muy bajo	Muy bueno
4	Bajo	Bueno
3	Medio	Regular
3.5	Medianamente bajo	Medianamente bueno
2.5	Medianamente alto	Medianamente malo
2	Alto	Malo
1	Muy alto	Muy malo

Sistema de indicadores GEO (GIRH) FPEIR en los tres distritos pertenecientes a la cuenca del arroyo Ludueña

A continuación, se muestra la aplicación del sistema de indicadores GEO (GIRH) FPEIR en los tres distritos pertenecientes a la cuenca del arroyo Ludueña. Se asumió el riesgo de perder precisión a nivel de cuenca al considerar sólo esos tres distritos, la cual será robusta cuando se disponga de la información de los quince que la conforman. En las Tablas 4 a 8, se muestra el diagnóstico FPEIR según el modelo GEO (GIRH), de la cuenca y de los distritos: Ibarlucea (D1), Roldán (D2) y Zavalla (D3). En relación a las Fuerzas motrices (F), se presentan los indicadores promediados a nivel de escala

Ecorregional (Ec), Provincial (Pr), Regional (Re) y de cuenca (C). En cuanto a Presión-Estado-Impacto-Respuesta (PEIR), se muestran los indicadores para dos escalas: a nivel local (D1, D2, D3) y a nivel de cuenca (C). Para los indicadores que se midieron a escala local, no hubo datos en todos los distritos por lo que no son viables estadísticamente a nivel de cuenca (C). Es por ello que, únicamente se promediaron los indicadores comunes constituyendo un único valor a escala de cuenca. La información que no pudo ser recolectada se debió a tres motivos: no fue relevada (No Aplicado, N/A), correspondió a otra escala (No Corresponde, N/C), o no existió o no se consiguió durante el período de relevamiento (No Disponible, N/D).

Tabla 4. Valores de los indicadores del aspecto Fuerza Motriz para los distritos y para la cuenca del arroyo Ludueña.

Nº	Indicadores de Fuerzas motrices	Ec	Pr	Re	C	Valor F
1	Índice de Presión Demográfica (IPD) provincial	N/C	0.63	N/C	N/C	0.63
2	Porcentaje de hogares provinciales con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	N/C	0.63	N/C	N/C	0.63
3	Porcentaje de hogares provinciales con acceso agua de red	N/C	0.5	N/C	N/C	0.5
4	Porcentaje de hogares provinciales con cloacas	N/C	0.5	N/C	N/C	0.5
5	Cantidad promedio de agua potable consumida per cápita en la región	N/C	N/C	0.5	N/C	0.5
6	Porcentaje de la superficie provincial con uso de suelo agropecuario	N/C	0.25	N/C	N/C	0.25
7	Indicador de Impacto Relativo (IIR) industrial provincial	N/C	0.5	N/C	N/C	0.5
8	Aumento en la cantidad de precipitaciones anuales en la región	N/C	N/C	0.75	N/C	0.75
9	Aumento de la concentración de las precipitaciones en la región	N/C	N/C	0.25	N/C	0.25
10	Aumento del nivel freático regional asociado a cambios del uso del suelo	0.25	N/C	N/C	N/C	0.25
11	Porcentaje de protección de la/s ecorregión/es de la cuenca en estudio	0	N/C	N/C	N/C	0
12	Existencia de áreas hídricas protegidas aledañas	N/C	N/C	0.75	N/C	0.75
13	Pendiente media de la cuenca en estudio	N/C	N/C	N/C	0	0
Promedio indicadores		N/C	N/C	N/C	N/C	0.42
Nº indicadores relevados		2/2	6/6	4/4	1/1	13/13

Tabla 5. Valores de los indicadores del aspecto Presión para los distritos y para la cuenca del arroyo Ludueña.

Nº	Indicadores de Presión	D1	D2	D3	C	Promedio P
1	Porcentaje de hogares de cada localidad con acceso a agua de red	0	0.75	1	N/C	0.58
2	Porcentaje de hogares de cada localidad con acceso a cloaca	0	0	0	N/C	0
3	Porcentaje de hogares de cada localidad sin acceso a agua de red, cloaca ni pozo séptico	0.75	0.75	0.75	N/C	0.75
4	Cantidad promedio de agua potable consumida per cápita por localidad	N/D	0.75	0.25	N/C	Datos insuficientes
5	Cambio de la cobertura vegetal natural	N/C	N/C	N/C	0	0
6	Índice de Presión Demográfica (IPD) local	0	0.5	0.83	N/C	0.44
7	Expansión urbana-industrial local	0.5	0.5	0.5	N/C	0.5
8	Porcentaje de superficie local con uso de suelo agrícola	0	0.25	0	N/C	0.08
9	Porcentaje de superficie local con uso de suelo urbano e industrial	0.5	0.75	1	N/C	0.75
10	Densidad de infraestructura de transporte local.	0.5	0.5	1	N/C	0.67
11	Intervención del escurrimiento natural por obras hídricas regulares	0	0	0.5	N/C	0.17
12	Cantidad de asentamientos irregulares locales en zonas inundables	0	0	0	N/C	0
13	Cantidad de canales irregulares locales	0.25	0.75	0.5	N/C	0.5
14	Existencia de áreas agropecuarias locales con riesgo alto de contaminación ambiental por agroquímicos	0	1	0	N/C	0.33
15	Riesgo de contaminación ambiental local por cantidad de tambos locales	1	1	1	N/C	1
16	Cantidad de industrias no agrícolas locales con riesgo alto y medio de contaminación ambiental	1	0	1	N/C	0.67
17	Riesgo de contaminación del RHS por de efluentes cloacales urbanos	0	0.25	0	N/C	0.08
18	Riesgo de contaminación del RHS por Disposición final de los RSU	0.5	0.5	0.5	N/C	0.5
19	Riesgo de contaminación del RH por existencia de basurales a cielo abierto locales	N/D	0.25	0.75	N/C	Datos Insuficientes
Promedio indicadores		0.31	0.43	0.55	N/C	0.41
Nº indicadores relevados		16/18	18/18	18/18	1/1	17/19

Las Fuerzas motrices (F), como indica la Tabla 4, fueron relevadas en su totalidad (13 indicadores), fueron muy generales y existió vasta información y de utilidad en los diferentes niveles de escala para contextualizar la realidad territorial (socio-productiva y ambiental) relacionada a la temática hídrica. Las mismas son comunes a los tres sitios y

a la cuenca del arroyo Ludueña. Su valor se encontró entre 0.66 y 0.33 por lo que se categorizó como “sustentabilidad media”, y además se encontraron cinco (5) puntos críticos que condicionan el territorio (superficie provincial con uso de suelo agrícola, aumento de la concentración de las precipitaciones, aumento del nivel freático de la

región asociado a cambios del uso del suelo, protección de las ecorregiones y pendiente media de la cuenca en estudio).

Con respecto al Estado (E), en la Tabla 6, aunque se relevó el 88.9% de los indicadores (8 de 9 indicadores relevados), los datos están muy desactualizados. Aquí los indicadores en su mayoría se midieron a nivel de cuenca, exceptuando los espacios verdes locales donde hay información para

Roldán y Zavalla. El valor para este aspecto (0.28) fue menor a 0.33 indicando que este aspecto es “no sustentable o crítico”, además, se encontraron seis (6) puntos críticos para la cuenca (índice de vegetación remanente, excesos en el agua superficial de: niveles físico-químicos, hidrocarburos totales, Coliformes Totales y Fecales, y *Escherichia coli*).

Tabla 6. Valores de los indicadores del aspecto Estado para los distritos y para la cuenca del arroyo Ludueña.

Nº	Indicadores de Estado	D1	D2	D3	C	Promedio E
1	Existencia de áreas protegidas que contemplen los cuerpos de agua locales	N/C	N/C	N/C	1	1
2	Espacios verdes locales proporcionales al área urbanizada	N/D	0.75	0.5	N/C	Datos Insuficientes
3	Índice de Vegetación Remanente (IVR)	N/C	N/C	N/C	0.25	0.25
4	Exceso de niveles físico-químicos en agua superficial	N/C	N/C	N/C	0	0
5	Exceso de metales pesados en agua superficial	N/C	N/C	N/C	1	1
6	Exceso de hidrocarburos Totales en agua superficial	N/C	N/C	N/C	0	0
7	Exceso de Coliformes Totales en agua superficial	N/C	N/C	N/C	0	0
8	Exceso de Coliformes Fecales en agua superficial	N/C	N/C	N/C	0	0
9	Exceso de <i>Escherichia coli</i> en agua superficial	N/C	N/C	N/C	0	0
Promedio indicadores		S/D	0.75	0.5	N/C	0.28
Nº indicadores relevados		0/1	1/1	1/1	8/8	8/9

Tabla 7. Valores de los indicadores del aspecto Impacto para un distrito y para la cuenca del arroyo Ludueña.

Nº	Indicadores de Impacto	D1	D2	D3	C	Promedio I
1	Cantidad de inundaciones por localidad en zonas urbanas	N/D	N/D	0.5	N/C	Datos Insuficientes
2	Cantidad de casos locales asociadas a enfermedades relacionadas con el agua	N/D	N/D	1	N/C	Datos Insuficientes
3	Cantidad de casos locales asociadas a enfermedades transmitidas por el agua	N/D	N/D	1	N/C	Datos Insuficientes
4	Calidad de agua superficial local para uso recreativo, turístico y deportivo	N/A	N/A	N/A	N/C	N/A
5	Cantidad de eventos que declaren emergencia agropecuaria por excesos hídricos	N/C	N/C	N/C	0	0
6	Porcentaje de áreas rurales impermeabilizadas	N/D	N/D	N/D	N/C	N/D
7	Pérdidas anuales de suelo estimadas por erosión superficial	N/C	N/C	N/C	0	0
8	Existencia de registros de cambio en el escurrimiento hídrico superficial asociado a la impermeabilización del suelo	N/C	N/C	N/C	0	0
9	Existencia de peces amenazados en la región	N/C	N/C	N/C	N/A	N/A
10	Existencia de especies de anfibios, reptiles, aves y mamíferos asociados a ecosistemas húmedos en la región	N/C	N/C	N/C	Datos Insuficientes	Datos Insuficientes
Promedio indicadores		S/D	S/D	0.83	N/C	0
Nº indicadores relevados		0/5	0/5	3/5	3/5	3/10

Tabla 8. Valores de los indicadores del aspecto Respuesta para los distritos y para la cuenca del arroyo Ludueña.

Nº	INDICADORES RESPUESTA	D1	D2	D3	C	Promedio R
1	Existencia de monitoreo de la calidad de agua superficial	N/C	N/C	N/C	0	0
2	Existencia de monitoreo de aguas de red de distribución en las localidades	1	1	1	N/C	1
3	Existencia de monitoreo del punto de vertimiento de los efluentes cloacales urbanos	0	1	0	N/C	0.33
4	Existencia de monitoreo de la biota acuática	N/C	N/C	N/C	0	0
5	Frecuencia de actualización de obras hidráulicas	N/C	N/C	N/C	0	0
6	Presupuesto actual destinado a la mejora del recurso hídrico	N/D	N/D	0.25	N/C	Datos Insuficientes
7	Respuesta de Organismos públicos a problemáticas hídricas	N/D	N/D	0.5	N/C	Datos Insuficientes
8	Políticas ambientales locales orientadas al desarrollo sustentable	0.5	0.5	0.5	N/C	0.5
9	Políticas orientadas a la mejora del recurso hídrico	0.5	0.5	0.5	N/C	0.5
10	Políticas locales de concientización ambiental	N/D	0.5	0.5	N/C	Datos Insuficientes
11	Políticas de diagnóstico de las comunidades biológicas	0	0	0	N/C	0
12	Participación de actores intervinientes en la temática hídrica local	N/A	N/A	N/A	N/C	N/A
Promedio indicadores		0.4	0.58	0.4	N/C	0.29
Nº indicadores relevados		5/9	5/9	8/9	3/3	8/12

Para el Impacto (I), en la Tabla 7, se relevó el 30% de los indicadores (3 de 10 indicadores relevados), a pesar de la intensa búsqueda pudo obtenerse escasa cantidad de información, destacándose Ibarlucea y Roldán, donde no existe información de ningún tipo. El valor de la cuenca para este aspecto (0) junto con los cuatro indicadores que se midieron a nivel de cuenca, fueron menores a 0.33, lo cual indica que este aspecto es "no sustentable o crítico". Los tres (3) puntos críticos se relacionaron con la cantidad de eventos que declararon emergencia agropecuaria por excesos hídricos, pérdidas anuales de suelo por erosión hídrica y cambio del escurrimiento asociado a impermeabilización del suelo.

Por último, para la Respuesta (R), en la Tabla 8, se relevó el 83.3% de los indicadores (10 de 12 indicadores relevados). Esto se debió a la falta de información brindada por los Organismos públicos durante el período de relevamiento. Para Ibarlucea (0.4), Roldán (0.58) y Zavalla (0.4), los valores se ubicaron entre 0.66 y 0.33, indicando que la gestión en cada distrito es

"sustentabilidad media". Asimismo, se encontraron puntos críticos: dos (2) para Ibarlucea (monitoreo de vertimiento de efluentes domiciliarios y políticas de diagnóstico de la biodiversidad), uno (1) para Roldán (políticas de diagnóstico de la biodiversidad), tres (3) para Zavalla (monitoreo de vertimiento de efluentes domiciliarios, presupuesto actual destinado a la mejora del recurso hídrico y políticas de diagnóstico de la biodiversidad), y por último, cinco (5) para la cuenca en general (monitoreo de la calidad de agua, de los efluentes domiciliarios, de la biota acuática, frecuencia de actualización de las obras hidráulicas y políticas de diagnóstico de la biodiversidad), y su valor se ubicó por debajo de 0.33, indicando "no sustentabilidad o crítico".

En los distritos Ibarlucea, Roldán y Zavalla existen once (11), ocho (8) y nueve (9) puntos críticos del sistema de indicadores, respectivamente, pertenecientes a Presión y Respuesta (la mayoría corresponde a Presión). Asimismo, para ambos aspectos, los indicadores señalan que están en condición de "sustentabilidad media" en cada distrito e

influyen fuertemente los aspectos Estado e Impacto.

Organismos públicos vinculados a la gestión de los recursos hídricos de la cuenca del arroyo Ludueña

En relación a la Red de actores de la administración

pública involucrados en la gestión del agua del arroyo Ludueña y sus tributarios, en la Tabla 9 se indica el Organismo público del cual se obtuvo información y sus funciones específicas para la gestión del recurso hídrico y su contaminación. Se destaca la dificultad de acceso a la misma.

Tabla 9. Organismos públicos vinculados con la gestión del recurso hídrico de la cuenca del arroyo Ludueña.

Funciones específicas	Escala	Organismo/s público/s	Normativa
Financiamiento de obras hídricas	Provincial Cuenca	Ministerio de Economía Ministerio de Infraestructura, Servicios Públicos y Hábitat	Ley Prov. de Ministerios N° 13.920
Lineamientos de preservación del ambiente y saneamiento	Provincia Cuenca	Ministerio de Ambiente y Cambio Climático Ministerio de Salud Comunas y Municipios	Ley Prov. de Ministerios N° 13.920 Ley Prov. N° 13.246 (Dec. regl. N° 4841/13)
Lineamientos de Ordenamiento Territorial	Provincial Cuenca	Ministerio de Infraestructura, Servicios Públicos y Hábitat Ministerio de Ambiente y Cambio Climático Comunas y Municipios	Ley Prov. de Ministerios N° 13.920 Ley Prov. N° 13.246 (Dec. regl. N° 4841/13)
Construcción de obras hídricas	Provincial Cuenca	Ministerio de Infraestructura, Servicios Públicos y Hábitat Secretaría de Recursos Hídricos Ministerio de Ambiente y Cambio Climático Comunas y Municipios	Ley Prov. de Ministerios N° 13.920 Ley Prov. N° 13.246 (Dec. regl. N° 4841/13)
Lineamientos de intervención en el AMR	Departamental Cuenca	Ente de Coordinación Metropolitana del Área Metropolitana de Rosario (ECOM)	Ley Prov. N° 13.532 (2016)
Construcción de obras menores y de mantenimiento. Reporte de problemáticas	Cuenca	Comité de Cuenca del arroyo Ludueña (Disuelto)	Ley prov. N° 9.830 Dec. prov. N° 2.375/10
	Provincial Cuenca	Ministerio de Infraestructura, Servicios Públicos y Hábitat Ministerio de Ambiente y Cambio Climático Comunas y Municipios	Ley Prov. de Ministerios N° 13.920 Ley Prov. N° 13.246 (Dec. regl. N° 4841/13)
	Cuenca - tramo desembocadura	S/D	S/D

Tabla 9 (continuación). Organismos públicos vinculados con la gestión del recurso hídrico de la cuenca del arroyo Ludueña.

Funciones específicas	Escala	Organismo/s público/s	Normativa
Mantenimiento de Obras hídricas (desagües pluvio-cloacales, cordones cunetas, canales regulares, pozos)	Cuenca - tramo desembocadura	S/D	S/D
	Ibarlucea	S/D	S/D
	Roldán	Secretaría de Obras Hídricas (construcción) y COPROL (mantenimiento y administración, una vez construida, hay bajo porcentaje de cloacas, por ello la distinción)	Inf. Pers. Sec.Obr. Púb. Ord. N° 670/10. Concesión hasta el 2040.
	Zavalla	Comuna	Inf. Pers. Pte. Comunal
Desagote de pozos sépticos y negros (barrios y/o distritos s/cloacas)*	Ibarlucea Roldán Zavalla	Los usuarios residenciales, y las industrias que estén habilitadas para el volcamiento de efluentes en la disposición final. (* no pertenece a la administración pública)	Res. Provincial N° 145/07
Transporte y disposición final de efluentes cloacales por camiones atmosféricos (aquellos distritos s/cloacas)	Provincial/Cuenca	Comunas y Municipios	Res. Provincial N° 145/07
	Ibarlucea	S/D	S/D
	Roldán	S/D	S/D
	Zavalla	S/D	S/D
Monitoreo en la calidad del agua superficial	Provincial/Cuenca	Ministerio de Ambiente y Cambio Climático	Ley Prov. de Ministerios N° 13.920
Monitoreos en la calidad de los efluentes líquidos industriales*(Usuarios no residenciales)	Cuenca- tramo desembocadura	Agua Santafesinas S.A.	Dec. prov. N° 1.358/07
	Ibarlucea Roldán Zavalla	Industrias emplazadas en los tres distritos que no desechen sus efluentes líquidos en desagües/lagunas cloacales (*) no pertenece a la administración pública	Res. N° 1.572/17. Dec. N° 1.089/82

Tabla 9 (continuación). Organismos públicos vinculados con la gestión del recurso hídrico de la cuenca del arroyo Ludueña.

Funciones específicas	Escala	Organismo/s público/s	Normativa
Monitoreos de calidad de agua de efluentes cloacales o biosólidos para agua superficial	Provincial Cuenca	Gerencia de Control de Calidad (Ente Regulador de Servicios Sanitarios)	Res. ENRESS N° 324/11
	Cuenca – tramo desembocadura	Aguas Santafesinas S.A.	Dec. prov. N° 1.358/07
	Ibarlucea	S/D. Prestador no identificado.	Res. ENRESS N° 324/11
	Roldán	Cooperativa de Agua Potable y Obras Públicas Ltda. (COPROL)	Res. ENRESS N° 324/11
	Zavalla	S/D. Prestador no identificado.	Res. ENRESS N° 324/11
Monitoreo de potabilidad de agua (calidad superficial y/o sub-superficial para consumo humano)	Provincial Cuenca	Ente Regulador de Servicios Sanitarios	Res. ENRESS 508/17 Y 325/11
	Cuenca- tramo desembocadura	Aguas Santafesinas S.A.	Dec. prov. N° 1.358/07
	Ibarlucea	Comuna	Res. ENRESS 508/17 Apartado iv y Res. 325/11
	Roldán	Cooperativa de Agua Potable y Obras Públicas Ltda. (COPROL)	Res. ENRESS 325/11
	Zavalla	Cooperativa Juan Silva Ltda.	Res. ENRESS 325/11
Restauración y recuperación de ambientes contaminados	Provincial Cuenca	Ministerio de Ambiente y Cambio Climático	Ley Prov. de Ministerios N° 13.920
Sanciones administrativas a actores de carácter ambiental	Provincial Cuenca	ENRESS MAYCC Municipios y Comunas Prestadores	Ley prov. N° 13.060

DISCUSIÓN

Contexto pampeano y de la provincia Santa Fe (Fuerzas motrices)

Los riesgos de contaminación para los recursos hídricos y los ecosistemas acuáticos por actividad industrial en la provincia y en la región son muy altos, principalmente los provenientes de: efluentes pecuarios, agroquímicos, efluentes industriales de procesamiento de carnes y lácteos. Así como también, confiere riesgos de alteración por la concentración de partículas devenidas de la erosión hídrica del suelo (Maguna y Montico, 2013; Sarandón y Flores, 2014; IPEC, 2019; SAyDS, 2019). Asimismo, la escasa cobertura cloacal expone a un riesgo de

contaminación de origen fecal a gran escala en Santa Fe, tanto para los recursos hídricos superficiales como para los subsuperficiales (INDEC, 2010).

En relación a la variabilidad climática regional, deben ser tenidas en cuenta prácticas agropecuarias que sean hidrológica y ecológicamente viables a largo plazo, contemplando una posible redistribución de las lluvias anuales, y los cambios de las especies adaptadas a estos y otros factores climáticos, trayendo aparejadas modificaciones en su ecología ya que se ha detectado mayores intensidades de las lluvias y un incremento leve de las precipitaciones anuales (IPCC, 2014; Barros *et al.*, 2015; Chesini, 2015; Uribe Botero, 2015; Vera, 2016; Ferrelli *et al.*, 2021).

Las superficies destinadas a las áreas protegidas son muy escasas para las dos ecorregiones donde se ubica la cuenca en estudio, aunque hay tendencias al incremento en los últimos años, la misma es insuficiente, y estas áreas están muy por debajo de la superficie mínima que deben ser preservadas (15%), dado que se estima que el porcentaje de protección actual es de 0.01% y de 0.21% para las ecorregiones Pampa y Delta e Islas del Paraná, respectivamente (APN-FVSA, 2007; SAyDS, 2019). Esto pone en riesgo la supervivencia de las especies ya que estos espacios son hábitat, refugio y lugar para alimentación y reproducción.

Por último, la cuenca del arroyo Ludueña es propensa a anegarse con frecuencia no sólo por la región climática donde se encuentra sino también por su geomorfología (Fuschini Mejía, 1994; Kruse y Zimmermann, 2002; Biasatti *et al.*, 2016). Por otro lado, se desconoce la cantidad exacta de lagunas temporarias que existen en épocas húmedas. Esto constituye un gran desconocimiento de la hidrología de la cuenca ya que es un humedal, donde estas dinámicas son naturales y se desarrollan las actividades humanas.

Procesos antrópicos influyentes en el arroyo Ludueña y sus tributarios (Presiones)

Las dinámicas de ocupación del espacio son determinantes al momento de entender estos procesos, donde la vegetación natural de la cuenca disminuyó en un 42.5%, y puede observarse dos etapas clave: (1) entre 1970 y 2000, la vegetación natural disminuye por la expansión de la agricultura y se la confina a relictos; y (2) entre 2000 y 2020, se avanza sobre estos relictos a escala local (sin dejar de avanzar desde la actividad agrícola), y produciéndose el desmonte de áreas naturales cercanas a las urbanas para loteos e industrias. En consecuencia, se observa un proceso que lentamente, y sin pausa, está extinguiendo los ecosistemas nativos locales de la cuenca, quedando muy confinados a ecosistemas de ribera del arroyo y de sus tributarios. Esta disminución pone en riesgo las funciones y los servicios ecosistémicos brindados por dicha cobertura, entre los que se encuentran la provisión de hábitat para las especies y la retención (regulación) hídrica en épocas húmedas.

Por otro lado, en la etapa (1), se cambia el modelo de producción de rotación agrícola-ganadero a la netamente agrícola, la cual es predominante hasta la actualidad, y fue esencial para el aumento del caudal

del arroyo Ludueña en épocas de crecida, y conllevaron a la impermeabilización del suelo potenciando el escurrimiento de agua, trayendo aparejado anegamientos, inundaciones y un cambio en el balance hídrico (Zimmerman *et al.*, 2001; Biasatti *et al.*, 2019; Bragos *et al.*, 2019; Montico *et al.*, 2019). Asimismo, en la etapa (2), se cuantificó una expansión urbana-industrial entre 2009 y 2020, de 59.6% (Ibarlucea), 54.1% (Roldán) y 49.5% (Zavalla), respectivamente. Esto último, trayendo aparejado una “expansión de la impermeabilización local”, así como también del aumento de la demanda de consumo de los recursos naturales y de la generación de efluentes y residuos domésticos.

Como la cuenca se ubica en un área de llanura y es propensa a los anegamientos, se desencadenan conflictos sociales por las inundaciones y pérdidas económicas por anegamientos en el sector rural, donde la ubicación de los distritos tiene implicancia no sólo en la regulación de los caudales, sino también a nivel de depuración del agua ya que lugares ubicados en cotas altas afectan a distritos aguas abajo.

Aquí se puede mencionar, como medidas de apaleamiento, la construcción de la Presa de Retención, el entubamiento del tramo final del arroyo (Rosario), y la construcción de los Canales La Legua, Media Legua, y el Canal Ibarlucea-Salvat, entre muchos otros, siendo estos últimos los principales tributarios del arroyo Ludueña (ECOM, 2017; Manavella, 2017; Mosconi Frey, 2018). Sin embargo, se pueden cuantificar canales irregulares en el área rural que drenan el agua, 19 canales en Ibarlucea, 13 en Zavalla, y 6 en Roldán, dejando sin efectividad las obras hídricas, y por otro lado, la construcción de reservorios en áreas urbanas para retener el agua, uno (parcial) en Zavalla, y al menos tres en Roldán, esto último por la aplicación de la Ley Prov. N° 13.246 *Estabilización de aportes del arroyo Ludueña*.

Con respecto a los conflictos sociales, en Roldán y en Zavalla, los mismos son derivados de la ocupación del espacio entre áreas urbanas y periurbanas con la rural. Estos involucran la calidad de vida humana y de los ecosistemas en ambos distritos: las inundaciones y la utilización de los agroquímicos. Asimismo, las áreas propensas a anegarse pueden también contener asentamientos irregulares, esta es una problemática doble: tanto social como ambiental. Estos hogares se ubican en sectores inundables, donde es muy alto el riesgo sanitario para las familias, y de contaminación de los recursos hídricos, por la posible inexistencia de pozos sépticos. La misma es común a los tres distritos.

En Zavalla existen pocos asentamientos ya que se ubica en una zona topográficamente alta y los anegamientos mayormente se dan en las zonas agrícolas, y los sectores afectados provienen del barrio Bione, Primavera y del oeste de Punta Chacra, este último por no haberse concretado la construcción del reservorio previsto (ECOM, 2017; Manavella, 2017; ECOM, 2019; Ministerio de Desarrollo Social, 2022). Este indicador es delicado y complejo: las familias requieren un hogar y habitan aquellos que les son posibles adquirir. Esto significa que tienen una dignidad y costumbres que deben ser contempladas a la hora de planificar el territorio ya que son parte del mismo.

Con respecto a la calidad de los recursos hídricos de la cuenca, los permisos de volcamiento de efluentes tanto industriales como domésticos en los cuerpos de agua, están regulados por el Decreto provincial N° 1.082/02 (Ley Prov. N° 11.220 *Regulación de Servicios Sanitarios*). Asimismo, se encuentra vigente el Decreto reglamentario N° 101/03 (Ley Prov. N° 11.717 - *Ley de ambiente*), la cual establece que cada industria tenga su Evaluación de Impacto Ambiental que categorice su riesgo de contaminación hacia los ecosistemas provinciales.

De lo dicho anteriormente, sumado a que la cobertura cloacal local en los tres distritos es muy baja, se desprende que los recursos hídricos de la cuenca del arroyo Ludueña presentan un alto riesgo de contaminación por efluentes domésticos. Además, el ENRESS debe monitorear semestralmente el estado de los líquidos antes del volcamiento al curso de agua, los cuales en Ibarlucea y Zavalla no pueden realizarse debido a que no existen las plantas depuradoras. Por último, se desconoce el volumen de los líquidos y la periodicidad de las descargas de los camiones atmosféricos, los cuales son necesarios para establecer medidas de control y/o manejo.

Asimismo, el mayor riesgo de impacto ambiental industrial para la cuenca lo aporta Roldán ya que posee un complejo industrial, y el sector productivo se aboca a la metalmecánica. Esto no quiere decir que esté contaminando en la actualidad pero se debe tener en cuenta que, estas actividades conllevan un riesgo para el ambiente. Asimismo, el aporte de los tres distritos en la región es de bajo riesgo de impacto ambiental, ya que otros distritos de la cuenca en estudio forman parte del Complejo Industrial al Norte de Rosario (Pouey, 2008). Se deberá profundizar en este tipo de indicador general.

En la actualidad, la superficie agrícola de Ibarlucea,

Roldán y Zavalla es de 81%, 67.1% y 96.7%, respectivamente, y todas tienen producción de forma convencional. En Ibarlucea (814 hectáreas agrícolas) y en Zavalla (1 408.8 hectáreas agrícolas) existe un alto riesgo de contaminación ambiental, el cual está asociado a sectores inundables y con baja velocidad de escurrimiento (Montico y Di Leo, 2015; ECOM, 2017, 2019). Las mismas deberán ser resguardadas por prácticas como las agroecológicas, o bien, estar bajo estricto control por los Organismos públicos correspondientes, entre ellos, el MAYCC, debido a su carácter de extrema vulnerabilidad.

Asimismo, en la cuenca, los herbicidas son los más móviles y representan más probabilidad de contaminar los cuerpos de agua superficiales y subsuperficiales que los insecticidas y los fungicidas (Montico *et al.*, 2017; Montico y Di Leo, 2021). Se hace necesario recordar aquí el alto grado de impermeabilización de la cuenca y el aumento de canales irregulares que ponen en producción zonas inundables en áreas agrícolas. Más allá que exista un movimiento “vertical” del agua, el mismo puede verse reducido e incrementado el “horizontal”, trayendo aparejado un incremento de pesticidas en el agua superficial en épocas húmedas. En este sentido, Auge (2004, 2009) señala que existe una conexión entre las capas superficiales y la freática donde en algún momento intercambian partículas disueltas, llegando a un “equilibrio” aparente.

En síntesis, los procesos de descarga mínimas permitidos para cada industria podrían estar interactuando en forma sinérgica (o no) a lo largo de las zonas de descarga conjuntamente con los efluentes cloacales, y residuos de agroquímicos en el arroyo Ludueña y sus afluentes, sedimentos del cauce, riberas, y en sus valles de inundación.

Situación del arroyo Ludueña, sus tributarios y los relictos de vegetación (Estado)

Los trabajos recopilados dan cuenta que los parámetros medidos muestran cierto grado de contaminación por efluentes domésticos (carga orgánica) para el arroyo y sus principales tributarios, y los sedimentos del tramo principal por cobre y zinc del tramo principal, y por ende, estarían en riesgo tanto los roles ecológicos como los servicios ecosistémicos brindados (Informe Oficial solicitado al MAYCC para el 2010; Tufo *et al.*, 2015; Martínez Bilesio, 2018; Martínez Bilesio *et al.*, 2019). Por otro lado, se desconoce si hay presencia de agroquímicos, y no se dispone de la taxonomía ni de la dinámica de

las comunidades acuáticas del arroyo Ludueña, por lo que no es posible diagnosticar su caudal ecológico y proponer lineamientos de conservación.

En concordancia con lo evaluado e informado por Montico *et al.* (2019), estos trabajos, con el objetivo común de estudiar la situación de los recursos hídricos de la cuenca, marcan un uso de los mismos como meros receptores de desechos.

En su estudio, Montico *et al.* (2019) indican que los remanentes de vegetación más importantes a nivel hídrico y ecológico en la cuenca del arroyo Ludueña, son monte (3 hectáreas) y pastizal (7 933 hectáreas) junto con las pasturas artificiales (770 hectáreas) y plantaciones forestales (2 hectáreas). Todos estos ecosistemas son esenciales en la captación y purificación del agua de la cuenca, a través de la retención de agua y contaminantes y la evapotranspiración.

Tal como afirman Biasatti *et al.* (2017), se hace necesario poner en valor y repensar la conservación de todos estos sitios, no solamente como “hábitat de la biodiversidad nativa y atractivo estético, sino como potenciales aportes a la diversificación del paisaje y fuente de variabilidad dentro de la matriz agrícola”. Éstos pueden encontrarse en áreas que tienen algún grado de protección como:

1. El Corredor Biológico de la autopista AP-01 Rosario-Santa Fe, atraviesa, en forma de “C” a la cuenca del arroyo Ludueña y abarca 100 metros a cada lado de la autopista Rosario-Santa Fe, abarcando las ecorregiones Pampa y Espinal, con sus zonas de transición (Dec. Regl. N.º 1.723/14).
2. El Bosque de los Constituyentes, donde es considerado como “una reserva de uso comunitario” y es considerada como “Espacio Temático Ambiental” en la Ciudad de Rosario (Dec. Mun. N.º 41.509/14). El mismo se ubica en la zona de captación del Canal La Legua en Roldán.
3. La Reserva Ecológica San Jorge, en la Ciudad de Funes en el límite con Roldán, es una cañada que se ubica inmediatamente aguas arriba de la presa de retención del arroyo Ludueña (Ord. Mun. N.º 996/15).
4. El Parque José Félix Villarino en Zavalla. Este último, es un Área Protegida del Paisaje Cultural (Res.CD. N.º 459/11 Facultad Ciencias Agrarias UNR), y se encuentra en la zona lindante a la zona urbana. Asimismo, este lugar fue declarado como un lugar de importancia para la conservación de los murciélagos, uno de los tres en la provincia de Santa Fe (PCMA).

5. El arroyo Ludueña, y sus márgenes a 100 metros de cada lado, estuvieron protegidos por la Ley Prov. N.º 13.372 *Ordenamiento Territorial Bosques Nativos (OTBN)*, y fueron contemplados como “zonas de alto valor de conservación”, los cuales no podían ser transformados. Sin embargo, según el IDESF (2021), los mismos se excluyen en el 2019 ya que no se reconocen las riberas del curso principal como zonas boscosas nativas. Esta exclusión es atribuida a errores por imprecisiones de los programas informáticos y por categorías de clasificación.

6. Infraestructura verde y/o espacios verdes locales, como: arbolado público, parques, plazas, jardines, campings y terrenos baldíos. Esta es reemplazada por infraestructura gris, la cual “no puede suplir el funcionamiento y la relativa estabilidad que posee un ecosistema no antropizado”, que amortigua los excesos hídricos y tienen un rol “compensador” en las áreas urbanas (WWAP, 2018; Zimmermann y Bracalenti, 2019).

Los espacios ribereños del arroyo, el Bosque de los Constituyentes y la Reserva Ecológica San Jorge son áreas naturales sujetas a períodos húmedos y secos, y podrían estar cumpliendo un rol excepcional en la cuenca del arroyo Ludueña, diluyendo los contaminantes del arroyo principal. Estos beneficios se modifican según su pulso hídrico natural donde el período seco tiende a concentrar los contaminantes, y los períodos húmedos a diluirlos y a captarlos en sus sedimentos, y en segundo lugar, por las alteraciones en la dinámica de la cuenca, cauces y cuerpos de agua, influyendo en su poder natural de absorción. Por otro lado, el bajo caudal medio que presenta el arroyo Ludueña puede ser un factor que podría ser limitante para la depuración de la carga orgánica que presenta (Escobar, 2002; Kandus *et al.*, 2011; Tufo *et al.*, 2015). Sin embargo, contar con estos espacios podría contribuir a disminuir el aporte de contaminantes del arroyo, a su depuración y al mantenimiento de las interacciones ecológicas nativas dentro de una matriz netamente urbanizada y agrícola.

En síntesis, y en concordancia con Pouey (2008), Volpedo y Fernández Cirelli (2011) y Mosconi Frey (2018) es necesario que se contemplen las funciones ecosistémicas de la cuenca desde el punto de vista ambiental, donde se ven involucradas interacciones ecológicas y roles que no se suplen por la infraestructura gris, a partir de la conservación de los cuerpos de agua desde la perspectiva de cuenca hidrológica: desde el arroyo Ludueña, sus tributarios y sus riberas, en conjunto con las planicies de inundación, unificadas a lo largo del curso principal.

Algunos servicios ecosistémicos afectados de la cuenca del arroyo Ludueña (Impactos)

En la región ocurren muchos eventos que desencadenan alta cantidad de emergencias hídricas en épocas húmedas. Con motivo de ejemplificar, se toma en cuenta el período de agosto a octubre de 2012, donde se registraron una serie de eventos que provocaron anegamientos en el sector rural (desencadenantes del Dec, prov. N° 186/13 *Emergencia Agropecuaria*) e inundaciones en el sector urbano y se registró el desborde y el colapso de las obras hídricas. Este último, fue atribuido principalmente, al sinergismo de la concentración de dichas lluvias en la región y al grado de impermeabilización del suelo en la cuenca del arroyo Ludueña que originó graves inconvenientes en varios distritos. En Roldán y en Zavalla este evento provocó daños agrícolas muy importantes, y en Ibarlucea, resultó en un desborde de los Canales Ibarlucea-Salvat y pérdidas agrícolas totales (MAHySF, s/f; MPyTN, 2019).

Con respecto a la salud humana en la cuenca, las enfermedades hídricas se manifiestan principalmente por la ingesta de agua contaminada y por una alteración en la calidad ambiental e hídrica (McJunkin, 1988; Chesini *et al.*, 2019). En nuestra región, esto se da a través de las inundaciones y se da en personas en situación de extrema vulnerabilidad, con viviendas de baja calidad material o en zonas de riesgo de inundación como también, con escasa cobertura de agua potable y cloacas (Pouey, 2008). En Zavalla, las enfermedades de transmisión y las relacionadas con el agua o las de origen entéricas, no existen o hay muy pocos casos, pero no relacionados a la contaminación hídrica. Esto se debe a que existe amplia cobertura de agua potable, o poco contacto con el agua superficial y a campañas de fumigación en zonas urbanas para mitigar y controlar la etapa adulta de la especie *Aedes aegyptis* en los períodos estivales, reduciendo la probabilidad de transmisión de enfermedades por dicho vector.

Desde el sector agrícola, la impermeabilización y el drenado de, al menos, 38 lagunas temporarias, junto con la impermeabilización urbana actual, muestran un desbalance en los flujos superficiales de agua en toda la cuenca del arroyo Ludueña, debiéndose mantener todos los espacios con vegetación posible e incrementar su superficie, para conservar los cuerpos de agua y sus comunidades acuáticas (Zimmermann y Bracalenti, 2019; Montico *et al.*, 2019).

Con respecto a los efectos en el ecosistema edáfico, las pérdidas de suelo por año por erosión hídrica en la cuenca están desactualizadas y son imprecisas, y se estiman pérdidas por erosión hídrica entre 20 a 70 toneladas de suelo por hectárea por año, y los mayores impactos son atribuidos al sistema productivo soja/soja, donde existe erosión de moderada a alta; y a su vez, en el 7% del área agrícola existen niveles de erosión hídrica graves a muy graves (Denoia *et al.*, s/f; Di Leo *et al.*, 2020).

Es evidente que en los últimos años la matriz del paisaje está muy lejos de mostrar una región de pastizal como lo ha sido hace más de 100 años la Región Pampeana. La pérdida de hábitat ha sido un factor fundamental para el desplazamiento y extinción local de la fauna en esta región, ya sea por la actividad agropecuaria o por la urbanización, y la información es escasa. En este sentido, la heterogeneidad espacial en ambientes urbanos y periurbanos es esencial para garantizar la supervivencia de las especies en los relictos naturales. Esta diversidad es necesaria para albergar mayor cantidad de especies, y aumentar las oportunidades de refugio, alimento y reproducción, donde las especies son parte del territorio y es inevitable su exclusión (Gherza y León, 2002; Garay y Fernández, 2013; Biasatti *et al.*, 2019).

Con respecto a los efectos en las especies de la macrofauna nativa, existe muy poca información acerca de su situación en esta cuenca, donde se remarca la importancia del mantenimiento de áreas naturales como el Parque J.F. Villarino (Zavalla), como hábitat y refugio en distritos pertenecientes a la cuenca, declarado como área de interés para la conservación de los murciélagos (Di Doménica, 2019). Por otro lado, se registró 11 mamíferos nativos en el corredor biológico de la Autopista AP-01, donde el aguará papé (*Procyon cancrivorus*) y el lobito de río (*Lontra longicaudis*) están clasificadas en el país como Vulnerable (VU) y En Peligro (EN), respectivamente (Cabrera, 2017). Actualmente, no se dispone de información de las especies de la fauna ictícola del arroyo Ludueña.

En síntesis, se acuerda con Montico *et al.* (2019) donde se valoran los relictos de vegetación y los recursos hídricos como los que mayores servicios ecosistémicos brindan en la cuenca del arroyo Ludueña. Sin embargo, sólo se observa su rol de receptores de desechos urbanos, agrícolas e industriales, despreciándose los roles ecológicos de la cobertura vegetal, ya que es imprescindible como

espacio remanente de hábitat para la macrofauna y las especies en general, y contribuyendo escasamente como retardadora de inundaciones, y por último, desvalorizándose las oportunidades culturales regionales, como el sentido de pertenencia y el espacio recreativo de sus riberas de este arroyo urbano y de sus tributarios.

Medidas ecológicas no estructurales respecto a la cuenca del arroyo Ludueña (Respuesta)

Hasta el momento no se conoce un monitoreo de la calidad del agua del arroyo Ludueña y sus tributarios, como tampoco se identificó algún registro de monitoreo de la biota acuática (comunidades planctónicas, bentónicas e ictícolas). En la actualidad, existe el *Programa de Recuperación de la Calidad de los Cuerpos de Agua Superficiales, tanto Lóticos como Lénticos*, vigentes por el Decreto provincial N° 1.470/21 *Control de Efluentes y Saneamiento de cursos superficiales*; y el Decreto Nacional N° 831/93 *Valores guía de calidad de agua dulce para protección de vida acuática*, los cuales podrían aplicarse para este arroyo y sus principales afluentes. Por último, existe el derecho humano al saneamiento, el cual incluye la cobertura cloacal o la deposición de los efluentes domésticos en lugares sanitaria y ambientalmente seguros. Es por ello, que los mismos deberán ser monitoreados por el ENRESS (Ente Regulador de Servicios Sanitarios), donde solamente existen en Roldán, y se deberán realizar en todos los distritos de la cuenca.

En relación a la periodicidad con que deben actualizarse las obras hídricas, estas son bastante frecuentes, dado que en alrededor de 20 años dejan de cumplir su objetivo, donde la impermeabilización, el aumento de canales irregulares y la variabilidad de las precipitaciones, son los motivos principales (MAHySF, s/f). Estos son factores a considerar ya que son necesarias inversiones e investigaciones acordes a la funcionalidad ecosistémica a escala de paisaje, como la retención del agua naturales en los valles de inundación y el rol del cambio climático (Escobar, 2002; Garay y Fernández, 2013; Mosconi Frey, 2018).

Con respecto a las respuestas a las problemáticas hídricas, en Roldán y en Zavalla, se observa que los conflictos sociales son desencadenados por las inundaciones y por la aplicación de agroquímicos en áreas periurbanas. Sin embargo, para el Municipio y la Comuna no se registran reclamos relacionados al saneamiento, como la cobertura cloacal o la

construcción de lagunas de estabilización y su correcto funcionamiento y control. Por otro lado, en concordancia con los reclamos sociales, la disminución de los pesticidas aplicados también implicaría una menor probabilidad de ingreso a los cursos de agua.

Asimismo, otras problemáticas devienen de la conformación y posterior disolución (sin documentar) del Comité de Cuenca del arroyo Ludueña creado en 2010 (Dec. Prov. N° 2.375/10) y su funcionamiento real a partir del 2014. Dos de sus objetivos eran la ejecución de obras hídricas menores y el reporte de las problemáticas que existían en dicho territorio (Ley Prov. N° 9.830). El Comité estaba conformado por miembros de Municipios y Comunas y del sector agrícola, excluyendo la participación ciudadana, como la población vulnerable de la cuenca o profesionales vinculados al área de ambiente. La gestión participativa como la construcción de un comité interdisciplinario para la toma de decisiones de los recursos hídricos, son finalidades de la GIRH (Martín y Justo, 2015). En contraposición, la Comuna de Zavalla manifestó que esta conformación se disolvió ya que no representó ni un avance ni una mejora en la situación de sus recursos hídricos.

En relación al presupuesto, para Zavalla, las respuestas de los Organismos públicos provinciales son deficientes y están asociadas a la falta y/o demora del presupuesto y a la ejecución de infraestructuras de distinta envergadura. Las inversiones para la infraestructura cloacal son costos inviables, por lo que se financia su construcción a corto-mediano plazo, construyendo piletones para el tratamiento de lagunas de estabilización, para la descarga de los pocos desagües y de los camiones atmosféricos. Esto constituye una línea de acción de saneamiento y restauración ecológica de suma importancia ya que se encuentra en el punto topográfico más alto dentro de la cuenca, donde los principales tributarios del arroyo Ludueña nacen y escurren hacia Rosario. Por otro lado, Ibarlucea no posee piletas de tratamiento para efluentes domésticos y se vuelcan al curso de agua. Estos forman parte del segundo subsistema de gran importancia en la cuenca y en el tramo final del arroyo Ludueña, el cual descarga su caudal al río Paraná. De la misma manera que para Zavalla, se hace necesario repensar el saneamiento a partir de esta localidad aguas arriba, donde nace el Canal Ibarlucea que incide en el estado del recurso hídrico y su espacio ribereño.

Los tres distritos en estudio son integrantes del Ente de Coordinación del Área Metropolitana de Rosario

(ECOM) donde se estudia el territorio de forma local y regional con la finalidad de proponer planes de Ordenamiento Territorial. Hasta febrero del 2020, Roldán no lo integraba, a raíz de un posicionamiento respecto a sus objetivos, donde estos se asumen, tendían a beneficiar a Rosario. Esto es un punto a tener en cuenta ya que, si se desea establecer consensos, los posicionamientos y las percepciones deben ser consideradas. En Ibarlucea, las problemáticas de origen hídrico toman una gran relevancia a futuro, ya que se acordó investigar espacios para instalar presas de retención y la reorganización de los bordes de los Canales Ibarlucea y Urquiza, donde se propone un corredor de biodiversidad (ECOM, 2017). Esto aún no ha sido aplicado. Por otro lado, en Zavalla se proponen obras de retención para regular el sistema hídrico que tendrían efectos atenuantes en Roldán y Funes, la Presa de Retención, y en el propio distrito, favoreciendo el escurrimiento del Canal La Legua en épocas húmedas, entre otras obras. Esto es fundamental, ya que estas propuestas tienen estudios que contemplan los movimientos hídricos a escala de cuenca (ECOM, 2019).

Las sanciones administrativas por contaminación ambiental son otorgadas al MAYCC y aquellos Municipios y Comunas que tengan convenios con este. Los actores que infrinjan la Ley Prov. N° 11.717, modificatoria N° 13.060, y la Ley N° 13.246 y otras de carácter ambiental podrán ser sancionados administrativamente con apercibimiento, multa, suspensión o caducidad de la concesión, clausuras y decomisos, entre otras. Asimismo, las sanciones a los prestadores locales están regidas por la Resolución ENRESS N° 896/12 y otras modificatorias. Se desconoce si estas normativas fueron aplicadas.

En línea con lo anterior, debe existir un diseño de esquemas de organización y normativa donde no haya una superposición de entidades ambientales en las cuencas, un estricto control y cumplimiento ambiental con la participación de la población local en la gestión hídrica de la cuenca, como: acuerdos voluntarios y rediseño de los instrumentos de planificación, control con la utilización de la tecnología y educación ambiental. Así como también, debe existir el tratamiento del agua contaminada para la restauración de los ecosistemas acuáticos (Volpedo y Cirelli Fernández, 2011; Molina, 2013; Porto *et al.*, 2019; González Arriagada, 2021). Por último, no se encontró solapamiento de funciones ambientales entre Organismos públicos, sino la falta de control y presupuesto tendiente a la GIRH de la cuenca del

arroyo Ludueña. Sin embargo, debido al escaso acceso a la información será necesario seguir profundizando en este análisis.

CONCLUSIONES

La cuenca hidrográfica es una opción para la GIRH ya que se abordan las entradas y salidas de agua de las actividades antrópicas locales. Asimismo, el abordaje sistémico, multidisciplinar y multiescalar puede permitir encontrar y unificar lineamientos de gestión en el territorio.

La dificultad de acceso y la escasa información pertinente disponible y en algunos casos la hostilidad de algunas fuentes, resultaron determinantes para definir el diagnóstico y los indicadores con mayor precisión y certeza.

Las Fuerzas motrices (F) del área ambiental son las Áreas Protegidas, la Geomorfología y el Cambio Climático.

Las Presiones (P) más importantes son: el saneamiento, la cobertura vegetal, el crecimiento poblacional, las obras hídricas, la superficie agrícola y las áreas con riesgo por pesticidas. Otras a considerar son: los asentamientos en zonas inundables, la expansión urbana-industrial, y la disposición de los RSU.

El Estado (E) es crítico. Los cursos de agua presentan excesos de carga orgánica desde su nacimiento, condicionando la supervivencia de las comunidades biológicas. Además, el paisaje es netamente agrícola-urbano, con parches de vegetación que pueden prestar solo servicios que le sirven a la población humana, como desagüe de desechos, y los espacios verdes como retardador de inundaciones y recreación, sin contemplar las interacciones biológicas.

Los Impactos (I) están escasamente documentados. Se deberán investigar las enfermedades relacionadas con la contaminación hídrica, la fragmentación del territorio, las especies amenazadas y las potenciales invasoras. Se registran niveles de erosión hídrica de moderada a alta, una altísima impermeabilización urbana y rural, y únicamente la construcción de obras hídricas como mitigadoras de inundaciones.

Las Respuestas (R) son insuficientes. Falta contemplar la dimensión ambiental y a la población local en la toma de decisiones. Los Organismos

públicos a la GIRH son muchos y podrían estar descoordinados. Se observa un reemplazo del Comité de Cuenca por el del ECOM. Por otro lado, existe una visión común con eje en el ordenamiento territorial pero no es abordada, y donde tampoco está contemplado el monitoreo biológico.

La Ley Prov. N° 13.740 *Ley de aguas*, no es aplicada hasta el momento para la dimensión ambiental. Se destacan las Leyes Prov. N° 11.220 *Prestación y regulación de los servicios sanitarios*, la N° 11.730 *Régimen de bienes inundables* y la N° 13.246 *Estabilización de los aportes del Ludueña*, muy escasamente aplicadas y deficientes en materia ambiental.

Es muy deficiente el monitoreo ecológico y se desconocen sanciones ambientales de índole hídrica en la cuenca, conllevando a un alto grado de incertidumbre sobre el destino de los recursos hídricos.

En relación a la GIRH, la misma debe ser participativa, es decir que incluya a la población en la toma de decisiones ya que se trata de un bien colectivo.

Desde el área ambiental, se sugiere el esquema de restauración ecológica del sistema hídrico del Ludueña y sus humedales, con el abordaje en distritos de cotas topográficas altas y/o que posean nacientes de afluentes de aporte significativo al arroyo principal.

AGRADECIMIENTOS

A la Lic. Claudia Torres, al Ing. Agr. Javier Giampaoli, al Ing. Agr. Néstor Di Leo, al Ing. Agr. José Berardi, a la Ing. Civ. Ana Ma. Ingallinella, al Ing. Civ. (Dr.) Erik Zimmermann, a la Ing. Amb. Marina Santinelli, a la Lic. (Dra.) Ma. Florencia Gutiérrez, al Lic. (Mg.) Ricardo Biasatti, al Ing. Civ. Miguel Siryi, a la Lic. Violeta Di Doménica, a la Lic. Lara Cabrera, a la Lic. Bárbara Delgado, a la Ing. Agr. (Mg.) Verónica Anibalini, Macarena Vázquez y Nicolás Hudyma. Al Pte. Comunal de Zavalla (Guillermo Rajmil) y al Sec. de Planeam., Obras y Medioambiente de Roldán (Germán Wirsch).

REFERENCIAS

AEMA. (2006). Conjunto básico de indicadores de la

AEMA. Guía. España. Recuperado de <https://www.miteco.gob.es/>.

Aguirre, M. (2002). Los sistemas de indicadores ambientales y su papel en la información e integración del medioambiente. Recuperado de <http://www.ingenieroambiental.com/>.

Alzugaray, C., Feldman, S. R., Bueno, M. S., Müller, D., Sorti, D., Blumenfeld, A., y otros. (2016). *Introducción a los Recursos Naturales* (pp. 12-16). Cuaderno de Cátedra. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Rosario.

APN-FVSA. (2007). Las Áreas Protegidas de la Argentina. Herramienta superior para la conservación de nuestro patrimonio natural y cultural. Recuperado de <https://sib.gob.ar/>.

Auge, M. (2004). Hidrogeología Ambiental I. Recuperado de <http://sedici.unlp.edu.ar/>.

Auge, M. (2009). Hidrogeología de llanuras. Recuperado de <http://sedici.unlp.edu.ar/>.

Barros, V., Vera, C., Agosta, E., Araneo, D., Camilloni, I., Carril, A., y otros. (2015). Capítulo 5: Cambios Climáticos en la Región Húmeda. Cambio Climático en Argentina: tendencias y proyecciones. Recuperado de <http://3cn.cima.fcen.uba.ar>.

Biasatti, N. R., Rozzatti, J. C., Fandiño, B., Pautaso, A., Mosso, E., Marteleur, G., y otros. (2016). Las ecorregiones: su conservación y las áreas naturales protegidas de la provincia de Santa Fe. Recuperado de <https://www.santafe.gov.ar/>.

Biasatti, N. R., Marc, L., Rimoldi, P., Spiaggi, E. (2017). Los valores ambientales de ecosistemas relictuales en la pampa húmeda: caso de “El Espinillo” y el tramo medio del río Carcarañá en Santa Fe. Recuperado de <https://www.academia.edu/>.

Biasatti, N. R., Rimoldi, P., Cabrera, L. (2019). Desafíos de la Conservación Biológica en el Espinal y la Pampa Húmeda santafesina. Recuperado de <https://www.academia.edu/>.

Bragos, O., Latour, M., Mazzano, P., Ochoa, A. (2019). Expansión, suburbanización y dispersión en la región Metropolitana de Rosario. En Cicutti, B., González, E., Valderrama, A. M., (1era. Ed) *A&P Investigaciones. Perspectivas sobre el componente natural en el espacio urbano* (pp. 165-166). Rosario, Argentina: UNR Editora.

Cabrera, L. (2017). *Diversidad de mamíferos nativos medianos y grandes del corredor biológico AP-01 Rosario-Santa Fe*. Facultad de Ciencias Agrarias, Zavalla, Argentina.

Cap-Net. (2005). Planes de gestión integrada del recurso hídrico. Manual de capacitación y Guía operacional. Recuperado de <https://www.gwp.org/>.

Chesini, F. (2015). Enfermedades de origen hídrico:

- Nuevos escenarios debido a la variabilidad y el Cambio climático. Recuperado de <https://www.researchgate.net/>.
- Chesini, F., Brunstein, L., Perrone, M., Orman, M., Gazia, M. V., Gómez, A., y otros. (2019). Clima y Salud en la Argentina: Diagnóstico de Situación. 2018. Recuperado de <http://repositorio.smn.gob.ar/>.
- Denoia, J., Montico, S., Di Leo, N., Bonel, B. (S/f). Erosión hídrica actual y potencial en sistemas de producción de la cuenca del arroyo Ludueña, Santa Fe. Recuperado de <https://unr.edu.ar/>.
- Di Doménica, V. (2019). *Diversidad de murciélagos (Mammalia, Chiroptera) en áreas arboladas y cultivadas de la Facultad de Ciencias Agrarias, Zavalla, Santa Fe, Argentina*. Facultad de Ciencias Agrarias, Zavalla, Argentina.
- Di Leo, N., Montico, S., Berardi, J. (2020). Evaluación del potencial de erosión hídrica de tipo carcávica mediante Google Earth en la cuenca del arroyo Ludueña, Santa Fe. XIV Jornadas de Ciencias, Tecnologías e Innovación. CONICET. IICAR. UNR.
- Díaz, E., Romero, A., Ayala, J., Aranguren, J., Chacón, Y., Flores, M. A. (2012). GEO Cuencas: adaptación metódica para la evaluación ambiental integral. Recuperado de <http://servicio.bc.uc.edu.ve/>.
- Dourojeanni, A., Jouravlev, A., Chávez, G. (2002). Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica. Recuperado de <https://repositorio.cepal.org/>.
- ECOM. (2017). 26 estrategias locales para un plan metropolitano. Ibarlucea. Recuperado de <https://ecomrosario.gob.ar/>.
- ECOM. (2019). 26 estrategias locales para un plan metropolitano. Zavalla. Recuperado de <https://ecomrosario.gob.ar/>.
- Escobar, J. (2002). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. Recuperado de <https://archivo.cepal.org/>.
- Ferrelli, F., Brendel, A. S., Piccolo, M. C., Perillo, G. M. (2021). Evaluación de la tendencia de la precipitación en la región pampeana (Argentina) durante el período 1960-2018. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v51i0.69962/>.
- Fuschini Mejía, M. C. (1994). El agua en las llanuras. Recuperado de <https://unesdoc.unesco.org/>.
- Garay, D., Fernández, L. (2013). Biodiversidad Urbana. Apuntes para un sistema de Áreas verdes en la región metropolitana de Buenos Aires. Recuperado de <https://ediciones.ungs.edu.ar/>.
- Ghersa, C. M., León, R. J. (2002). Capítulo 6. Ecología del Paisaje Pampeano. Consideraciones para su manejo y conservación. En Naveh, Z., Lieberman, A. S., (1era. Ed.) *Ecología de Paisajes* (pp. 511). Buenos Aires, Argentina: Orientación Gráfica Editora S.R.L.
- González Arriagada, K. G. (2021). Aplicación de un modelo conceptual DPSIR para la gestión ambiental de lagos en la cuenca del Río Valdivia. Recuperado de <http://repositorio.udec.cl/>.
- Guttman Sterimberg, E., Zorro Sánchez, C., Cuervo de Forero, A., Ramírez, J. C. (2004). Diseño de un sistema de indicadores socio ambientales para el Distrito Capital de Bogotá. Recuperado de <https://repositorio.cepal.org/>.
- GWP. (2011). ¿Qué es la GIRH? Recuperado de <https://www.gwp.org/es/>.
- GWP. (2013). Guía para la aplicación de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) a nivel municipal. Recuperado de <https://www.gwp.org/>.
- IDESF. (2021). Visualizador. Recuperado de <https://www.santafe.gob.ar/idesf/visualizador/>.
- INDEC. (2010). Indicadores demográficos de la Argentina. Recuperado de <https://www.indec.gob.ar/>.
- IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Impactos Adaptación y vulnerabilidad. Capítulo 11. Salud Humana: impactos, adaptación y co-beneficios. Recuperado de <http://www.ipcc.ch/>.
- IPEC. (2019). Explotaciones y superficies agropecuarias. Censo Nacional Agropecuario 2018. Resultados preliminares. Noviembre de 2019. Oleaginosas. Recuperado de <http://www.estadisticasantafe.gob.ar/>.
- Jobbágy, E. G. (2011). Capítulo 7. Servicios hídricos de los ecosistemas y su relación con el uso de la tierra en la llanura Chaco-Pampeana. Recuperado de <https://inta.gob.ar/>.
- Kandus, P., Quintana, R. D., Minotti, P. G., Oddi, J. P., Baigún, C., González Trilla, G., Ceballos, D. (2011). Ecosistemas de humedal y una perspectiva hidrogeomórfica como marco para la valoración ecológica de sus bienes y servicios. Recuperado de <https://inta.gob.ar/>.
- Kruse, E., Zimmermann, E. D. (2002). Hidrogeología de grandes llanuras. Particularidades en la llanura pampeana (Argentina). Recuperado de <https://www.fceia.unr.edu.ar/>.
- Maguna, M. E., Montico, S. (2013). Capítulo IV. Política y Ordenamiento Territorial en Santa Fe. En (1era Ed.) *Los planes de ordenamiento: una herramienta clave para la transformación del territorio* (pp. 58-68). Rosario, Argentina: Colegio de Ingenieros Agrónomos II Circunscripción.
- MAHySF. (s/f). Control de Crecidas del Sistema

- Hídrico Arroyo Ludueña. Ejecución de la embocadura del a° Ludueña y obras de arte sobre el a° Ludueña, Ibarlucea y Salvat, y ejecución de canalizaciones parciales. Recuperado de <https://www.santafe.gov.ar/>.
- Manavella R. J. (2017). Plan Manejo Hídrico Roldán. Informe Final. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/>.
- Martín, L., Justo, J. B. (2015). Análisis, prevención y resolución de conflictos por el agua en América Latina y el Caribe. Recuperado de <https://www.cepal.org/>.
- Martínez Bilesio, A. R. (2018). Herramientas Quimiométricas para analizar conjuntamente datos de orden cero, primero y segundo aplicadas a bases de datos de monitoreo ambiental. Recuperado de <http://hdl.handle.net/>.
- Martínez Bilesio, A. R., Batistelli, M., García-Reiriz, A. G. (2019). Fusing data of different orders for environmental monitoring. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.08.005/>.
- McJunkin F. E. (1988). Agua y salud humana. Recuperado de <https://www.iris.paho.org/>.
- Ministerio de Desarrollo Social. (2022). Registro Nacional de Barrios Populares (ReNaBaP). Mapa de Barrios Populares. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/>.
- Molina F. A. S. (2013). Gestión Integrada de la subcuenca del arroyo León-Hondo en el occidente del suelo urbano del distrito de Barranquilla, Colombia. Recuperado de <https://www.researchgate.net/>.
- Montico, S. (2004). El manejo del agua en el sector rural de la región Pampeana argentina. Recuperado de <http://revista-theomai.unq.edu.ar/>.
- Montico, S. (2011). Cuestiones asociadas a la gestión del agua en el sector rural de la región pampeana norte. En *Estudios sociales del riego en la agricultura argentina* (pp. 197-211). CABA, Argentina: Ediciones INTA.
- Montico, S., Di Leo, N. (2015). Riesgo ambiental por pesticidas en una cuenca al sur de la provincia de Santa Fe, Argentina. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/>.
- Montico, S., Di Leo, N. (2021). Risk of contamination of phreatic aquifer with pesticides in the basin of Ludueña stream, Argentina. Recuperado de <https://www.researchgate.net/>.
- Montico, S., Pouey, N. (2001). *Cuencas rurales. Pautas y criterios para su ordenamiento* (pp. 167). Santa Fe, Argentina: Ed. U.N.R.
- Montico, S., Di Leo, N., Bonel, B., Denoia, J. (2017). Riesgo ambiental por el uso de fitosanitarios en cultivos anuales de la cuenca del arroyo Ludueña, Santa Fe. Recuperado de <https://rephip.unr.edu.ar/>.
- Montico, S., Bonel, B., Di Leo, N., Denoia, J. (2020). La cuenca del arroyo Ludueña (Santa Fe): un ambiente complejo y con múltiples impactos ambientales. Recuperado de <https://cei.unr.edu.ar/>.
- Montico, S., Di Leo, N., Bonel, B., Denoia, J. (2019). Cambios del uso de la tierra en la cuenca del arroyo Ludueña, Santa Fe: Impacto en la sostenibilidad y en los servicios ecosistémicos. Recuperado de <https://cuadernosdelcuriham.unr.edu.ar/>.
- Morello, J., Matteucci, S. D., Rodríguez, A. F., Silva, M., de Haro, J. C. (2012). Ecorregiones y Complejos Ecosistémicos Argentinos. Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. Recuperado de <https://www.researchgate.net/>.
- Mosconi Frey, C. M. (2018). Figuras de protección urbano-rural. Aportes para la interpretación de áreas periurbanas inundables: el caso de Nuevo Alberdi Oeste Rural, Rosario- Argentina. Recuperado de <http://repositorio.ucv.cl/>.
- MPyTN. (2019). Plan de Gestión Integrada de Riesgos en el Sector Agropecuario de la Provincia de Santa Fe (GIRSAR). Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/>.
- OCDE. (1993). OECD Core Set of Indicators for Environmental Performance Reviews. A synthesis report by the group on the State of the Environment. Recuperado de <http://www.oecd.org/>.
- OECD. (2020). Gobernanza del agua en Argentina. Recuperado de <https://www.oecd-ilibrary.org/>.
- Ordóñez Gálvez, J. J. (2011). ¿Qué es una cuenca hidrológica? Cartilla Técnica. Contribuyendo al desarrollo de una cultura del agua y la gestión integral del recurso hídrico. Recuperado de <https://www.academia.edu/>.
- Paruelo, J. M., Guerschman, J. P., Verón, S. R. (2005). Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Revista Ciencia Hoy*. 15(87):14-23.
- PNUMA. (2002). Metodología para la elaboración de informes Geo Ciudades. Manual de Aplicación. Recuperado de <http://www.pnuma.org/>.
- PNUMA. (2009). Manual de Capacitación para Evaluaciones Ambientales Integrales y elaboración de informes. Winnipeg, Manitoba. Recuperado de <http://www.pnuma.org/>.
- Polanco, C. (2006). Indicadores ambientales y modelos internacionales para toma de decisiones. Gestión y Ambiente. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. Colombia. Recuperado de <https://www.redalyc.org/>.
- Porto, D., Basso, L., Strohaecker, T. (2019). Diagnóstico ambiental da bacia hidrográfica do Rio Mampituba, Região sul do Brasil, utilizando a matriz FPEIR. Geosul, Florianópolis.

- <http://doi.org/10.5007/1982-5153.2019v34n72p28/>.
- Pouey, N. (2008). Geo Área Metropolitana Rosario: perspectivas del medio ambiente urbano. Recuperado de <http://www.pnuma.org/>.
- Quiroga Martínez, R. (2009). Guía Metodológica para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible en países de América Latina y el Caribe. Recuperado de <https://www.cepal.org/>.
- Sarandón, S. J., Flores, C. C. (2014). Agroecología: Bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables. Recuperado de <http://sedici.unlp.edu.ar/>.
- SaYDS. 2019. Informe Nacional Ambiente y Áreas Protegidas de la Argentina 2008-2018. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/>.
- Tufo, A. E., Graziano, M., Almada, P. S., Curuchet, G., Lombardo, R., dos Santos Afonso, M. (2015). Niveles de metales en aguas y sedimentos superficiales de la cuenca inferior del río Paraná. Recuperado de <http://www.sacyta.com.ar/>.
- Uribe Botero, E. (2015). El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina. Recuperado de <https://repositorio.cepal.org/>.
- Vera, C. (2016). Tendencias del clima en la Argentina. Recuperado de <https://cienciahoy.org.ar/>.
- Vitta, J., Fernández, J., Guillen, M., Romano, M., Spiaggi, E., Montico, S. (2001). La visión del desarrollo sustentable en el agro de nuestra región: bases para la discusión. *Revista Ambiental UNR* 4(4):24-47.
- Volpedo, A. V., Fernández Cirelli, A. (2011). Aplicación del Modelo GEO (FMPEIR) a los ecosistemas acuáticos pampeanos (Argentina). Experiencias en la aplicación del enfoque GEO en la evaluación de ecosistemas degradados de Iberoamérica. Recuperado de <https://ri.conicet.gov.ar/>.
- WWAP. (2018). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. Soluciones basadas en la Naturaleza para la Gestión del Agua. Recuperado de <https://unesdoc.unesco.org/>.
- Zimmermann, E. D., Bracalenti, L. (2019). Suelo y su cobertura vegetal como retardador del escurrimiento superficial. En Cicutti, B., González, E., Valderrama, A. M., (1era. Ed.) *A&P Investigaciones. Perspectivas sobre el componente natural en el espacio urbano* (pp. 54-55). Rosario, Argentina: UNR Editora.
- Zimmermann, E. D., Basile, P.A., Riccardi, G. A. (2001). Análisis de la modificación en la respuesta hidrológica del sistema arroyo Ludueña provocados por cambios de uso del suelo. Recuperado de <https://www.fceia.unr.edu.ar/>.

Tipo de Publicación: ARTICULO.

Trabajo recibido el 29/12/2022, aprobado para su publicación el 09/03/2023 y publicado el 11/04/2023.

COMO CITAR

Martin, L. y Montico, S. (2023) Diseño de un sistema de indicadores para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) en la cuenca del arroyo Ludueña, Santa Fe. *Cuadernos del CURIHAM*, 29:e190. <https://doi.org/10.35305/curiham.v29i.190>

ROLES DE AUTORÍA

LM y SM contribuyeron a la conceptualización, la metodología y al análisis formal. LM contribuyó a la investigación, la redacción y la visualización. SM contribuyó a la supervisión y la edición del artículo. La autora y el autor aprobaron la versión para ser publicada y son capaces de responder respecto a todos los aspectos del manuscrito.

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



MULTI-TEMPORAL FLOOD MAPPING AND FARM FLOOD PREVENTION STRATEGIES IN AN AGRICULTURALLY DOMINATED WATERSHED OF ARGENTINA

CARTOGRAFÍA MULTITEMPORAL Y ESTRATEGIAS PARA LA PREVENCIÓN DE INUNDACIONES EN UNA CUENCA CON PREDOMINIO AGRÍCOLA DE ARGENTINA

María Ximena Solana ⁽¹⁾, Asunción Romanelli ⁽²⁾ y Orlando Mauricio Quiroz Londoño ⁽³⁾

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales; e Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario, Universidad Nacional de Mar del Plata – Comisión de Investigaciones Científicas Provincia de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Mar del Plata, Argentina.

⁽¹⁾ e-mail: ximenasolana@mdp.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4575-6990>

⁽²⁾ e-mail: aromanel@mdp.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9003-396X>

⁽³⁾ e-mail: qlondono@mdp.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2817-9570>

ABSTRACT

This study presents a semi-automated approach for mapping the extent and frequency of floods in agriculturally dominated river watersheds, using the Quequén Grande River watershed as a case study. By the combination of normalized difference indices computed from Landsat imagery and the application of Otsu's thresholding method in Google Earth Engine (GEE) environment, two flood categories were defined: Open Flood Surfaces (OFS) and Flooded Vegetation (FV). The analysis of historical flood frequency allowed the proposal of flood prevention strategies to be implemented in each defined flood frequency class, which is essential for flood mitigation in agriculturally dominated river watersheds.

Keywords: Google Earth Engine, Landsat Imagery, Spectral Indices, Flood Mapping, Flood Prevention Strategies.

RESUMEN

En este estudio se propone un método semiautomático para la cartografía de la extensión y frecuencia de las inundaciones en una cuenca hidrográfica con predominio agrícola, seleccionándose la cuenca del Río Quequén Grande como caso de estudio. Mediante la combinación de índices diferenciales normalizados calculados a partir de imágenes Landsat y la aplicación del método de umbralización desarrollado por Otsu en el entorno de Google Earth Engine (GEE), se definieron dos categorías para las inundaciones: superficies de inundación abiertas (OFS) y vegetación inundada (FV). El análisis de la frecuencia histórica de las inundaciones permitió la propuesta de estrategias de prevención a las inundaciones dirigidas a ser implementadas en cada clase de frecuencia de inundación definida, siendo esencial para la mitigación de inundaciones en cuencas hidrográficas con predominio agrícola.

Palabras clave: Google Earth Engine, Imágenes Landsat, Índices Espectrales, Cartografía de inundaciones, Estrategias de Prevención a la Inundación.

INTRODUCTION

Flooding is an extended natural hazard that affects the society of different parts of the world, and it is considered the most recurring and devastating problem from its impact on the economic and social conditions of human lives (Alderman et al., 2012; Wannous & Velasquez, 2017). The influence of human activity also enhances the severity and consequences of flooding events, which are generated by the arbitrary coincidence of different meteorological factors (Feloni et al., 2019). Global climatic change, land-use changes, and accelerated urbanization are intensifying flood events worldwide, independently of their topographic and meteorological context (Dash & Sar, 2020; Detrembleur et al., 2015; Du et al., 2015).

Predicting the potential flood inundation extent (*i.e.*, identifying areas susceptible to flooding) of heavy rainfall events is critical, particularly in developing countries where the effects of floods are severely felt (Dash & Sar, 2020). However, in most of these countries, the accessibility of flood inundation extent maps is scarce, and those existing are outdated and have a low spatio-temporal resolution (Mehmood et al., 2021). In Latin America and the Caribbean region (LAC) floods are the most common disaster, with 548 floods occurring since 2000 (UN-OCHA, 2020). Here, the intensification of flood consequences is expected due to several socio-economic and political factors such as inefficient public policies, infrastructural problems, poverty persistence, ineffective emergency response to flooding events, unregulated and exponential urbanization of floodplains, anthropogenic degradation of catchments, and the lack of flood data (Sandoval & Sarmiento, 2020; UN-OCHA, 2020).

Over the last decade, there has been a proliferation of Earth Observations (EO) data. The global open data access from operational satellites like the Landsat series, together with important advances in cloud computing, have made possible the cartography of inundation over increasingly larger scales (DeVries et al., 2020; Hawker et al., 2020; Mehmood et al., 2021), and at relatively high spatio-temporal resolution (Wulder & Coops, 2014). Particularly, the cloud-based platform Google Earth Engine (GEE) stands out. It was introduced by Google Inc. for planetary-scale geospatial analysis and provides free access to high-performance computing resources, allowing the processing of extensive geospatial datasets (Gorelick et al., 2017).

The development of this tool represents a great opportunity for effective flood response interventions and management plans, especially in under-resourced regions of the world with a lack of information (Hawker et al., 2020). In the case of flood inundation extent maps developed from satellite imagery, the creation of several algorithms has been produced by different institutions such as universities, space agencies, or companies directed to disaster recovery and response (DeVries et al., 2020; Hawker et al., 2020; Mehmood et al., 2021; Policelli et al., 2017). Specifically, for the Global South, most of the flood-related research including the use of GEE for flood extent identification is associated with South Asia (Kumar et al., 2022; Lal et al., 2020; Pandey et al., 2022; Vanama et al., 2020), with very few studies in LAC countries (Mora et al., 2021; Tellman et al., 2021).

In Argentina, extreme precipitation events causing floods and droughts lead to the country's natural hazard risk profile. Floods have been responsible for causing important economic losses since 1980, with an average of US \$ 1 billion annually (World Bank, 2021), and these losses could increase by 125% due to climate change. Recently, historical increases in the frequency of flooding linked to severe rainfall events highlighted the need for improved risk management strategies. This behavior can be partially attributed to higher average precipitation, land-use changes, and water table rising (Rozenberg et al., 2021). In the case of very flat and poorly drained landscapes, the rise in water tables causes floods linked to increased water storage, and after reaching high levels water losses occur as liquid water outflows, in addition to an increased evaporation rate (Fan et al., 2013; Kuppel et al., 2015).

The Argentine Pampa region (east-central of the country), is a subhumid aeolian plain that encompasses the most populated and productive sector of the country. Here, an alternation of non-flooded and flooding cycles occurs and describes the ephemeral nature of surface water coverage (Houspanossian et al., 2018), which makes this region highly relevant for implementing flood mapping techniques. During large episodic flood events, an important fraction of the sedimentary Pampean Plain is covered by water for months or even years, on account of low horizontal water transport caused by the low surface runoff and the slowness of groundwater flow (Aragón et al., 2011). The hydrological conditions of these very flat

regions must be considered carefully when land management strategies are implemented (Kuppel et al., 2015), especially because there is an expected intensification of farming at such arable lands since global food demand and trade are increasing (Paruelo et al., 2005).

This article presents a semi-automatic methodology for mapping the spatial extent and frequency of flooding in agriculturally dominated plain environments. Based on spectral indices computed at the GEE platform, our approach aims to generate historical flood frequency maps from past flood events that occurred between 2000 and 2020. Additionally, the proposed approach gives some advances in the detection and extraction not only of open flood surfaces but also of flooded areas underneath vegetation (*i.e.*, flooded vegetation), which is of particular importance for flood monitoring and assessment. By conducting a comprehensive multi-temporal assessment of floods in an agriculturally dominated watershed, we sought to achieve the following results: i) identify areas with a history of frequent flooding, providing critical information to authorities and farmers regarding the flood-prone regions within the area, and ii) enable action guidelines for private landowners and agricultural producers to reduce the extent and impact of flood-related damage.

STUDY AREA

To analyze the usefulness of the generated algorithm, a representative plain river watershed of the Pampa Region is proposed as a case study. The Quequén Grande River Watershed (QGRW) is an extensive river catchment located in an agricultural-livestock area of great economic importance for the country, with several small and medium-sized cities. Towards the southwest of the Tandilia Range System (TS), the origin of the Quequén Grande River (QGR) is marked by an undulating plain with a dominant northwest-southeast slope called “Pampa de Juárez”, and flows to the southeast across the Pampean Plain, reaching the Atlantic Ocean near Necochea city (Campo de Ferreras & Piccolo, 1999). Tributaries of this main water course are small streams developed almost exclusively from its right bank (Marini & Piccolo, 2005). From the hydrological point of view, this catchment belongs to a temperate climate zone where the mean annual precipitation in the basin is about 800 mm. However, the area is characterized by climatic

oscillations and instabilities, with a history of both floods and drought periods.

The QGRW comprises six geomorphological units, *i.e.*, ranges, perirange aeolian hills, relic hills, alluvial plain, poor drainage alluvial plain, and hills with shallow lakes (Teruggi et al., 2005) (Figure 1). Here, agriculture predominates over livestock farming, especially through the cultivation of wheat, natural pastures, and winter fodder cereals (Campo de Ferreras & Piccolo, 1999). The QGRW covers a surface of about 11000 km² and most of it consists of an essentially flat plain with a topographic average gradient of 0.03 (Teruggi et al., 2005). In the north part of the catchment area, a small sector is taken up by low-relief ranges (maximum elevation = 510 m a.s.l.) corresponding to the TS.

Hydrogeologically, the loess sediments of the Pampean Plain constitute an aquifer of great importance for the country, ranging between 70 - 100 m in thickness. This hydrogeological sequence represents an unconfined, shallow, and multi-layer aquifer, with permeability changes caused by subtle grain size and clay content variations (Martínez & Bocanegra, 2002). Groundwater recharge of this area is attributed mainly to precipitation, with groundwater discharge occurring towards the Atlantic Ocean, the surface drainage network (*i.e.*, rivers and streams), and the shallow lakes located at the southwestern limit of the QGRW. Here, a hydraulic barrier to the Pampean Aquifer has been proposed in-depth acting as a regional discharge area (Solana et al., 2021a). Rivers and streams are primarily effluents along their course, with south and/or southeast direction usually aligned to the groundwater flow path. For the QGR, a base-flow estimation of 70-90% was obtained (Martínez et al., 2010).

MATERIALS AND METHODS

The proposed flood mapping code was developed in the GEE JavaScript API. This algorithm generates a stack of spatially overlapped pixels classified as water/non-water corresponding to the rainiest years between 2000 and 2020. Surface water changes were analyzed at the GEE platform by processing freely-available Surface Reflectance (SR) cloud products of Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, and Landsat 8 OLI/TIRS imagery. To exclude permanent water bodies from flooded areas, the driest year of this period was also analyzed, and permanent water

bodies (*i.e.*, rivers, streams, and shallow lakes) were masked. Water detection was achieved by the combination of two normalized difference indices: the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI; Xu, 2006) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI; Tucker, 1979). Then, Above-Ground Water Presence Frequency (AWPF) maps were obtained following Borro et al. (2014). The proposed code consists of five steps: (1) free

data selection from cloud servers, (2) pre-processing of Landsat imagery, (3) normalized difference indices computation and dynamic segmentation, (4) water detection, (5) multi-temporal flood analysis, and (6) mapping of flooding frequency. The methodological framework is shown in Figure 2. The generated GEE JavaScript codes for multi-temporal flood analysis and mapping of flooding frequency are provided in *Data Availability*.

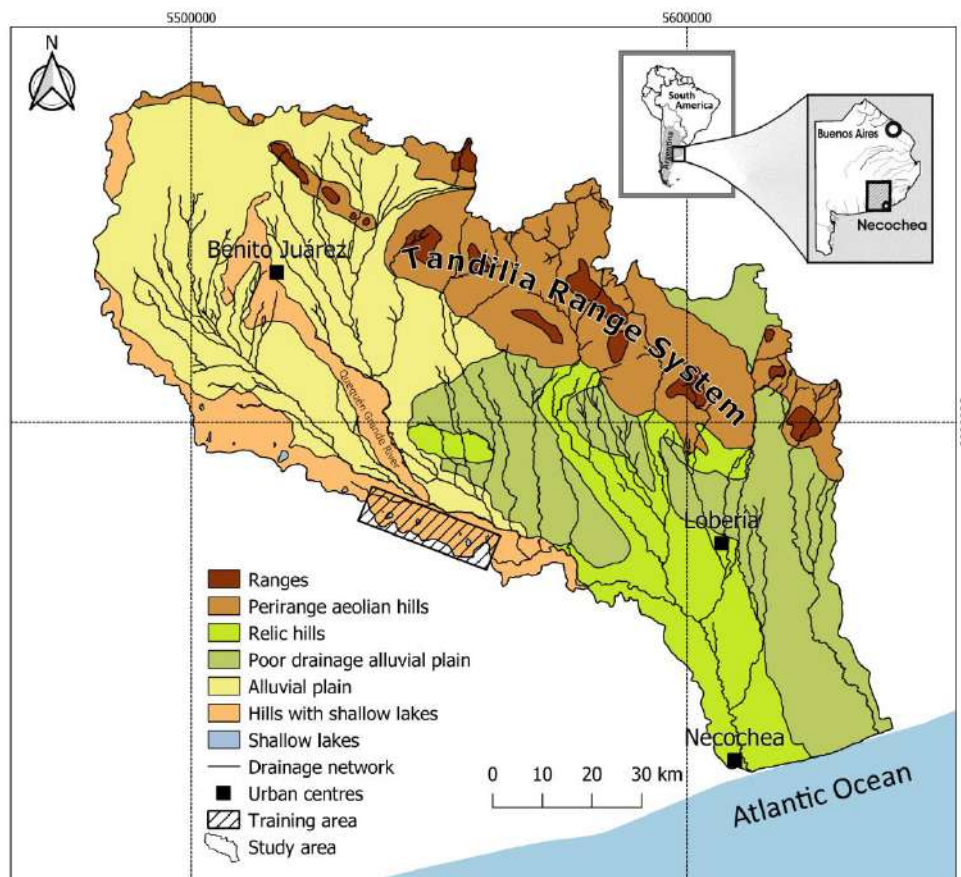


Figure 1: Location and geomorphologic units of the study area.

Data selection

To evaluate rainfall trends in the study area, precipitation data from the last 60 years were reviewed. Time series of daily rainfall data (mm/day) within the influence area of the QGRW were extracted from national and local weather stations (National Institute of Agricultural Technology-INTA, Meteorological National Service-SMN, National University of Mar del Plata-UNMdP). All rainfall time series from the period were analyzed and processed to obtain both a

monthly mean value and an annual total value per year. Finally, those years between 2000 and 2020 with annual rainfall values reaching one standard deviation above the mean precipitation value of the last 60 years were selected as target years for flooding mapping. Additionally, the driest year of this period (*i.e.*, 2009) was selected for the generation of an exclusion mask of permanent water bodies from flooded areas. Regarding remote sensing data, SR cloud products from Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, and Landsat 8 OLI/TIRS were selected from the Earth Engine Data Catalog.

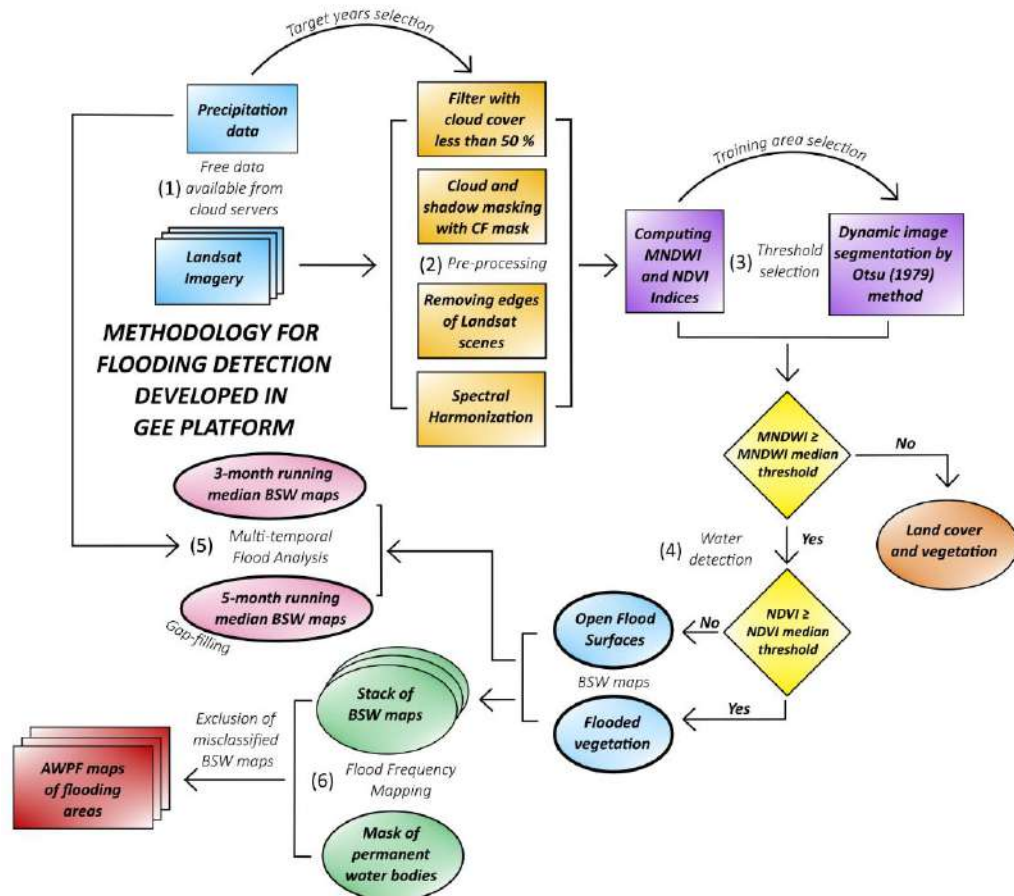


Figure 2: Schematic workflow of the flood extension and frequency mapping, developed in the GEE environment. Each of the six steps is indicated by parentheses.

Pre-processing of Landsat imagery

Landsat satellite imagery was initially filtered by a cloud cover of less than 50%. Then, shadow and cloud masking were performed using the pixel quality assurance band (qa) with the C Function of Mask (CFMask) algorithm. The CFMask series of algorithms are recommended for the operational detection of clouds and cloud shadows at the Landsat series, as they are based on a previous understanding of such physical phenomena and can be implemented with no geographical restrictions (Foga et al., 2017). Additionally, scene edges of all datasets were removed by clipping a buffer of 500 m inward as a way to exclude no-data pixels such as abnormalities along Landsat 5 scene edges (Robinson et al., 2017). Spectral characteristics of Landsat datasets were also harmonized by a linear transformation of OLI to TM /ETM+ spectral space

following Roy et al. (2016), in order to improve temporal continuity between sensors.

Normalized difference indices computation and dynamic segmentation

The two normalized difference indices selected for water detection were computed by the following equations:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

Where *NIR*: near-infrared band and *R*: red band.

$$MNDWI = \frac{G - SWIR}{G + SWIR} \quad (2)$$

Where *G*: green band and *SWIR*: short-wave infrared band.

The segmentation threshold of each index was estimated by the Otsu (1979) method for a training area where differences between land, vegetation, and water can be easily distinguished. This dynamic method was selected since it automatically selects a threshold from two mixed distributions through the density histogram, which eliminates the bias caused by arbitrary thresholding methods. For the selected time-lapse collection, median threshold values were determined because they represent points where the sums of the distances from the representative points of the sample are a minimum (Haldane, 1948). Once obtained, NDVI and MNDWI median thresholds were applied to the entire study area.

Water detection

By the calculation [equations (1) and (2)] and combination of the selected indices, more accurately flooded surface detection was achieved. Firstly, pixels with MNDWI values above the median threshold were identified as water. Then, an additional filter with NDVI values was applied to the pixel selection of MNDWI for each Landsat scene, in order to discern between open water surfaces and flooded vegetation. The proposed sub-selection was based on the NDVI response to inundation since areas adapted to flood pulses are highly responsive, showing increases and peaks in NDVI values (Powell et al., 2014). Finally, two categories were defined as follows:

- a. Open Flood Surfaces (OFS): represented by pixels with MNDWI values above the median threshold and NDVI values below the median threshold. This category corresponds mainly to wetlands, ponds, rivers, streams, and open water surfaces.
- b. Flooded vegetation (FV): represented by pixels with MNDWI and NDVI values above median thresholds. In the scope of this paper, the term FV describes the temporary or permanent occurrence of a water surface beneath vegetated areas (Tsyganskaya et al., 2018). It corresponds to wetland vegetated areas, floodplains, and surrounding stream areas covered by water during inundation events.

Flooding evolution analysis

After OFS and FV detection of the selected Landsat scenes, Binary Surface Water (BSW) maps

corresponding to each category were obtained. Multi-temporal flood analysis was performed quarterly by running time-lapse collections of Landsat images and computing median BSW maps, since almost all the pixels of the QGRW surface were covered successfully after cloud masking (QGRW surface covered accuracy of about 99%). The selection of the quarterly multi-temporal flood analysis was based on the accuracy of the proposed algorithm at different time-lapse windows (*i.e.*, monthly, bimonthly, and quarterly). To achieve better results, a cut-off tolerance threshold value of 1 was set, *i.e.*, the total number of flooding maps obtained for the QGRW with a surface-covered accuracy lower than 80%, which was obtained quarterly. Additionally, pixels with no data values were filled by median BSW values of an additional 5-month running time-lapse collection of Landsat images.

Mapping of flooding frequency

Annual flooding frequency was analyzed in each pixel of the QGRW using the entire Landsat collection of the target years. The applied methodology was based on the procedure defined by Borro et al. (2014), which is defined by the following equation:

$$AWPF_{sj} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} BSW_{ij}}{N_s} \quad (3)$$

Where $AWPF_{sj}$ represents the above ground water presence frequency value of the pixel j for the set s and corresponds to the ratio of images i with BSW equal to 1 in the pixel j (BSW_{ij}) of the total number of images in the analyzed set (N_s). As a result, $AWPF$ maps describing the water permanence degree in each pixel were obtained, ranging from 0 (pixels equal to 0 in all BSW maps) to 1 (pixels equal to 1 in all BSW maps). This methodology was successfully applied by Solana et al. (2021b) for the water frequency classification of shallow lakes located in the southwestern limit of the QGRW.

To exclude permanent water bodies from flood mapping, an exclusion mask was generated by the flooding frequency analysis of the driest year of this period (*i.e.*, 2009). Only the pixels labeled as permanent water (*i.e.*, $AWPF$ pixels equal to 1 obtained for the driest year) have been included in the reference water mask. In every pixel of the watershed, each flood category (*i.e.*, Open Flood Surfaces -OFS- and Flooded Vegetation -FV-) was classified according to the relative frequency of occurrence of

the flooded area. For this purpose, five flood frequency classes were defined: *Very Low* ($AWPF < 20\%$), *Low* ($20\% \leq AWPF < 40\%$), *Moderate* ($40\% \leq AWPF < 60\%$), *High* ($60\% \leq AWPF < 80\%$), and *Very High* ($AWPF \geq 80\%$), taking as a reference the total number of handled images. Here, the exclusion of some BSW maps from the GEE code was required, since some Landsat scenes were affected by satellite malfunctions, and cloud shadows are not always successfully removed by the CFMask algorithm. However, excluded Landsat scenes from data processing only represented a small portion (12%) of the evaluated dataset (619 images). Satellite data distortion problems such as data loss are widely described on USGS official website (United State Geological Survey [USGS], access date 08/05/2023).

Finally, historical flood frequency maps were generated by combining all annual datasets of OFS and FV categories, and classified according to the relative flood frequency previously defined following Borro et al. (2014). Subsequently, a set of flood prevention strategies was proposed for each specific frequency class. These recommended measures are intended to assist farmers and landowners in reducing flood-related damages on farmlands and agricultural landscapes,

safeguarding agricultural productivity and minimizing potential losses.

RESULTS

Rainfall analysis

Annual and monthly average values of precipitation data are shown in Figure 3. In the case of total annual precipitation, a mean value of 858 mm was obtained for the last 60 years, showing a clear increasing tendency. In the case of monthly rainfall averages, the mean value reached 74 mm, but the increasing tendency was less clear. The greatest annual rainfall averages with values reaching one standard deviation (*i.e.*, 161.4 mm) above mean precipitation were obtained for 5 years. For those years, variations between monthly average values and mean precipitation of each month registered during the last 60 years showed, in most cases, average rainfall values above mean monthly precipitation (Figure 3). This behavior was especially noticed during the second half of the year. Moreover, four of the greatest annual rainfall years showed similar rainfall averages in August, with a subsequent decrease in September and a substantial increase in October and November.

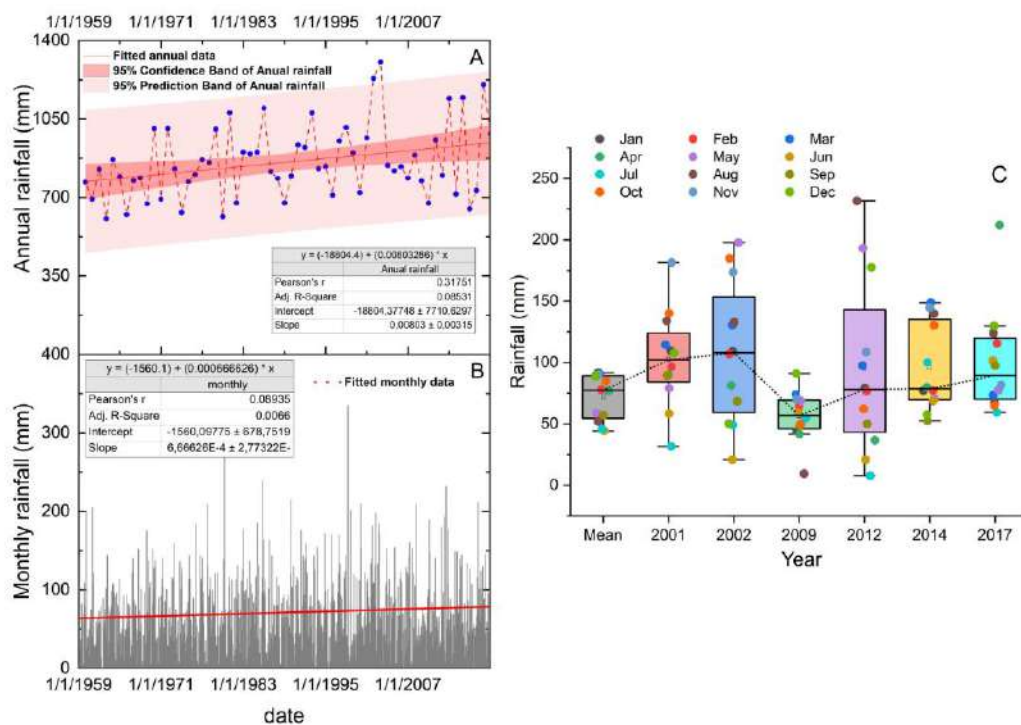


Figure 3: A) Annual and B) Monthly rainfall values between 1959 and 2020 for the study area. C) Box plots of monthly rainfall amounts in the target years of the study and mean rainfall values for the period 1959-2020.

Changes in accumulated rainfall and flooded extension

Comparisons between quarterly accumulated precipitation (mm), open flood surfaces (km^2), and flooded vegetation (km^2) of the target years are shown in Figure 4. Results indicated water and flooded vegetation increase during the cold months of the winter (JJA, JAS), which can be attributed to the descent of evapotranspiration. In the case of precipitation, an increase is observed during the summer season, being the general tendency for the study area. Furthermore, results obtained for the driest year of the selected time-lapse window (2009) can be attributed to the permanent water bodies of

the QGRW, since flooded vegetation areas were almost absent.

The extreme values of obtained Otsu's median thresholds, the number of Landsat images used, and the percentages of QGRW surface covered accuracy obtained at the multi-temporal flood analysis, are shown in Table 1. In the case of the 3-month running time-lapse analysis, accuracy was defined as the percentage of the total study area covered by the handled quarterly Landsat collection, which was improved by the proposed gap-filling method of an additional 5-month running time-lapse collection, reaching values closer to 100% of accuracy.

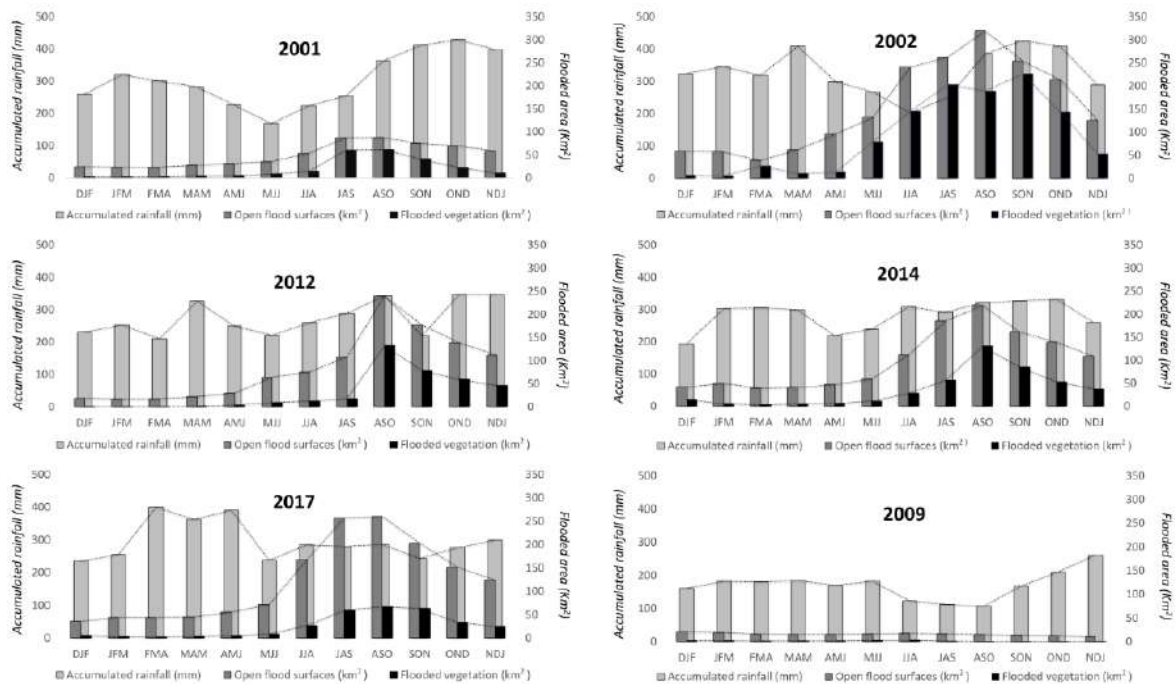


Figure 4: Accumulated rainfall (mm), open flood surfaces extension (km^2), and flooded vegetation (km^2) of the target years, expressed quarterly.

Table 1. Extreme values of Otsu's median thresholds, number of Landsat images, and percentages of accuracy obtained at the multi-temporal flood analysis for each year.

Year	Otsu's MNDWI		Otsu's NDVI		Quarterly Landsat		3-month		Final	
	median thresholds		median thresholds		Collections (#)		accuracy (%)		accuracy (%)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2001	-0.0393	0.0385	0.4139	0.4609	17	36	99.54	100.00	99.99	100.00
2002	-0.1175	0.0077	0.2733	0.5078	13	32	54.44	100.00	88.41	100.00
2009	-0.1020	-0.0073	0.3671	0.4766	8	39	51.24	100.00	99.34	100.00
2012	-0.1487	-0.0375	0.3356	0.5391	11	23	97.63	100.00	99.58	100.00
2014	-0.2577	-0.1794	0.3633	0.5391	21	45	99.98	100.00	99.99	100.00
2017	-0.2384	-0.1990	0.3633	0.5352	26	36	99.98	100.00	99.99	100.00

Annual flood frequency maps

AWPF maps of the selected years corresponding to OFS and FV frequency are shown in Figure 5. In the case of 2002, obtained results showed the maximum flooding extension (1398.84 km^2), being specially noticed in the flooded vegetation category (802.21 km^2). This was also observed in Figure 4, where the FV of 2002 showed an important increase, especially during the autumn season. Moreover, FV areas were located primarily at the floodplains of rivers and streams placed at the alluvial plain, which suggests an overflow caused by soil water surplus

generated in 2001, when soil water storage capacity reached its limit of absorption and storage capacity (Quiroz Londoño et al., 2013; Scarpatti & Capriolo, 2013). In the case of 2014, the OFS total extension (653.74 km^2) was greater than the FV category (297.22 km^2). In regards to the driest year of the selected time-lapse window (2009), water corresponded primarily to permanent shallow lakes (8.51 km^2), and FV (13.48 km^2) was linked to the OFS (58.18 km^2) or some isolated croplands with a very low flooding frequency. Flooding extension areas of each category of annual AWPF maps are shown in Table 2.

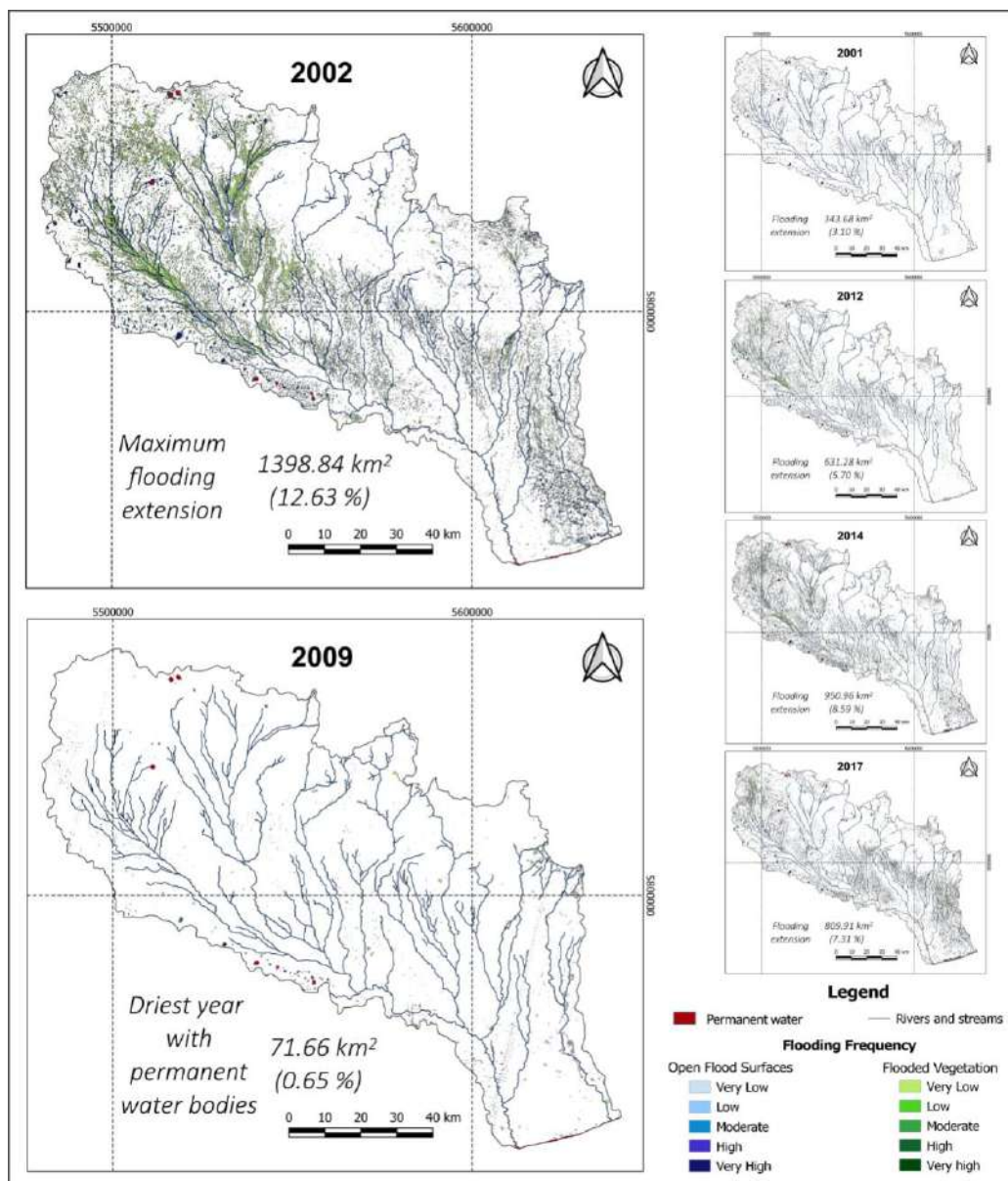


Figure 5: Flooding frequency in the QGRW obtained from Landsat imagery at the GEE platform for the selected years.

Table 2. Flooding extension of the OFS and FV categories obtained for the QGRW from AWPf maps shown in Figure 5.

Year	Flooding Surfaces(km ²)										Handled Landsat		Otsu's median thresholds	
	Open Flood Surfaces					Flooded Vegetation					Images (#)		MNDWI	NDVI
	Very Low	Low	Mode-rate	High	Very High	Very Low	Low	Mode-rate	High	Very High	Used	Excluded		
2001	216.4	24.4	6.0	4.7	19.8	70.7	1.6	0.02	-	-	94	10	0.0071	0.4610
2002	439.5	71.4	38.0	16.5	31.2	732.7	62.7	5.1	0.92	0.70	75	6	-0.0708	0.2735
2009	39.7	3.5	1.6	2.1	11.2	13.3	0.1	-	0.02	-	83	31	-0.0714	0.4141
2012	217.3	82.5	46.5	10.1	16.7	238.4	19.0	0.8	0.04	-	62	5	-0.1327	0.4299
2014	492.2	88.5	31.5	11.7	29.8	293.8	3.1	0.3	0.02	-	119	10	-0.2110	0.4414
2017	359.2	84.4	52.0	32.4	17.1	256.8	7.2	0.7	0.1	0.03	106	18	-0.2304	0.4336

Final flood frequency maps

AWPF final maps corresponding to OFS and FV categories are shown in Figure 6. For the OFS category, all flooding frequencies were identified in the final map, reaching a total area of 1116.18 km²

and corresponding mainly to wetlands and ponds. In the case of FV, flooded areas were identified with *Very Low*, *Low* and *Moderate* frequencies of flooding, reaching a total area of 1520.29 km² located mainly at the floodplains of rivers and streams.

Flooding Frequency

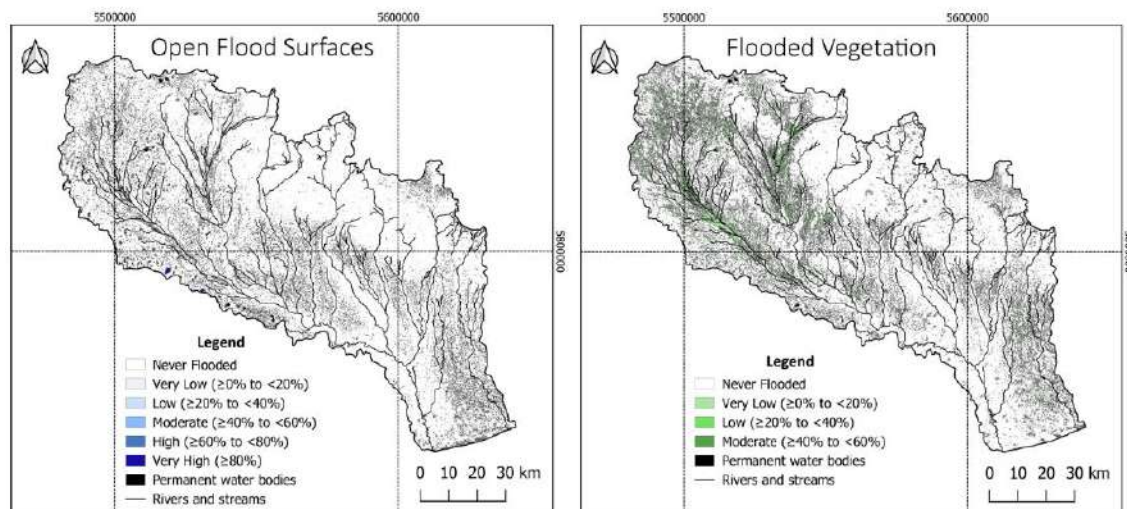


Figure 6: Final flood frequency maps obtained for the study area with the selected time-lapse collection.

The combination of historical OFS and FV binary maps, classified by the relative flood frequency classes, is shown in Figure 7. According to the geomorphologic units of the QGRW, the alluvial plain showed the maximum flooding extension (941.41 km²), reaching the 27.22% of the floodplains of rivers and streams (Table 3). Here, the FV category generates the greatest flooding impact (71%), which is related to overflows of the surrounding vegetated areas, corresponding mainly to the *Very Low* frequency class. In the poor drainage

alluvial plain, maximum flooding extension reaches 440.3 km², which represents the 17.40% of this geomorphologic unit, and it is more represented by the OFS category (55%), corresponding to subcircular ponds with sizes ranging from 0.014 to 1.10 km² and minor ephemeral streams, as observed by Teruggi et al. (2005). Similar results were obtained in the hills with shallow lakes, with a maximum flooding extension of 195.49 km² (17.14% of the hills extension) and represented mainly by the OFS category (60%). Particularly in this area, the

Very High frequency class is better represented (9.88 km²), since temporary water bodies related to the subsurface water flow emerge. In the case of the relic hills and perirange aeolian hillocks, maximum flooding extension was lower (92.11 km² and 93.79

km²), covering the 5.91% and the 4.45% of the total extension of the mentioned geomorphologic units, respectively. Finally, as expected, flooding in the ranges was almost negligible (7.98 km², representing 2.88% of the range system).

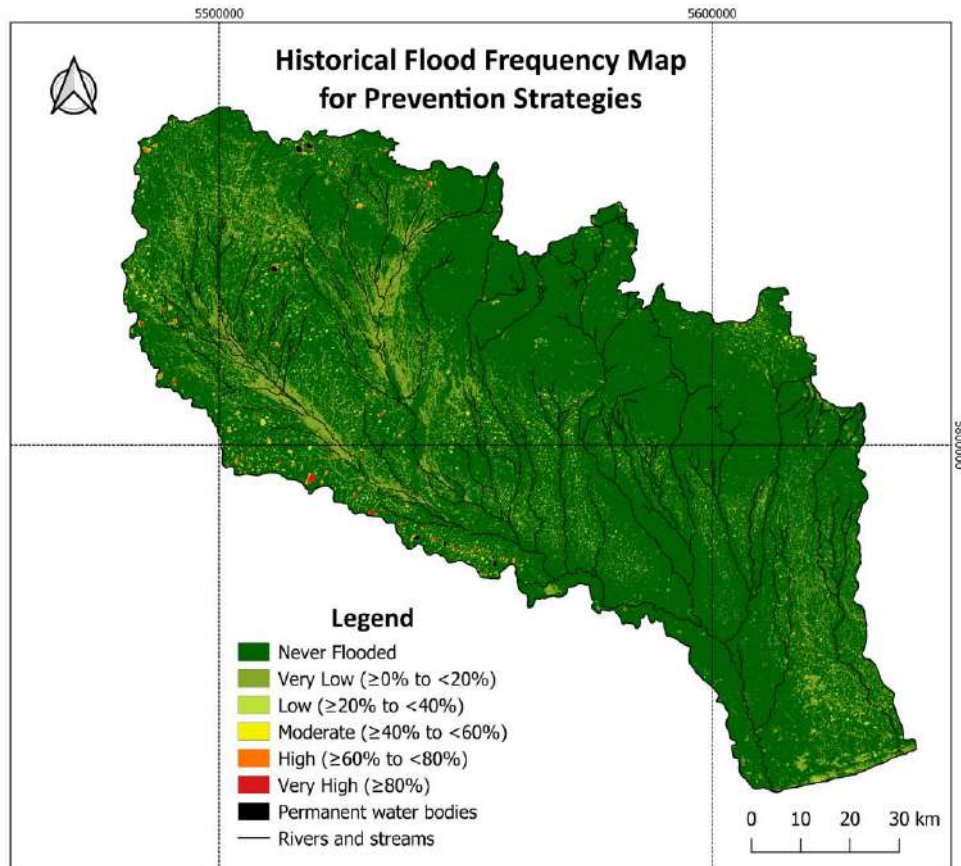


Figure 7: Historical Flood Frequency Map conducted to determine flood prevention strategies in the region.

Table 3. Flood extension of the historical flood frequency obtained for the geomorphologic units of the QGRW.

Geomorphologic unit	Area (km ²)								Area (%)	Flooding representation	
	Total area	Not flooded	Very Low	Low	Moderate	High	Very High	TOTAL (Flooded)	Flooded	FV (%)	OFS (%)
<i>Ranges</i>	277	269.1	7.89	0.09	-	-	-	7.98	2.88	61	39
<i>Perirange aeolian hills</i>	2110	2016.19	86.94	3.8	2.09	0.85	0.11	93.79	4.45	52	48
<i>Relic hills</i>	1557	1465.44	82.36	6.77	1.8	0.68	0.5	92.11	5.91	39	61
<i>Hills with shallow lakes</i>	1141	945.31	129.18	33.86	14.17	8.4	9.88	195.49	17.14	40	60
<i>Alluvial plain</i>	3459	2517.41	879.65	45.16	9.23	4.55	2.82	941.41	27.22	71	29
<i>Poor drainage alluvial plain</i>	2531	2090.6	370.06	53.97	13.97	1.87	0.43	440.3	17.4	45	55
TOTAL	11075	9304.05	1556.08	143.65	41.26	16.35	13.74	1771.08	15.99	51	49

Flood prevention strategies

Farm flood prevention strategies can vary depending on specific circumstances and location. However, there are certain agricultural best management practices and measures that each single landowner and agricultural producer can implement for farm flood prevention (Antolini et

al., 2020; European Commission - Directorate-General for Environment, 2021; Warner et al., 2017). Based on the results of the historical flood frequency mapping (Figures 6 and 7), several flood prevention measures were proposed for implementation in each flood frequency class (Table 4), encompassing both structural and non-structural approaches.

Table 4. Recommended strategies for farm flood prevention based on flood frequency classes.

Flood prevention strategies	Flood frequency classes		
	Low-Very low flood frequency	Moderate flood frequency	High-Very high flood frequency
1. Land Use Planning	**	***	****
2. Drainage Management	*	***	****
3. Conservation practices		**	****
4. Buffer Zones		***	****
5. Erosion Control	*	***	****
6. Floodplain Management		***	****
7. Water Storage and Detention		**	****
8. Soil Management	**	***	****
9. Communication and Education	*	**	****
10. Monitoring	**	***	****
11. Flood insurance	*	***	****

Very high (****), high (***), moderate (**), low (*), or insignificant (empty cell) indicate the recommended actions for flood prevention regarding each flood frequency class

1. Land use planning: Proper land use planning is essential to minimize the risk of flooding on farms. Avoiding construction or farming activities in flood-prone areas can help prevent flood damage. Identify areas at higher elevations or well-drained soils for critical infrastructure and sensitive operations.

2. Drainage management: Implementing effective drainage systems is crucial for both high and low flood frequency scenarios. Maintain and regularly inspect existing drainage ditches, channels, and culverts to ensure they are clear of debris and functioning properly. Consider installing additional drainage infrastructure if necessary.

3. Conservation practices: Implement conservation practices that promote soil health and water infiltration. Practices like contour plowing, strip cropping, cover cropping and planting trees can help reduce surface runoff and improve soil structure, decreasing the risk of flooding.

4. Buffer zone and wetland restoration: Establish buffer zones or riparian buffers along water bodies, such as rivers or streams, adjacent to the farm. These natural vegetated areas can help absorb excess water during floods, reduce erosion, and filter out sediment and pollutants.

5. Erosion control: Implement erosion control measures to prevent soil erosion, which can worsen flooding. Methods such as terracing, grassed waterways, and retaining walls can help minimize erosion and keep soil in place.

6. Floodplain management: If your farm is located in a floodplain, it's important to understand the flood risks and develop appropriate floodplain management strategies. This may include strategies like floodplain zoning, flood forecasting, early warning systems, and emergency response planning.

7. Water storage and detention: Constructing on-farm water storage and detention structures, such as ponds or reservoirs, can help capture excess water during high flood events. These structures can also be used for irrigation during dry periods.

8. Soil management: Maintaining healthy soils through practices like organic matter management and appropriate crop rotation can improve soil structure and water-holding capacity, reducing the impact of flooding.

9. Communication and education: Promote awareness and education among farm owners, workers, and neighboring communities about flood risks and appropriate flood prevention measures.

Encourage collaboration with local authorities, extension services, and other stakeholders involved in water management.

10. Monitoring networks (data and information): Effective monitoring is widely acknowledged as a critical component of prediction and prevention strategies. In particular, the establishment of stream/river gauges for continuous streamflow monitoring, systematic recording and analysis of precipitation patterns and regular monitoring of water table levels are of paramount importance. Additionally, the installation of on-farm weather stations can provide invaluable insights to farmers, enabling them to plan and prepare for extreme weather conditions and optimize their planting and harvesting schedules.

11. Flood insurance: Can help farmers prepare for and recover from such disasters.

DISCUSSION

During the last years, the production of low-cost flood maps all around the globe has increased, since several satellite datasets were made available for free (Hawker et al., 2020; Mehmood et al., 2021). The analysis of long time series of multi-temporal satellite imagery, as applied in this study, proved to be useful information for generating flood maps. In this contribution, an evaluation tool to translate flood data into operational maps is provided, which allows visualizing the spatial dimension of potential floods and taking action to prevent and reduce their damage.

The proposed method has several strengths: firstly, cloud-cover and shadow limitations in the performance of normalized difference indices have been overcome by including image pre-processing procedures (e.g., C Function of Mask algorithm, collection filtering). Secondly, the temporal continuity of reflectance between Landsat TM, ETM+, and OLI/TIRS sensors was undertaken by spectral harmonization following Roy et al. (2016), which allowed the analysis of long-time series of multiple sensors properly. Thirdly, the proposed identification of flooded areas created by the combination of spectral indices (i.e., MNDWI and NDVI) provided more accurate information related to the associated flooding events. In this sense, the NDVI proved to be a powerful tool to differentiate between open water surfaces and flooded vegetation previously detected as water by MNDWI, as the

NDVI response during flood events is highly sensitive to inundation (Powell et al., 2014), and it is usually underestimated at flooding detection. Finally, the selection of a training area within the study area (i.e., watershed), where differences between water, land, and vegetation are exposed, was a key point to enhance the Otsu dynamic threshold selection of the utilized normalized difference indices for flood mapping of the QGRW.

Delineation of water and monitoring of water body changes have been successfully performed by the computation of Normalized Difference Water Indices (NDWI) worldwide (Jain & Sinha, 2005; McFeeters, 1996; Rogers & Kearney, 2004; Sethre et al., 2005; Xu, 2006, among others). Particularly, the MNDWI proposed by Xu (2006) is the best option for delineating surface water in Landsat imagery, since it improves the separation of built-up features and vegetation (Campos et al., 2012; Mohammadi et al., 2017) from water. However, the threshold between water and non-water features is not a constant value; instead, it is a dynamic value that changes according to the subpixel land-cover components. Thus, for a given water fraction, the thresholds can be determined more efficiently by examining the histogram of the MNDWI image (Ji et al., 2009). In this sense, Otsu's threshold selection method for gray-level histograms is appropriate since it is simple, nonparametric, unsupervised, and automatic (Otsu, 1979). For a better implementation of this method, a training area with clear differences between the targets of the study (i.e., water, non-water) might be selected, and obtained thresholds can then be applied to the entire study area.

In the case of NDVI, several studies use this index to detect water and flooding (Domenikiotis et al., 2003; Shrestha et al., 2017). Nonetheless, it remains a vegetation index that is strongly sensitive to the subpixel vegetation component, which makes it less suitable for delineating water unless the SWIR band is not available in the remote sensor (Ji et al., 2009). Concerning flood events, very low values of NDVI are expected when the soil/vegetation component is flooded. But this behavior is different in areas adapted to the flood pulse (Powell et al., 2014). In the proposed study area, the subpixel components of floodplains located at rivers and streams, in addition to wetland vegetated areas are highly responsive to NDVI during flooding pulses. Thus, a combination of MNDWI and NDVI can be used that assess not only the open water flooding but also the productivity response to flooding, according to the

vegetation response. This combination of indices has been already used by several authors for monitoring flooding areas (Azedou et al., 2022; Mehmood et al., 2021; Solana et al., 2021b, among others). However, most of these studies focused on the detection of open water surfaces and disregarded the FV class, which can lead to an underestimation of the extent of inundation. The present work gives some advances in the detection and extraction not only of open flood surfaces but also of flooded areas underneath vegetation, allowing the creation of much more realistic scenarios of flooding.

In the QGRW, differences between the spatial distribution and frequency of potential floods in both OFS and FV can be attributed to the watershed dynamics of this poorly drained landscape. Regarding OFS, the *Moderate* to *Very High* flood frequency categories were observed mainly in temporary water bodies. This was particularly evident in the hills with shallow lakes located at the southwestern limit of this plain river watershed, where Solana et al. (2021a) proposed a regional discharge area associated with the presence of a hydraulic barrier to the Pampean aquifer in-depth. Similar behavior was observed in the poorly drained alluvial plain, where the *Very Low* to *Moderate* frequency categories of both OFS and FV can be attributed to the groundwater rise. In this sense, it has been recently observed in the South American plains that initial deep groundwater levels do not recover because of the replacement of natural pastures and native vegetation by rainfed agriculture, which leads to flooding even under low rainfall scenarios (Houspanossian et al. 2023). Conversely, the *Very Low* flood frequency category of OFS also occurred in the main rivers, which may be related to important but isolated overflows. In the case of FV areas, the *Very Low* to *Moderate* categories were observed primarily in floodplains along rivers and streams, which can be related to the typical discharge behavior of these watercourses that flood along surrounding croplands.

Flood mapping in other basins with similar geographical, climatological, and geomorphological features could apply the method followed in this study by adapting the algorithm and adjusting the thresholds for detecting floods in comparable areas, for future implementation of flood prevention strategies. By engaging in good planning and making strategic investments, private landowners and agricultural producers can proactively prevent flooding and safeguard their land interests and

assets. While farmers cannot entirely prevent flooding, they can significantly reduce the potential damage and negative impacts on their agricultural operations by implementing these strategies and taking appropriate actions. It is crucial for farmers to assess their specific circumstances, local conditions, and flood risk profiles to determine the most appropriate combination of flood prevention measures for their farms. Additionally, staying updated with local regulations, guidelines, and best practices related to flood management is essential.

CONCLUSIONS

This study contributed to the generation of flood inundation extent and frequency maps along rivers in plain watershed basins, which is of particular importance for flood monitoring and assessment of these environments. By using the advantages offered by the GEE platform, the historical analysis of multi-temporal Landsat images was achieved without downloading and performing time and memory-system-intensive tasks.

The proposed rainfall and multi-temporal flood analysis suggested a strong connection between flooded areas and the ruling climatic conditions of the QGRW, with increases in precipitation during the summer, and increases in flooded areas attributed to the decrease in evapotranspiration that arises during the winter. In the case of frequency analysis, the dominance of *Very Low* frequencies of flooding (AWPF < 20%) observed in both OFS and FV areas, highlighted the importance of flash flood events in the knowledge of areas potentially prone to flooding expected in plain watersheds.

The differentiation of OFS and FV from non-flooded areas was achieved by the combination of MNDWI and NDVI, with the NDVI as a powerful tool to evaluate the vegetation response to flooding. Here, the application of the Otsu method to compute the dynamic segmentation of the normalized difference histograms was a key step to define the dynamic threshold values according to the fractional components of water, soil, and vegetation, instead of using constant values.

Overall, this study provided valuable information for flood management and mitigation efforts in Argentina's agriculturally dominated river watersheds. Implementing these mapping techniques on a broader scale can contribute to more effective

preparedness, response, and recovery strategies for flood-prone regions in Argentina and beyond.

DATA AVAILABILITY

The codes developed in the current study are available in the Google Earth Engine platform: <https://code.earthengine.google.com/b5645a358ff74f7c0286624f4451e6d3> for multi-temporal flood analysis, and for annual flood frequency mapping: <https://code.earthengine.google.com/79eff9484ce89ef2bc402677d18284c1>.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was financially supported by the National Agency for Scientific and Technological Promotion (PICT 1616/14), the National University of Mar del Plata (R354220), and the International Atomic Energy Agency's Coordinated Research Project (F30059) entitled "Assessment of Groundwater Resources at Local/National Scales". The authors give posthumous thanks to Ms. Joanie López Pueyrredón, who performed a very important role in monitoring and logistical support.

REFERENCES

- Antolini, F., Tate, E., Dalzell, B., Young, N., Johnson, K. & Hawthorne, P. L. (2020). Flood risk reduction from agricultural best management practices. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 56(1), 161-179. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12812>
- Aragón, R., Jobbágy, E. & Viglizzo, E. (2011). Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina). *Ecohydrology*, 4, 433-447. <https://doi.org/10.1002/eco.149>
- Azedou, A., Khatibi, A. & Lahssini, S. (2022). Characterizing fluvial geomorphological change using Google Earth Engine (GEE) to support sustainable flood management in the rural municipality of El Faid. *Arabian Journal of Geosciences*, 15, 413. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09674-3>
- Alderman, K., Turner, L. & Tong, S. (2012). Floods and human health: A systematic review. *Environment International*, 47, 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.06.003>
- Borro, M., Morandeira, N., Salvia, M., Minotti, P., Perna, P. & Kandus, P. (2014). Mapping shallow lakes in a large South American floodplain: A frequency approach on multitemporal Landsat TM/ETM data. *Journal of Hydrology*, 512, 39-52. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.057>
- Campo de Ferreras, A. M. & Piccolo, M. C. (1999). Hidrogeomorfología de la cuenca del Río Quequén Grande, Argentina. *Papeles de Geografía*, 29. <https://revistas.um.es/geografia/article/view/45221>
- Campos, J., Sillero, N. & Brito, J. (2012). Normalized difference water indexes have dissimilar performances in detecting seasonal and permanent water in the Sahara – Sahel transition zone. *Journal of Hydrology*, 464-465, 438-446. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.07.042>
- Dash, P. & Sar, J. (2020). Identification and validation of potential flood hazard area using GIS-based multi-criteria analysis and satellite data-derived water index. *Journal of Flood Risk Management*, 13(3), 1-14. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12620>
- Detrembleur, S., Stilmant, F., Dewals, B., Erpicum, S., Archambeau, P. & Piroton, M. (2015). Impacts of climate change on future flood damage on the river Meuse, with a distributed uncertainty analysis. *Natural Hazards*, 77, 1533-1549. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1661-6>
- DeVries, B., Huang, C., Armston, J., Huang, W., Jones, J. & Lang, M. (2020). Rapid and robust monitoring of flood events using Sentinel-1 and Landsat data on the Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 240, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111664>
- Domenikiotis, C., Loukas, A. & Dalezios, N. (2003). The use of NOAA/AVHRR satellite data for monitoring and assessment of forest fires and floods. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 115-128. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-115-2003>
- Du, S., Shi, P., Van Rompaey, A. & Wen, J. (2015). Quantifying the impact of impervious surface location on flood peak discharge in urban areas. *Natural Hazards*, 76, 1457-1471. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1463-2>
- European Commission - Directorate-General for Environment. (2021). Strengthening the synergies between agriculture and flood risk management in the European Union. *Publications Office of the European Union*, 31 pp. <https://doi.org/10.2779/128153>
- Fan, Y., Li, H. & Míguez-Macho, G. (2013). Global Patterns of Groundwater Table Depth. *Science*, 339, 940-943. <https://doi.org/10.1126/science.1229881>

- Feloni, E., Mousadis, I. & Baltas, E. (2019). Flood vulnerability assessment using a GIS-based multi-criteria approach – The case of Attica region. *Journal of Flood Risk Management*, 13, 1-15. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12563>
- Foga, S., Scaramuzza, P., Guo, S., Zhu, Z., Dilley Jr, R., Beckmann, T., Schmidt, G., Dwyer, J., Hughes, M. & Laue, B. (2017). Cloud detection algorithm comparison and validation for operational Landsat data products. *Remote Sensing of Environment*, 194, 379-390. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.026>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Haldane, J. (1948). Note on the Median of a Multivariate Distribution. *Biometrika*, 35, 414-417. <https://doi.org/10.1093/biomet/35.3-4.414>
- Hawker, L., Neal, J., Tellman, B., Liang, J., Schumann, G., Doyle, C., Sullivan, J., Savage, J. & Tshimanga, R. (2020). Comparing earth observation and inundation models to map flood hazards. *Environmental Research Letters*, 15, 1-13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abc216>
- Houspanossian, J., Giménez, R., Whitworth-Hulse, J. I., Nosetto, M. D., Tych, W., Atkinson, P. M., Rufino, M. C. & Jobbágy, E. G. (2023). Agricultural expansion raises groundwater and increases flooding in the South American plains. *Science*, 380(6652), 1344-1348. <https://doi.org/10.1126/science.add5462>
- Houspanossian, J., Kuppel, S., Nosetto, M., Di Bella, C., Oricchio, P., Barrucand, M., Rusticucci, M. & Jobbágy, E. (2018). Long-lasting floods buffer the thermal regime of the Pampas. *Theoretical and Applied Climatology*, 131, 111-120. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1959-7>
- Jain, V. & Sinha, R. (2005). Response of active tectonics on the alluvial Bagmati River, Himalayan foreland basin, eastern India. *Geomorphology*, 70, 339-356. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.02.012>
- Ji, L., Zhang, L. & Wylie, B. (2009). Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(11), 1307-1317. <https://doi.org/10.14358/PERS.75.11.1307>
- Kumar, H., Karwariya, S. & Kumar, R. (2022). Google Earth Engine-Based Identification of Flood Extent and Flood-Affected Paddy Rice Fields Using Sentinel-2 MSI and Sentinel-1 SAR Data in Bihar State, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 50, 791-803. <https://doi.org/10.1007/s12524-021-01487-3>
- Kuppel, S., Houspanossian, J., Nosetto, M. & Jobbágy, E. (2015). What does it take to flood the Pampas?: Lessons from a decade of strong hydrological fluctuations. *Water Resources Research*, 51, 2937-2950. <https://doi.org/10.1002/2015WR016966>
- Lal, P., Prakash, A. & Kumar, A. (2020). Google Earth Engine for concurrent flood monitoring in the lower basin of Indo-Gangetic-Brahmaputra plains. *Natural Hazards*, 104, 1947-1952. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04233-z>
- Marini, M. F. & Piccolo, M. C. (2005). Hidrogeomorfología de la cuenca del río Quequén Salado, Argentina. *Investigaciones Geográficas*, 37, 59-71. <https://doi.org/10.14198/INGEO2005.37.04>
- Martínez, D. E., Solomon, K., Quiroz Londoño, O., Dapeña, C., Massone, H., Benavente, M., Panarello, H. & Grondona, S. (2010). *Tiempo medio de residencia del flujo base en aguas superficiales de la llanura pampeana: aplicación de isótopos del agua, gases nobles y CFCs en el río Quequén Grande*. In: I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras Azul, Buenos Aires, Argentina, 420-427.
- Martínez, D. E. & Bocanegra, E. M. (2002). Hydrogeochemistry and cation-exchange processes in the coastal aquifer of Mar Del Plata, Argentina. *Hydrogeology Journal*, 10, 393-408. <https://doi.org/10.1007/s10040-002-0195-7>
- McFeeters, S. (1996). The Use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Mehmood, H., Conway, C. & Perera, D. (2021). Mapping of Flood Areas Using Landsat with Google Earth Engine Cloud Platform. *Atmosphere*, 12(7), 1-16. <https://doi.org/10.3390/atmos12070866>
- Mohammadi, A., Costelloe, J. & Ryu, D. (2017). Application of time series of remotely sensed normalized difference water, vegetation and moisture indices in characterizing flood dynamics of large-scale arid zone floodplains. *Remote Sensing of Environment*, 190, 70-82. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.003>
- Mora, D., Walker, E. & Venturini, V. (2021). Flood monitoring in Santa Fe using the Google Earth Engine platform. In: *XIX Workshop on Information Processing and Control (RPIC)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/RPIC53795.2021.9648518>
- Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9, 62-66.

- Pandey, A., Kaushik, K. & Parida, B. (2022). Google Earth Engine for Large-Scale Flood Mapping Using SAR Data and Impact Assessment on Agriculture and Population of Ganga-Brahmaputra Basin. *Sustainability*, 14(7), 4210, 1-22. <https://doi.org/10.3390/su14074210>
- Paruelo, J., Guerschman, J. & Verón, S. R. (2005). Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia Hoy*, 15(87), 14-23.
- Policelli, F., Slayback, D., Brakenridge, B., Nigro, J., Hubbard, A., Zaitchik, B., Carroll, M. & Jung, H. (2017). The NASA Global Flood Mapping System. *Remote Sensing of Hydrological Extremes*, 47-63. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43744-6_3
- Powell, S., Jakeman, A. J. & Croke, B. (2014). Can NDVI response indicate the effective flood extent in macrophyte dominated floodplain wetlands? *Ecological Indicators*, 45, 486-493. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.05.009>
- Quiroz Londoño, O., Grondona, S., Massone, H., Farenga, M., Martínez, G. & Martínez, D. (2013). Modelo de anegamiento y estrategia de predicción-prevenición del riesgo de inundación en áreas de llanura: el sudeste de la provincia de Buenos Aires como caso de estudio. *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, 13_1, 76-98. <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/262>
- Robinson, N., Allred, B., Jones, M., Moreno, A., Kimball, J., Naugle, D., Erickson, T. & Richardson, A. (2017). A Dynamic Landsat Derived Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Product for the Conterminous United States. *Remote Sensing*, 9(8), 863,1-14. <https://doi.org/10.3390/rs9080863>
- Rogers, A. S. & Kearney, M., (2004). Reducing signature variability in unmixing coastal marsh Thematic Mapper scenes using spectral indices. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12), 2317-2335. <https://doi.org/10.1080/01431160310001618103>
- Roy, D., Kovalsky, V., Zhang, H., Vermote, E., Yan, L., Kumar, S. & Egorov, A. (2016). Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity. *Remote Sensing of Environment*, 185, 57-70. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.024>
- Rozenberg, J., Dborkin, D. V., Giuliano, F. M., Jooste, C., Mikou, M., Rodriguez Chamussy, L., Schwerhoff, G., Turner, S. D., Vezza, E. & Walsh, B. J. (2021). *Argentina - Poverty and Macro Economic Impacts of Climate Shocks (English)*. Washington, D.C.: World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/590371624981025569/Argentina-Poverty-and-Macro-Economic-Impacts-of-Climate-Shocks>
- Sandoval, V. & Sarmiento, J. (2020). A neglected issue: informal settlements, urban development, and disaster risk reduction in Latin America and the Caribbean. *Disaster Prevention and Management*, 29, 731-745. <https://doi.org/10.1108/DPM-04-2020-0115>
- Scarpato, O. E. & Capriolo, A. D (2013). Droughts and floods in Buenos Aires province (Argentina) and their space and temporal distribution. *Investigaciones Geográficas*, 82, 38-51. <https://doi.org/10.14350/rig.31903>
- Sethre, P., Rundquist, B. & Todhunter, P. (2005). Remote Detection of Prairie Pothole Ponds in the Devils Lake Basin, North Dakota. *GIScience & Remote Sensing*, 42(4), 277-296. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.42.4.277>
- Shrestha, R., Di, L., Yu, E., Kang, L., Shao, Y. & Bai, Y. (2017). Regression model to estimate flood impact on corn yield using MODIS NDVI and USDA cropland data layer. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(2), 398-407. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61502-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61502-2)
- Solana, M. X., Quiroz Londoño, O. M., Weinzettel, P. & Donna, F. (2021a). Contributions to the conceptual hydrogeological model of the Quequén Grande River Basin at its southwestern limit. *Boletín Geológico y Minero*, 132(1-2): 197-205. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.132.1-2.020>
- Solana, M. X., Quiroz Londoño, O. M., Romanelli, A., Donna, F., Martínez, D. & Weinzettel, P. (2021b). Connectivity of temperate shallow lakes to groundwater in the Pampean Plain, Argentina: A remote sensing and multi-tracer approach. *Groundwater for Sustainable Development*, 13, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100556>
- Tellman, B., Sullivan, J. A. & Doyle, C. S. (2021). Global Flood Observation with Multiple Satellites. In: *Global Drought and Flood* (eds H. Wu, D.P. Lettenmaier, Q. Tang and P.J. Ward), 99-121. <https://doi.org/10.1002/9781119427339.ch5>
- Teruggi, L., Martínez, G., Billi, P. & Preciso, E. (2005). Geomorphologic units and sediment transport in a very low relief basin: Rio Quequén Grande, Argentina. *IAHS Publication*, 299, 154-160.
- Tsyganskaya, V., Martinis, S., Marzahn, P. & Ludwig, R. (2018). SAR-based detection of flooded vegetation – a review of characteristics and approaches. *International Journal of Remote Sensing*, 39(8), 2255-2293. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1420938>

- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- UN-OCHA (2020). Natural disasters in Latin American and the Caribbean, 2000–2019. New York: United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs. <https://www.unocha.org/publications/report/world/natural-disasters-latin-america-and-caribbean-2000-2019>
- United State Geological Survey. (s.f.). *Landsat Known Issues*. <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-known-issues>
- Vanama, V. S. K., Mandal, D. & Rao, Y. S. (2020). GEE4FLOOD: Rapid mapping of flood areas using temporal Sentinel-1 SAR images with Google Earth Engine cloud platform. *Journal of Applied Remote Sensing*, 14(3), 1-23. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.034505>
- Wannous, C. & Velasquez, G. (2017). United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR)—UNISDR's Contribution to Science and Technology for Disaster Risk Reduction and the Role of the International Consortium on Landslides (ICL). In: Sassa, K., Mikoš, M., Yin, Y. (eds) *Advancing Culture of Living with Landslides*, 109-115. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59469-9_6
- Warner, B. P., Schattman, R. E. & Hatch, C.E. (2017). Farming the floodplain: Ecological and agricultural tradeoffs and opportunities in river and stream governance in New England's changing climate. *Case Studies in the Environment*, 1(1), 1-9. <https://doi.org/10.1525/cse.2017.sc.512407>
- World Bank (2021). *Argentina: Valuing Water -Brief for Policy Makers*. Water Security Diagnostic, 1-27. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/945671624438916229/pdf/Argentina-Water-Security-Valuing-Water-Brief-for-Policy-Makers.pdf>
- Wulder, M. A. & Coops, N. C. (2014). Satellites: Make Earth observations open access. *Nature*, 513, 30–31. <https://doi.org/10.1038/513030a>
- Xu, H. (2006). Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

Type of publication: ARTICLE

Received on 08/15/2023, approved for publication on 11/20/2023 and published on 12/12/2023.

CITATION

Solana, M. X., Romanelli, A. and Quiroz Londoño, O. M. (2023). Multi-temporal flood mapping and farm flood prevention strategies in an agriculturally dominated watershed of Argentina. *Cuadernos del CURIHAM*, 29. e191. <https://doi.org/10.35305/curiham.v29i.e191>

AUTORSHIP ROLES

Author contribution statement

María Ximena Solana: Conceptualization, Methodology, Developing codes in the GEE, Writing Original Draft. Asunción Romanelli: Investigation, Conceptualization, Writing, Reviewing and Editing. Orlando Mauricio Quiroz Londoño: Original Idea, Project Administration, Funding Acquisition, Supervision, Reviewing and Editing.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

The authors approved the final version for publication and they are able to respond to all aspects of the manuscript.

LICENSE

This is an open access article under license: Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0 DEED) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>)



CUENCA EXPERIMENTAL ARROYO SAGMATA: MONITOREO DE CRECIDAS TORRENCIALES EN ARROYOS EFÍMEROS DE LA PATAGONIA SEMIÁRIDA (PCIA. DEL CHUBUT, ARGENTINA)

SAGMATA STREAM EXPERIMENTAL WATERSHED: MONITORING FLASHFLOODS IN EPHEMERAL STREAMS OF SEMIARID PATAGONIA (CHUBUT PROVINCE, ARGENTINA)

Gabriel Kaless⁽¹⁾, Oscar Frumento⁽²⁾, Héctor Andrés Malnero⁽³⁾ y Miguel Alberto Pascual⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Trelew, Argentina.
e-mail: gkaless@ing.unp.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7370-1321>

⁽²⁾ Universidad Nacional de los Comechingones. Merlo, Argentina.

e-mail: ofrumento@unlc.edu.ar ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3373-1491>

⁽³⁾ Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Trelew, Argentina.
e-mail: hmalnero@ing.unp.edu.ar ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3736-8645>

⁽⁴⁾ Centro Nacional Patagónico, Centro Científico Tecnológico del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas Puerto Madryn, Argentina.
e-mail: miguelafuera@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9654-8841>

RESUMEN

El Valle inferior del Río Chubut (VIRCh) es el lugar de asiento de la mitad de la población de la Provincia del Chubut (Argentina). Las lluvias ocasionales producen crecidas repentinas en los arroyos efímeros y pulsos de alta turbiedad en el Río Chubut que provocan el corte del suministro de agua potable a las poblaciones y riesgo de inundación. Con el objetivo de contar con información de campo de los procesos hidrológicos y de erosión de suelos, en el año 2017 se inició la instrumentación de una cuenca piloto de 129 km² de extensión, denominada Cuenca Experimental Arroyo Sagmata (CEAS). Se presentan resultados para el periodo diciembre-2017 a febrero-2022. La lluvia media anual fue de 161 mm. No se observan variaciones estacionales en la precipitación y duración de las tormentas. Se registraron tres eventos con elevada intensidad en 10 min: 42, 45 y 63 mm/h. Durante el periodo se han registrado 17 eventos de crecidas, con un caudal máximo vertido en el Río Chubut de 34.6 m³/s. La concentración media de sedimentos transportados en suspensión por el flujo es de 33.4 g/l con un valor máximo registrado de 60.6 g/l. Los resultados presentados constituyen un aporte tanto al conocimiento de la hidrología regional como así también para la formulación de proyectos que garanticen la seguridad hídrica en el VIRCh.

Palabras clave: Turbiedad, Crecidas repentinas, Arroyos efímeros, Monitoreo ambiental, Río Chubut.

ABSTRACT

Half of the population of the Chubut Province (Argentina) lives in the Lower Valley of the Chubut River (VIRCh). The occasional rains produce flash floods in the ephemeral streams and high turbidity pulses in the Chubut River, which may cut off the provision of fresh water to the communities and flood risk as well. In order to get field data on soil erosion and hydrological processes, the Sagmata Stream Experimental Basin (CEAS), a 129 km² pilot basin, was instrumented in 2017. Results are presented for the period December-2017 to February-2022. The mean annual rainfall was 161 mm. Seasonal variations in precipitation and duration of storms are not significant. Three events with high 10 min- rainfall intensity were recorded: 42, 45, and 63 mm/h. During the period, 17 flood events have been registered, with a maximum flow discharged into the Chubut River of 34.6 m³/s. The average sediment concentration of the flow is 33.4 g/l with a maximum registered value of 60.6 g/l. The results constitute a contribution to the knowledge of regional hydrology as well as for the formulation of projects to guarantee water security in VIRCh.

Keywords: Turbidity, Flash floods, Ephemeral streams, Environmental monitoring, Chubut River.

INTRODUCCIÓN

Los ambientes áridos cubren una proporción importante del planeta en un espectro climático amplio: desde condiciones hiperáridas en el norte de África y la península Arábiga (7.5%), zonas áridas en el medio oriente, Asia central y Australia (12%), semiárida en la mayor extensión del sudoeste de Estados Unidos y América del Sur (17.7%) (Parsons y Abrahams, 2009). En este último caso en particular, se destaca la diagonal árida que constituye una franja que se extiende hacia el sur por ambas vertientes de la cordillera andina. El extremo norte se ubica en la costa del Pacífico en proximidades del Ecuador, mientras que el extremo oriental se encuentra en la costa atlántica del sur de Argentina (Martínez Carretero, 2013).

Las crecidas repentinas en los sistemas fluviales efímeros han sido motivo de gran preocupación debido al impacto producido en las comunidades. En general, los estudios científicos/técnicos han sido conducidos luego del paso de las crecidas, documentándose eventos extremos en el sur del Sinaí, Egipto (Kehew et al., 2010), en el este de Sudáfrica (Heritage et al., 2019) y el suroeste de los Estados Unidos (Costa y Jarret, 2008). En el contexto de Argentina, recientemente han ocurrido eventos extraordinarios en varios lugares de la región semiárida de Patagonia, afectando comunidades como Puerto Madryn (Bilmes et al., 2016), Comodoro Rivadavia (Paredes et al., 2021); el Valle Inferior del Río Chubut – VIRCh (Kaless et al., 2019a) y la meseta chubutense (Kaless et al., 2019b; Kaless et al., 2023). La cuantificación de la intensidad de dichos eventos resulta casi imposible de realizar durante el desarrollo del evento debido a su peligrosidad, ocurrencia en lugares remotos y baja duración. Por tal motivo se ha recurrido a técnicas de reconstrucción post-evento (Jarret y England, 2002). Sin embargo, existen algunos casos en el mundo de implementación de estaciones de monitoreo. La cuenca del Arroyo Walnut en Arizona fue instrumentada a mediados del siglo pasado con una densa red de pluviómetros y canales de pendiente crítica en la red de arroyos (Renard et al., 2008; Renard y Keppel, 1966). Otro ejemplo es la estación de monitoreo ubicada en el norte del desierto de Negev, Israel, diseñada principalmente para la medición del transporte de sedimentos (de fondo y en suspensión), que opera desde los '90 (Reid et al., 1998).

La región patagónica se extiende al sur de los ríos Colorado y Barrancas hasta el canal de Beagle; y

desde la cordillera de los Andes hasta el Océano Atlántico (área aproximada de 790000 km²). La mayor parte del territorio pertenece a la región extraandina con clima árido y semiárido (Coronato et al., 2008). La presente investigación tiene lugar en el VIRCh (Pcia. del Chubut, Argentina) que se extiende desde la represa Florentino Ameghino al oeste y el Mar Argentino en el extremo oriental (Figura 1). Las lluvias de gran intensidad y corta duración que ocurren entre la represa y el paraje denominado Boca Toma producen pulsos de alta turbidez en el Río Chubut que provocan la interrupción en el suministro de agua potable a todas las localidades de la comarca VIRCh-Valdez (Kaless et al., 2019a) que se encuentra ubicadas aguas abajo. Además, estos altos caudales han ocasionado la inundación del valle tanto en tiempos pasados como recientes (Griffiths y Tooth, 2021; Kaless, 2021). Por otro lado, la comunidad científica ha alertado sobre las potenciales consecuencias a nivel local del cambio climático global (Pessacg et al., 2020; 2021). En este contexto local y general, sumado a la falta de datos hidroambientales, hemos iniciado una investigación en el año 2017 para el monitoreo de la respuesta hidrológica de los sistemas efímeros ante la ocurrencia de eventos de lluvia de alta intensidad. Se instrumentó una cuenca piloto de 129 km² de extensión, denominada Cuenca Experimental Arroyo Sagmata (CEAS).

OBJETIVOS

Los objetivos de la presente publicación son: a) caracterizar las lluvias torrenciales en la cuenca Arroyo Sagmata, b) caracterizar la respuesta hidrológica de la cuenca en términos de caudales y escorrentía, y c) caracterizar la turbiedad aportada al Río Chubut; para el periodo de observación enero 2018-febrero 2022.

METODOLOGÍA

Cuenca de estudio

La CEAS se encuentra ubicada en el VIRCh, en el centro de la Patagonia, entre las latitudes 43° 30' S y 43° 38' S y las longitudes 65° 57' O y 66° 04' O. La cuenca tiene su cabecera en la meseta de Montemayor a una elevación de 274 m s.n.m. y drena las aguas de lluvia hacia el Río Chubut que se encuentra a una elevación de 53 m s.n.m. El clima en el área de estudio es de tipo semiárido, con una precipitación anual que no excede de 170 mm.

No se identifica algún patrón estacional en la precipitación y cualquier mes del año puede estar libre de precipitaciones. La evaporación anual asciende a 722 mm (del Valle et al., 2009), con un índice de aridez de 0.23 clasificándose el clima como semiárido (Middelton

y Thomas, 1992). La temperatura media anual es de 14° C con un amplio rango de variación en los días de verano. Los vientos dominantes provienen del oeste como resultado de los patrones de circulación atmosférica en Patagonia (Prohaska, 1976).

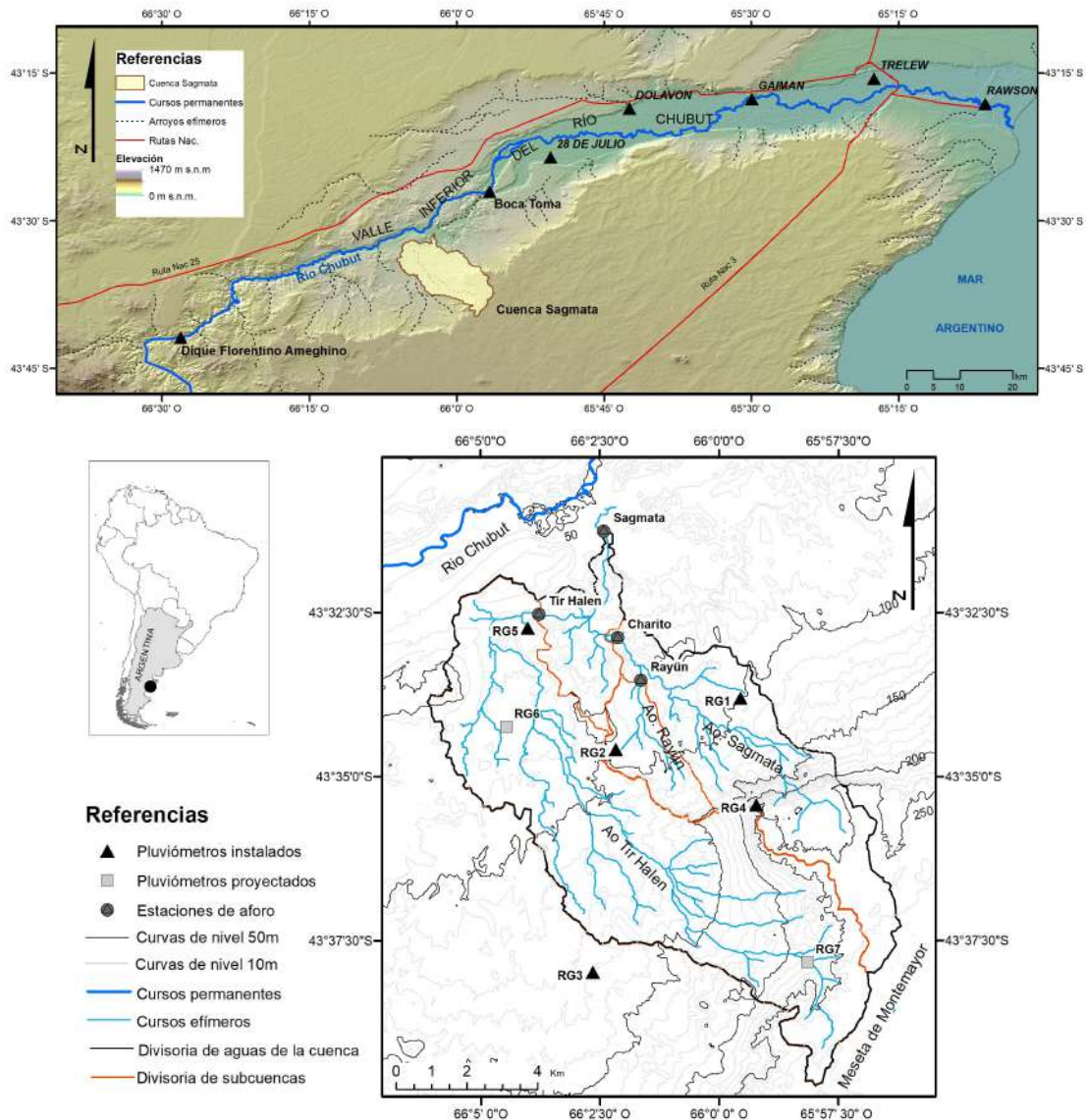


Figura 1: Ubicación de la cuenca, red hidrográfica, red de pluviómetros instalados y proyectados para ser instalados en 2023. Se indica también la ubicación de los puntos de monitoreo en los arroyos.

La geomorfología de la cuenca está caracterizada por formas de erosión fluvial controladas por unidades litoestratigráficas. Se identifican superficies exhumadas de planación de rocas volcánicas que se observan como afloramientos irregulares. La erosión en rocas sedimentarias origina paisajes con escarpas y

badlands. Parte de la red de drenaje se desarrolla sobre depósitos recientes conformados por sedimentos finos sometidos a recirculación. Gran parte de la cuenca posee distintos niveles de pedimentos. También se identifican antiguas terrazas de origen fluvial en el extremo norte de la cuenca (Bilmes et al., 2003).

Monitoreo meteorológico

Se han instalado 5 pluviómetros (Nakaasa Instruments, Co. Ltd, modelo B-200). El dispositivo de almacenamiento de datos ha sido un desarrollo del Laboratorio de Electrónica, SECELEC del CCT-CONICET-CENPAT. El equipo RG1 se ubica en el extremo oriental, el RG2 en el centro y el RG3 en el extremo Sur (fuera de la cuenca). El RG4 fue ubicado en la meseta y el RG5

en la zona baja, extremo Norte (Figura 1).

La lluvia acumulada fue registrada cada 30 min durante el primer año y luego se aumentó el muestreo a 5 min. La resolución del equipo es de 0.5 mm.

Para definir la duración de la tormenta, se considera que un evento ha finalizado cuando transcurre un periodo de 6 h con una precipitación de 1.5 mm (Renard et al, 1997).

Tabla 1. Características fisiográficas principales y geomórficas (Bilmes et al., 2023) de la cuenca y subcuencas.

	Sagmata	Tir Halen	Charito	Rayün
Parámetros fisiográficos				
Área de la cuenca (km ²)	98.2	60.0	30.8	5.9
Perímetro (km)	56.6	52.45	35.4	12.6
Elevación promedio (m s.n.m.)	140.2	142.3	151.6	101.0
Elevación mínima (m s.n.m.)	53.3	67.9	64.3	73.7
Elevación máxima (m s.n.m.)	274.0	274.	267.2	168.7
Pendiente media (m/m)	0.030	0.031	0.042	0.034
Longitud del cauce principal (km)	15.4	20.6	10.9	5.8
Pendiente media del cauce ppal. (m/m)	0.013	0.009	0.017	0.010
Unidades geomórficas				
Terrazas estructuradas (km ² / km ²)	0.04	0.02	0.08	0.08
Badlands y escarpas de erosión (km ² / km ²)	0.11	0.06	0.28	0.32
Pedimentos antiguos (km ² / km ²)	0.39	0.42	0.37	0.29
Terrazas antiguas (km ² / km ²)	0.06	0.07	0.02	0.00
Bajadas remanentes (km ² / km ²)	0.10	0.15	0.01	0.00
Depósitos recientes (km ² / km ²)	0.18	0.14	0.25	0.31
Terrazas fluviales intermedias (km ² / km ²)	0.12	0.14	0.01	0.00

Monitoreo en los arroyos

Se instalaron cuatro estaciones para el aforo de caudales y muestreo de sedimentos, una en cada curso principal de la red hidrográfica (Figura 1). La estación Sagmata se encuentra en el curso homónimo y monitorea los flujos producidos por toda la cuenca. La segunda estación está ubicada en el Arroyo Tir Halen que drena la subcuenca oeste. La tercera estación, Charito, se ubica en el tronco oriental del Arroyo Sagmata. La cuarta estación se emplazó en el Arroyo Rayün, tributario del anterior curso.

Cada estación cuenta con un tubo de PVC de 175 mm de diámetro ubicado en proximidad de la margen. Consta de una escala graduada de 0.05 m de intervalo y una lámpara solar en el extremo superior para la iluminación nocturna (Figura 2). En la margen se colocó una cámara de tipo “time-lapse” que realiza una fotografía cada 5 min, las 24 horas del día, y un video diario. Dentro del tubo de PVC se encuentra el equipo de muestreo de sedimentos. Se instalaron 10 botellas con capacidad de 500 cc. En la tapa de cada botella se conectaron dos tubos cuya función es la de

colectar la muestra y permitir la salida del aire durante el llenado. La diferencia de altura en dichos tubos permite controlar el rango de niveles hidrométricos en el que se realiza el muestreo. Las botellas y conductos están fijos a un mástil metálico que se ubica en el interior del tubo de PVC. Tanto el tubo como el mástil están anclados en el lecho del cauce cuya resistencia ha sido aumentada mediante una mezcla de suelo-cemento. Las alturas de muestreo son: 0.05 m, 0.10 m, 0.15 m, 0.20 m, 0.30 m, 0.40 m, 0.50 m, 0.60 m, 0.80 m, 1.00 m.

Las botellas son recolectadas luego de cada evento, usualmente una semana después cuando los caminos son transitables. Se las deja en reposo en el laboratorio por 10 a 15 días para que decanten los sedimentos. El líquido sobrenadante es removido y pesado. La restante mezcla de agua y sedimentos es secada en horno. La concentración de sedimentos es calculada como el peso seco de sedimentos y el volumen total de agua. La distribución granulométrica fue determinada utilizando tamices para partículas de tamaño mayor a 0.074 mm y el método hidrométrico para tamaños menores (Department of Transportation [DOT], 2015).

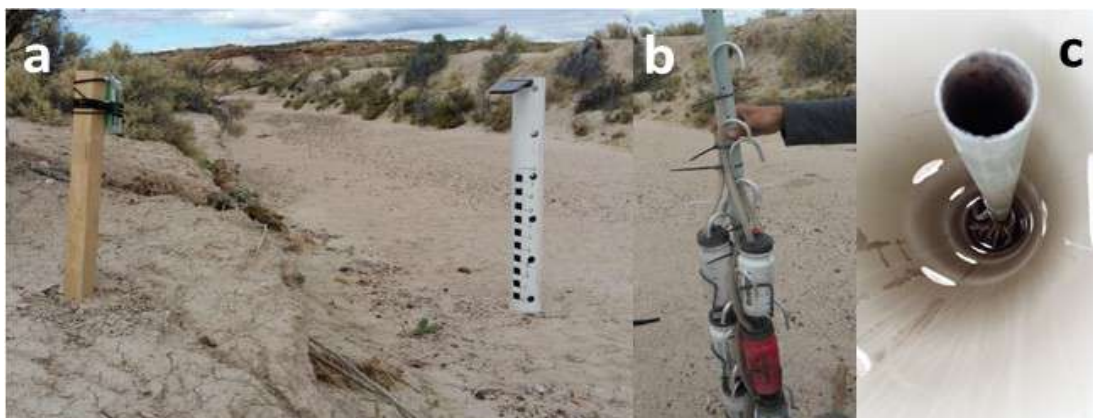


Figura 2: Vista de los equipos ubicados en cada estación de monitoreo en los arroyos: a) la cámara está ubicada en la margen y registra los niveles según las marcas pintadas en el tubo de PVC, b y c) este tubo aloja en su interior un mástil metálico que sirve de elemento de sujeción de 10 botellas que capturan sedimentos transportados en suspensión (concentración del nivel superior del flujo).

Estimación de caudales

Los caudales son estimados indirectamente a partir de la observación de la superficie libre registrada en las cámaras. Se emplea un modelo hidrodinámico bidimensional, IBER, (Bladé et al., 2014, Cea et al., 2020) que resuelve las ecuaciones de flujo promediado en la vertical e incorpora un modelo de turbulencia k-ε. Si bien es posible realizar simulaciones con fondo móvil, se impuso una condición de fondo fijo.

En cada estación de aforo se realizó un relevamiento topográfico con dron mapeándose tanto el cauce principal como las planicies y terrazas adyacentes (Tabla 2). Se realizaron pruebas con distintos tamaños de grillas y se evaluó el Índice de Convergencia de Grilla (Roache, 1997) a fin de estimar el error en el cálculo de la superficie libre (en todos los casos fue inferior a 0.024 m, para un tamaño máximo de grilla de 0.56 m).

En el borde de aguas abajo se impuso la condición de flujo crítico o supercrítico en base a simulaciones exploratorias. En el extremo de aguas arriba se impuso un hidrograma creciente escalonado abarcando el rango de observaciones. Como primera aproximación, se realizaron simulaciones en régimen permanente, prolongando la duración de cada caudal el tiempo necesario para alcanzar la igualdad en los caudales de ingreso y salida del tramo de estudio. Posteriormente, se realizó una verificación del régimen transitorio en los hidrogramas que presentaban las mayores velocidades de ascenso del pelo de agua. En esta

instancia, se cargó el modelo con un hidrograma estimado en base a la curva altura-caudal (régimen permanente). Se comparó el nivel calculado con el predicho y se realizaron ajuste a los caudales en caso de discrepancias.

RESULTADOS

Desarrollo cronológico

La colocación en campo de los instrumentos fue un proceso gradual que contempló el desarrollo tecnológico, análisis hidrológico de la ubicación más conveniente y la posibilidad de acceso. El 2 de febrero de 2018 se instaló el equipo RG3 y hacia el fin de ese mes se instaló el RG1 y dos meses después, el RG2. El equipo ubicado en la meseta de Montemayor, el RG4, fue colocado en noviembre de 2018. El RG5 fue instalado a fines de marzo del año 2022. Antes de la finalización del año 2023 se colocarán los equipos RG6 y RG7 (Figura 1).

Inicialmente se programaron los equipos para registrar la lluvia acumulada cada 30 min pero luego fue modificado. El 26 de octubre de 2018, una tormenta de tipo convectiva produjo un evento de fuerte intensidad y baja duración que activó por primera vez los arroyos desde el inicio del monitoreo. Su duración no se extendió por más de 30 min por lo que consideramos conveniente aumentar la frecuencia de muestreo a 5 min. Esto requirió visitas regulares para descargar los datos, que fue posible hasta el inicio de la cuarentena, a mediados de marzo de 2020. Posteriormente, a

inicios del año 2021, se pudo optimizar el algoritmo para registrar los acumulados de lluvia cada 5 min, siempre y cuando se verificaran pulsos con el movimiento de los cangilones.

Las estaciones de aforo comenzaron a ser instaladas en diciembre del año 2017, iniciando con Sagmata. En Marzo de 2018 se instalaron las estaciones de Charito y Tir Halen, y finalmente Rayün a mediados de abril.

En la Tabla 3 se presenta un resumen de las características de las tormentas, crecidas, y concentración de sedimentos.

Régimen de lluvias

La lluvia media anual registrada en el equipo RG3 asciende a 161 mm (con un mínimo de 119 mm en 2018 y un máximo de 188 en el año 2021). Si bien no fue posible medir la precipitación durante el año

2020, el mismo fue seco en la región, reportándose un valor acumulado de 92 mm en la estación meteorológica del INTA ubicada en la ciudad de Trelew (distante a 70 km al Este) y no se produjeron eventos de crecidas ese año. La precipitación media mensual es de 14.1 mm, no siendo significativa la diferencia entre los valores mensuales y la media (valor de $p > 0.14$), por lo que se concluye que los acumulados mensuales no presentan estacionalidad.

Se aplicaron distintos indicadores para caracterizar las tormentas. En la Figura 3 se muestran gráficos tipo boxplot que sintetizan la información. Los eventos que afectan la cuenca se caracterizan por su corta duración: la mitad tiene una duración menor a 3.5 h y solamente un cuarto de ellos supera las 6.8 h. La mayoría de los eventos tienen una lluvia acumulada igual o menor a 8 mm (3er cuartil) pero algunos eventos (6 de 89) muestran acumuladas superiores a 20 mm (Figura 3).

Tabla 2. Características de los tramos relevados para la determinación del caudal (ubicación de estaciones de aforo en Figura 1).

	Sagmata	Tir Halen	Charito	Rayün
Longitud del tramo (m)	201	220	296	116
Pendiente media (m/m)	0.0023	0.0029	0.0029	0.0034
Ancho de fondo (m)	7.0	6.0	6.6	11.6
Área relevada con dron (Ha)	21.0	18.2	25.5	10.6

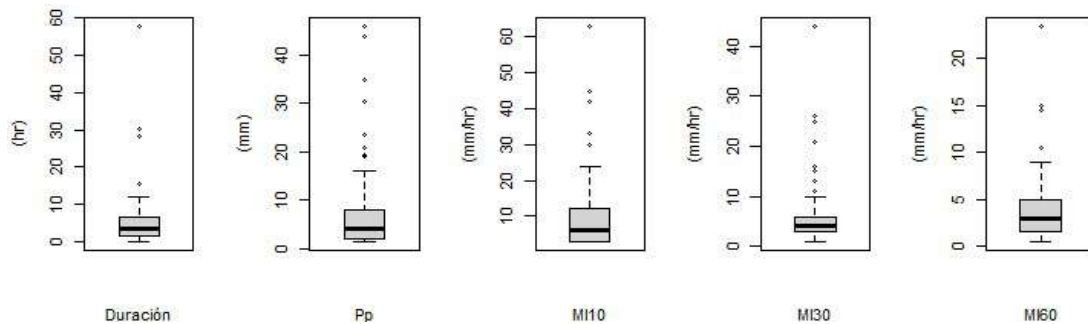


Figura 3: Parámetros característicos de las tormentas registradas en el equipo RG3. Se muestra información para la duración de la tormenta, la precipitación acumulada (Pp) y las intensidades máximas en 10 min, 30 min y 60 min (denominadas como MI10, MI30 y MI60 respectivamente).

La duración de las tormentas del período primavera-verano (media de 4.4 h) es similar a las del período otoño-invierno (media de 6.6 h, $p = 0.169$). Tampoco hay diferencias estacionales en la precipitación ($p = 0.855$). Las intensidades máximas en 60 min son levemente mayores ($p = 0.054$) en primavera-verano (con media 4.7 mm/h) que en otoño-invierno (media de 3.2 mm/h).

Se analizaron otras duraciones para la intensidad máxima, tales como 10 y 30 min. La intensidad máxima en 30 min (MI30), es ampliamente utilizada

en la evaluación de erosión de suelos (Renard et al., 1997). Para la zona de estudio, el tercer cuartil tiene un valor de 6 mm/h. Sin embargo, hay 11 eventos comprendidos entre 10 y 44 mm/h. Por otro lado, según Rostagno et al. (1999), la intensidad máxima en 10 min es más significativa para los procesos de erosión en ambientes semiáridos de Patagonia. En nuestro estudio, el 75% de los eventos tuvo intensidades máximas menores a 12 mm/h. Sin embargo se registraron tres eventos con intensidades de 42, 45 y 63 mm/h (el primero ocurrido el 6 de abril de 2021 y los otros dos en el mes de enero).

Tabla 3. Resumen de las características de parámetros de lluvia, caudal, escorrentía y concentración de sedimentos para 17 eventos de escorrentía en el período 2018-2022.

Descripción	Min	1er Cuartil	Media	3er Cuartil	Max
Duración de tormenta (h)	0.1	1.5	5.6	6.8	57.8
Precipitación (mm)	1.5	2.0	7.0	8.0	46.0
Máxima intensidad en 5 min (mm/h)	6.0	6.0	14.5	12.0	84.0
Máxima intensidad en 10 min (mm/h)	3.0	3.0	10.1	12.0	63.0
Máxima intensidad en 15 min (mm/h)	2.0	4.0	8.6	10.0	44.0
Máxima intensidad en 30 min (mm/h)	1.0	3.0	5.8	6.0	44.0
Máxima intensidad en 60 min (mm/h)	0.0	1.5	3.9	5.0	23.5
Caudal Pico (m³/s)					
Sagmata		4.2	13.9	13.9	34.6
Tir Halen		1.6	5.7	9.7	18.0
Charito		5.5	12.3	13.6	46.1
Rayün		1.7	5.3	6.2	17.1
Escorrentía (mm)					
Sagmata		0.48	1.46	1.81	5.31
Tir Halen		0.32	1.64	2.41	5.99
Charito		1.37	2.51	2.72	8.27
Rayün		2.17	4.32	3.74	10.69
Concentración de sedimentos (g/l)					
Sagmata	14.5	25.0	33.4	34.0	60.6
Tir Halen	9.1	9.9	18.6	21.6	43.8
Charito	21.7	36.0	42.9	47.1	71.8
Rayün	13.2	17.8	21.2	24.8	30.0

Régimen de caudales

La red hidrográfica está conformada por cauces aluviales con lechos de arena y gravas. Los arroyos están secos la mayor parte del año y solamente algunas tormentas suficientemente intensas logran producir escorrentía. Por ejemplo, el primer evento de escorrentía fue observado el 26 de octubre de 2018 (Figura 4), luego de 9 meses de iniciado el monitoreo. Dos semanas después, el 10 de noviembre ocurrió el segundo evento de crecida. En el periodo enero-2018 a febrero-2022 se contabilizó un total de 17 hidrogramas (menos de 3 eventos por año). Los hidrogramas presentan una fase ascendente brusca, con observaciones de velocidades de ascenso de hasta 0.15 m/min. Una vez alcanzado el pico se sucede la fase recesiva con duración más prolongada. En la Figura 5 se muestran los rangos de caudales estimados. Para la cuenca Sagmata, el caudal pico promedio es de 11.7 m³/s (con cuartiles entre 4.2 y 13.9 m³/s).

La curva de duración de caudales expresa lo anteriormente dicho en términos cuantitativos. En media, los arroyos están bañados no más de 12 horas al año. Si se adopta un umbral de 10 cm en el nivel hidrométrico (considerando posible estancamiento del flujo) los eventos de crecidas tienen una duración media de 7 h y 6.8 h en las estaciones de Sagmata y Tir Halen, respectivamente. En las

subcuenas más pequeñas las duraciones son menores: 3.9 h en Charito y 3.0 h en Rayün.

La subcuenca más pequeña presenta respuestas impulsivas con un notable ascenso de los caudales específicos por encima de 1.2 mm/s con duraciones menores a 16 min. El valor máximo de caudal específico es de 2.6 mm/s. La escala areal de la cuenca modifica la duración de caudales. Conforme aumenta el área el caudal específico es más bajo (valor máximo de 0.84 mm/s en Charito y 0.33 mm/s en Sagmata).

La producción de escorrentía resulta de la integración de las curvas de duración de caudales. Para la subcuenca Rayün se obtuvo una lámina de 16.6 mm/año, para Charito 12.2 mm/año, Tir Halen 7.6 mm/año y Sagmata 6.6 mm/año. Estos valores, comparados con la lámina de precipitación anual, indican que el suelo, a través de la infiltración, ejerce un control importante sobre la producción de escorrentía. Por otro lado, se observa una reducción areal (Figura 7) que puede interpretarse en términos de la extensión reducida de las tormentas que afectan parcialmente a la cuenca. También resultan importantes las pérdidas por infiltración en el manto aluvial de los arroyos. La lámina computada en la sección de aforo de Sagmata es el 72% de la suma de las láminas correspondientes a las estaciones ubicadas aguas arriba (Charito y Tir Halen).



Figura 4: Secuencia fotográfica del paso de un evento. Estación de aforo de Charito mostrando el arribo de la crecida a las 20:00 y el nivel máximo 15 minutos después (evento del 26/10/2018).

Aporte de turbiedad al Río Chubut

Se recolectaron muestras de sedimentos para 14 eventos y se realizó un análisis granulométrico con muestras de las estaciones de Charito y Tir Halen pertenecientes al evento de 15 de marzo 2019. La muestra de Charito está compuesta por 30% de arena, 31% de limos y 39% de arcillas (tamaño D_{95} de 0.84 mm). La muestra de Tir Halen está compuesta por 16% de arena, 39% de limos y 45% de arcillas (tamaño D_{95} de 0.26 mm). Si bien las muestras son recolectadas a niveles próximos a la superficie es de esperar una distribución de concentraciones uniforme en la vertical para las fracciones finas (limos y arcillas) que resultan de interés en los problemas de turbidez aguas abajo.

La concentración media más baja se observa en la subcuenca occidental de Tir Halen, con un valor de 20.9 g/l (desv.est. 22.5 g/l). Por otro lado, la concentración en la subcuenca de Charito es de 58.0 g/l (desv.est. 17.9 g/l) y su subcuenca de Rayún es de 28.5 g/l (desv.est. 21.2 g/l). Producto de la mezcla de los flujos de las subcuencas Charito y Tir Halen, la concentración media del flujo que descarga la cuenca en el Río Chubut es de 41.4 g/l (desv.est. 16.3 g/l). La máxima concentración muestreada fue de 131.2 g/l en la estación de Rayún durante el primer evento (el RG2 registró una intensidad

máxima en 30 min de 42 mm/h). Similares valores fueron obtenidos en las muestras de las otras estaciones para ese evento. Finalmente, debe observarse que el muestreo se realiza durante la fase creciente del hidrograma que, debido a la histéresis en la relación concentración-caudal, suele ser mayor a la concentración de sedimento durante la fase recesiva del hidrograma.

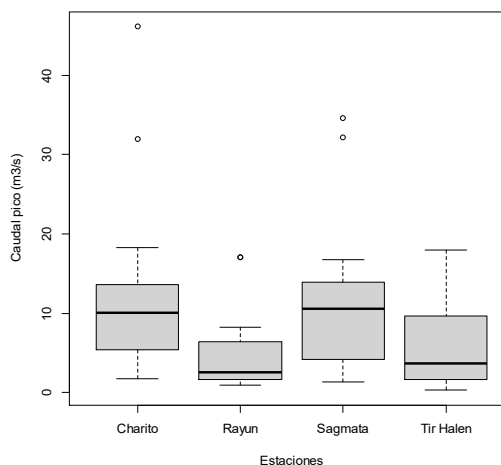


Figura 5: Resumen de los caudales pico de 17 eventos observados en el periodo 2018-2022.

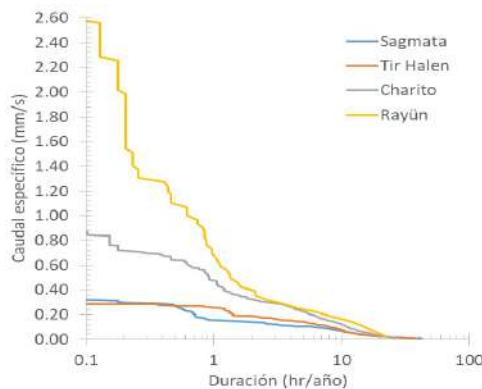


Figura 6: Duración de los caudales observados en estaciones de aforo, divididos por el área de cada subcuencas (consultar Tabla 1).

DISCUSIÓN

Erosión de suelos y ondas de turbiedad en el Río Chubut

Durante el periodo de estudio se registraron 17 eventos de crecidas torrenciales en el Arroyo Sagmata. La turbiedad en el Río Chubut alcanzó niveles suficientemente altos para dejar fuera de

servicio a la planta potabilizadora de Trelew en 9 de dichos eventos. La planta potabilizadora de Trelew (nro. 1) detiene su funcionamiento a partir de una turbiedad de 3 g/l (J. P. San Martín, comunicación personal). En el caso de la ciudad de Puerto Madryn el umbral está entre 3.8 g/l y 4.8 g/l, que se amplía a 12 g/l desde la construcción del predecantador, en el año 2017 (M. Junyent, comunicación personal). En todos los casos, se ha utilizado una equivalencia con las unidades nefelométricas de turbiedad (UNT) de 1 UNT = 1.9 mg/l (Kales et al., 2019a).

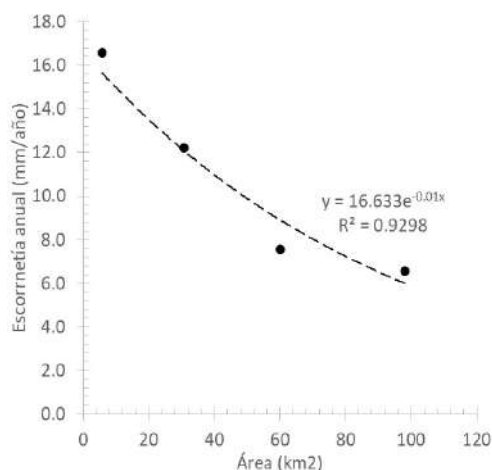


Figura 7: Escorrentía media anual en cada subcuenca. Se observa la dependencia con el área drenada.

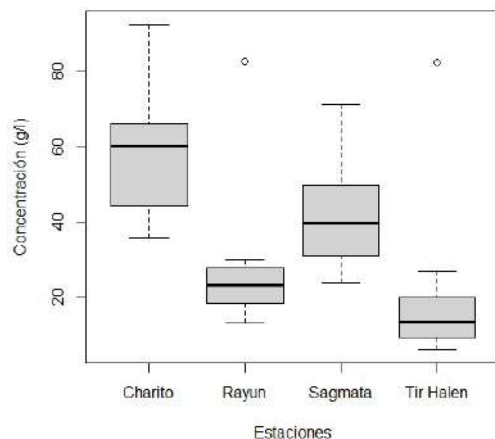


Figura 8: Resumen de las concentraciones de las 14 muestras recolectadas en cada sección de monitoreo.

Las concentraciones medidas en los arroyos resultan varios órdenes de magnitud superiores a los valores usuales del Río Chubut. La carga de sedimentos transportada por el río en el VIRCh tiene una variación estacional con mínimo de 20 mg/l en Junio

y un máximo de 59 mg/l en Septiembre (Kales et al., 2019a). Durante los eventos de crecidas repentinas en los cañadones, la concentración alcanza los 0.6 g/l y en contadas ocasiones se registraron picos de 2.8 g/l (Kales et al., 2019a), según mediciones que se realizan en las plantas potabilizadoras. La notable diferencia respecto de las concentraciones medidas en la estación de aforo de Sagmata se interpreta en términos de: la concentración medida es mayor a la concentración media del evento; el efecto de dilución al mezclarse el aporte del arroyo con el agua prácticamente limpia del Río Chubut, y el efecto de dispersión propiciado por la distancia de transporte.

Origen de las ondas de turbiedad

Las investigaciones precedentes han concluido que las cuencas ubicadas al sur del Río Chubut, entre el Dique Ameghino y Boca Toma, son las principales productoras de sedimentos. Estos estudios se han enfocado en la caracterización de los suelos (Luque y Beider, 2002), la aplicación de modelos de erosión (Serra, 1999) con tentativas de calibración en base a medición de la concentración en el Río Chubut (Bastida et al., 2017). Las mediciones en la red fluvial de la cuenca Arroyo Sagmata aportan nueva información sobre el origen de los sedimentos. La mayor concentración proviene de un sector de superficie menor o igual a 25 km², tal como resulta de comparar las concentraciones en Charito y Rayún (Tabla 3 y Figura 8). Por el contrario, el menor aporte de sedimentos se observa en la subcuenca de Tir Halen. Esas diferencias se asocian a las características de la cobertura vegetal y controles geológicos. Estudios más recientes de teledetección realizados por Flaherty y Pascual (2018) indican que la subcuenca Tir Halen se distingue por una mayor extensión de la cobertura vegetal, mientras que en la subcuenca Charito predominan los suelos desnudos. Desde un punto de vista geomorfológico, Bilmes et al (2023) mostraron que la subcuenca Charito tiene el mayor potencialidad de producción de sedimentos en virtud de la presencia de badlands y escarpas de erosión, en contraste con la subcuenca de Tir Halen donde predominan los pedimentos y depósitos recientes (Tabla 1).

Crecidas torrenciales en ambientes áridos

El monitoreo en la CEAS brinda nuevas posibilidades para el estudio de la generación de crecidas torrenciales en paisajes áridos de la Patagonia. En el contexto del VIRCh, los estudios

anteriores se han enfocado en la modelación hidrológica de transformación lluvia-caudal (Ruiz y Pongolini, 2002; Serra, 2004), con escasas posibilidades de calibración de parámetros en base a estimaciones de caudales en el paraje de Boca Toma (Kaless, 2021). Otra limitación ha sido la baja densidad de pluviómetros en la zona. A partir del año 1998 se implementó una red de alerta (Ruiz y Pongolini, 2002) que proveyó información de precipitación en 6 ubicaciones entre la represa y Boca Toma (Bastida et al., 2017), que representa una densidad de 1 dato de lluvia cada 180 km², aproximadamente. Para el caso de la CEAS, se espera aumentar la densidad en un orden de magnitud, con 1 equipo cada 13 km².

Los eventos de lluvia que produjeron crecidas en el periodo 2018-2022 han sido en su mayoría de baja intensidad. De acuerdo al estudio de tormentas realizado por Chachero (2012), es posible afirmar que en 15 de 17 eventos, el tiempo de retorno evaluado con la intensidad máxima de 30 min fue menor o igual a 5 años. En cambio, el primer evento registrado, ocurrido el 26 de octubre de 2018, tuvo una recurrencia de 29 años. El estudio de caudales y volúmenes de escorrentía (Figuras 6 y 7, Tabla 3) evidencia efectos debido a la escala espacial (tales como distribución no uniforme de la precipitación, pérdidas por infiltración en el lecho de los arroyos) y el control ejercido por la cobertura del suelo y formaciones geológicas. Se espera que los datos recopilados en CEAS sean la base para la calibración de nuevos modelos de transformación lluvia-caudal que sean aplicables a todas las cuencas vecinas.

Monitoreo en zonas áridas de Patagonia

La combinación de estructuras de muestreo en el interior del cauce y el uso de cámaras tipo time-lapse ha permitido el monitoreo del flujo de agua y sedimentos en una cuenca remota a un bajo costo. La construcción de canaletas de flujo crítico (Renard et al., 2008) o estructuras de aforo estaba fuera de presupuesto. Además, la ubicación remota y condiciones de seguridad hacían imposible la medición directa de la velocidad. Por lo tanto, hemos optado por llevar a cabo una determinación indirecta del caudal en base a la observación de los niveles hidrométricos y modelación hidrodinámica.

Las cámaras tipo time-lapse han sido utilizadas con anterioridad para el monitoreo de sistemas fluviales en localidades remotas. Gleason et al., (2015) monitorearon un río pro-glacial en Groenlandia y

aplicaron una metodología semi-supervisada para la medición del ancho del río, un proxy del caudal. Más aún, Leduc et al. (2018) también utilizaron estas cámaras en un contexto igualmente lejano para monitorear los niveles de agua. En este caso, emplearon un transductor de presión para validar el procesamiento automatizado de las imágenes. En el caso de CEAS, hemos aplicado un procedimiento completamente supervisado posibilitado por la baja frecuencia de eventos. Sin embargo, ha resultado difícil la lectura de la regla para niveles altos debido a la turbulencia y formación de una onda aguas arriba del tubo. Un procedimiento alternativo sería desarrollar un algoritmo que detecte la superficie libre y le asigne coordenadas a los píxeles, en base a un relevamiento topográfico previo de objetos reconocibles en las fotos (Leduc et al., 2018).

El uso de cámaras provee de información suplementaria, tal como las características de la superficie libre en niveles altos. Hemos podido verificar la formación de ondas estacionarias en el centro del canal en las estaciones de Tir Halen y Sagmata. Estas ondas han sido interpretadas en términos de interacción de flujos críticos con la morfología del lecho (Grant, 1997; Tinkler, 1997). La ocurrencia (o ausencia) de ondas posibilitaron realizar una confrontación con los resultados del modelo hidrodinámico.

La reconstrucción de crecidas pasadas utilizando modelos hidráulicos han sido conducidas generalmente en tramos con afloramientos de roca que garantizan la condición de lecho fijo (Denlinger et al., 2002; Heritage et al., 2019). En CEAS tal requerimiento no puede alcanzarse porque el lecho es aluvial. Por lo tanto, los tramos de estudio fueron seleccionados cuidadosamente evitando curvas y buscando la mayor estabilidad morfológica. A fin de monitorear el cambio de elevación del lecho se instalaron cadenas enterradas en el material aluvial. Esta investigación se encuentra en curso. Finalmente, dada la dificultad de realizar mediciones intrusivas, resulta poco probable la posibilidad de validar las curvas altura-caudal construidas mediante modelación. Sin embargo, el desarrollo de técnicas de velocimetría por imágenes (LSPIV, Large scale particle image velocimetry, Patalano et al., 2017) ofrece la posibilidad de determinar la velocidad superficial del escurrimiento en base a videos de crecidas. Asumiendo un perfil vertical de velocidad será posible relacionar el campo de velocidades medias calculadas con las observadas en superficie.

CONCLUSIONES

La Cuenca Experimental Arroyo Sagmata representa una experiencia pionera en el monitoreo de procesos hidrológicos en cuencas de ambientes semiáridos de Patagonia. La escala espacial elegida (100 km²) para la cuenca principal es adecuada para el estudio y caracterización de los procesos hidrológicos en el VIRCH. En el presente artículo se ha presentado una caracterización de parámetros hidroambientales en base a un monitoreo de 4 años y la ocurrencia de 17 eventos de crecidas repentinas en los arroyos.

El caudal máximo registrado a la fecha asciende a 34.6 m³/s (caudal específico de 0.35 m³/s/km²) y la concentración máxima de sedimentos aportada al río Chubut ha sido medida en 60.6 g/l.

La información provista por CEAS resulta de importancia para la elaboración de estudios de riesgo hídrico y elaboración de proyectos de mitigación. La integración de datos de campo con productos de teledetección y mapeos geomorfológicos permite extrapolar el estudio a una escala de análisis mayor abarcando la totalidad de las cuencas torrenciales ubicadas entre el Dique Florentino Ameghino y Boca Toma.

Los trabajos futuros estarán direccionados, en lo que a instrumentación respecta, a la incorporación de dos nuevos pluviómetros, medición del nivel hidrométrico por ultrasonido, determinación de la velocidad superficial del flujo con técnicas de LSPIV para validar los resultados de los modelos hidrodinámicos, y muestreo continuo de sedimentos con medición por métodos ópticos. Además, se están llevando a cabo estudios para cuantificar la bondad del método indirecto en la determinación de los caudales en los arroyos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los dueños de los campos por permitir el acceso al área de estudio y colaborar durante los trabajos de campo. La investigación se ha realizado en el marco del proyecto “Aplicación de ingeniería verde para fomentar la retención de sedimentos en suelos del Valle Inferior del Río Chubut”, financiada por Danone División Aguas y The Nature Conservancy. Agradecemos la colaboración de numerosos estudiantes de la UNP-Sede Trelew en las tareas de campo.

REFERENCIAS

- Bastida Arias, R., Crespo Guridi, L. E. y Kaless, G. (2017). *Calibración del modelo RUSLE-SEDD de pérdida y transporte de suelos. Caso de cuencas torrenciales en la Patagonia Central*. VII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Córdoba, Argentina.
- Bilmes, A., Pessacg, N., Alvarez, M. P., Brandizi, L., Cuitiño, J.L., Kaminker, S., Bouza, P.J., Rostagno, C. M., Núñez de la Rosa, D. y Canizzaro, A. (2016). *Inundaciones en Puerto Madryn: Relevamiento y diagnóstico del evento del 21 de Enero de 2016*. Informe Técnico CCT-CONICET CENPAT. Recuperado de <https://www.repositorio.cenpat-conicet.gob.ar/items/b81adae5-51d0-4ab4-b65b-42103ebb5df5>
- Bilmes, A., Cuitiño, J. I., Bouza, P., Scivetti, N., Rostagno, M. y Pascual, M. (2023). Critical areas for sediment delivery to the Chubut River, Patagonia Argentina: geomorphological evidence from the Sagmata pilot basin. *Journal of Maps* 19 (1). <https://doi.org/10.1080/17445647.2023.2244517>.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cedón, Dolz, J. y Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*. 30(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Cea, L., Bladé, E., Sanz-Ramos, M., Fraga, I., Sañudo, E., García-Feal, O., Gómez-Gesteira, M. y González-Cao, J. (2020). *Benchmarking of the Iber capabilities for 2D free Surface flow modelling*. Servicio de Publicaciones. Universidade da Coruña. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497640>
- Chachero, M. J. (2012). Estudio de precipitaciones en la ciudad de Trelew, análisis estadístico y ecuación de lluvia. *Cuadernos del CURIHAM*, 18, 23-37. <https://doi.org/10.35305/curiham.v18i0.47>
- Coronato, A., Coronato, F., Mazzoni, E. y Vázquez, M. (2008). The physical geography of Patagonia and Tierra del Fuego. *Development of Quaternary Sciences*, 11, 13-55. [https://doi.org/10.1016/S1571-0866\(07\)10003-8](https://doi.org/10.1016/S1571-0866(07)10003-8)
- Costa, J. E. y Jarrett, R. D. (2008). *An evaluation of selected extraordinary floods in the United States reported by the U.S. Geological Survey and implications for future advancement of flood science*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2008-5164. 232 p. <https://pubs.usgs.gov/sir/2008/5164/pdf/sir20085164.pdf>

- Del Valle, H. F., Blanco, P. D., Sione, W., Rostagno, C. M. y Elissalde, N. O. (2009). Assessment of salt-affected soils using multisensor radar data: A case study from Northeastern Patagonia (Argentina). En Metternicht, G., y Zinck A. (Eds.), *Remote sensing of soil salinization: Impact on land management* (1st ed, pp. 155–173). CRC Press.
- Denlinger, R. P., O’Connell, D. R. H. y House, P. (2002). Robust determination of stage and discharge: an example from an extreme flood on the Verde River, Arizona. En House, P. K., Webb, R. H., Baker, V. R., y Levish, D. R. (Ed) *Ancient Floods, Modern Hazard: Principles and applications of paleoflood hydrology*. (Vol 5, pp. 127-146). American Geophysical Union.
- Department of Transportation. (2015). *Geotechnical Test Method: Test Method and Discussion for the Particle Size Analysis of Soils by Hydrometer Method*. Nueva York, EE.UU. Geotechnical Engineering Bureau.
- Flaherty, S. y Pascual, M. (2018). *Mapeo de uso/cobertura del suelo con imágenes satelitales en el Valle Inferior del Río Chubut: comparación de sensores en un área piloto*. Conference XII Jornadas Nacionales de Geografía Física. Trelew, Argentina.
- Gleason, C. J., Smith, L. C., Finnegan, D. C., LeWinter, A. L., Pitcher, L.H. y Chu, V. W. (2015). Technical Note: Semi-automated effective width extraction from time-lapse RGB imagery of a remote, braided Greenlandic river. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 2963-2969. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2963-2015>
- Grant, G. E. (1997). Critical flow constrains flow hydraulics in mobile-bed streams: a new hypothesis. *Water Resources Research*, 33(2), 349-358. <https://doi.org/10.1029/96WR03134>
- Griffiths, H. M. y Tooth, S. (2021). Remembering and forgetting floods and droughts: lessons from the Welsh colony in Patagonia. *Cultural geographies*, 28(2), 341-361. <https://doi.org/10.1177/1474474020963135>
- Heritage G., Entwistle, N., Milan, D. y Tooth, S. (2019) Quantifying and contextualising cyclone-driven, extreme flood magnitude in bedrock-influenced dryland rivers. *Advances in Water Resources* 123, 145-159. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.11.006>
- Jarret, R. D. y England, J. F. (2002). Reliability of paleostage Indicators for paleoflood studies. En House, P. K., Webb, R. H., Baker, V. R., y Levish, D. R. (Ed) *Ancient Floods, Modern Hazard: Principles and applications of paleoflood hydrology*. (Vol 5, pp. 91-109). American Geophysical Union.
- Kaless, G. (2021). Crónica de las inundaciones en el valle y la meseta del Chubut. Desde los relatos de los pioneros galeses a los informes técnicos (1865 – 2021). *Revista Párrafos Geográficos*, 20(2), 51-104. Recuperado de <http://www.revistas.unp.edu.ar/index.php/parrafosgeograficos/article/view/641>
- Kaless, G., Pascual, M., Flaherty, S., Liberoff, A., García Asorey, M., Brandizi, L. y Pessacg, N. (2019a). Ecos de la tormenta de Comodoro Rivadavia en el Valle Inferior del Río Chubut. Aporte de sedimentos al Río Chubut desde la cuenca del Río Chico. En: J. M. Paredes, (Ed.) *Comodoro Rivadavia y la catástrofe de 2017. Visiones Múltiples para una ciudad en riesgo*. (1a ed., pp. 289-303) Comodoro Rivadavia: Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.
- Kaless, G., Frumento, O., Bianchi, E. Chachero, M. J., Bastida, R. y Iglesias, S. (2019b). Cuando en el desierto patagónico los arroyos braman. Evento extraordinario de abril de 2017 en la cuenca del Arroyo Perdido. En: J. M. Paredes. (Ed.), *Comodoro Rivadavia y la catástrofe de 2017. Visiones Múltiples para una ciudad en riesgo*. (1a ed., pp. 273-288). Comodoro Rivadavia: Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.
- Kaless, G., Bastida, R., Iglesias, S., Belcaro, F., Villar, M., Brandizi, L., Díaz Farias, C., Rubinich Queupan, M., Bianchi, E., Zappellini, D. y Serra, J. (2023). Estimación del caudal máximo de inundaciones históricas em arroyos efímeros. Casos de la Patagonia semiárida (Argentina). *Cuadernos de Ingeniería Civil Hidráulica*. Aceptado para publicación.
- Kehew, A. E., Milewski, A. y Soliman, F. (2010). Reconstructing an extreme flood from boulder transport and rainfall-runoff modelling: Wadi Isla, South Sinai, Egypt. *Global and Planetary Change* 70, 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2009.11.008>
- Leduc, P., Ashmore, P. y Sjogren, D. (2018). Technical note: Stage and water width measurement of a mountain stream using a simple time-lapse camera. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 1-11. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1-2018>
- Luque, J. y Beider. A. (2002). *Caracterización de una Cuenca Degradada por Erosión Hírica en la Pcia. de Chubut. Incidencia de las características Físicas*. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn, Argentina.

- Martínez Carretero, E. (2013). La Diagonal Árida Argentina: entidad bio-climática. En: D.R. Pérez D.R., Rovere, A.E. y Rodríguez Araujo, M.E. (Ed.) *Restauración ecológica en la diagonal árida de la Argentina* (1a ed., 14-31). Vázquez Mazzini Editores.
- Middleton, N. y Thomas, D. (1992) *World atlas of desertification*. 2nd edition. Londres, Reino Unido, Arnold.
- Paredes, J. M., Ocampo, S. M., Foix, N., Olazabal, S. X., Valle, M. N. y Allard, J. O. (2021). Geomorphic and Sedimentological Impact of the 2017 Flash Flood Event in the City of Comodoro Rivadavia (Central Patagonia, Argentina). En P. Bouza, Rabassa, J., Bilmes, A. (Ed) *Advances in Geomorphology and Quaternary Studies in Argentina. Proceedings of the Seventh Argentine Geomorphology and Quaternary Studies Congress* (1st. ed., 3-29). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66161-8_1
- Parsons, A. J. y Abrahams, A. D. (2009). Geomorphology of desert environments. En A.J., Parsons, y Abrahams, A.D., (Eds) *Geomorphology of desert environments*, (2nd ed., 3-7). Springer Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5719-9_1
- Patalano, A., García, C. M. y Rodríguez, A. (2017). Rectification of Image Velocity Results (RIVER): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV). *Computer and Geosciences* 109, 323-330. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.009>
- Pessag, N., Flaherty, S., Solman, S. y Pascual, M. (2020). Climate change in northern Patagonia: critical decrease in water resources. *Theoretical and Applied Climatology*, 140, 807-822. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03104-8>
- Pessag, N., Blázquez, J., Lancelotti, J. y Solman, S. (2021). Climate changes in coastal areas of Patagonia: observed trends and future projections. En E.W. Helbling, Narvarte, M. A., González, R. A., y Villafañe, V. (Eds.) *Global Change in Atlantic Coastal Patagonian Ecosystems, A Journey Through Time* (1st. ed., 13-42). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86676-1_2
- Prohaska, F. (1976). The climate of Argentina, Paraguay and Uruguay. En E. Schwerdtfeger., (Ed.) *Climate of Central and South America. World Survey of Climatology* (57-69). Amsterdam, Países Bajos, Elsevier.
- Reid, I., Laronne, B. L. y Powell, D. M. (1998). Flash-flood and bedload dynamics of desert gravel-bed streams. *Hydrological Processes* 12. 543-557. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19980330\)12:4<543::AID-HYP593>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19980330)12:4<543::AID-HYP593>3.0.CO;2-C)
- Renard, K. G. y Keppel, R. V. (1966). Hydrographs of ephemeral streams in the Southwest. *Journal of the Hydraulics Division*, 92 (2), 33-52. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001419>
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K. y Yoder, D. C. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Agriculture Handbook No. 703. Washington D.C. Estados Unidos. U.S. Department of Agriculture.
- Renard, K. G., Nichols, M. H., Woolhiser, D. A. y Osborn, H. B. (2008). A brief background on the U.S. Department of Agriculture Agricultural Research Service Walnut Gulch Experimental Watershed. *Water Resources Research*, 44, 1-11. <https://doi.org/10.1029/2006WR005691>
- Roache, P. J. (1997). Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. *Annual Review of Fluid Mechannics*, 29, 123-160. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.29.1.123>
- Rostagno, C., Coronato, F., Del Valle, H. y Puebla, D. (1999). Runoff and Erosion in Five Land Units of a Closed Basin of Northeastern Patagonia. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 13(3), 281-292, <https://doi.org/10.1080/089030699263311>
- Ruiz, A. H. y Pongolini, A. S. (2002). *Emergencia hídrica de agosto de 2001 en el Río Chubut. Respuesta de la red de alerta*. XIX Congreso Nacional del Agua. Villa Carlos Paz, Argentina.
- Serra, J. (1999). Riesgo de erosión hídrica en el cuenco aluvional del área Dique F. Ameghino y Boca Toma, Valle Inferior del Río Chubut. *Cuadernos del CURIHAM*, 5(2), 63-83.
- Serra, J. (2004). Urbanización e inundaciones em sistemas hídricos del centro de la Región Patagónica. En Bertoni, J. C. (Ed.) *Inundaciones urbanas en Argentina* (155-196) Córdoba, Argentina, Estudio Tríptico.
- Tinkler, K. J. (1997). Critical flow in rockbed streams with estimated values for Manning's n. *Geomorphology* 20 (1 y 2), 147-164. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(97\)00011-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(97)00011-1)

Tipo de Publicación: ARTICULO.

Trabajo recibido el 26/09/2023, aprobado para su publicación el 23/11/2023 y publicado el 15/12/2023.

COMO CITAR

Kaless, G., Frumento, O., Malnero, H. A. y Pascual, M. A. (2023). Cuenca Experimental Arroyo Sagmata: monitoreo de crecidas torrenciales en arroyos efímeros de la Patagonia Semiárida (Pcia. del Chubut, Argentina). *Cuadernos del CURIHAM*, 29. e192. <https://doi.org/10.35305/curiham.v29i.e192>

ROLES DE AUTORIA

GK contribuyó con el análisis formal, redacción y visualización de los resultados. OF contribuyó con la instalación, mantenimiento de pluviómetros y procesamientos de registros. GK, MP y AM contribuyeron con la instalación de equipos en arroyos, relevamientos de campo, procesamientos fotogramétricos, y conceptualización del proyecto. MP contribuyó con la supervisión, adquisición de fondos y administración del proyecto.

Los autores aprobaron la versión final para ser publicada y son capaces de responder respecto a todos los aspectos del manuscrito.

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



AMENAZA EN EL RIESGO DE INUNDACIONES EN SISTEMAS HIDROLÓGICOS DE LLANURA ANTE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO: APLICACIÓN AL SISTEMA "LAS ENCADENADAS"

THREAT TO FLOODING RISK IN FLATLANDS HYDROLOGICAL SYSTEMS UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS: APPLICATION TO THE "LAS ENCADENADAS" SYSTEM

Magalí V. Soria⁽¹⁾, Pedro A. Basile⁽²⁾ y Gerardo A. Riccardi^{(2) (3)}

⁽¹⁾ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Argentina.
e-mail: msoria@frvt.utn.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4680-8753>

⁽²⁾ Departamento de Hidráulica (Escuela de Ingeniería Civil) y Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

e-mail: pbasile@fceia.unr.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8826-0621>

⁽³⁾ Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
e-mail: riccardi@fceia.unr.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9294-3166>

RESUMEN

El presente trabajo estudia la amenaza asociada a diversos escenarios de cambio climático (CC) en el riesgo de inundaciones en el sistema hidrológico no-típico "Las Encadenadas", ubicado al sur de la provincia de Santa Fe en Argentina. Las herramientas y metodologías utilizadas son fundamentadas en la geomática. Respecto a representaciones del comportamiento del sistema, es utilizado un modelo hidrológico-hidráulico distribuido, físicamente basado. Como principales resultados, es lograda la cuantificación y mapeo de superficies de agua y caudales, la permanencia del agua superficial y su cercanía a ejidos urbanos y redes viales, para recurrencias con y sin consideración del efecto por CC. Para las condiciones más desalentadoras: recurrencia de 100 años, suelo cuasi-saturado y coeficiente de CC de 1.30; se obtuvo un 19.92% de superficie del sistema ocupada con agua, caudales pico del orden de los 320 m³/s en la sección de cierre, un escurrimiento del agua del 11.6% en las primeras 24 horas y un total de 202 tramos de redes viales con agua en proximidades. Se obtuvo una nueva delimitación del sistema y se realizaron mejoras en la zonificación y regulación del uso del suelo en áreas inundables de diversos pueblos, de acuerdo con Ley N° 11730.

Palabras clave: Sistemas Hidrológicos de Llanura, Modelo Hidrológico-Hidráulico Distribuido y Físicamente Basado, Herramientas Geomáticas, Las Encadenadas, Cambio Climático.

ABSTRACT

In the present work the threat associated with different climate change (CC) scenarios on the flooding risk of the non-typical hydrological system called "Las Encadenadas" is studied. The basin is located in the southern part of Santa Fe province in Argentina. The tools and methodologies used are based on geomatics. Regarding representations of the system behavior, a physically based distributed hydrologic-hydraulic model is used. The main results are the quantification and mapping of water surfaces and flows, the permanence of surface water and its proximity to urban areas and road networks, for recurrences with and without consideration of the CC effect. For the most discouraging conditions: 100-year recurrence, quasi-saturated soil and CC coefficient of 1.30, we obtained 19.92% of the system surface area occupied with water, peak flows of about 320 m³/s in the closing section, water runoff of 11.6% in the first 24 hours and a total of 202 sections of road networks with water in the vicinity. A new delimitation of the system was obtained and improvements were made in the zoning and regulation of land use in flood-prone areas in different towns, in accordance with Law No. 11730.

Keywords: Flatlands Hydrological Systems, Distributed and Physically Based Hydrological-Hydraulic Model, Geomatics Tools, Las Encadenadas, Climate Change.

INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Hidrológicos No Típicos (SHNT) son sistemas que no cuentan con una superficie tributaria definida de componentes lineales, organizados y jerarquizados, ni con una relación puntual, sino que prevalece la estructura de disipación (Fertonani y Prendes, 1983).

Dichos sistemas tienen como rasgo distintivo la baja energía morfológica del terreno (Fuschini Mejía, 1994) encontrándose conformados por zonas bajas y depresiones, las cuales se interconectan naturalmente mediante cañadas y esteros.

El agua pluvial en este tipo de sistemas se moviliza muy lentamente sin encauzarse en forma de manto, incitada generalmente por la pendiente local (Paoli y Giacosa, 1983) hasta llegar a las depresiones naturales (lagunas y bajos temporarios), produciendo el anegamiento del sector. Para eventos de recurrencias importantes, dichos espacios de amortiguación incrementan sus niveles hasta el desborde, anegando la zona aledaña y/o pudiendo conectarse con otras lagunas a través de los esteros y cañadas.

Cabe destacar que los fenómenos hidrológicos son los mismos tanto para zonas llanas como para zonas de relieve, pero las variables que lo componen asumen una importancia e interrelación diferentes en cada uno de éstos, siendo la principal diferencia el lapso en el cual actúan las mismas (Paoli y Giacosa, 1983).

Con respecto al balance para una tormenta para una cuenca hidrológicamente aislada (situaciones que se presentan en este trabajo), por tratarse de un intervalo de tiempo corto, el planteo de la cuantificación de las variables del ciclo hidrológico se considera:

$$P = \Delta F + \Delta S + I + A_s \quad (1)$$

Es decir, el enfoque del trabajo involucra los procesos de precipitación (P), intercepción en follaje (F) y superficial (S), infiltración (I) durante el evento y escurrimiento superficial (A_s), procesos considerados predominantes durante un evento lluvioso y mayormente causantes de amenazas de inundación con el consiguiente riesgo hídrico.

Dicho esto, se remarca que el estudio no contempla la evaluación directa de procesos de evapotranspiración, exfiltración, recarga, escurrimiento subterráneo, ni tampoco almacenamiento de humedad de suelo ni almacenamiento subterráneo; siendo las mismas

introducidas como condiciones iniciales y de borde para el correcto análisis por evento.

Perturbaciones antrópicas

La instalación del hombre en las llanuras ha alterado el ciclo hidrológico de estos sistemas (Fuschini Mejía, 1994). Si bien la inundación es producida por precipitaciones considerables, también puede ser coproducida por la acción humana al alterar de diversas maneras el equilibrio del mismo.

Una modificación importante que el hombre produce en el paisaje (actualmente en muchos casos de manera incorrecta) es la sustitución de cobertura vegetal nativa por cultivos de cereales, oleaginosas, pasturas, etc. Los cambios en la vegetación natural por otras implantadas producen una gran fragilidad en los SHNT, recordando principalmente las componentes verticales del ciclo hidrológico, dentro de las cuales se encuentra la humedad del suelo y la evapotranspiración, dos componentes ligadas a la vegetación. Además, el tipo de técnica con el cual se siembran y se cosechan los cultivos, afecta el ciclo normal del agua precipitada, obteniendo en el peor de los casos la impermeabilización del suelo, lo cual genera más escorrentía directa.

Otro efecto importante para destacar es el producido por las conexiones mediante canalizaciones de lagunas y/o bajos temporarios, las cuales en muchos casos no son planificadas o son clandestinas. Estas acciones disminuyen las superficies de agua acumuladas, con lo cual generan una mayor escorrentía superficial y en un tiempo mucho menor al natural, produciendo el colapso del sistema aguas abajo.

Sumado a estas perturbaciones, en nuestra región se presenta una planificación escasa para la regulación de los excedentes hídricos superficiales, falta de ejecución de proyectos de obras, desconocimiento del comportamiento de los sistemas hídricos y falta de información hidrológica seriada, entre otros (Riccardi et al., 2008).

Cambio climático en los Sistemas Hidrológicos (SH): riesgos hidroambientales

La definición de cambio climático (CC) provista por el artículo N°1 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (1992) expresa que cambio climático, es un cambio del clima adjudicado a la actividad humana que modifica las características de la

composición de la atmósfera mundial y se acopla a la variabilidad normal del clima observada en periodos de tiempo comparables.

En el Sexto Informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) (2021), más específicamente en el aporte del Grupo de Trabajo 1, se aborda una comprensión física de CC, recopilando los últimos avances en la ciencia del clima y combinando múltiples líneas de evidencia. Se ha incorporado, además, con objeto de brindar un análisis tanto espacial como temporal flexible ya sea de la información sobre el CC basada en datos como de los resultados de la evaluación, un Atlas interactivo (Gutiérrez et al., 2021).

En el Atlas, para la región Sur-Este de América del Sur, se presentan los coeficientes de incrementos de precipitaciones máximas, de 5 días de duración, los cuales fueron adoptados en este trabajo, mostrándose en la Tabla 1.

Tabla 1. Coeficientes de incrementos de Precipitaciones máximas de 5 días de duración. CMIP6-Coupled Model Intercomparison Project Fase 6 (Gutiérrez et al., 2021) Región: Sur-Este de América del Sur.

Escenario	Calentamiento (°C)	Coefficiente CC
ECC1	1.5	1.06
ECC2	2.0	1.10
ECC3	3.0	1.20
ECC4	4.0	1.30

ECC: escenario de cambio climático

Respecto al riesgo, Natenzon (2017) realiza un abordaje del mismo, describiendo a los componentes del mismo: peligrosidad es definida como una potencialidad que requiere de conocimientos sobre los aspectos físicos-naturales del proceso desencadenante, vulnerabilidad como producto de estructuras sociales que requieren conocer los aspectos socioeconómicos del estado antecedente de los grupos involucrados, exposición como el impacto material que demanda del conocimiento de aspectos territoriales y poblaciones; y a la incertidumbre, formando parte de las perspectivas/decisiones, necesitando conocer los aspectos políticos, imaginarios y representaciones de los grupos sociales involucrados.

El IPCC para su último informe de evaluación, realiza una definición de riesgo con el objeto de que el uso del concepto entre sus colaboradores sea

completamente coherente, y permita una comunicación eficaz. Lo define como un potencial de consecuencias adversas para los sistemas humanos o ecológicos, aceptando la variedad de valores y metas asociadas a tales sistemas. Además, define que, en el marco de CC, el riesgo puede originarse de los impactos potenciales del CC como así también de las respuestas humanas al CC (Reisinger et al., 2020).

Caracterización del sistema hidrológico de llanura Las Encadenadas

Debido a que el sistema hidrológico de interés no se encuentra muy estudiado, se inicia el trabajo caracterizando al mismo, con el objeto de comprender primeramente el comportamiento de éste frente a eventos conocidos, y posteriormente pronosticar su desenvolvimiento frente a eventos futuros acrecentados por CC.

Ubicación

El SHNT Las Encadenadas se encuentra ubicado en Argentina, al sur de la provincia de Santa Fe, en el departamento General López (Figura 1). El mismo abarca completamente los distritos de San Eduardo y Venado Tuerto. A su vez, en menor proporción, comprende los distritos de: Maggiolo, Murphy, San Francisco, Cafferata, La Chispa, Carmen, Chapuy, Sancti Spíritu, María Teresa, Santa Isabel, Elortondo, Villa Cañas y Teodelina; teniendo como punto de cierre del mismo esta última localidad.

Es atravesado por las rutas nacionales N° 8 y N° 33, las rutas provinciales N°: 14, 15 y 94, las rutas secundarias: 2-S, 3-S, 4-S, 5-S, 7-S y 8-S; y las líneas San Martín y Mitre del ferrocarril.

Los límites hidrológicos del área de estudio de noreste a sureste son: cuenca del río Carcaraña, cuenca del arroyo Saladillo, cuenca superior del arroyo Pavón, cuenca de la laguna de Melincué y cuenca del río Arrecifes. De noroeste a suroeste son: cuencas de lagunas endorreicas y cuenca del río Salado brazo sur (Giraut et al., 2008).

Clima

El clima de la región de estudio es definido como templado húmedo con estación seca. Si bien esta definición parece contradictoria, responde a las estadísticas sobre las condiciones climáticas imperantes en esta zona: clima C (templado), a (húmedo) y w (invierno seco) (Martín, 2014). Las precipitaciones medias anuales de la región rondan los 1000 mm.

Además, se destaca que en esta zona se presentan dos principales tipos de tormentas: las de frente frío y las de calor o verano. Se producen en promedio 56

cambios de tiempo al año. Salvo contadas excepciones, las tormentas siempre se producen poco antes o durante el cambio de tiempo (Martín, 2014).

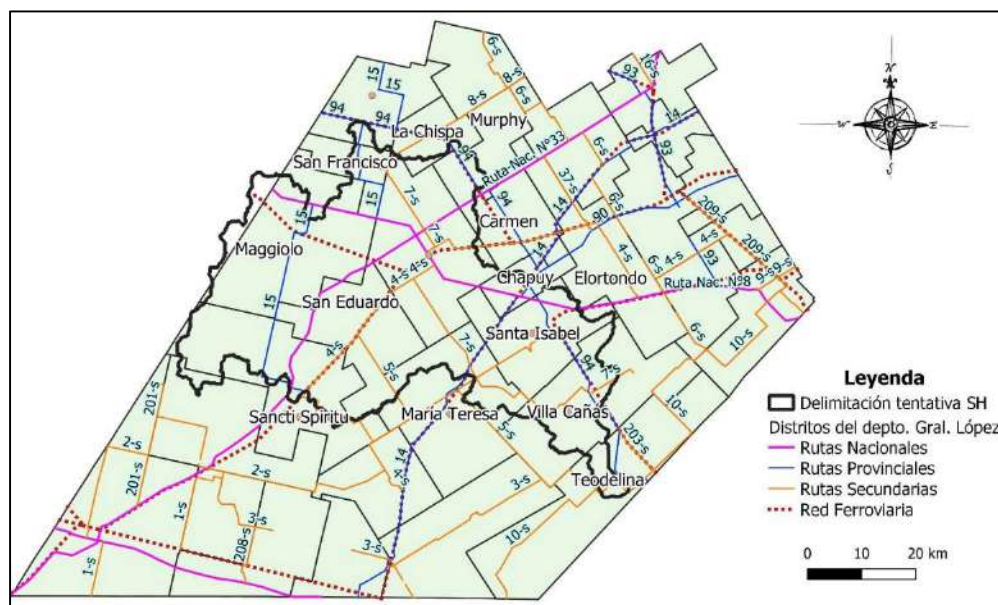


Figura 1: Ubicación geográfica del SH Las Encadenadas.

OBJETIVOS

El objetivo general es estudiar la dinámica hídrica del SH de llanura, mediante la conceptualización de los procesos relevantes involucrados y la simulación hidrológica correspondiente; incorporando la incertidumbre asociada a diferentes escenarios de CC.

Asimismo, se plantean como objetivos específicos, analizar el impacto para diversos escenarios de lluvia, determinando las zonas afectadas en términos de áreas anegadas y permanencias (caracterización de impacto de inundaciones) para el estado actual del clima y para hipotéticos estados futuros frente a la influencia del CC.

Se optó por simular la dinámica de los procesos de almacenamiento y escurrimiento superficial asociados a eventos de lluvias máximas de varios días de duración, similares a eventos de lluvia ya acontecidos en la zona de estudio, los cuales han puesto en emergencia diferentes vías de comunicación y poblaciones dentro de la cuenca.

Algunos tópicos tales como almacenamiento, elaboración, análisis y recuperación de gran cantidad

de información espacialmente distribuida, gestionada mediante sistemas de información geográfica (SIG) y su combinación con modelos hidrológicos son asimismo objetivos importantes de este trabajo.

Se consideran además como objetivos importantes la transferencia al medio de metodologías de evaluación apropiadas para la planificación y gestión de los recursos hídricos de la región, haciendo por lo tanto hincapié en la aplicación del estudio en el SH Las Encadenadas, ubicado en el sur de la Provincia de Santa Fe.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

En lo que respecta a Materiales, a modo de resumen se indica que es empleada información básica para realizar la simulación hidrológica/hidráulica del sistema de estudio, como ser: modelo digital de elevación (DEM), mapas de tipologías y usos del suelo, imágenes satelitales, canalizaciones, alcantarillas intervinientes, registros históricos de lluvias, temperatura, viento, humedad, etc. Se destaca que dicha información es adquirida conforme métodos clásicos de recolección y mediante productos provenientes de la teledetección.

En cuanto a Metodología, son utilizadas herramientas de geomática, principalmente para la preparación de información espacial. Respecto a la simulación hidráulica del sistema de estudio, es empleado el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado VMMHH 1.0.

Constitución del modelo VMMHH 1.0

El VMMHH 1.0 está compuesto por un modelo hidrológico-hidráulico (Riccardi, 2001) y una plataforma computacional (Stenta et al., 2005).

La modelización del SH se encuentra constituida por elementos del tipo Valle y Río, los cuales representan en este caso, porciones de planicies y canalizaciones/cañadas presentes en el mismo. Además, son presentadas las diferentes vinculaciones entre los elementos.

Cada uno de los elementos que componen el SH contiene información característica del área que representan, en el caso de elementos del tipo Valle, contienen información como ser: coordenadas, altura del terreno y coeficiente de rugosidad de Manning. En cuanto a los elementos de tipo Río, contienen además de la información requerida para elementos Valle, ancho de base, talud y profundidad del canal. Conjuntamente, con la finalidad de representar situaciones semejantes a la realidad, los elementos contienen alturas iniciales de agua, cuando así lo requiere la representación del evento.

Otro factor para considerar en la modelización es el contenido humedad inicial en los elementos. En el modelo hidrológico-hidráulico de elementos, al definir el Número Curva (CN) al inicio de una tormenta real o de proyecto, se define el complejo suelo-vegetación más una aproximación a la humedad antecedente en cada elemento de discretización. Si bien en el modelo la señal de entrada es la lluvia neta, esta variable se deduce a partir de la precipitación total y el CN calculado inicialmente a partir de una condición media (CN II) y luego llevada a una condición real [CN entre condición I (seca) y III (saturada)] que representa la humedad inicial antecedente para un evento.

Información geomorfológica

Corrección altimétrica del DEM

En lo que respecta a materiales, fue utilizado el DEM obtenido por la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Model) de 90 m de resolución espacial, de

la cual se utilizaron cuatro escenas; y puntos acotados del Instituto Geográfico Nacional (IGN), los cuales presentan valores altimétricos precisos, referenciados sobre el nivel del mar, para el área de estudio. Los softwares empleados fueron QGIS y GRASS GIS.

En cuanto a la metodología, debido a que el modelo puede presentar ciertas diferencias con la altimetría real del terreno, son realizadas diferentes correcciones al mismo. Para iniciar con dichas correcciones, es efectuada la unión de las cuatro escenas del DEM-SRTM y luego es exportada al software GRASS-GIS para aplicar correcciones con herramientas específicas para DEM's.

La primera operación de correcciones altimétricas realizada al modelo es Relleno de vacíos y depresiones, la cual corrige las falsas depresiones encontradas en el DEM. Seguidamente, es aplicado un filtro de paso bajo de ventana móvil, con el objeto de eliminar ruidos en el ráster.

Luego de estas correcciones, con motivo de corroborar la validez de los valores altimétricos del modelo, es realizado un análisis de regresión lineal simple para puntos seleccionados del DEM, los cuales se contrastaron con puntos acotados provistos por el IGN con objeto de identificar una relación entre las variables.

Se destaca que la correlación obtenida entre los 336 pares de valores del modelo SRTM y del IGN fue formidable, con un valor $R^2 = 0.99$, un error porcentual del sesgo de 0.001 y una desviación de la raíz media cuadrada de 1.61, lo cual indica que la corrección es acertada.

Finalizadas las correcciones altimétricas, debido a que el DEM poseía un sistema convencional que es empleado para la representación de la cartografía a nivel mundial (EPSG: 4,326 - WGS 84), el mismo fue proyectado a coordenadas planas (para la zona de estudio se utilizó WGS 84 - UTM zona 20-S, codificación: EPSG 32,720) con el objeto de trabajar con coordenadas precisas y unificar el sistema con los mapas de suelos y usos del suelo. A su vez, éste fue resampleado a píxeles de 100 m x 100 m, puesto que el software QSWAT+, el cual se detalla posteriormente, se ejecuta con mosaicos de iguales valores en x e y.

Generación de batimetrías

Para realizar una interpretación batimétrica marginal del sistema de estudio, y que la misma resulte

funcional a la simulación hidrológica, fueron empleados los siguientes recursos: Imágenes satelitales Landsat, Software ENVI 4.8 (para el procesamiento y análisis de imágenes geoespaciales), Software QGIS, Software R (para el análisis estadístico y gráfico), DEM ajustado e información batimétrica proveniente de EVARSA (1995).

En cuanto a la metodología, la misma se inicia con la identificación de las lagunas pertenecientes o circundantes al SH de estudio, posteriormente se trabaja con imágenes satelitales de diferentes fechas para ver el comportamiento de las mismas con el paso del tiempo y extraer en forma de máscaras de agua sus geometrías. Para finalizar, se contrastan dichas máscaras con información altimétrica del DEM, logrando de tal manera una batimetría marginal de las lagunas (Soria et al., 2017). Cabe destacar que para las lagunas presentes en el estudio de EVARSA (1995) se pudo además cotejar la información de manera visual con los relevamientos topobatimétricos presentes en el mismo. Las lagunas seleccionadas para realizar el estudio batimétrico marginal fueron elegidas conforme pertenencia o cercanía a la delimitación actual del SH, puesto que en esta instancia no se tiene una delimitación concluyente del SH, pudiendo lagunas cercanas aportar agua pluvial al mismo.

Delimitación marginal del SH de estudio

Para realizar la delimitación del sistema de estudio fueron utilizadas las siguientes herramientas y materiales: Mapa de delimitación del SH del Instituto Nacional del Agua (INA) (Giraut et al., 2008), Mapa de delimitación del SH del Ministerio de Infraestructura y Transporte, Secretaría de Recursos Hídricos, Subsecretaría Operativa, Dirección Provincial de Coordinación de Comité de Cuencas, Dirección General de Comité de Cuencas y Talleres; Capa delimitación de la parte alta del SH Las Encadenadas (Soria, 2019), complemento QSWAT+, el cual es una herramienta de evaluación de suelo y agua para el manejo de cuencas (Soil & Water Assessment Tool [SWAT], 2019); y el DEM calibrado y modificado conforme el estudio de batimetrías como material de ingreso al software.

En cuanto a la metodología, inicialmente al disponer de dos delimitaciones del SH que se encontraban en formato pdf, fue empleado el software QGIS para realizar la georreferenciación de las mismas y posteriormente el trazado en formato vectorial; pero al no ser las delimitaciones coincidentes y, con motivo de comprender fehacientemente el comportamiento

del agua proveniente de precipitaciones en el SH, es realizada la delimitación del mismo mediante software y complemento citados. Como insumo de dichas herramientas es empleado el DEM con las correcciones presentadas hasta el momento.

Realizada la delimitación, la cual fue ejecutada con procedimientos similares (Soria, 2019), es notado que la misma incorpora el SH cerrado aledaño. Esto es así puesto que el mecanismo de delimitación se basa en la búsqueda de caminos de flujo, no considerando los sistemas cerrados como una posibilidad sino forzando su camino a una salida. Debido a que se tiene poca información sobre el comportamiento del sistema aledaño, y que no es de descartar una posible unión de ambos sistemas para recurrencias de años elevados, se ha decidido conservar dicha delimitación para el estudio, resultando al finalizar las simulaciones hidrológicas-hidráulicas para distintas recurrencias, la delimitación final.

Además, conforme la asistencia de imágenes satelitales actuales, fueron detectadas canalizaciones en los bordes del SH las cuales vierten sus aguas pluviales dentro del mismo y zonas de dudoso escurrimiento, con lo cual debieron ser anexadas para su análisis.

En la Figura 2 pueden apreciarse las delimitaciones mencionadas.

Discretización del DEM corregido y determinación de rangos numéricos componentes de las subcuencas

El software de simulaciones hidrológico-hidráulicas necesita como información de ingreso valores altimétricos puntuales representativos del SH, los cuales deben estar equidistantes en sus dos direcciones del plano.

Puesto que hasta el momento se venía trabajando con el DEM, el cual es en formato ráster, se debió realizar la discretización de dicha información conforme los lineamientos del software de simulaciones.

El modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado VMMHH 1.0, permite la caracterización mediante categorías de distintos sectores de la cuenca, tanto para diferenciar características del suelo y cobertura, como para distinguir el impacto de los eventos climáticos en distintas áreas. Para este estudio, las categorías fueron adoptadas como representación de las distintas subcuencas presentes en el SH.

Debido a que la numeración de los elementos de la discretización del SH están dados conforme su aparición en el plano, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo; y que, las subcuencas presentan formas irregulares

conforme su naturaleza hidrológica, hubo que realizar un reconocimiento de los valores identificatorios de elementos presentes en cada una de las subcuencas y agruparlos en rangos conforme su correlatividad.

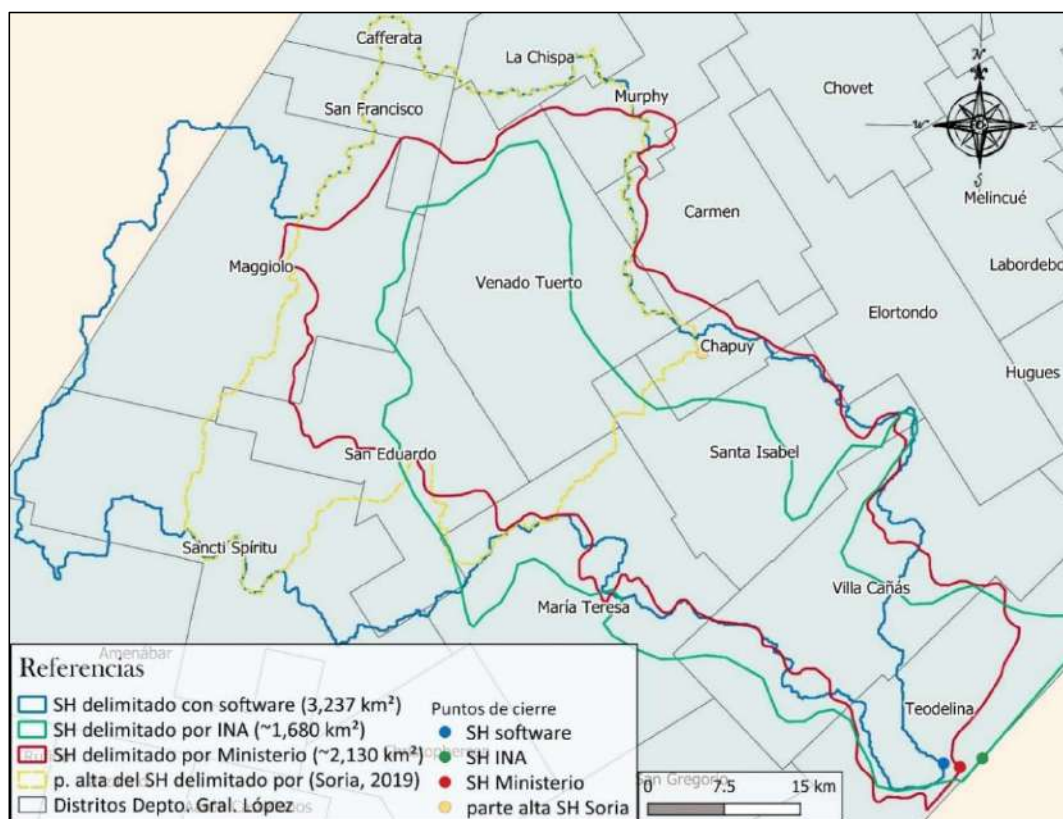


Figura 2: Comparativa de delimitaciones para el SH de estudio.

Información hidrológica

Al iniciar con el tratamiento de la información hidrológica, son obtenidas las divisiones en subcuencas, resultado de la tipología de suelos presentes en el área de estudio el uso que se le da al mismo y la altimetría del terreno. Para la tipología de suelos se trabajó con el mapa confeccionado por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (Espindola et al., 2014); y respecto a los usos del suelo, fue utilizado el producto Land Cover de MODIS (Friedl et al., 2010). Cabe destacar que las subcuencas son identificadas meramente a los efectos de diferenciar los distintos tipos de suelos, usos y pendientes; no así para la modelación del escurrimiento superficial, ya que el modelo implementado en este estudio no necesita que se delimiten subcuencas para representar la dinámica del escurrimiento.

Seguidamente, es ubicada geográficamente preparada la información climatológica, la cual se presenta, a excepción de la información pluviométrica, de carácter mensual, debiendo ser transformada a diaria para poder efectuar la simulación hidrológica. En cuanto a la información pluviométrica, la misma es recabada de la estación meteorológica ubicada en Venado Tuerto (VT), perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), y de una Estación particular de la localidad de Villa Cañas (VC); siendo ambas ciudades pertenecientes al área de estudio y poseyendo un registro pluviométrico que data desde 1989. Cabe destacar que, debido a que la información pluviométrica de la localidad de Villa Cañas es proveniente de una estación particular, no adquiriendo rigor de información oficial, debió efectuarse un análisis de consistencia (Basile, 2008), el cual manifestó una marcada proporcionalidad

entre ambas, no observándose ningún tipo de quiebre significativo y con un valor de $R^2 = 0.9988$, lo cual se traduce en una efectiva consistencia de los datos de la estación VC.

Posteriormente, son obtenidos mediante simulación hidrológica los valores de cada una de las variables del ciclo hidrológico para el período de análisis. El software empleado para la obtención de los valores promedio de las variables es QSWAT+. El mismo simula al ciclo hidrológico basándose en la ecuación de equilibrio del agua. Para la infiltración, considera que la tasa inicial depende del contenido de agua en la superficie terrestre y la final a la conductividad hidráulica saturada de la tierra. Para determinar la humedad del suelo, utiliza una técnica que predice el flujo por cada capa de tierra en la zona principal; ocurriendo la filtración cuando se excede la capacidad de espacio de una capa de tierra y no se presenta saturada la siguiente inferior. Para la evapotranspiración, computa por separado la evaporación de plantas y suelos, utilizando funciones exponenciales de profundidad de suelo y contenido de agua para evaporación de agua en el suelo; y simulando como una función lineal de la evapotranspiración potencial e índice de área de hoja a la transpiración de la planta. Para la evapotranspiración potencial, presenta tres métodos opcionales para la estimación: Hargreaves, Priestley-Taylor y Penman-Monteith (empleando este último para el cálculo). En cuanto a la simulación de la escorrentía, utiliza una modificación del método de Número Curva del Servicio de Conservación de Suelos (Uribe, 2010).

Para la calibración del balance, fue considerado el primer año de datos (1989) de simulación como calibración. Cabe destacar que la obtención de las variables del ciclo hidrológico, no sólo son importantes para la caracterización del SH, sino que también son fuentes de ingreso a las simulaciones hidrológicas-hidráulicas de eventos puntuales realizadas más adelante.

Para finalizar, son estimados los valores de CN en condición media para cada uno de los meses en cada una de las subcuencas, con el objeto de definir el complejo suelo-vegetación y una aproximación de la humedad antecedente del suelo. Esta información es requerida para determinar los hietogramas netos, los cuales alimentan al modelo. Para la estimación de los valores de CN de cada una de las subcuencas que componen el SH de estudio es utilizada información del tipo hidrológico de suelo, del uso de la tierra y

tratamiento, y condición previa de humedad; la cual ya fue generada. Obtenido el resultado, fue realizado el promedio mensual de CN para cada una de las de las unidades presentes, los cuales fueron verificados con los valores brindados en Tipos de complejos hidrológicos y números de escurrimiento respectivos para condición II (media) del libro Hidrología, procesos y métodos (Orsolini et al., 2008).

Información sobre canalizaciones

Debido a la escasa información sobre canalizaciones presentes en el sistema de estudio, son empleadas metodologías de análisis espacial, mediante el software QGIS, tanto para identificar los canales presentes como así también para extraer información característica de los mismos.

Información sobre alturas iniciales

Puesto que no se dispone de información directa sobre alturas de agua en el SH, debieron utilizarse técnicas de teledetección y SIG para obtener las mismas. A grandes rasgos, la metodología consiste en clasificar imágenes satelitales radar en coberturas de agua/no agua y analizar las superficies de agua: conforme el valor altimétrico del terreno en el elemento de mayor altura que contempla el cuerpo de agua, asignar tirantes a los restantes elementos; realizando este procedimiento para cada uno de los cuerpos de agua presentes en el evento de análisis.

En lo que concierne a herramientas para desarrollar esta metodología, a modo de resumen se menciona principalmente el software SNAP, el cual es empleado para la manipulación de las imágenes satelitales radar, el software QGIS para la extracción de la información proveniente de las imágenes satelitales radar, y hoja de cálculo de Microsoft Excel, para el tratamiento final de la información.

Con respecto a los materiales, insumos de los softwares, son utilizados los productos L1 Detected High-Res Dual-Pol (GRD-HD) del satélite radar Sentinel 1 para distintas fechas; y el DEM SRTM de 90 m de píxel corregido.

Selección de eventos para la simulación del SH

La selección de eventos climatológicos para el área de estudio debió ser realizada conforme dos factores: por un lado, los períodos de búsqueda de información pluviométrica debieron ser ajustados acorde a la disponibilidad de registros históricos de lluvias de las

localidades de Venado Tuerto y Villa Cañas, de las cuales se dispone información desde el año 1989; y el otro motivo, severamente limitante a la hora de elegir los eventos puesto que de él depende la calibración de las simulaciones, fue el de la disponibilidad de imágenes satelitales radar, de las cuales existe un registro que inicia a finales de 2014. Cabe aclarar que se utilizaron únicamente imágenes radar debido a que las imágenes satelitales ópticas, si bien poseen un archivo histórico considerablemente mayor al de las imágenes radar, se presentan cubiertas con nubes en la totalidad de las fechas en las cuales se registra precipitación.

Por estas cuestiones, los eventos climatológicos seleccionados para la simulación del comportamiento del SH fueron los siguientes:

Evento N° 1: Se inicia la simulación del mismo el 21 de diciembre de 2016, con una primera calibración de ajuste para el día 02 de enero de 2017 y una calibración de cierre del evento el día 14 de enero de 2017. Dicho evento presentó una precipitación total de 347 mm para la localidad de Venado Tuerto y 363 mm para la localidad de Villa Cañas. Es el evento de mayor magnitud presente en el rango de estudio, y a su vez, un evento notable para la región, que puso en emergencia hídrica la zona, afectando numerosas poblaciones y vías de comunicación.

Evento N° 2: De inicio con fecha 10 de octubre de 2016 y culmina el 22 de octubre de 2016. Este evento presentó una precipitación total de 57 mm para la localidad de Venado Tuerto y 52 mm para la localidad de Villa Cañas. En cuanto a magnitud es un evento leve, distribuido en el tiempo, resultando útil su análisis para la calibración de eventos de baja recurrencia.

Cabe aclarar, que las fechas de inicio de los eventos son dadas conforme las fechas de las imágenes satelitales radar utilizadas en las asignaciones de alturas iniciales de agua del SH.

Simulación de eventos climatológicos antecedentes

Los procedimientos efectuados aquí, son meramente realizados con el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado VMMHH 1.0.

Ingreso de información altimétrica

Para dar inicio a las simulaciones, es ingresada como primera información el DEM corregido, el cual además posee ejecutadas las batimetrías de las lagunas presentes. Cabe recordar que los valores de dicho DEM se presentan discretizados en valores

puntuales, en forma de malla, numerados de izquierda a derecha y de norte a sur, con una separación entre puntos de 100 m en ambas direcciones.

Adjudicación de Número de Curva CN

En esta etapa, son ingresados los valores de CN normales (condición II) a cada rango numérico conforme la subcuenca que integra y el mes en el cual es desarrollada la simulación.

Especificación de coeficientes de rugosidad de Manning

En cuanto a las rugosidades de Manning, fue utilizado en esta instancia un valor general, representativo de todas las subcuencas presentes en el SH. El mismo fue obtenido del manual de Hidrología Aplicada (Chow et al., 1994) como un promedio de los valores para las descripciones de planicies de inundación compuestas de pastos y cultivos ($0.035 \text{ s/m}^{1/3}$ y $0.040 \text{ s/m}^{1/3}$, respectivamente). Cabe aclarar que estos valores son particulares, formando parte de un conjunto mayor con los cuales fue realizado el análisis de sensibilidad, el cual es descrito más adelante.

Condición de borde

La condición de borde seleccionada para la caracterización del punto de cierre del SH es una curva de descarga tipo Q-H, caudal (m^3/s) versus altura de agua (m).

La misma se presenta en la Figura 3, obtenida a partir de información conforme obras de arte situadas en el punto de cierre del SH, siendo la misma brindada por la Sede de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Santa Fe en Venado Tuerto y corroboradas las secciones mediante salidas de campo. Se aclara que fue realizada una prolongación de la curva considerando situaciones en las cuales la cota de agua supere la cota de coronamiento de las obras de arte, escurriendo a superficie libre sobre el pavimento.

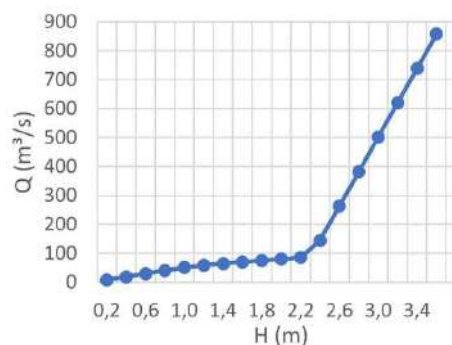


Figura 3: Curva Q (m^3/s) vs H (m).

Si bien no se cuenta con registro de caudales en el punto de cierre del sistema con los cuales poder cotejar los valores de la curva, se obtuvieron imágenes del evento de diciembre 2016-enero 2017, el cual es analizado posteriormente, lo cual permite una comparación marginal de tirante-caudal ocurrido frente a lo simulado.

Asignación de precipitaciones

Los hietogramas ingresados a la simulación fueron obtenidos mediante información pluviométrica de las localidades de Venado Tuerto y Villa Cañas. Con la finalidad de que los hietogramas posean una buena representatividad en la cuenca, los mismos fueron asignados a las distintas subcuencas de acuerdo con su cercanía las mismas.

Debido a que el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado realiza la simulación del escurrimiento de la precipitación considerando la lluvia neta se realizaron procedimientos preliminares a la simulación con el objeto de descontar el agua precipitada que es retenida e infiltrada y lograr la precipitación neta.

En la Tabla 2 pueden apreciarse los resúmenes de lluvia para ambas estaciones.

Tabla 2. Resumen de lluvias para las estaciones VT y VC.

Evento/ Estación	Lluvia Total (mm)	Lluvia Neta (mm)
Evento 1 - VT	347	233
Evento 1 - VC	363	293
Evento 2 - VT	57	8
Evento 2 - VC	52	14

Procesamiento y simulación

Como etapa previa a la simulación, debió realizarse el análisis de consistencia de datos, y conforme a su dictamen, continuar con la etapa de procesamiento o rever los errores informados. Seguidamente, se realizó el guardado de los archivos en formato dat.

Resulta apropiado mencionar que, en esta primera etapa de simulación (sin canalizaciones) son utilizados intervalos de procesamiento del orden de los 30 segundos, tiempo máximo en el cual las simulaciones se manifiestan estables.

Con los archivos dat generados, la simulación es ejecutada por fuera del modelo hidrológico-

hidráulico distribuido y físicamente basado, mediante un intérprete de comandos CMD. Cabe destacar que antes de iniciar la simulación, debieron ser modificados los archivos de alturas iniciales.

Validación de las simulaciones

El SH Las Encadenadas, no posee registros históricos de caudales o de cotas de nivel de agua en secciones fijas de interés, con lo cual, realizar la validación de las simulaciones hidrológico/hidráulicas del mismo, se torna ciertamente más complejo. Debido a esta situación, y con el objeto de lograr simulaciones precisas del sistema, es utilizada parte de la metodología desarrollada para obtener alturas iniciales con el objeto de obtener una validación a través de la verificación de superficies de agua presentes en el SH. A modo de repaso, son utilizadas las imágenes satelitales radar clasificadas en agua/no agua y contrastada dicha información con la arrojada por la simulación, que también previamente es condicionada bajo la sentencia agua/no agua.

Resulta importante aclarar que la unidad areal de contraste son celdas (de 100 m x 100 m, en este caso) puesto que es la unidad con la cual trabaja el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado. Con respecto a las fechas de las imágenes satelitales radar, las mismas son elegidas conforme los eventos climáticos seleccionados y viceversa, es decir, son elegidos los eventos climáticos conforme la disponibilidad de imágenes satelitales radar.

El contraste de la información de alturas finales de agua en cada una de las celdas conforme la existencia de agua/no agua del producto logrado mediante imágenes satelitales radar (Soria et al., 2020) es efectuado luego de realizadas las simulaciones sin canalizaciones, para ambos eventos.

Dicha contrastación se realiza ingresando en una planilla de cálculo el archivo de alturas finales que arroja el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado y alistando en otra columna (previo alineamiento de la información por valores de coordenadas) la información del producto agua/no agua de la imagen radar para la fecha de estudio. La información de alturas brindada por el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado es convertida a agua/no agua bajo el condicionante de que, para alturas de agua seleccionadas dentro del rango de 0.40 m a 0.60 m sean consideradas agua, y alturas inferiores como no agua. Cabe destacar que dicho rango de valores fue

designado luego de analizar la influencia que genera dicho valor en los resultados de la contrastación. Se debe tener en cuenta que este tirante de agua responde a una esquematización de almacenamiento y conducción dentro del elemento; con lo cual la altura inicial en la que se considera como agua, resulta menor en la realidad al encontrarse dispersa por toda el área del elemento; por tal motivo las alturas inferiores a ese rango son consideradas no agua.

Luego de asignada la altura en la cual las celdas son consideradas con agua, es realizada una clasificación de dichas celdas conforme las siguientes premisas: la celda es considerada con agua tanto en la simulación como en la máscara de agua, la celda es considerada sin agua tanto en la simulación como en la máscara de agua, la celda es considerada como agua sólo en la simulación; y la celda es considerada como agua sólo en la máscara de agua. Realizado esto, la planilla es exportada a formato .csv e ingresada al software de SIG. Para finalizar, es realizado un mapeo de este análisis, lo cual permite una mejor interpretación de las no coincidencias.

Debido a que existen algunas subcuencas en las cuales la modelización no presenta un ajuste adecuado conforme la realidad, resulta necesario realizar la modelización del SH con el agregado de canales existentes, siendo seleccionados primordialmente los pertenecientes a las zonas de menor ajuste. Además, con el objeto de lograr alta precisión tanto espacial como del caudal saliente, se realizaron diversas simulaciones del SH con las canalizaciones, en las cuales se variaron los valores de rugosidad de Manning tanto para las canalizaciones como para los valles de inundación. Se realizaron simulaciones con diferentes combinaciones de rugosidades en celdas río y celdas valle, basadas en los rangos numéricos establecidos de acuerdo a las características de las celdas: canales de tierra, serpenteantes y lentos, con pastos y algunas malezas; y planicies de inundación con coberturas desde pastizales hasta cultivos en sus diferentes etapas.

Como resultado se obtuvo que, las simulaciones que contienen valores de rugosidad de valle mínimos-medios dentro del rango de las rugosidades consideradas para campos cultivados, en cualquiera de los estados en los que se presente: sin cultivo, cultivos alineados y cultivos maduros (Chow, 2004) son las que producen los mayores picos de caudales a la salida del sistema (hasta 800 m³/s). Además, las simulaciones que consideran los valores mínimos-

medios de rugosidad dentro de la categoría seleccionada de canales excavados con pala con poca vegetación (Chow, 2004) también incrementan dichos valores. Esta situación de caudales pico tan elevados no es representativo de la realidad puesto que, al observar la curva Q vs H de cierre del sistema y el posicionamiento de las alcantarillas, esos caudales pico representarían tirantes superiores a 0.50 m de agua sobre la calzada, situación que no ha ocurrido. Por tal motivo, y debido a un mejor ajuste espacial, fueron seleccionadas como más representativas las rugosidades de 0.033 para río y 0.050 para valle.

Cabe recordar que los tiempos de traslado de la escorrentía son validados indirectamente, mediante la contrastación de las superficies de agua arrojadas por el software y las presentes en la clasificación de las imágenes satelitales, para diferentes fechas, dentro de la ocurrencia del evento de análisis.

La Figura 4, corresponde a la respuesta de la calibración de la simulación para el Evento N° 1, con las canalizaciones seleccionadas, las rugosidades definidas y; al igual que en las simulaciones sin canalizaciones, el tirante para que una celda sea considerada agua, definido. En las mismas puede apreciarse que, en color azul se presentan las áreas en las cuales realmente había agua en la superficie, de acuerdo con la imagen satelital radar, y también la simulación arroja como resultado agua. En color beige, se presentan las zonas en las cuales no había agua para ese evento y tampoco lo considera agua la simulación. En color celeste, se presentan las superficies en las cuales no había agua según la imagen satelital radar, pero que la simulación considera como agua; y en color terracota, en las cuales sí había agua en superficie pero que la simulación no las considera agua.

Además de la clasificación expuesta, se presenta una categorización la cual se encuentra basada en las diferencias entre la simulación sin canales y la simulación con canales. La misma, hace un discernimiento entre las superficies consideradas como agua en la simulación con canales, y que anteriormente en la simulación sin canales no existían como agua (en color magenta) es decir que desmejoró el ajuste de la simulación puesto que no era agua en realidad; y las superficies que figuraban como agua en la simulación sin canales, y que en la simulación con canales desaparecieron (en color amarillo), resultando una mejora en el ajuste ya que como en el caso anterior, no era agua en la realidad.

En la Figura 5 se presenta el hidrograma en el punto de cierre del SH, obtenido de la simulación del

Evento N° 1, con las canalizaciones anexadas y el ajuste de las rugosidades.

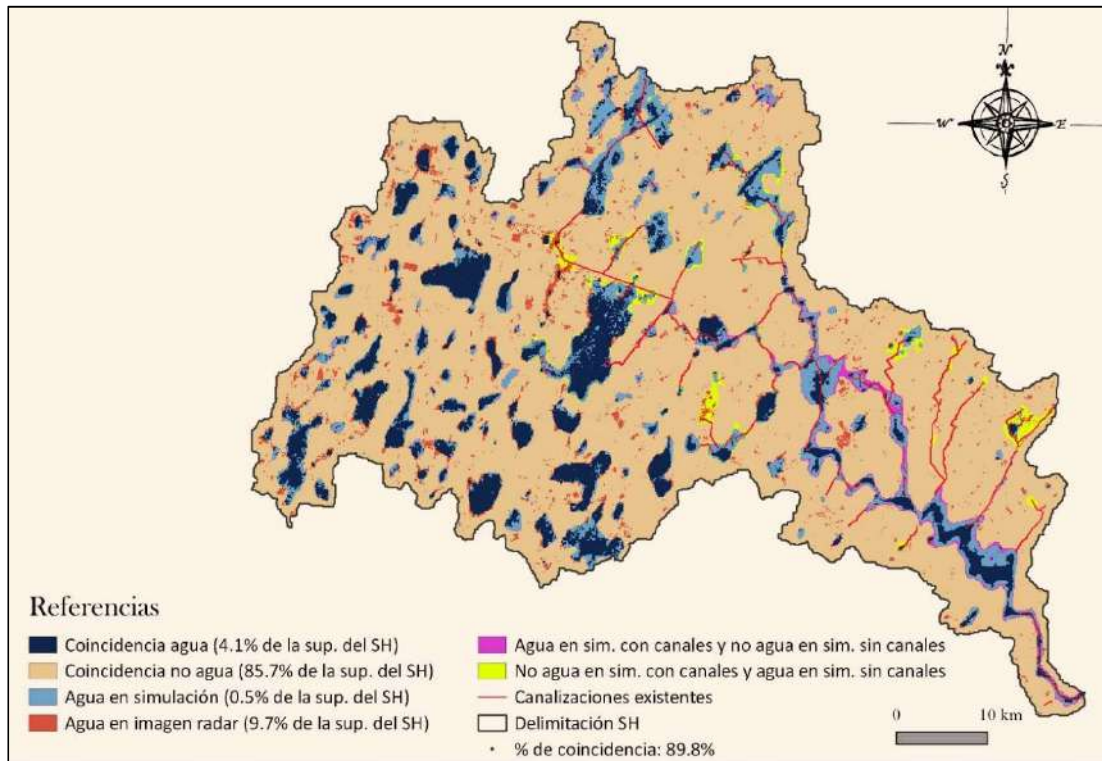


Figura 4: Mapa de contraste de respuestas de Evento N° 1, con canalizaciones y rugosidades ajustadas, para la fecha 14 de enero de 2017.



Figura 5: Hidrograma en punto de cierre obtenido de la simulación calibrada del Evento N° 1.

Como puede apreciarse en la Figura 4, en varios sectores en los cuales fueron agregados canales, se notan mejorías. También, se observa que en la zona de escurrimiento más definida que posee el sistema, se presenta un desborde mayor al de la simulación sin considerar canales y, que resulta real de lo

acontecido. Conforme a lo observado y de acuerdo con las superficies de cada una de las clases analizadas, se manifiesta que la calibración del sistema y consecuentemente las predicciones del comportamiento del mismo frente a diversos eventos climáticos poseen un grado de certeza superior al 86%.

Además, se tiene que, para estas representaciones del SH calibradas, en el Evento N° 1 se presenta un pico máximo en el escurrimiento $\sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$ a las 510 h de iniciada la simulación; y el Evento N° 2 un pico máximo de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ a las 258 h.

En cuanto a los tiempos de respuesta del SH arrojados por el software de simulación hidrológica-hidráulica, si bien los mismos no pudieron ser verificados directamente debido a la inexistencia de lecturas de caudales en el punto de cierre, para dichos eventos; pudieron ser cotejados marginalmente para estas fechas de calibración, mediante la visualización de incrementos y decrementos de las superficies de agua

del cauce próximo al punto de cierre a través de las imágenes satelitales correspondientes a dichas fechas de análisis.

Aplicación de VMMHH 1.0 en eventos extremos ante cambio climático

Determinación de lluvias para diferentes recurrencias

Para la selección de las recurrencias de precipitaciones se utilizaron las series históricas de la localidad de Venado Tuerto y de Villa Cañas, las cuales ya fueron descritas con anterioridad. Acorde a la escala de trabajo, fueron analizadas las recurrencias de 25, 50 y 100 años; estableciendo como duración de la tormenta (D) 120 h.

Para iniciar con la selección de las recurrencias, se extrajeron de cada año y para cada estación, las precipitaciones máximas de duración igual a 24, 48, 72, 96 y 120 h. Posteriormente, mediante el software de inferencia estadística AFMULTI (Paoli et al., 1996) se realizaron ajustes a las series de precipitaciones máximas conforme los modelos probabilísticos: LogGauss (Galton), Gumbel, GEV, Pearson, LogPearson y Exponencial, obteniendo así las recurrencias de precipitación. Además, con motivo de obtener el modelo de predicción de mejor ajuste a las series de estudio, se efectuaron gráficos de probabilidad de excedencia, para ambas estaciones.

Conforme las pruebas de bondad de ajuste realizadas, todos los modelos son considerados como válidos; pero con motivo de seleccionar uno de los mismos, para realizar las curvas Precipitación-Duración-Recurrencia (PDR) y posteriormente realizar los hietogramas de análisis, se ha escogido el modelo de LogPearson, el cual presenta un mejor ajuste de manera general para las distintas recurrencias y duraciones.

Hietogramas de lluvia para distintas recurrencias considerando cambio climático

Para la confección de los hietogramas de lluvia para distintas recurrencias considerando CC es utilizado el método de bloques alternos (Orsolini, 2008). En el mismo, son utilizadas las curvas P-D-R presentadas anteriormente.

Posteriormente, en dichos hietogramas se aplicaron coeficientes de incremento de precipitación, los cuales fueron adjudicados a cada uno de los barotes de lluvias diarias, para las recurrencias de análisis de ambas estaciones. Los coeficientes aplicados fueron de 1.06, 1.10, 1.20 y 1.30; pretendiendo abarcar con

éstos, la variación del efecto de CC producto de diversos escenarios.

Para finalizar, fue realizado el cálculo de las precipitaciones netas en el SH para las distintas recurrencias y condiciones de CC, según procedimientos (Zimmermann y Orsolini, 2008), conforme dos condiciones de estado del terreno: Por un lado, con los CN's normales a la temporada verano, que es donde se producen los registros más copiosos de lluvias en la región de estudio; y por otro lado, bajo una condición de suelo cuasi-saturado (CN = 95) para todo el sistema; aclarando que los CN corresponden a un valor medio ponderado para todo el evento.

Simulación del comportamiento del SH frente a eventos climáticos de diversas recurrencias considerando cambio climático

Respecto de la simulación del comportamiento del SH frente a eventos considerando CC, la información de entrada resulta la misma que fue utilizada en el período de calibración (alturas del terreno, canales, características de canales y condición de borde), pero las alturas iniciales de agua en las celdas (para las celdas que representan lagunas) fueron utilizados valores correspondientes a un estado habitual de las lagunas. En cuanto a la condición de humedad del suelo, se realizaron simulaciones conforme dos condiciones de valor medio ponderado para todo el evento: normales (Condición II) y cuasi-saturados (Condición III, CN = 95). Además, fueron realizadas simulaciones para estas tres recurrencias considerando diversos coeficientes de CC. En los siguientes apartados, son presentados los efectos de dichos escenarios de CC, conforme las diferentes recurrencias de precipitaciones de análisis.

Recurrencia de veinticinco años

La simulación del comportamiento del SH frente a precipitaciones de recurrencia de 25 años, arrojó como resultado 45236 ha de superficie cubiertas por agua para condiciones normales de la capacidad absorción (condición II) y 53709 ha para la condición de suelo cuasi saturado (CN = 95); con un 4.7% y un 10.2%, respectivamente, del volumen entrante escurrido a los 12 días de iniciado el evento. Para condiciones de capacidad de absorción de suelo normales considerando CC, el incremento de agua superficial llega a alcanzar, para los escenarios más desfavorables, aproximadamente un 13.6% más respecto a la superficie de agua sin considerar CC; en cambio, en condiciones de suelo cuasi-saturadas el incremento respecto a una simulación sin CC es del 12.2%. Con respecto a volúmenes escurridos

considerando el peor escenario de CC, en condiciones normales del suelo llega a alcanzar el 6.7%, y un 17.5% en condiciones de suelo cuasi saturado. En cuanto al incremento del porcentaje de superficie cubierta con agua respecto la superficie del SH, para condiciones de suelo normales respecto del peor escenario alcanza un 15.87% y para condiciones de suelo cuasi-saturado un 18.61%. En cuanto a los caudales pico, para condiciones de suelo normales se observa que al no considerar CC los mismos rondan en 40 m³/s, y considerando los coeficientes de CC más desfavorables, duplican dicho valor. Para los caudales pico en condiciones de suelo cuasi-saturado sin CC se tienen valores del orden de los 100 m³/s y, considerando los coeficientes por CC más desfavorables, del orden de los 200 m³/s.

Recurrencia de cincuenta años

El análisis del comportamiento del SH frente a precipitaciones de recurrencia de 50 años, da como resultado 47498 ha de superficie cubiertas por agua para condiciones normales de la capacidad absorción y 55602 ha para la condición de suelo cuasi saturado; con un 7.1% y un 12.5%, respectivamente, del volumen entrante escurrido a los 12 días de iniciado el evento. Para condiciones de capacidad de absorción de suelo normales considerando CC, el incremento de agua superficial llega a alcanzar, para los escenarios más desfavorables, aproximadamente un 14% más respecto a la superficie de agua sin considerar CC; en cambio, en condiciones de suelo cuasi-saturadas el incremento respecto a una simulación sin CC es del 12.22%. Con respecto a volúmenes escurridos considerando el peor escenario de CC, en condiciones normales del suelo llega a alcanzar el 13.3%, y un 20.5% en condiciones de suelo cuasi saturado. En cuanto al incremento del porcentaje de superficie cubierta con agua respecto la superficie del SH, para condiciones de suelo normales respecto del peor escenario alcanza un 16.62% y para condiciones de suelo cuasi-saturado un 19.27%. En cuanto a los caudales pico, para condiciones de suelo normales se observa que al no considerar CC los mismos rondan en 50 m³/s, y considerando los coeficientes de CC más desfavorables, duplican dicho valor. Para los caudales pico en condiciones de suelo cuasi-saturado sin CC se tienen valores del orden de los 120 m³/s y, considerando los coeficientes por CC más desfavorables, del orden de los 250 m³/s.

Recurrencia de cien años

En cuanto al comportamiento del SH frente a precipitaciones de recurrencia igual a 100 años, el

mismo proporcionó como resultado 49220 ha de superficie cubiertas por agua para condiciones normales de la capacidad absorción y 57669 ha para la condición de suelo cuasi saturado; con un 9.3% y un 15.1%, respectivamente, del volumen entrante escurrido a los 12 días de iniciado el evento.

Para condiciones de capacidad de absorción de suelo normales considerando CC, el incremento de agua superficial llega a alcanzar, para los escenarios más desfavorables, aproximadamente un 14% más respecto a la superficie de agua sin considerar CC; en cambio, en condiciones de suelo cuasi-saturadas el incremento respecto a una simulación sin CC es del 12%. Con respecto a volúmenes escurridos considerando el peor escenario de CC, en condiciones normales del suelo llega a alcanzar el 15.5%, y un 22.7% en condiciones de suelo cuasi saturado. En cuanto al incremento del porcentaje de superficie cubierta con agua respecto la superficie del SH, para condiciones de suelo normales respecto del peor escenario alcanza un 17.30% y para condiciones de suelo cuasi-saturado casi un 20%. En cuanto a los caudales pico, para condiciones de suelo normales se observa que al no considerar CC los mismos rondan en 60 m³/s, y considerando los coeficientes de CC más desfavorables, se encuentran próximos a los 180 m³/s. Para los caudales pico en condiciones de suelo cuasi-saturado sin CC se tienen valores del orden de los 150 m³/s y, considerando los coeficientes por CC más desfavorables, del orden de los 330 m³/s.

Determinación/análisis de permanencia de agua en superficie

Una situación que resulta también relevante de analizar es el tiempo en el cual el agua permanece sobre la superficie del SH hasta que escurre, se infiltra o evapora. Para realizar este análisis es utilizado un complemento del modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado VMMHH 1.0 el cual realiza la lectura de las simulaciones y efectúa el análisis de permanencia de agua en superficie. Debido a que el mismo arroja los resultados de permanencia de agua en cada celda en formato de coordenadas de posicionamiento, los mismos son procesados mediante el software de SIG para, mediante una categorización de la información, realizar un mapeo general del tiempo de permanencia de agua en superficie en todo el SH. A continuación, en la Figura 6, se presenta el mapa de permanencia de agua en superficie para una recurrencia de 100 años, en condición antecedente de humedad del suelo cuasi-saturado, para un escenario que considera el coeficiente máximo de incremento por CC.

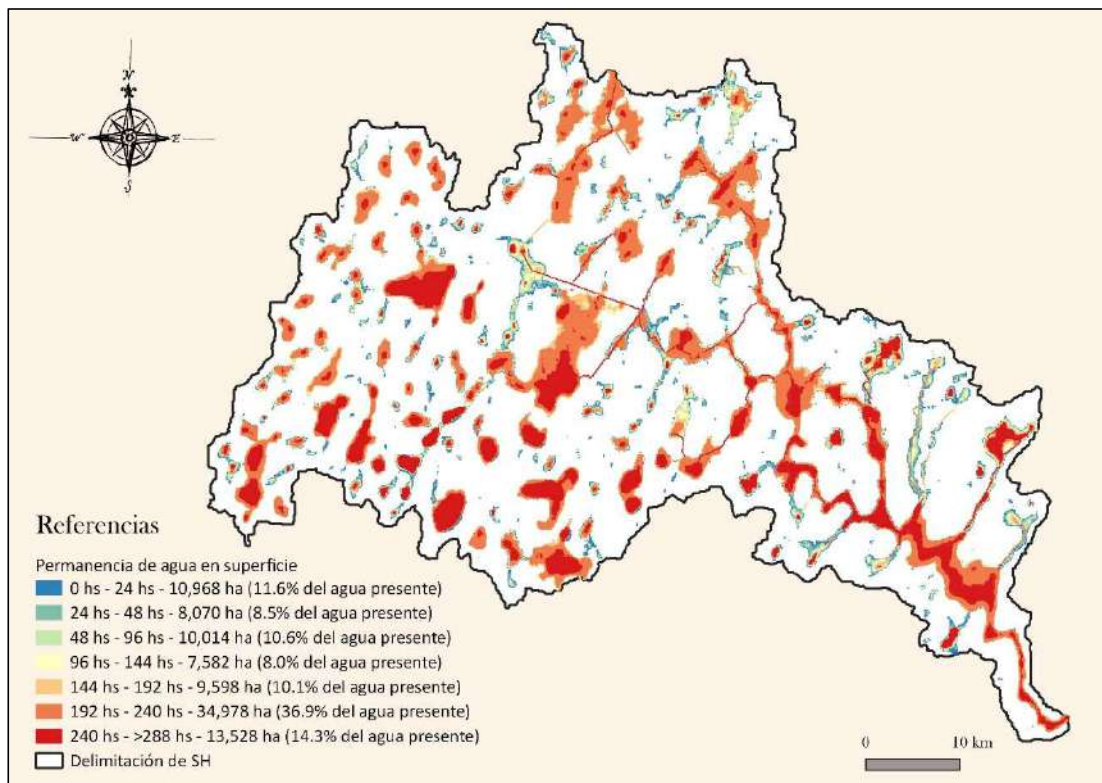


Figura 6: Mapa de permanencia de agua en superficie para una R = 100 años, en condición de suelo cuasi-saturado considerando un incremento de precipitación por CC de 1.30.

Para una recurrencia de 25 años, sin considerar el efecto del CC, más del 47% de la superficie con agua presente tiene una demora superior a 193 h en escurrir, escurriendo solamente el 8% del agua superficial dentro de las primeras 24 h de iniciado el evento climático. Para la misma recurrencia, considerando la peor condición de CC (coeficiente CC = 1.30) se tiene que el 10.5% del agua presente escurre dentro de las 24 h y más del 53%, después de las 193 h.

Para una recurrencia de 50 años, sin considerar el efecto del CC, se tiene que más del 52% del agua escurre posterior a las 193 h de iniciado el evento, y tan sólo el 10.1% del agua presente en el SH escurre dentro de las 24 h de iniciado el evento climático. Para las mismas condiciones, pero teniendo en cuenta el peor efecto por CC (coeficiente CC = 1.30) se tiene que el 11.1% escurre dentro de las 24 h y más del 53% pasadas las 193 h.

Respecto a la recurrencia de 100 años, sin considerar CC, se tiene que más del 52% del agua presente escurre después de las 193 h, escurriendo tan sólo el

10.7% del agua presente en el SH dentro de las 24 h. En cuanto a la recurrencia de 100 años, pero considerando el peor efecto por CC se tiene que el escurrimiento del agua presente que se da dentro de la primeras 24 h es del 11.6% y el 51.2% pasadas las 193 h.

DISCUSIÓN EN DELIMITACIÓN DEL SH

Para elección de la delimitación del SH, se trabajó con la desarrollada en este trabajo, después una exposición de delimitaciones existentes, pero se la consideró marginal puesto que se esperaba ver la respuesta del SH frente a los diferentes eventos climáticos para poder determinar de forma fehaciente la delimitación.

Acorde con lo esperado, en la Figura 7 se muestra en esquema de colores los tirantes de agua para una recurrencia de 100 años considerando el máximo coeficiente por CC planteado y condición de suelo cuasi-saturado (CN medio = 95), vislumbrando de fondo el DEM corregido con exageración vertical, para una mejor interpretación. Como puede

observarse, todos los sectores del SH se encuentran interconectados, y en la mayoría de ellos para este evento de recurrencia de 100 años, presentan agua. Es por ello, que resulta apropiado considerar esta delimitación como correcta del SH, puesto que si bien es más extendida que la presentada por los organismos enunciados, contempla eventos que pueden acontecer, con lo cual ignorar el aporte que brindarían las áreas no incluidas, puede ocasionar problemas de gravedad.

Se aclara que esta delimitación no contempla el área anexada o suprimida producto de la canalización que conecta ese sector a otro SH mediante el canal San Urbano en dirección noreste, puesto que no hay evidencia clara del sentido de escurrimiento del agua, y conforme las calibraciones para las simulaciones efectuadas, los resultados son aceptables bajo este esquema de funcionamiento del SH.

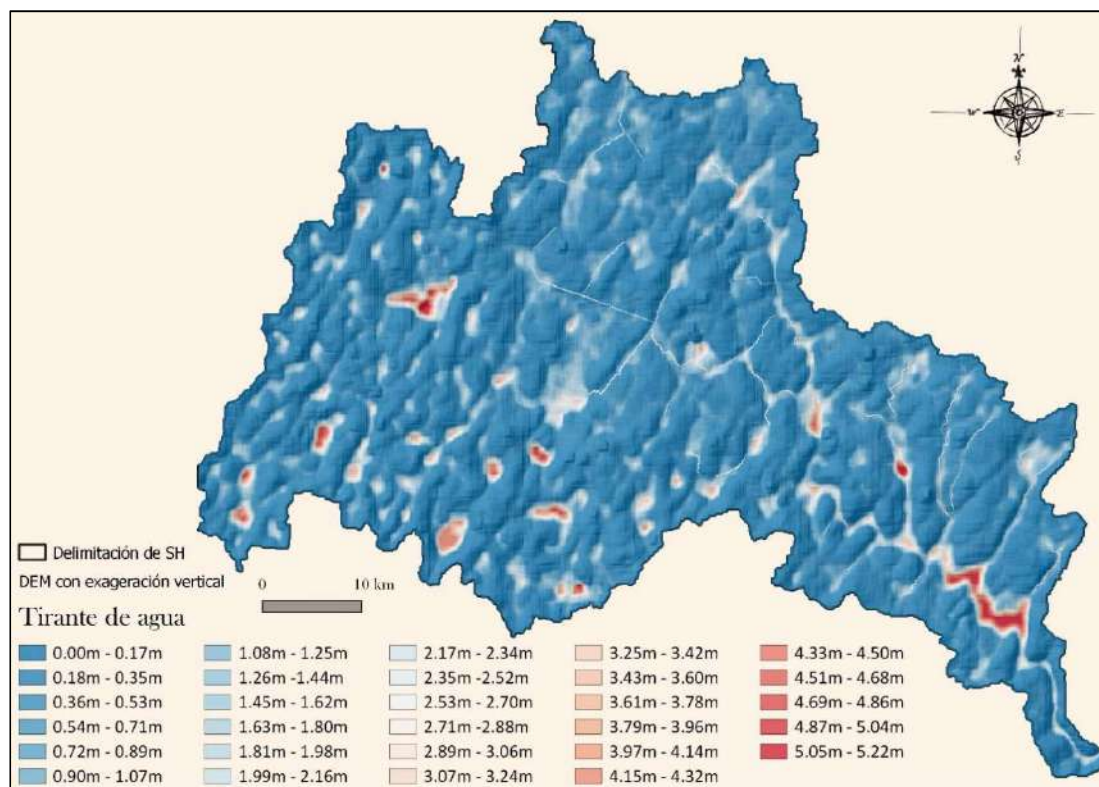


Figura 7: Mapa de validación de la delimitación del SH Las Encadenadas.

IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CON AMENAZA, CONSTRUCCIÓN DE MAPAS Y CONTRASTACIÓN CON ÁREAS DE RIESGO HÍDRICO SEGÚN LEY 11730

En este apartado son identificados los sectores en riesgo producto de eventos climáticos que contemplan CC, y generados diversos Mapas de amenaza/peligrosidad conforme distintos factores. Además, se realiza una contrastación de los mismos de acuerdo a las Áreas de Riesgo Hídrico según Ley 11730.

La primera serie de mapas de amenaza/peligrosidad contempla las áreas máximas de agua superficial

producto de eventos de recurrencia 25, 50 y 100 años considerando CC y cercanía de éstas a las redes viales. Para la confección de estos mapas es realizada, para cada una de las recurrencias, la unión de las capas de superficie de agua; producto de los distintos coeficientes por CC. Posterior a ello, son ejecutadas las disoluciones de dichas uniones, adquiriendo una sola figura por recurrencia e interceptando a las mismas con las distintas capas de tipo línea de las redes viales; dando como resultado una capa de tipo línea conformada por tramos de redes que se encuentran próximas a las superficies de agua. Para finalizar, con el objeto de lograr una interpretación eficaz de los mapas, se puntualizaron dichos tramos,

fue aplicada una escala de tamaño de los puntos, conforme la longitud de los tramos próximos a agua superficial y se discriminaron en distintos colores, conforme la tipología de red.

A continuación, en la Figura 8 se presenta el gráfico de cantidad de tramos para cada uno de los tipos de vías que presentan agua circundante conforme eventos climáticos para una recurrencia de 100 años, considerando CC; y en la Figura 9, uno de los mapas de amenaza por agua circundante en redes viales, en este caso debido a eventos climáticos contemplando CC para una recurrencia de 100 años.

Se tiene para una recurrencia de 25 años, la existencia de 122 tramos con agua circundante: 48 corresponden a redes ferroviarias, 21 a rutas nacionales, 12 a rutas provinciales y 41 a rutas secundarias; resultando 19 de los 122 tramos, con longitud superior a los 1400 m. Para una recurrencia de 50 años, 124 tramos con agua en cercanías, de los cuales 20 superan los 1400 m de longitud. Para una recurrencia de 100 años, 202 tramos con agua en sus cercanías, siendo 40 de rutas nacionales, 41 de rutas provinciales, 64 de rutas secundarias y 57 de redes ferroviarias. Cabe destacar que 26 de los 202 tramos para la recurrencia de 100 años poseen una longitud superior a los 1400 m.

La segunda serie de mapas consiste en representar los sectores de las redes viales en los cuales el agua aledaña presente posee una determinada permanencia luego de iniciada la lluvia de diseño. La metodología fue similar a la efectuada en la serie de mapas descritos arriba, a diferencia que en este caso son

puntualizados los tramos que presentan cercanía a una determinada permanencia de agua, siendo representada esta permanencia en distintos tamaños sobre las puntualizaciones.

En la Figura 10 se aprecia uno de los Mapas de amenaza en redes viales frente a permanencia de agua contemplando CC, en este caso para una recurrencia de 100 años.

La tercera serie de mapas resulta de un análisis de las simulaciones para recurrencias de 25, 50 y 100 años con el incremento del máximo coeficiente de CC. El análisis contempla la clasificación entre superficies que han superado el tirante de 1 m de agua en algún momento de la simulación, juntamente con la superación de la velocidad de 1 m/s en su escurrimiento, consideradas como zonas de riesgo; y las superficies que no han alcanzado dichos condicionantes. Posteriormente son consideradas las redes viales pertenecientes al SH, efectuando puntualizaciones en los tramos de éstas que presentan cercanía a las zonas de riesgo, con metodologías similares a las series de mapas anteriores. En la Figura 11, puede apreciarse uno de los mapas de riesgo en redes viales contemplando CC, en este caso para una recurrencia de 100 años.

Una cuarta tipología de mapa (Figura 12) presenta un compendio de las puntualizaciones de los sectores de amenazas/peligrosidad presentados en las tres series anteriores aglomerando los puntos por cercanía, con el objeto de visualizar los sectores más comprometidos dentro del SH.

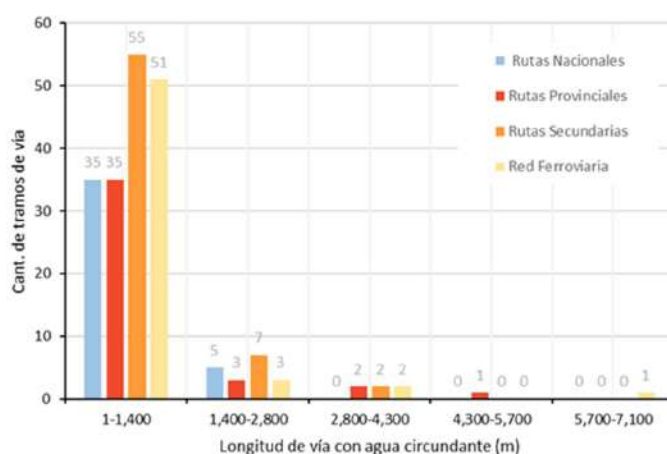


Figura N° 8: Cantidad de tramos para cada uno de los tipos de vías que presentan agua circundante conforme eventos climáticos para una recurrencia de 100 años, considerando CC.

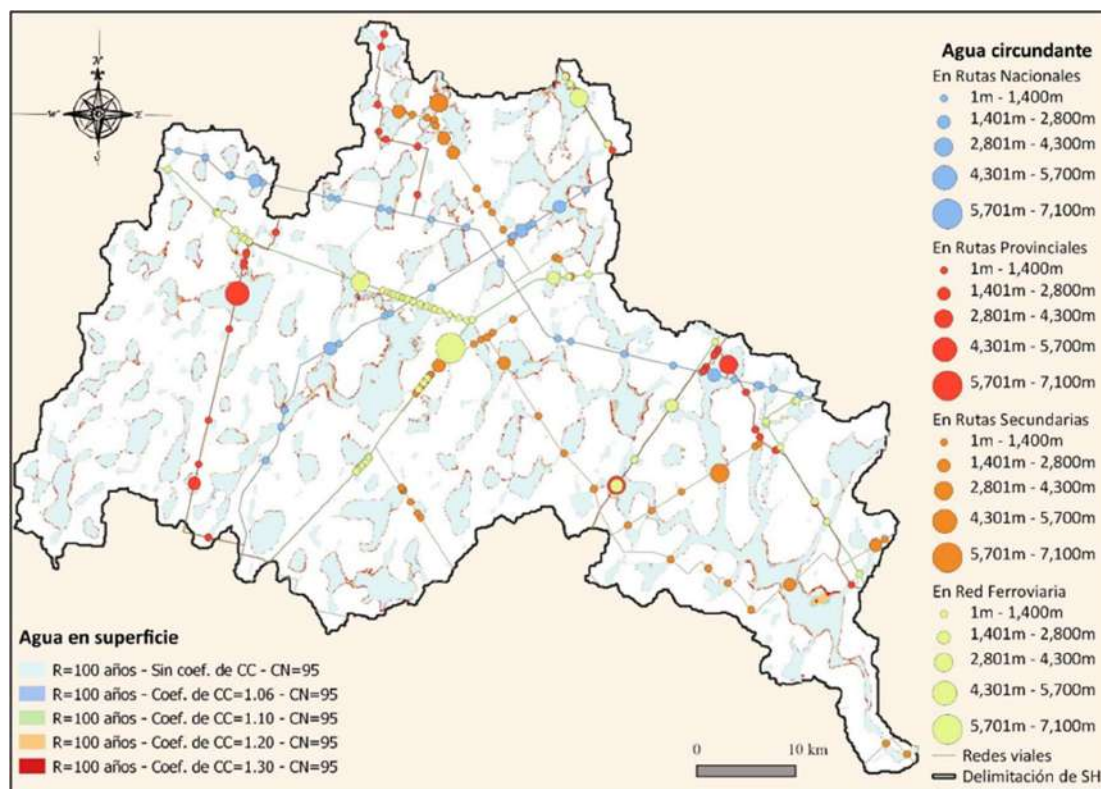


Figura 9: Mapa de amenaza por agua circundante en redes viales, debido a eventos climáticos contemplando CC para una recurrencia de 100 años.

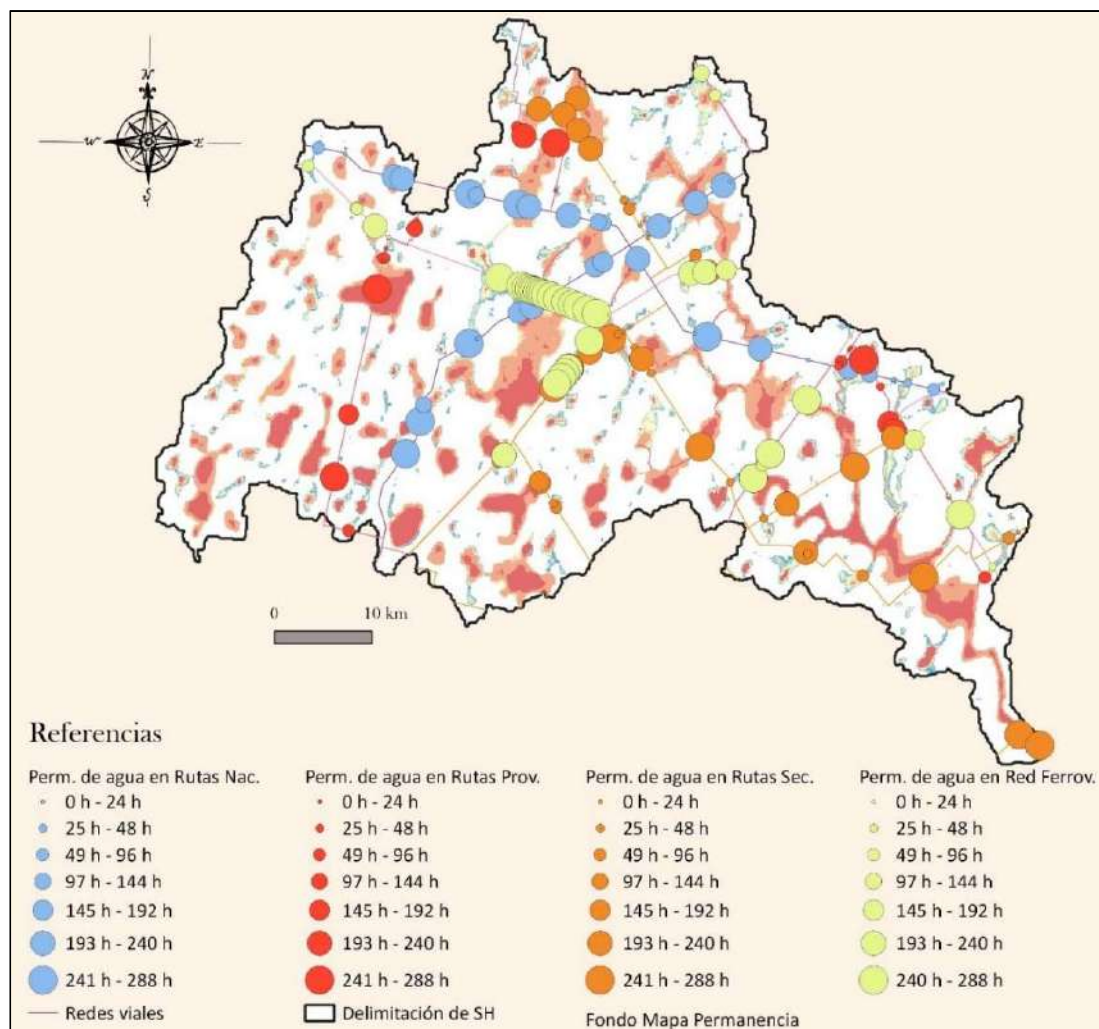


Figura 10: Mapa de amenaza en redes viales frente a permanencia de agua contemplando CC para una recurrencia de 100 años.

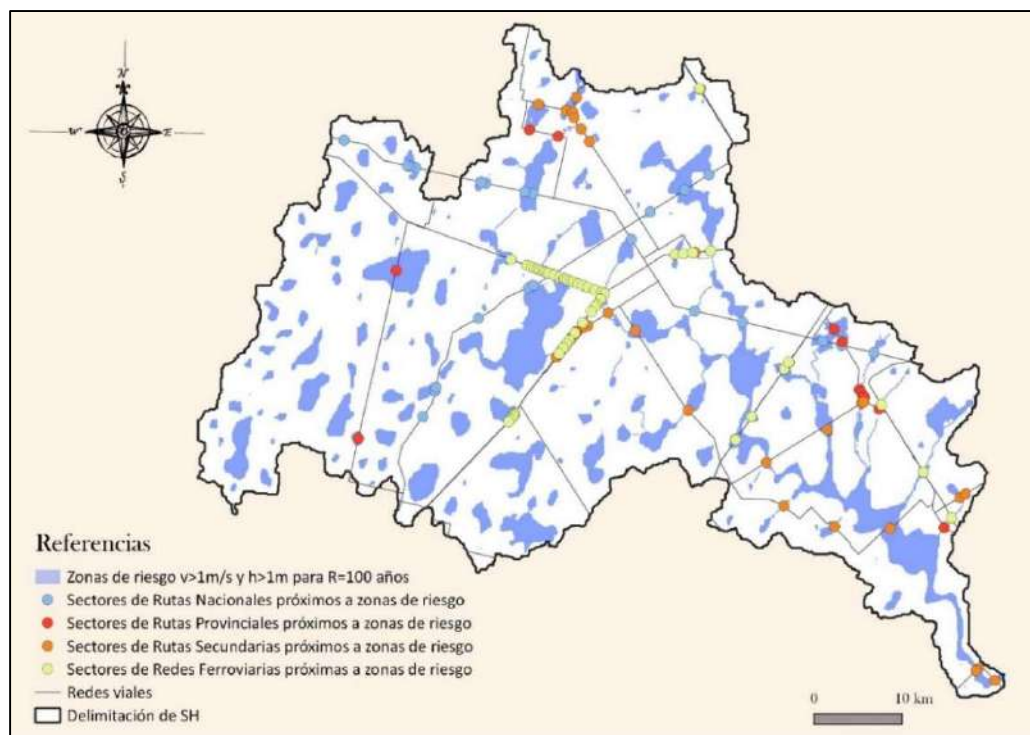


Figura 11: Mapa de riesgo en redes viales contemplando CC para una recurrencia de 100 años.

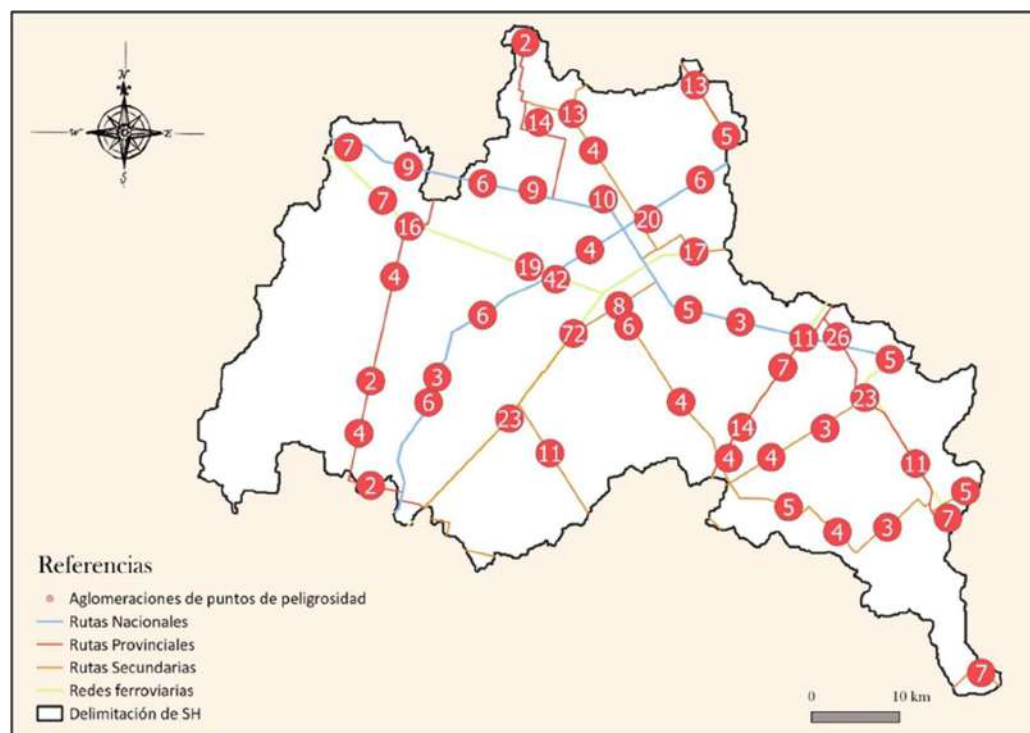


Figura 12: Mapa de detección de sectores del SH con peligrosidad frente a eventos con CC conforme agua superficial, su permanencia, tirante y velocidad.

Para finalizar, se presentan mapas de amenazas/peligrosidad de riesgo hídrico para las localidades pertenecientes íntegramente al SH Las Encadenadas. Dichos mapas contienen áreas de influencia a 250 m a las manifestaciones de riesgo, lo cual brinda un panorama de la posible afectación urbana. Además, es realizada una comparativa entre las imágenes de amenaza realizadas en este trabajo para algunas de las localidades, en conjunto con los mapas de amenaza presentadas en el archivo de planos de la Ley 11730 (Gobierno de la Provincia de Santa Fe, s.f.) sobre las cuales se presentan disimilitudes. A continuación se presentan breves comentarios sobre las tres localidades pertenecientes al SH, en las cuales se obtuvo mayor diferencia respecto a la Ley 11730.

San Francisco: Como puede apreciarse en la Figura 13, en este trabajo el riesgo se presenta potencialmente desde la zona oeste a la localidad de San Francisco, y en la imagen obtenida por el atlas se presenta desde el este. Se considera que quizás, la diferencia radique en que, al tener este estudio una base de simulaciones de eventos y producto de esto, tal como lo expresa la imagen central presente en la Figura 13, una aproximación sobre la permanencia de agua en superficie, dicha zona haya escapado al análisis del atlas, el cual utiliza una metodología quizás más estática basada en imágenes satelitales puntuales.

Maggiolo: Para esta localidad, desde lo realizado en este trabajo se presenta cierta cercanía del riesgo, es decir, las zonas de mayor riesgo se encuentran a una distancia aproximada de 200 m del agua en superficie; pero con respecto a la imagen presentada en el atlas, surgen dos interpretaciones: o bien dicha imagen considera que el riesgo se manifiesta por todos los frentes a la localidad, o bien no hay riesgo para la localidad, pero sí para el área circundante. Desde lo realizado, puede observarse en la Figura 14, en la parte central, que el agua más próxima al poblado desaparece en el menor rango de tiempo presentado.

Venado Tuerto: En esta localidad, se presenta un caso similar al expuesto para la localidad de Maggiolo; en Figura 15 se evidencia que en el atlas no resulta claro si toda la ciudad se encuentra en riesgo de inundación, o si la ciudad se encuentra fuera de riesgo, pero el área circundante sí. En este trabajo, se visualizan zonas puntuales de riesgo, y

una alerta de cuáles son las zonas en las cuales demorará considerablemente en escurrir el agua.

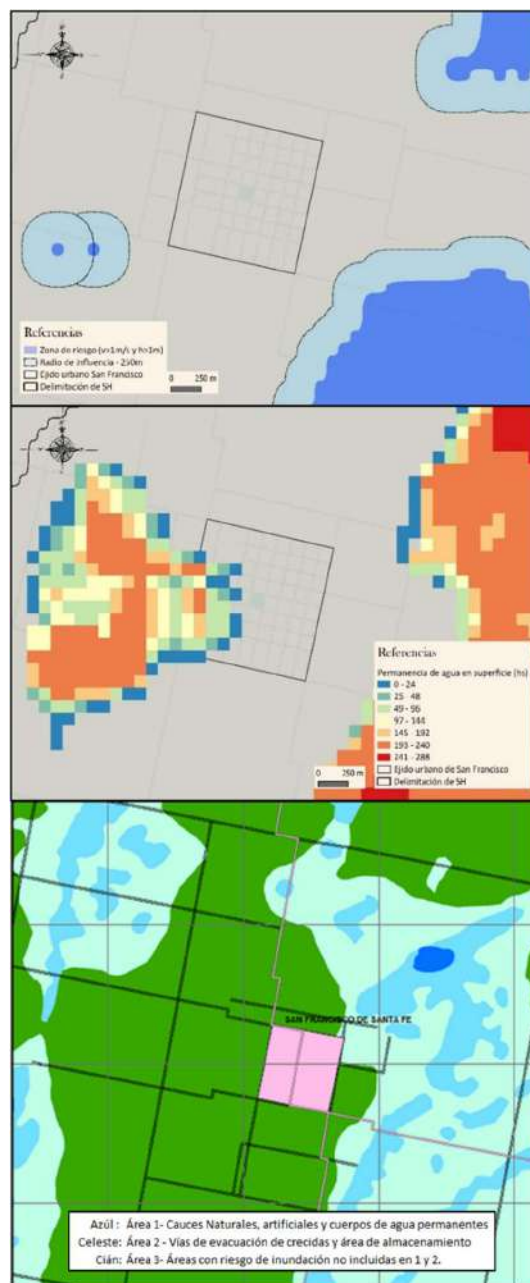


Figura 13: Mapa de contraste de respuestas de amenaza para la localidad de San Francisco. Izquierda: mapas elaborados en este estudio, derecha: mapas del archivo de planos de la Ley 11730.

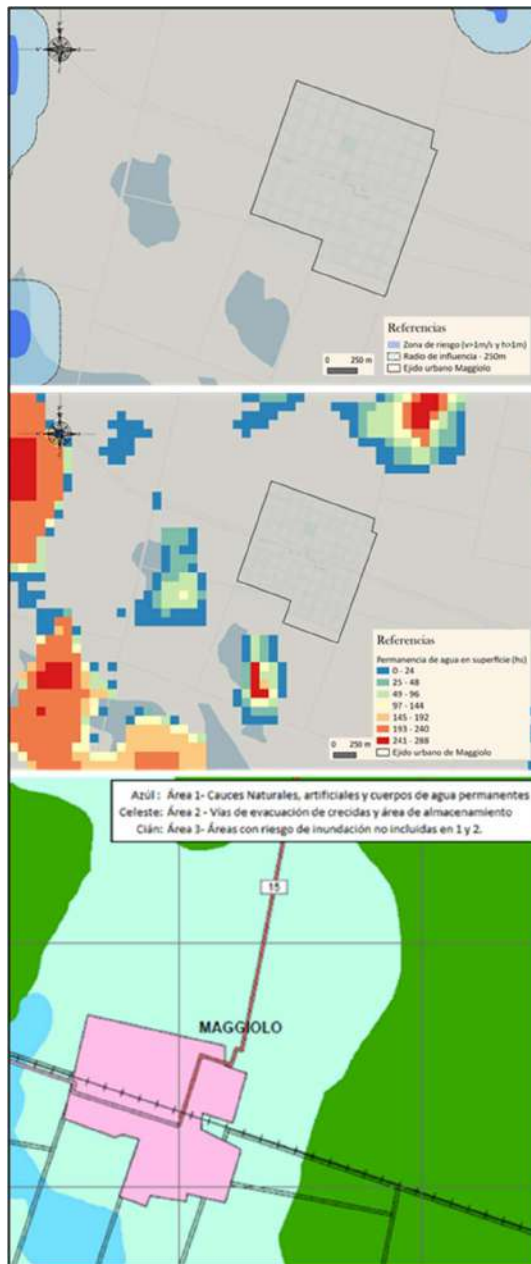


Figura 14: Mapa de contraste de respuestas de amenaza para la localidad de Maggiolo. Izquierda: mapas elaborados en este estudio, derecha: mapas del archivo de planos de la Ley 11730.

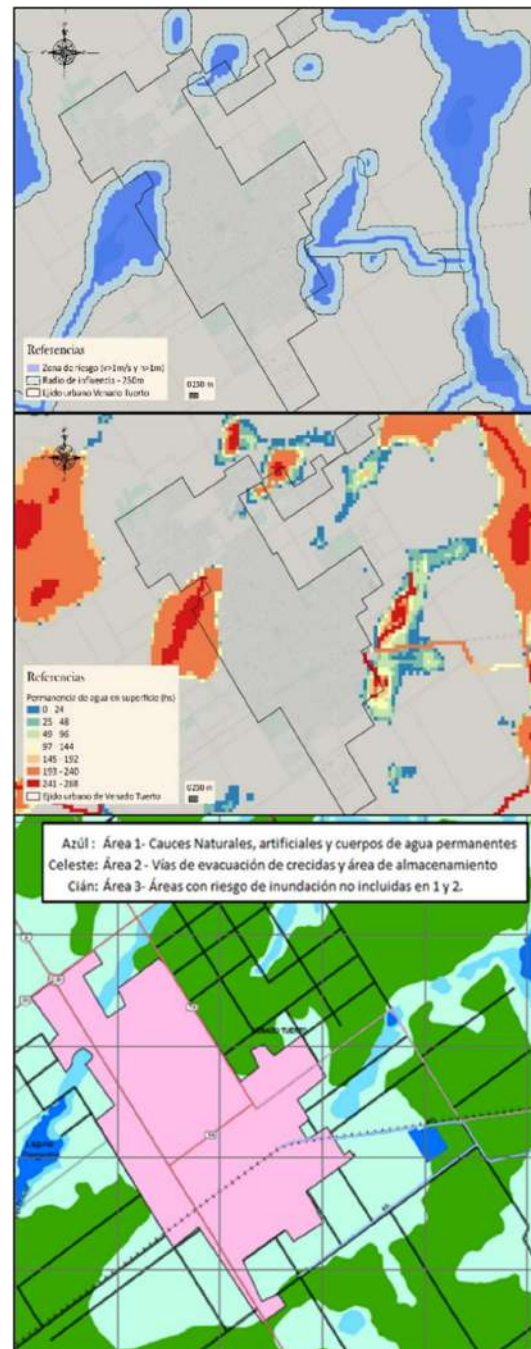


Figura 15: Mapa de contraste de respuestas de amenaza para la localidad de Venado Tuerto. Izquierda: mapas elaborados en este estudio, derecha: mapas del archivo de planos de la Ley 11730.

Resulta conveniente aclarar, tal como se fue visualizando a lo largo de la lectura del trabajo, que el análisis realizado en el mismo fue basado en el proceso del ciclo hidrológico dominante, que

es en este caso el horizontal. Resta para otros estudios analizar el comportamiento del SH en lapsos de tiempo mayores, que contemplen los procesos verticales.

CONCLUSIONES

Se ha logrado representar la dinámica hídrica del SH de Llanura "Las Encadenadas", mediante la conceptualización de los procesos relevantes involucrados y la simulación hidrológica-hidráulica correspondiente; incorporando la incertidumbre asociada a diferentes escenarios de CC.

Se ha realizado la cuantificación y mapeo de superficies de agua y caudales presentes en el SH, la permanencia del agua superficial y la cercanía de la misma a ejidos urbanos y redes viales, para recurrencias con y sin consideración del efecto por CC.

En cuanto a la superficie del SH Las Encadenadas para una recurrencia de 25 años, en condiciones de suelo normales y sin considerar CC, se alcanza las 45236 ha (el 13.97% de la superficie del SH) y caudales pico del orden de los 40 m³/s; mientras que en peores condiciones (suelo cuasi-saturado y coeficiente de CC = 1.30) alcanza las 60267 ha (18.61% de la superficie del SH) y caudales pico del orden de los 80 m³/s. Para una recurrencia de 50 años, en condiciones de suelo normales y sin considerar CC se tienen 47498 ha de la superficie del SH ocupadas con agua (14.67% del total de la superficie del SH) y caudales picos próximos a los 50 m³/s; siendo que para condiciones de suelo cuasi-saturado y coeficiente de CC de 1.30, se tienen 62396 ha ocupadas con agua (19.27% del total del SH) y caudales picos cercanos a los 250 m³/s. Para recurrencias de 100 años, en condiciones de suelo normales y sin considerar CC se tienen 49220 ha del SH ocupadas con agua (15.20% de la superficie del SH) y caudales picos próximos a los 60 m³/s; mientras que para condiciones de suelo cuasi-saturado y coeficiente de CC de 1.30 se tiene una superficie de 64514 ha ocupadas con agua (19.92% de la superficie total del SH) y caudales picos del orden de los 320 m³/s.

En cuanto a la permanencia del agua en la superficie, se obtuvo que, para una recurrencia de 25 años, sin considerar el efecto del CC, sólo el 8% del agua superficial escurre dentro de las primeras 24 h de iniciado el evento climático, mientras que más del 47% de la superficie con agua presente tiene una demora superior a 193 h en escurrir y; considerando la peor condición de CC (coeficiente de CC = 1.30) se tiene que el 10.5% del agua presente escurre dentro de las 24 h y más del 53%, después de las 193 h. Para una recurrencia de 50 años, sin considerar el efecto del CC, se tiene que el 10.1% del agua presente en el SH escurre dentro de las 24 h de iniciado el evento climático, y más del 52% del agua, posterior a las 193 h y; teniendo en cuenta el

peor efecto por CC (coeficiente CC = 1.30) se tiene que el 11.1% escurre dentro de las 24 h y más del 53% pasadas las 193 h. Respecto a la recurrencia de 100 años, sin considerar CC, se tiene que el 10.7% del agua presente en el SH escurre dentro de las 24 h y más del 52% del agua presente, después de las 193 h. En cuanto a la recurrencia de 100 años, pero considerando el peor efecto por CC se tiene que el escurrimiento del agua presente que se da dentro de las primeras 24 h es del 11.6% y el 51.2% pasadas las 193 h.

Con respecto a los tramos con agua en sus proximidades, se presenta para una recurrencia de 25 años, la existencia de 122 tramos, de los cuales 48 corresponden a redes ferroviarias, 21 a rutas nacionales, 12 a rutas provinciales y 41 a rutas secundarias; resultando 19 de los 122 tramos, con longitud superior a los 1400 m. Para una recurrencia de 50 años, son 124 los tramos con agua en cercanías, de los cuales 20 superan los 1400 m de longitud y; para una recurrencia de 100 años, son 202 los tramos que poseen agua en sus cercanías, conformados de la siguiente manera: 40 pertenecen a rutas nacionales, 41 a rutas provinciales, 64 a rutas secundarias y 57 a redes ferroviarias. Cabe destacar que 26 de los 202 tramos para la recurrencia de 100 años poseen una longitud superior a los 1400 m.

Toda esta información también presentada espacialmente en el SH mediante mapas permite una clara y rápida comprensión de la amenaza/peligrosidad en la cual se encuentra el SH frente a determinadas condiciones climáticas, lo cual favorece a la toma de decisiones de los actores correspondientes.

Otro resultado que merece sea mencionado, es la obtención de una nueva delimitación del SH, más extensa a las actualmente vigentes (3237 km² respecto a ~1680 km² del INA y ~2130 km² del Ministerio de Infraestructura y Transporte) la cual como fue demostrado, contempla superficies que aportan al SH frente a eventos del orden de los 100 años de recurrencia o superiores. Además, se realiza un aporte concreto en la región del SH a un mejor detalle en la zonificación y regulación del uso del suelo en áreas inundables en sistemas hídricos de la provincia de Santa Fe de acuerdo con Ley 11730 en referencias a la definición de áreas con riesgo hídrico.

Como aporte del trabajo en el avance del conocimiento, se resalta la contribución respecto a la representación de la dinámica del escurrimiento superficial en una cuenca compleja, donde no había

antecedentes de calibración y explotación de un modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado, para simulación de eventos, del tipo utilizado en el trabajo. Resulta muy importante también la contribución que se logra en estos estudios hidrológicos-hidráulicos desde la geomática, en la obtención y manipulación de datos y resultados en cuencas escasamente aforadas. Cabe destacar que es implementada una novedosa metodología para la determinación de las topobatimetrías de las lagunas y correspondientes curvas nivel-almacenamiento. También se resalta la contribución (inédita en el SH) de la calibración a partir del entrecruzamiento de áreas inundadas simuladas (con un modelo apropiado para la representación de la dinámica del escurrimiento en zonas de llanura) y áreas inundadas obtenidas de imágenes satelitales. En sistemas hidrológicos de este tipo, la calibración con mediciones puntuales de caudal en un lugar o en algunos puntos específicos, no necesariamente puede capturar la dinámica de los procesos de almacenamiento y escurrimiento superficial en toda la cuenca; lo cual es posible solo con un modelo del tipo aquí utilizado juntamente con dicha estrategia de calibración. Esta metodología, de evaluar niveles de lagunas en calibración/validación, resulta un gran avance del trabajo, puesto que se trata de las condiciones iniciales y de borde predominantes, necesarias para una correcta simulación por eventos; ya que el almacenamiento superficial es en este tipo de SHNT gravitante en la valoración de la posible amenaza de inundación en cualquier evento, en variables como altura de agua y permanencia de inundación.

Este trabajo puede considerarse como un avance para estudios futuros, mediante la implementación de modelos que incorporen otros aspectos del ciclo hidrológico (modelos continuos). En este trabajo se optó por representar la dinámica de los procesos de almacenamiento y escurrimiento superficial asociados a eventos de lluvias máximas de 5 días de duración, similares a eventos ya acontecidos, los cuales han puesto en emergencia diferentes rutas y poblaciones dentro de la cuenca. Justamente uno de esos eventos (diciembre 2016) fue utilizado en la calibración del modelo.

Además, se realiza un aporte a la rasterización de diversos tipos de información (meteorológica, hidrológica, hidráulica, morfológica, cobertura de suelo, usos de suelo, etc.) del SH en estudio para su posible ensamblaje futuro con todo tipo de sistema de información geográfica.

BIBLIOGRAFÍA

- Basile, P. A. (2008). Mediciones hidrológicas. En: H. Orsolini, E. Zimmermann y P. Basile (Eds.), *Hidrología, Procesos y Métodos* (2nd ed., pp. 19–48). Rosario, Argentina: UNR Editora.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santa Fé de Bogotá, Colombia. McGRAW-HILL / Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Chow, V. T. (2004). Desarrollo del flujo uniforme y sus ecuaciones. En: M. Suárez (Ed.), *Hidráulica de canales abiertos* (pp. 109–111). McGRAW-HILL / Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Naciones Unidas, FCCC/INFORMAL/84 GE.05-62220 (E) 200705. Secretaría de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Bonn, Alemania, 24 p. unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf
- Espindola, A., Godagnone, R., Havrylenko, S., de la Fuente, J. C. y Mercuri, P. (2014). Generación de bases de datos de suelos para modelos hidrológicos a escalas regionales. *XXIV Congreso Argentino de La Ciencia Del Suelo*, 10p.
- EVARSA (1995). *Obras de evacuación laguna El Basural*. Proyecto ejecutivo. Informe Final. Tomo I.
- Fertonani, M. y Prendes, H. (1983). Hidrología en áreas de llanura. Aspectos conceptuales teóricos y metodológicos. En: M. C. Fuschini Mejía (Ed.), *Hidrología de las grandes llanuras - Coloquio de Olavarría* (pp. 119–156). Buenos Aires, Argentina: Comité Nacional Argentino para el Programa Hidrológico Internacional en conjunto con UNESCO.
- Friedl, M. A., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A. y Huang, X. (2010). *MODIS Collection 5 cobertura global del suelo: refinamiento de algoritmos y caracterización de nuevos conjuntos de datos*. Collection 5.1 IGBP Land Cover. Boston University, Boston, MA, USA.
- Fuschini Mejía, M. C. (1994). *El agua en las llanuras* (1ra. ed.). Montevideo, Uruguay: UNESCO - ORCYT. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000159361>
- Giraut, M., Lupano, C., Soldano, Á. y Rey, C. (2008). *Cartografía Hídrica Superficial Digital de la Provincia de Santa Fe*. Atlas Digital de los Recursos Hídricos Superficiales de la República Argentina. Buenos Aires.
- Gobierno de la Provincia de Santa Fe (s.f.). Mapas de áreas afectadas por inundaciones. En: *Informe final sobre la implementación de la Ley provincial N°*

- 11730 Zonificación y regulación del uso del suelos en áreas inundables en sistemas hídricos de la Provincia de Santa Fe.
- Gutiérrez, J. M., Jones, R. G., Narisma, G. T., Alves, L. M., Amjad, M., Gorodetskaya, I. V., Grose, M., Klutse, N. A. B., Krakovska, S., Li, J., Martínez-Castro, D., Mearns, L. O., Mernild, S. H., Ngo-Duc, T., van den Hurk, B. y Yoon, J. H. (2021). Atlas. En: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. y Zhou, B. (eds.), *Cambio climático 2021: la base de la ciencia física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático*. Prensa de la Universidad de Cambridge. Atlas interactivo disponible en <http://interactive-atlas.ipcc.ch/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Eds.: V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S., Connors, C., Péan, S., Berger, ... B. Zhou. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish.pdf
- Martín, R. (2014). *Meteorología Regional* (1era. ed.). Rosario, Argentina: Iracema Ediciones.
- Natenzon, C. (2017). Riesgo hídrico, vulnerabilidad social y participación ciudadana. *III Jornadas Nacionales de Política Hídrica*. Buenos Aires, Argentina.
- Orsolini, H. (2008). Estadística hidrológica. Lluvias de diseño. Hidrograma de diseño. En: H. Orsolini, E. Zimmermann y P. Basile (Eds.), *Hidrología, procesos y métodos* (2da. ed., pp. 262–336). Rosario, Argentina: UNR Editora.
- Orsolini, H., Zimmermann, E. D. y Basile, P. A. (2008). *Hidrología, procesos y métodos* (2da. ed.). Rosario, Argentina: UNR Editora.
- Paoli, C., Bolzicco, J., y Cacik, P. (1996). *Análisis de frecuencia de variables hidrológicas*. UNL - FICH.
- Paoli, C. y Giacosa, R. (1983). Necesidades de investigaciones hidrológicas en áreas de llanura. En: M. C. Fuschini Mejía (Ed.), *Hidrología de las grandes llanuras - Coloquio de Olavarría* (pp. 395–432). Buenos Aires, Argentina: Comité Nacional Argentino para el Programa Hidrológico Internacional en conjunto con UNESCO.
- Reisinger, A., Howden, M., Vera, C., Garschagen, M., Hurlbert, M., Kreibich, S., ... Ranasinghe, R. (2020). *The concept of risk in the IPCC Sixth Assessment Report: a summary of cross-working group discussions*. Guidance for IPCC authors. Intergovernmental Panel on Climate Change, Ginebra, Suiza. 15 p. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/02/Risk-guidance-FINAL_15Feb2021.pdf
- Riccardi, G. A. (2001). *Un sistema de simulación hidrológica-hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos*. Tesis Doctoral. FCEyN-UNC, Córdoba.
- Riccardi, G. A., Basile, P. A., Zimmermann, E. D., Stenta, H. R., Scuderi, C. M. y García, M. L. (2008). El modelado de escurrimiento superficial en cuencas del sur de la provincia de Santa Fe, Argentina. En: *Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura* (1era. ed., pp. 3–20). Rosario, Argentina: UNR Editora.
- Soil & Water Assessment Tool. (2019). QSWAT. <https://swat.tamu.edu/software/qswat/>
- Soria, M. (2019). *Caracterización morfológica y análisis de riesgo hidrológico en la parte alta del sistema hidrológico de llanura Las Encadenadas mediante aplicación de herramientas geomáticas*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Entre Ríos, Facultad de Ciencia y Tecnología.
- Soria, M., Basile, P. y Riccardi, G. (2020). Calibración de simulaciones bi-dimensionales mediante imágenes radar. En: Universidad Nacional de Rosario (Ed.), *XIV Jornadas de Ciencia, Tecnologías e Innovación*. Rosario, Argentina.
- Soria, M., Piñero, V., Ledesma, N., Basile, P. y Riccardi, G. (2017). Análisis batimétrico de lagunas poco profundas mediante técnicas de Teledetección y SIG: aplicación a la laguna La Victoria. *Cuadernos del CURIHAM*, 23, pp. 51–61.
- Stenta, H., Rentería Beltrán, J. y Riccardi, G. (2005). Plataforma computacional para gestión de información en la Simulación Hidrológica-Hidráulica del Escurrimiento Superficial. *XX Congreso Nacional Del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos Del Cono Sur*, Cap. Hidrología 1-13. Retrieved from https://www.fceia.unr.edu.ar/curiham/es/wp-content/uploads/2018/11/cna-2005_-stenta-renteria-riccardi.pdf
- Uribe, N. (2010). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Versión SWAT2005. En: *SWAT Soil and Water Assessment Tool*. Guía de uso de SWAT adaptado de Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. 2005. Soil and Water Assessment Tool – Theoretical Documentation.

Grassland, Soil and Water Research Laboratory –
Agricultural Research Service. Blackland Research
Ce. Retrieved from
<http://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>

Zimmermann, E. y Orsolini, H. (2008). Infiltración y
exceso de lluvia. En: H. Orsolini, E. Zimmermann y P.
Basile (Eds.), *Hidrología, procesos y métodos* (2da.
ed., pp. 89–107). Rosario, Argentina: UNR Editora.

**Trabajo recibido el 12/12/2023, aprobado para su
publicación el 20/02/2024 y publicado el
26/02/2024.**

COMO CITAR

Soria, M. V., Basile, P. A. y Riccardi, G. A. (2024).
Amenaza en el riesgo de inundaciones en sistemas
hidrológicos de llanura ante escenarios de cambio
climático: aplicación al sistema “Las Encadenadas”.
Cuadernos del CURIHAM, 29. e193.
<https://doi.org/10.35305/curiham.v29i.e193>

Tipo de Publicación: ARTÍCULO.

ROLES DE AUTORÍA

Nombre y Apellido de Autores	Colaboración Académica													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Magalí Valeria Soria	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Pedro Abel Basile	X	X	X			X		X			X	X		
Gerardo Adrián Riccardi	X	X	X			X		X			X	X		

1. Administración del proyecto; 2. Adquisición de fondos; 3. Análisis formal; 4. Conceptualización; 5. Curaduría de
datos; 6. Escritura - revisión y edición; 7. Investigación; 8. Metodología; 9. Recursos; 10. Redacción - borrador
original; 11. Software; 12. Supervisión; 13. Validación; 14. Visualización.

LICENCIA

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



BAJANTE DEL RÍO PARANÁ 2019-2022. CAUSAS E IMPACTOS

Sección Editorial

La cuenca del río Paraná tiene una extensión de aproximadamente 2700000 km² con su principal afluente el río Paraguay, involucrando zonas de aporte de Bolivia, Paraguay, Brasil y Argentina. Sintéticamente puede afirmarse que los caudales del río Paraná se originan mayormente a partir de las lluvias que se producen en las cuencas tributarias del Alto Paraná (Brasil), río Iguazú (Brasil y Argentina) y río Paraguay (Paraguay, Argentina y Bolivia).

El régimen del río siempre se caracteriza por ciclos y alternancias de crecidas y bajantes (o estiajes), presentándose ambos extremos con diversos grados de severidad y extensión temporal.

Respecto a la bajante extraordinaria ocurrida en el período de los años 2019 y 2022, entre las causas pueden mencionarse la variabilidad y cambio climático; las alteraciones en las condiciones de escurrimiento debido a modificaciones en los usos del suelo (deforestación, prácticas agrícolas intensivas con monocultivos, eliminación de bajos naturales, incendios, canalizaciones no planificadas y clandestinas); entre otras.

Este tipo de evento extraordinario produce impactos en numerosos aspectos relacionados con el ambiente fluvial tales como alteraciones en los servicios ecosistémicos de los humedales (flora, fauna, calidad del agua, alteraciones en los suelos). También impacta en las obras de infraestructura como por ejemplo las tomas de agua para abastecimiento y en el transporte fluvial de cargas entre algunos de los efectos de dicha bajante.

En este número especial de la revista se presentan y difunden algunos trabajos referidos a las causas y los impactos de la bajante extraordinaria del río Paraná del período 2019-2022 mediante el aporte de las diferentes disciplinas involucradas en esta temática.

El contenido de esta sección puede resultar de interés para investigadorxs, docentes, técnicxs, estudiantes y profesionales vinculados con la temática.

El Consejo Editorial de la Revista agradece a lxs profesionales por la contribución realizada para la difusión.



SEQUÍA, BAJANTE Y EFECTOS DE LOS INCENDIOS EN SUELOS DEL DELTA DEL PARANÁ, ARGENTINA

DROUGHT, WATER LEVEL DROP AND EFFECTS OF FIRES ON SOILS IN THE PARANÁ DELTA, ARGENTINA

Sergio Montico ⁽¹⁾, Néstor Cristian Di Leo ⁽²⁾ y José Alberto Berardi ⁽³⁾

⁽¹⁾ Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario. Zavalla, Argentina.
e-mail: smontico@unr.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8053-7734>

⁽²⁾ Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario. Zavalla, Argentina.
e-mail: ndileo@unr.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7872-9692>

⁽³⁾ Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario. Zavalla, Argentina.
e-mail: jose.berardi@unr.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4957-4793>

RESUMEN

El cambio climático influye sobre los regímenes hidrológicos de los ríos. Las bajantes en épocas de sequía transforman negativamente a los humedales. La alteración estructural y funcional que producen en ellos, modifica principalmente la productividad vegetal y los suelos, y esto se agrava cuando ocurren incendios. Para los años 2017, 2019, 2020 y 2022 se estimó la cobertura de agua del Delta Superior del río Paraná mediante imágenes satelitales, y se evaluaron los efectos en algunas propiedades edáficas causados por incendios en un sector de una isla del mismo humedal. La cobertura de agua se estimó a partir de mosaicos de imágenes satelitales Sentinel 2 A/B. Las tareas de geoprocésamiento se efectuaron en Google Earth Engine. Se caracterizó el estado de los suelos en 18 posiciones que tuvieron distintas severidades de quema. El efecto combinado de una bajante pronunciada en el nivel del río con una sequía climática muy intensa, condicionaron fuertemente la superficie cubierta por agua en el área del humedal. Los incendios tuvieron efectos negativos, principalmente en los suelos de los sitios con mayor severidad de quema en dos variables químicas y en una física-mecánica. De repetirse estas combinaciones ambientales el humedal incrementará riesgosamente su vulnerabilidad ecosistémica.

Palabras clave: suelos, humedales, delta, incendios.

ABSTRACT

Climate change affects the hydrological regimes of rivers. The water recession in times of drought negatively transform the wetlands. The structural and functional alteration that they produce in them mainly modifies the plant productivity and soils, and this is aggravated when fires occur. For the years 2017, 2019, 2020 and 2022, the water coverage of the Upper Delta of the Paraná River was estimated through satellite images, and the effects on some edaphic properties caused by fires were evaluated in a sector of an island of the same wetland. The water cover was estimated using Sentinel 2 A/B satellite image mosaics. Geoprocessing tasks were performed on Google Earth Engine. The state of the soils was characterized in 18 positions that had different severities of burning. The combined effect of a pronounced drop in the river level with a very intense climatic drought strongly conditioned the surface covered by water in the wetland area. The fires had negative effects mainly on the soils of the sites with the highest burning severity in two chemical variables and in one physical-mechanical variable. If these environmental combinations are repeated, the wetland will riskily increase its ecosystem vulnerability.

Keywords: soils, wetlands, delta, fires.

INTRODUCCIÓN

La región del delta del río Paraná es un mosaico de humedales que en Argentina se extiende trescientos kilómetros a lo largo de la cuenca baja del Paraná (Malvárez, 1999). Es una llanura aluvial compleja que tiene características biogeográficas y ecológicas únicas (Malvárez, 1997).

Los humedales son reservorios vitales de biodiversidad, que constituyen el hábitat de numerosas especies de fauna y flora (Guasone y Roncoroni, 2022). Algunos de ellos se cuentan entre los ecosistemas más productivos del planeta y brindan importantes beneficios económicos y sociales, llamados bienes y servicios ecosistémicos (Kandus et al., 2010; Junk et al., 2013; Dayan y Monkes, 2022).

Conforman un espacio transicional entre los ecosistemas netamente acuáticos y los terrestres, y se caracterizan por estar periódicamente inundados por agua o por tener suelos saturados de manera permanente o semipermanente, lo que propicia el desarrollo de rasgos y/o propiedades edáficas específicas (hidromorfismo) en menor o mayor grado. Los humedales albergan vegetación con adaptaciones evolutivas focalizadas en la influencia espacial y temporal del agua (Beuel et al., 2016).

El agua es un elemento de la naturaleza indisociable de un humedal, pero la cantidad, características y/o la frecuencia de la dinámica de la misma en estos espacios no es constante y tampoco comparable entre ellos. Esto da lugar a múltiples tipologías de humedales, siempre presentando intensas y muy complejas asociaciones con el régimen hidrológico del elemento de la hidrósfera de tipo marítimo-costero o continental (léntico o lótico) con el cual se encuentre asociado (Junk et al., 2014). Dependen, además, de las características del hidroperíodo, de la energía de los flujos de agua y de la disponibilidad de nutrientes, entre los rasgos hídricos más sobresalientes.

A diferencia de los humedales, en los sistemas terrestres la zona saturada con agua se encuentra por debajo de la rizosfera, en tanto que en los ecosistemas acuáticos los procesos biológicos tienen lugar dentro de la columna de agua y bastante por encima del nivel del suelo o sustrato saturado. Los ecosistemas de humedales implican entonces una transición vertical entre los dos anteriores; es decir son espacios territoriales en donde ocurren inundaciones someras o condiciones de saturación constante o recurrente de la superficie y a nivel subsuperficial en el suelo, lo que genera rasgos hidromórficos por anaerobiosis edáfica (Mitch y Gosselink, 2015). Con estos elementos, Kandus et al (2011), citando a Brinson (2004), subdividen a los ecosistemas de humedales en “húmedos” y “secos”. Los primeros son los que presentan mayor frecuencia de anegamiento sobre la superficie del suelo, hasta un par de metros de profundidad. Los humedales secos son aquellos en los que la zona saturada con agua generalmente abarca al perfil del suelo (incluyendo a la rizosfera), y solo esporádicamente se presentan agua sobre la superficie de éste. Ambas tipologías de humedales presentan diferencias muy importantes en cuanto a su funcionamiento ecosistémico.

Los autores antes citados afirman que, si bien el régimen climático contribuye a definir la existencia y el perfil ecológico de los humedales, la dependencia de sus propiedades estructurales y funcionales con el régimen hidrológico, hace que hayan sido considerados como sistemas azonales, es decir que su presencia no puede inferirse totalmente a partir de las condiciones climáticas generales circundantes (Mitch y Gosselink, 2007, Kandus et al., 2011).

En contextos de bajantes pronunciadas y por períodos temporalmente extensos, la importancia de la disponibilidad de agua climática se incrementa comparativamente, en todas las funciones ecosistémicas que involucren a los factores bióticos. En este sentido, Euliss et al. (2004) afirman que la variabilidad en los ciclos climáticos a corto y/o mediano plazo tienen suma importancia, ya que causan cambios en estructuras y/o funciones abióticas que son parte integral de los procesos de los humedales, las que luego impactaran en su microflora, flora y fauna. Por ejemplo, los cambios en los patrones de precipitación pueden influir en la hidrología de los humedales al alterar el momento y la cantidad de entradas de agua atmosférica y subterránea, lo que altera características abióticas importantes (la profundidad del agua, la concentración de solutos, la temperatura y la velocidad de secado de los sustratos expuestos), que influyen en la composición de las

comunidades de plantas, invertebrados y vertebrados de estos ambientes. Por lo tanto, la hidrología y la climatología son elementos indispensables en cualquier estudio coyuntural sobre humedales, ya que el agua condiciona la dinámica de estos ecosistemas y de sus componentes, estructuras y funciones.

Por sus características, estos espacios naturales son frágiles y vulnerables frente a diversas adversidades. Cuando ocurren incendios, se produce una fuerte alteración del ecosistema en todos sus componentes que promueven diversos daños funcionales. Uno de los que sufre mayor afectación es el suelo, en muchos casos, depósitos de sedimentos fluviales con edafización incipiente, en el cual se generan severas modificaciones. Principalmente ocurren cambios en la materia orgánica, acidez o pH, afectaciones biológicas, estabilidad estructural, porosidad, y modificaciones en los nutrientes totales del suelo (Rosero Cuesta y Giraldo, 2013).

De acuerdo a la intensidad y duración del fuego como a la condición antecedente -suelo más o menos húmedo, los impactos cambian, tanto como las variables afectadas. La severidad del fuego describe la magnitud de la perturbación (Neary et al., 1999). Es así, que los efectos poseen distintos impactos en las características antes citadas. También las manifestaciones lesivas se detectan en la dinámica microbiológica, la textura y el aumento de la hidrofobicidad (González-Pérez et al., 2012).

Los incendios severos (con altos umbrales de temperatura) pueden causar cambios en las tasas de sucesión florística, alterar por encima y por debajo la composición de especies del suelo, generar volatilización de nutrientes y arrastre de cenizas en columnas de humo, producir tasas de mineralización rápidas o disminuidas, alterar las proporciones de C:N, que resultan en pérdidas subsiguientes de nutrientes a través de erosión acelerada, lixiviación o desnitrificación. Además, pueden ocurrir cambios en el funcionamiento hidrológico del suelo, y como se mencionó, degradación de las propiedades físicas edáficas, disminución de la micro y macrofauna y alteraciones en las poblaciones microbianas y procesos asociados (Neary et al., 1999; Mataix-Solera y Cérda, 2009).

Una afectación importante es la mineralógica (Minervini et al., 2018), dado que estos ambientes son de origen sedimentológico, hidromórficos y con distinto grado de insaturación, por lo que poseen diferentes condiciones físico-químicas con suelos desarrollados, y con frecuencia, abundancia de hierro libre, por lo que el fuego produce alteraciones que modifican sus pseudo-equilibrios y funcionalidad.

Es particularmente importante definir el espesor afectado en la quema, esto posee íntima relación con las posibilidades y el tiempo de recuperación pos-incendio. La resiliencia de la matriz del suelo está condicionada por los factores vinculados a estos eventos, dependiendo principalmente de la evolución del clima, la hidrología local, y la eventual nueva perturbación antrópica.

El objetivo de este trabajo fue caracterizar la hidrología del río Paraná y la estimación de cobertura de agua a través de imágenes satelitales, vinculado a las condiciones climatológicas imperantes en el período 2019 a 2022, y evaluar el efecto de los incendios sucedidos en islas del humedal del río Paraná en las propiedades de los suelos en dos sitios con diferente severidad de quema.

MATERIALES Y MÉTODOS

La región donde se realizó este estudio, se caracteriza por ser clima templado con precipitaciones y temperaturas medias de 1000 mm y de 17°C, respectivamente. El balance hídrico no registra un neto período de déficit en el año. El sistema de humedales de la región, genera un efecto de modificación sobre las principales variables climáticas que modera tanto las temperaturas extremas como la deficiencia hídrica temporaria, lo que origina condiciones más parecidas a las subtropicales húmedas que a las templado subhúmedas de la zona circundante. Respecto a los rasgos geomorfológicos, y en relación a la génesis del paisaje actual, luego del Holoceno superior ocurrieron procesos fluviales originados por el río Paraná, que formó las fajas de bancos, islas y meandros. En relación a la vegetación, las comunidades presentes están asociadas a un esquema sucesional desde estructuras graminosas a bosques (Malvárez, 1999).

La estimación de cobertura de agua en el humedal del río Paraná se realizó a partir del empleo de mosaicos de imágenes satelitales Sentinel 2 A/B, cubriendo un área de 729435 hectáreas que comprende al Delta Superior del río Paraná (Burkart et al., 1999), con coordenadas centrales 32° 51' 46'' S y 60° 06' 22' O (datum WGS84) (Figura 1).

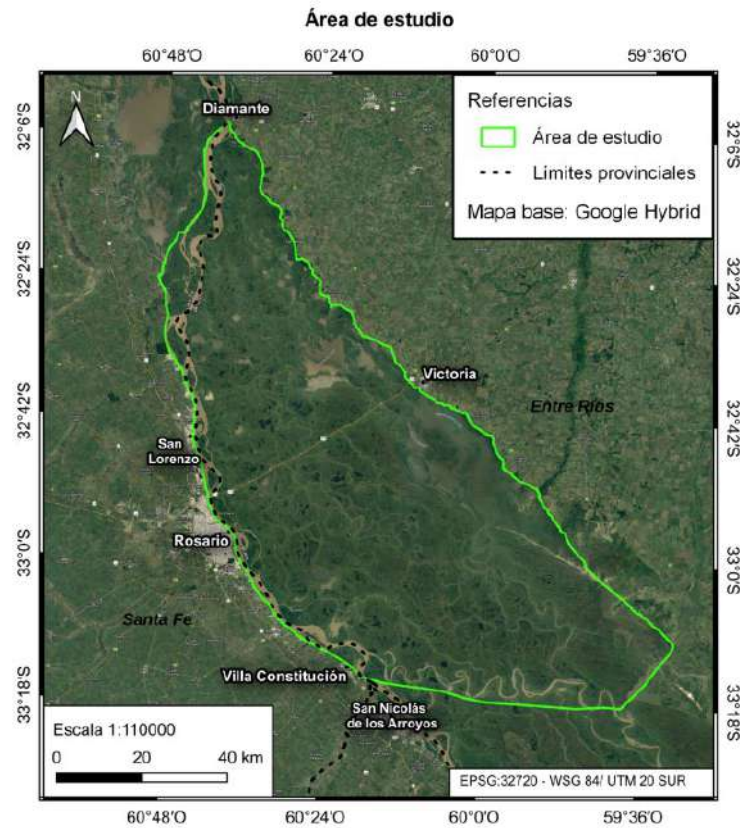


Figura 1. Sector de estudio del Delta superior del río Paraná.

A partir de los mosaicos generados con los *tiles* de las imágenes incluidas en el área de estudio se calcularon índices espectrales que ayudan a resaltar la presencia de agua en superficie, entre ellos el NDWI (*Normalized Difference Water Index*) (Gao, 1996), que ha sido probado en distintos escenarios y se lo señala como más adecuado para aguas continentales dulces. Su ecuación es:

$$NDWI = \frac{G - NIR}{G + NIR} \quad (1)$$

donde G es el valor de reflectancia en la banda verde y NIR es el valor de reflectancia en la banda infrarroja cercana.

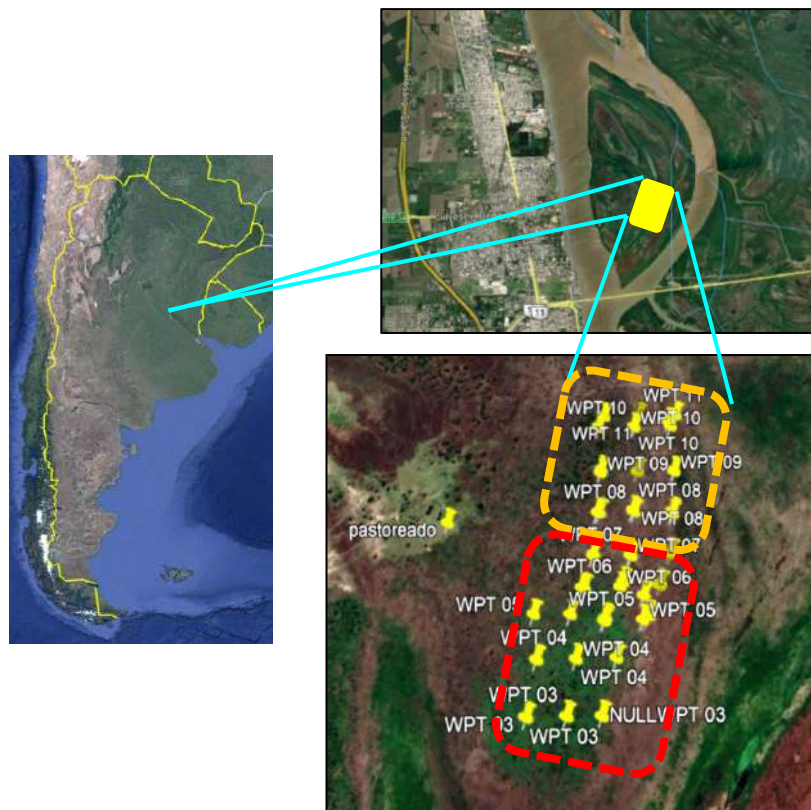
Las fechas de conformación de los mosaicos de imágenes satelitales se seleccionaron de acuerdo a situaciones singulares de la altura hidrométrica del río Paraná, medida en el puerto de la ciudad de Rosario, Santa Fe. Estos datos fueron proporcionados por el Centro de Información Meteorológica (CIM), perteneciente a la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral. Niveles mínimos de altura en los años 2020 y 2022, niveles máximos de altura dentro del rango de años en los que están disponibles datos Sentinel 2 A/B, en este caso, se encontró un máximo relativo en el año 2016. Finalmente, para la caracterización de la superficie cubierta por agua, relacionada al promedio de altura del agua del río Paraná en el hidrómetro de la citada ciudad (valor de 3,60 m), fueron seleccionadas imágenes de un periodo durante el año 2017.

Las tareas de geoprocesamiento se realizaron en Google Earth Engine (GEE), plataforma en línea para el análisis de datos geospaciales a gran escala, desarrollada por Google. Combina una gran cantidad de datos de sensores remotos satelitales, con herramientas de geoprocesamiento muy avanzadas, lo que posibilita la visualización y el análisis de patrones y tendencias en la Tierra a lo largo del tiempo y en superficies extensas con facilidad (Gomes et al., 2020).

El estudio sobre el impacto de los incendios en los suelos se realizó en un sector de las Islas de los Mástiles, Granadero Baigorria (Santa Fe, Argentina) ($32^{\circ} 50' 48''\text{S}$; $60^{\circ} 40' 25''\text{O}$) (Figura 2). Esta isla se originó en la década del sesenta del siglo pasado a través de una deposición continua de sedimentos fluviales acarreados por el río Paraná. Posee una superficie actual aproximada de 1233 ha, la cual se integra al paisaje deltaico preexistente.

Durante 2020, una de las zonas más afectadas por incendios fue la ecorregión Delta e Islas del Paraná, que abarca 4825000 ha de humedales a lo largo del tramo inferior del río Paraná (Guasone y Roncoroni, 2022). En la Isla de los Mástiles se produjo un incendio de grandes proporciones en los últimos días del mes de julio del año 2020, luego de sucesivos eventos de incendios iniciados en marzo de ese año, con el propósito de caracterizar el estado de los suelos, en una etapa posterior a los mismos, a inicios de octubre se realizó un relevamiento en terreno de la situación pos-quema para definir la severidad de los incendios, la estrategia y sitios de muestreo de los suelos, lo cual se efectuó a fin del mes.

El muestreo se desarrolló de acuerdo a una grilla georreferenciada con GPS en 18 posiciones del sector en estudio (Figura 2), los cuales representaron distintas severidades de quema: severidad alta (SA) de una superficie de 10 ha y severidad baja (SB) de una superficie de 8 ha (Figura 3). La severidad se definió por las evidencias visuales relacionadas con la quema de vegetación cespitosa, arbustiva y arbórea, y el hallazgo y cantidad de osamentas de animales menores y mayores.



Ref: línea de trazo roja corresponde a Severidad de quema alta (SA), línea de trazo amarilla corresponde a severidad de quema baja (SB)

Figura 2. Sector de estudio de los suelos en la Isla de Los Mástiles, Granadero Baigorria (SFe) y sitios de muestreo georreferenciados.



Figura 3. Severidad de quema alta (SA; izq.) y baja (SB; der.)

Los muestreos consistieron en la realización de pozos de observación y extracción de muestras de suelos en los espesores 0-10 cm y 10-20 cm y en la medición de la resistencia mecánica en el espesor 0-20 cm. En las muestras se determinó materia orgánica (%), pH, nitrógeno total (%), fósforo (ppm), conductividad eléctrica (ds/m), capacidad de Intercambio catiónico (meq/100 gr), hierro (ppm) y textura. En cada sitio de muestreo se midió la resistencia a la penetración (KPa) en el espesor 0.20 cm. Se recurrió al criterio de situaciones apareadas y para el análisis de los resultados se aplicó un ANOVA con un test de comparación de medias de Tukey ($p < 0.5$).

RESULTADOS

La caracterización de la dinámica hidrológica del río Paraná, que condiciona imperativamente la cantidad de superficie cubierta por agua en el área del humedal analizada, mostró contrastes importantes.

La altura promedio de 3.60 m se caracterizó adecuadamente con imágenes captadas en fecha 15 de agosto de 2017, con una altura del río de 3.33 m. El año 2017 fue de climatología “neutra” según fases ENSO (“El Niño South Oscillation”). La Figura 4 muestra la distribución del agua en el área de estudio.

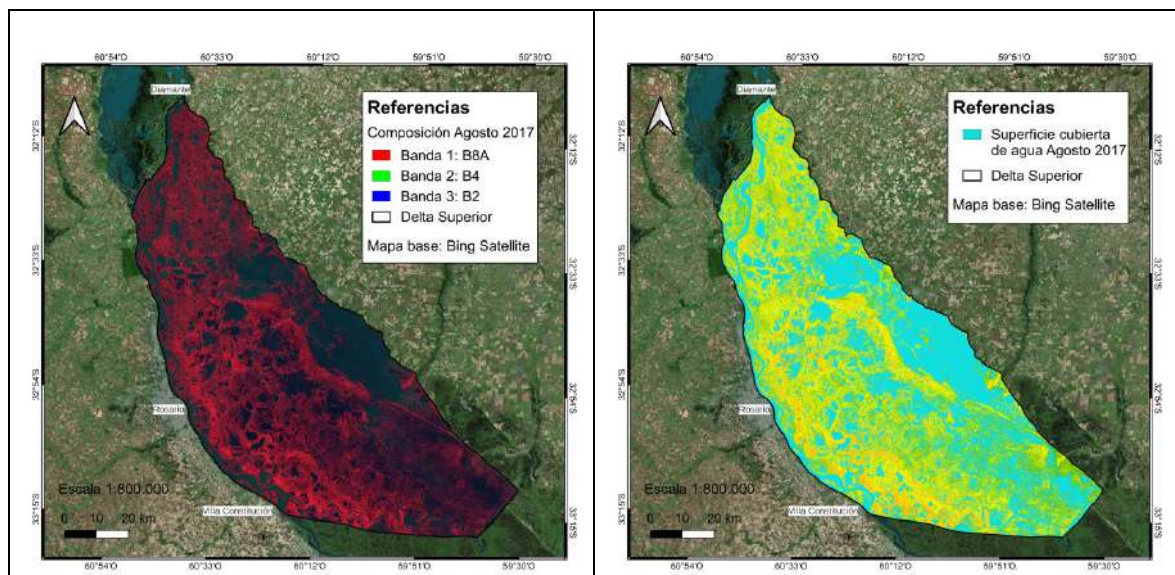


Figura 4. Aspecto del humedal en el promedio de altura del río Paraná. a) Falso color infrarrojo izq.; b) NDWI der.

El máximo de altura medido en el hidrómetro de la ciudad de Rosario, dentro del rango temporal de disponibilidad de imágenes Sentinel 2 A/B (desde fines de 2015 hasta el presente), se produjo los días 12 y 13 de enero de 2016, con un valor de altura del río Paraná de 5.53 m (Figura 5).

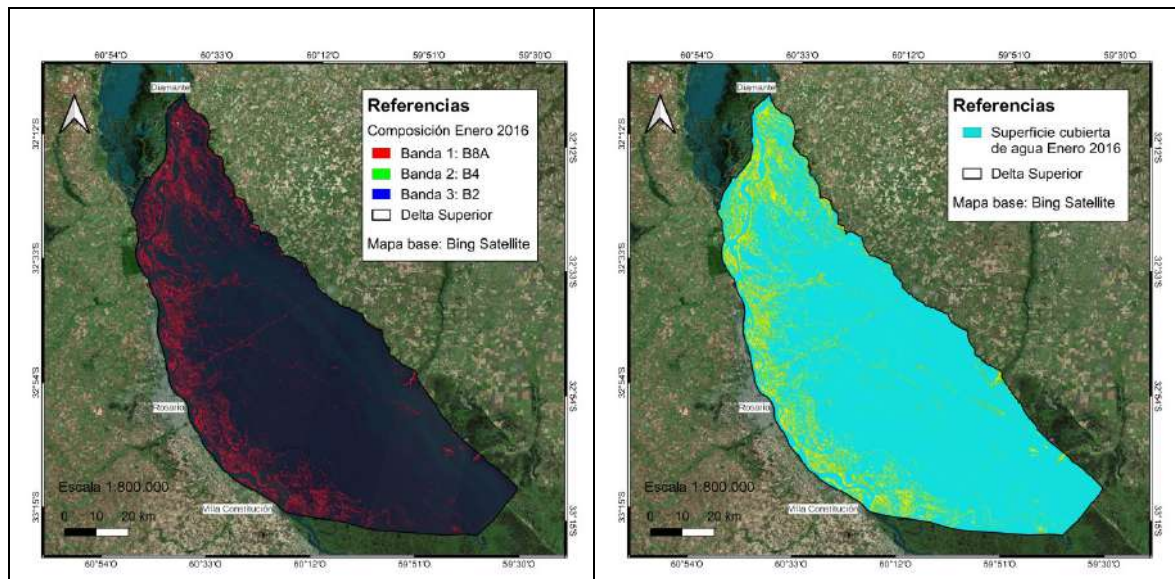


Figura 5. Aspecto del humedal en el máximo relativo de altura del río Paraná. Falso color infrarrojo izq.; NDWI der.

A partir de fines de 2019 se comenzó a verificar una bajante general importante en el río Paraná, lo que coincidió con una fase ENSO muy prolongada de “La Niña” que llegó hasta los primeros meses de 2023. En 2020, en fecha 22 de mayo, tiene lugar la lectura más baja de todo el año, la cual fue de 0.08 metros. Las imágenes disponibles próximas a esta fecha son del 26 de mayo del mismo año con el río Paraná en una altura de 0.40 m (Figura 6).

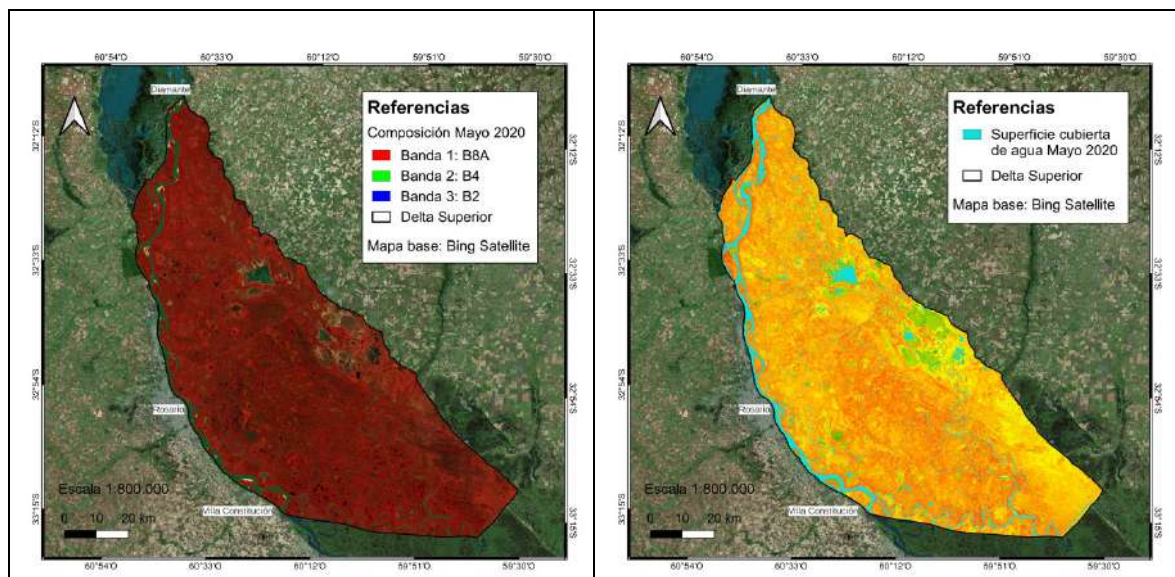


Figura 6. Aspecto del humedal en el mínimo de altura del río Paraná en 2020. Falso color infrarrojo izq.; NDWI der.

La máxima bajante en el período considerado se produjo el 13 de enero de 2022, con una marca de 0.49 m por debajo del nivel de referencia. Cabe consignar que el récord de nivel mínimo en el puerto de Rosario ocurrió en 1947, alcanzando una altura de solo -1.49 m. Esta situación fue caracterizada con imágenes captadas el 11 de enero del mismo año, día en el cual el río presentaba una altura de -0.30 m. La Figura 7 muestran la distribución del agua en el área de estudio en este momento de mínimo relativo.

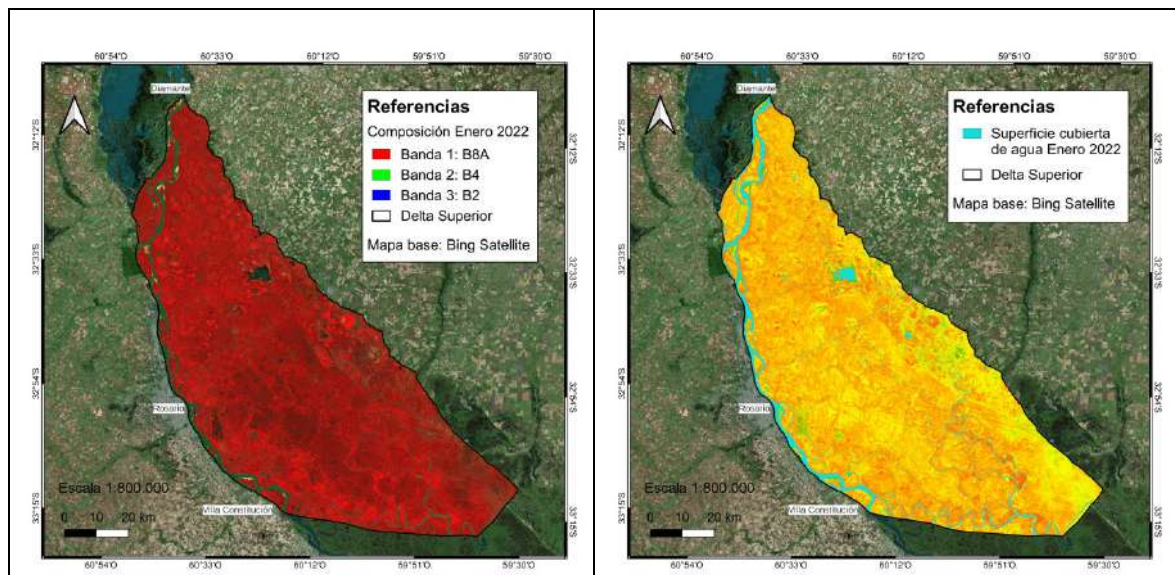


Figura 7. Aspecto del humedal en el mínimo de altura del río Paraná en el año 2022; valor más bajo verificado en el período analizado. Falso color infrarrojo izq.; NDWI der.

La Tabla 1 muestra la superficie ocupada por agua para los cuatro momentos analizados en el área de estudio.

Tabla 1. Valores de altura y de superficie cubierta por agua en el área de estudio, según los momentos y las condiciones hidrométricas del río Paraná.

Fecha	Altura del río Paraná en el hidrómetro de Rosario, SF	Condición hidrológica	Superficie ocupada por agua	
			Hectáreas	Porcentaje del área de estudio
26 de enero 2016	5.53 m	Creciente	627059.74	85.97
15 de agosto 2017	3.33 m	Promedio	316947.89	43.45
26 de mayo 2020	0.40 m	Bajante	50222.90	6.89
11 de enero 2022	-0.30 m	Bajante	38087.89	5.22

En la Tabla 2, se indican los resultados del impacto de los incendios en los suelos del sector de estudio de la Isla de Los Mástiles a fines de julio del año 2020. Los resultados se muestran por espesor de la condición de cada variable edáfica relevada en ambos sitios. En la Tablas 3, 4 y 5, se presentan los resultados por espesor de las variables edáficas en los ambientes SA y SB.

Tabla 2. Estado de las variables edáficas en todos los ambientes relevados

Variables edáficas	Espesor (cm)	Valor máximo y mínimo
Materia orgánica (%)	0-10	2.76 - 5.51
	0-20	0.29 - 1.55
pH	0-10	4.34 - 5.38
	0-20	4.73 - 5.38
Nitrógeno total (%)	0-10	0.150 - 0.222
	0-20	0.014 - 0.073
Fósforo (ppm)	0-10	1.10 - 21.20
	0-20	0.50 - 44.60
Conductividad eléctrica (ds/m)	0-10	0.06 - 0.40
	0-20	0.02 - 0.16
CIC (meq/100 gr)	0-10	14.23 - 32.44
	0-20	3.32 - 21.66
Hierro (ppm)	0-10	358.0 - 532.2
	0-20	96.0 - 490.5

Tabla 3. Estado de las variables edáficas en sitios quemados con diferente severidad

Sitio	Espesor (cm)	MO (%)	pH	Nt (%)	P (ppm)	CE (ds/m)	CIC (meq/100 gr)	Fe (ppm)
SB	0-10	4.85a	4.92	0.200	8.55a	0.280	24.15	446.02
	0-20	0.63	5.22	0.020	25.33	0.080	8.25	294.63
SA	0-10	4.11b	4.88	0.190	3.06b	0.267	22.81	441.83
	0-20	0.64	5.13	0.026	26.65	0.054	7.61	262.70

letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.5$) entre severidades para el mismo espesor

Tabla 4. Proporción de partículas texturales en los suelos de los sitios quemados con diferente severidad

Sitio	Espesor					
	0 -10 cm			10-20 cm		
	arena	limo	arcilla	arena	limo	arcilla
SB	7b	43a	47	36b	46a	15
SA	19a	33b	48	56a	26b	16

letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.5$) entre severidades para el mismo espesor

Tabla 5. Resistencia a la penetración (RP) en los sitios quemados con diferente severidad en el estrato 0-20 cm

Sitio	RP (KPa)
SB	980b
SA	1552a

letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.5$) entre severidades para el mismo espesor

DISCUSIÓN

Las magnitudes de las oscilaciones de la superficie cubierta por agua implican impactos en toda la funcionalidad del humedal. Incluso bajantes tan marcadas y prolongadas respecto del promedio, provocan que la zona de saturación en los perfiles de los suelos se deprima en igual magnitud, con lo cual la dinámica ecosistémica se asemeja a la de un humedal seco, más que a la de uno húmedo (Brinson, 1993). Esto tiene impactos en toda la cadena trófica, ya que condiciona fuertemente su base funcional, la cual se asocia a la productividad primaria vegetal (Neiff, 1999).

Ante períodos tan prolongados de bajante del curso fluvial como los registrados en el lapso estudiado, el componente climatológico se erige por sobre los demás atributos ambientales, dado que el agua pluvial es la única disponible para mantener la productividad vegetal en niveles razonablemente normales (Brinson, 2004). Cuando se acoplan bajantes del río Paraná y sequías climáticas muy extensas en el tiempo, el efecto en los componentes bióticos del ecosistema resulta sumamente intenso (Neiff y Neiff, 2013). A esto debe incorporarse el impacto superlativo que supone la ocurrencia de incendios de la biomasa vegetal en el humedal, los que afectan fuertemente tanto a los componentes bióticos (flora y fauna), como a los suelos, los cuales pueden sufrir cambios intensos, a corto, mediano y largo plazo (Doerr y Cerda, 2005). Esto último implica un deterioro desestabilizante del funcionamiento del humedal, dado que altera las relaciones ecológicas intra e inter ambientes del mismo.

Respecto a ello, el impacto del fuego provoca la modificación de las propiedades edáficas, aunque no siempre en la misma dirección, hay factores que influyen y pueden marcar respuestas muy diversas (Mataix-Solera y Doerr, 2004). Estas alteraciones dependerán principalmente de la temperatura alcanzada durante el incendio (Neary et al., 1999). De Bano (1991) afirma que entre 200 y 300° C, se producen cambios en los tenores de algunos nutrientes, y por sobre esa temperatura, más aún. Ello se advirtió en este estudio en el caso del fósforo, dado que se produjo una pérdida del 65.2% en los primeros 10 cm de suelo en el sitio de mayor severidad de quema respecto al de baja severidad. Esto condice con lo informado por Luchéis et al. (1994) al hallar que las peores consecuencias de un incendio se dan en los primeros centímetros de suelo, siendo los efectos diferentes a mayor profundidad.

Respecto a la materia orgánica, coincidiendo con lo reportado por Salvia et al. (2012) cuando comparó áreas con diferentes severidades de quema, hubo una disminución del 15.2% entre ambas situaciones, no afectando significativamente el estrato 10-20 cm. Ello sugiere que el fuego solo afectó el espesor superficial del suelo respecto al tenor de carbono presente, tal como plantea Ceballos et al. (2012) sucedió en los estudios del potencial de pérdida de carbono en ambientes del Delta Inferior del Paraná.

En relación al nitrógeno total, la cantidad superficial fue 10 a 7.5 veces mayor que en el espesor inferior en SA y SB, respectivamente. No se detectaron diferencias entre ambas severidades de incendio en los mismos estratos a diferencia de lo que informan varios autores (Afif Khouri y Oliveira Prendes, 2006; Rosero Cuesta y Giraldo, 2013). Esta condición podría deberse a que los incendios tuvieron una relativa baja intensidad (relación entre temperatura y duración del incendio sobre la superficie) que no tuvo gran influencia para volatilizar este nutriente.

El pH resultó ácido en los sitios SA y SB, en ambos estratos. Fue menor en la superficie, y no mostró cambios luego de los incendios, a pesar de la pérdida del efecto buffer por disminución de la materia orgánica. Este resultado no coincide con lo informado por algunos autores (Mataix-Solera, 1999; Mataix-Solera y Guerrero, 2007), quienes atribuyen a las cenizas la causa del aumento del pH tras la combustión de la vegetación, aunque luego se reduzca por el progresivo lavado. En estudios de diferentes severidades de quemaduras de Salvia et al. (2012) no se detectaron cambios en profundidad y tampoco entre severidades de este evento.

La CE en superficie fue de 3.5 a 5 veces mayor que en el espesor inferior en SA y SB, respectivamente, y no se detectaron diferencias significativas entre ambas severidades de incendio en los mismos estratos. Como afirma Salvia et al. (2012) en algunas situaciones, el fuego tiene ligeros efectos sobre la CE, pudiendo incrementarse debido al aporte de carbonatos, cationes básicos y óxidos procedentes de las cenizas. Otros autores (Pettit y Naiman, 2007; Notario del Pino et al., 2008), encuentran en el aumento de los cationes intercambiables surgidos de las quemaduras, la causa de un probable incremento de la CE en los estratos superiores del suelo.

La profundidad de suelo afectada, así como la magnitud y dirección de los cambios en la fracción mineral y en las propiedades físicas son temas controvertidos y dependen de los umbrales de temperatura de cada componente y de la severidad de los incendios (Minervini et al., 2018). El calentamiento del suelo produce variaciones en algunas de las propiedades físicas. La reducción de la materia orgánica también da como resultado cambios en las propiedades físicas del suelo y una disminución de la resiliencia física edáfica (Neary et al., 1999; Certini, 2005; Hubbert et al., 2006). Un componente de la estructura que puede ser afectado negativamente por el fuego, es la porosidad total y el tamaño de los poros del suelo (De Bano et al., 2005). La pérdida de agregación por el fuego reduce la porosidad edáfica y aumenta la densidad aparente. Muy probablemente el incremento de la RP en la situación SA del 36.8% respecto a SB, se deba a estas causas, con sus consecuencias negativas para la infiltración y el movimiento de aire en los suelos.

La CIC fue mayor en superficie en los dos sitios (tres veces más) y no se hallaron diferencias significativas entre ellos en ambos espesores. Dado la dependencia de esta variable del tenor de materia orgánica y de arcilla, la alteración de ambas por el fuego, impactan sobre la misma. En este caso hubo una asociación de la disminución de la CIC con la pérdida de materia orgánica en SA, no detectada con el nivel de significancia utilizado.

La cantidad de hierro fue mayor en superficie en los dos sitios y no se hallaron diferencias significativas entre ellos. El espesor 10-20 cm tuvo 65% menos hierro en SB y 59% menos en SA. Tal como asevera Minervini et al. (2018), la combustión puede afectar la concentración de minerales de hierro, principalmente los óxidos, pero en este estudio no se advirtió.

Respecto a la textura, las temperaturas alcanzadas en los incendios raramente afectan las fracciones granulométricas por debajo de unos pocos centímetros de la superficie del suelo (De Bano et al., 2005). Se asume que las diferencias en SA y SB se deben a las relacionadas con los ambientes de sedimentación en los

sitios estudiados. En ambos, en el espesor 0-10 cm, la cantidad de arcilla es mayor que la arena, y a la inversa en el espesor 10-20 cm. No obstante, se considera que estudios más específicos podrían develar cambios en estas fracciones.

CONCLUSIONES

Desde finales de 2019 hasta el presente, el efecto combinado de una bajante pronunciada del río Paraná con una sequía climática muy fuerte, ambas por períodos prolongados, han producido un impacto marcado en la estructura ecosistémica del humedal correspondiente al Delta Superior del río Paraná. Esta situación, más otras, circunstancialmente graves (p.e. quemadas inducidas), han facilitado la ocurrencia de incendios de biomasa vegetal, los que sin dudas incrementó fuertemente los impactos en el ambiente, en particular en los suelos, soporte vital para el equilibrio funcional del humedal deltaico.

En relación a esto último, los incendios tuvieron efectos negativos sobre distintas variables edáficas de acuerdo a la severidad con que ocurrieron. Su manifestación resultó diferente en los espesores edáficos superficiales y subsuperficiales. Los impactos del fuego en dos variables químicas (materia orgánica y fósforo) y en la física-mecánica (RP) en el sitio de mayor severidad de quema, indican una pérdida de capacidades funcionales ambientales de los suelos afectados por los incendios y un riesgo a futuro, dado que, de continuar los incendios, podrían intensificarse estos rasgos degradativos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Plataforma de Estudios Ambientales y Sostenibilidad (PEAS-CEI) de la Universidad Nacional de Rosario, por el aporte económico efectuado para la realización de las determinaciones analíticas de los muestras de suelo.

REFERENCIAS

- Afif Khouri, E. y J. A. Oliveira Prendes. (2006). Efectos del fuego prescrito sobre matorral en las propiedades del suelo. *Invest Agrar: Sist Recur For*, 15(3), 262-270.
- Beuel, S., Alvarez, E., Amler, E., Behn, K., Kotze, D., Kreye, C., Leemhius, C., Wagner, K., Willy, D., Ziegler, S. y Becker, M., (2016). A rapid assessment of anthropogenic disturbances in East African wetlands. *Ecological Indicators* 67.10.1016/j.ecolind.2016.03.034. Acceso: 11 nov. 2022.
- Brinson, M. M. (1993). Changes in the functioning of wetlands along environmental gradients. *Wetlands* 13 (2). pp. 65-74.
- Brinson, M. M. (2004). Niveles extremos de variación de patrones y procesos en humedales. En A. I. Malvárez y R. F. Bó (Comp.) Documentos del curso-taller “Bases ecológicas para la clasificación e inventario de humedales en Argentina”. 115 págs. Buenos Aires, Argentina. FCEYN-UBA; RAMSAR; USFWS; USDS.
- Burkart R., Bárbaro N., Sánchez R. y Gómez D. (1999). Eco-regiones de la Argentina. Buenos Aires. Programa Desarrollo Institucional Ambiental. Componente Política Ambiental. Administración de Parques Nacionales. Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable. Presidencia de la Nación. p.42.
- Ceballos D., Frangi, J. y Jobbágy, E. (2012). Soil volume and carbon storage shifts in drained and afforested wetlands of the Paraná River Delta. *Biogeochemistry*. Recuperado de: <http://www.springerlink.com/content/36050t37k24qw133/?MUD=MP>.
- Certini, G. (2005). Efectos del fuego en las propiedades de los suelos forestales: una revisión. *Ecología*. 143 (1), 1-10.
- Dayan, L. A. y Monkes, J. I. (2022). El concepto “servicios ecosistémicos” como herramienta para normar el uso y apropiación del Delta del Paraná, Argentina. *Sociedad y ambiente*, 25: 1-28.
- De Bano, L. F. (1991). The effect of fire on soil properties. *Proceedings management and productivity of western-Montane. Forest Soils*, pp. 151-155.

- De Bano, L. F., Neary, D., y Ffolliot, P.F. (2005). Soil physical properties. pp. 29-52 in D. Neary, K. Ryan and L. F. DeBano (eds.). Wildland fire in ecosystems; effects of fire on soils and water. Gen. Tech. Rep., vol. 4. Forest Service, Rocky Mountain Research Station, U.S.D.A., USA.
- Doerr, S.H. y Cerda, A. (2005). Fire effects on soil system functioning: new insights and future challenges. *International Journal of Wildland Fire* 14: 339-342.
- Euliss, N. H. Jr., LaBaugh, J.W., Fredrickson, L. H., Mushet, D. M., Laubhan, M. K., Swanson, G. A., Winter, T. C., Rosenberry, D. O. y R. D. Nelson, D. O. (2004). The wetland continuum: a conceptual framework for interpreting biological studies. *Wetlands* 24: 448-58.
- Gao, B. C. (1996). NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3), 257-266.
- Gomes, V., Queiroz, G. y Ferreira, K. (2020). An Overview of Platforms for Big Earth Observation Data Management and Analysis. *Remote Sensing*, 12(1253). doi:10.3390/rs12081253
- González-Pérez J.A., Arjona B., Martí, C, González-Vila, F. J. y Badía, D. (2012). Heat induced organic matter transformations with depth in a Rendzic Phaeozem. *Proceedings 4th International Congress Eurosoil 2-6 July, 2012. Bari, Italy.*
- Guasone, M. V. y Roncoroni, L. (2022). Estudio mediante técnicas de teledetección de los incendios forestales ocurridos en las islas del Delta del Paraná durante el año 2020. Tesis de Licenciatura. Pontificia Universidad Católica Argentina. Recuperado de: <https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/15208>.
- Hubbert, K.R., Preisler, H.K., Wohlgemuth, P.M., Graham R.C. y Narog, M.G. (2006). Prescribed burning effects on soil physical properties and soil water repellency in a steep chaparral watershed, southern California, USA. *Geoderma*, Volume 130, Issues 3-4, Pages 284-298.
- Junk, W. J., An, S., Finlayson, C.M., Gopal, B., Kvet, J., Mitchell, E. A., Mitsch, W. J. y Robarts, R. D. (2013). Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: a synthesis. *Aquat Sci* 75:151-167.
- Junk, W. J., Piedade, M. T. F., Lourival, R., Wittmann, F., Kandus, P., Lacerda, L. D., Bozelli, R. L., Esteves, F. A., Cunha, C. N., Maltchik, L., Schöngart, J., Schaeffer-Novelli, Y. y Agostinho, A. A. (2014). Brazilian wetlands: their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 24, 1, 5-22. Doi:10.1002/aqc.2386
- Kandus, P., Morandeira, N. y Schivo, F. (2010). Bienes y Servicios Ecosistémicos de los Humedales del Delta del Paraná. Fundación Humedales / Wetlands International. Buenos Aires, Argentina. 32 pags.
- Kandus, P., Quintana, R.D., Minotti, P.G., Oddi, P.D.J., Baigún, C., González Trilla, G., Ceballos, D.S. (2011) Ecosistemas de humedal y una perspectiva hidrogeomórfica como marco para la valoración ecológica de sus bienes y servicios. En Lateral, P., Jobbágy, E.G., Paruelo, J.M. (Eds.) *Valoración de Servicios Ecosistémicos. Conceptos, Herramientas y Aplicaciones para el Ordenamiento Territorial* (pp. 265-290). Buenos Aires, Argentina: Ediciones INTA.
- Luchéis S., Ansaldi, M. y Giovannini, G. (1994). Regeneration of Mediterranean maquis alter the passage of an experimental Fire. Soil erosion as a consequence of forest fires, (pp 177-183). *Geoderma*, Logroño, España.
- Malvárez, A. I. (1997). Las comunidades vegetales del Delta del Río Parana. Su relación con factores ambientales y patrones del paisaje. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. 179 pags. Recuperado de: http://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n2900_Malvarez.
- Malvárez, A. I. (1999). El Delta del río Paraná como mosaico de humedales. Pags 35-53 En: A.I. Malvárez, editor. *Tópicos Sobre Humedales Subtropicales y Templados de Sudamérica*. Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe, 1: 35-54.
- Mataix-Solera, J. 1999. *Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por incendios forestales*. Contribución a su conservación y regeneración. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad de Alicante. 330 pags.
- Mataix-Solera, J. y Doerr, S. H. (2004). Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fireaffected pine forest in southeastern Spain. *Geoderma*, 118, 77-88.
- Mataix-Solera, J. y Guerrero, C. (2007). Efectos de los incendios forestales sobre las propiedades edáficas. *Incendios Forestales, Suelos y Erosión Hídrica*. pp 5-40. España.
- Mataix-Solera, J. y Cerdá, A. (2009). Los efectos de los incendios forestales en los suelos. Síntesis y conclusiones. Nuevos retos en la investigación y en la gestión. Universidad de Valencia, pp 495-529.

- Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/229181477>.
- Minervini, M. G., Morrás, H. J. M. y Taboada, M. A. (2018). Efectos del fuego en la matriz del suelo. Consecuencias sobre las propiedades físicas y mineralógicas. *Ecología Austral* vol., 28 N°1. pp 12-27.
- Mitch, W.J. y Gosselink, J.G. (2007). *Wetlands*. Fourth edition. John Wiley and sons, Inc. New York, EE.UU. Pp. 582.
- Mitch, W.J. y Gosselink, J.G. (2015). *Wetlands*. Fifth edition. John Wiley and sons, Inc. New York, EE.UU. Pp. 752.
- Neary, D G., Klopatek, C, De Bano, L. F. y Folliott, P. F. (1999). Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecology and Management*, N° 122, 51-71.
- Neiff, J.J. (1999). El régimen de pulsos en ríos y grandes humedales de Sudamérica. En: A.I. Malvárez y P. Kandus (Eds.), *Tópicos sobre grandes humedales sudamericanos*. pp 1-49. Montevideo, Uruguay. ORCYT-MAB (UNESCO).
- Neiff, J. J. y Neiff, M. (2013). Evaluación de los impactos del cambio climático sobre el ecosistema natural y la biodiversidad. (Serie Medio Ambiente y Desarrollo); NACIONES UNIDAS - CEPAL; MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO; 152: 1-58.
- Notario del Pino, J., Dorta Almenar, I., Rodríguez Rodríguez, A., Arbelo Rodríguez, C., Navarro Rivero, F.J., Mora Hernández, J.L., Armas Herrera, C. M. y Guerra García J.A. (2008). Analysis of the 1:5 soil: water extract in burnt soils to evaluate fire severity. *Catena* 74: 246–255.
- Pettit, N. E. y Naiman, R. J. (2007). Fire in the riparian zone: Characteristics and ecological consequences. *Ecosystems* 10: 673-687.
- Rosero Cuesta, J. y Giraldo, I. O. (2013). Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo. Estado del arte. *Cuaderno Activa*, 5: 59-67.
- Salvia, M., Ceballos, D., Grings, F., Karszenbaum, H. y Kandus, P. (2012). Post-fire effects in wetland environment: landscape assessment of plant coverage and soil recovery in the Paraná River Delta marshes, Argentina. *Fire Ecology*, 8(2): 17-37.

Trabajo recibido el 27/03/2023 y aceptado por el Consejo Editorial para su publicación el 12/04/2023.

COMO CITAR

Montico, S.; Di Leo, N. y Berardi, J. A. (2023) Sequía, bajante y efectos de los incendios en suelos del delta del Paraná, Argentina. *Cuadernos del CURIHAM*, Edición Especial (2023): Bajante del río Paraná. e199. <https://doi.org/10.35305/curiham.vi.199>

ROLES DE AUTORÍA

SM y NDL contribuyeron en la concepción de la idea; SM, NDL Y JAB contribuyeron en el diseño del estudio, recolección, análisis e interpretación de los datos. Todos los autores aprobaron la versión final para ser publicada y son capaces de responder respecto de todos los aspectos del manuscrito.

LICENCIA

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



Este trabajo se enmarca dentro de la EDICIÓN ESPECIAL (2023): Bajante del río Paraná de la revista Cuadernos del CURIHAM

IMPACTOS GENERADOS POR LA SEQUÍA 2019-2023 EN LA REGIÓN DEL LITORAL ARGENTINO

IMPACTS GENERATED BY 2019-2023 DROUGHT IN THE ARGENTINE LITORAL REGION

Mazzón Rosana⁽¹⁾ y Rafaelli Silvia⁽²⁾

⁽¹⁾Instituto Nacional del Agua. Centro Regional Litoral. Santa Fe. Argentina.
e-mail: rmazzon@ina.gob.ar. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7589-6335>

⁽²⁾Instituto Nacional del Agua. Centro Regional Litoral. Santa Fe. Argentina.
e-mail: srafaelli@ina.gob.ar. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3743-3130>

RESUMEN

Las condiciones de sequía en la Cuenca del río Paraná entre finales del año 2019 e inicio del año 2023 han generado múltiples impactos de variada magnitud, amenazando el desarrollo productivo, el bienestar de las poblaciones y el funcionamiento de los ecosistemas. En este sentido, el presente trabajo incluye la identificación, integración y análisis de los impactos descritos en diversas fuentes de información que abarcan las dimensiones social, económica y de los recursos naturales. Se consideran impactos relacionados a disponibilidad hídrica para abastecimiento humano en zonas urbanas y rurales, producción de alimentos y energía, navegación y comercio, salud, bienestar asociado al turismo así como a la biodiversidad y los ecosistemas considerando la mortandad y crisis reproductiva de peces, desastres por incendios, floraciones algales (cianobacterias) y alteración de humedales. Se sumaron también referencias sobre oportunidades y conflictos interjurisdiccionales así como problemas en sistemas de mediciones hidrométricas. Los resultados del trabajo brindan conocimiento de base sobre los impactos ocurridos durante el último evento extremo de sequía en la Región del Litoral Argentino y aportan una mejor comprensión de los efectos, como insumo para definir futuras medidas de acción en el marco de políticas de resiliencia, adaptación y gestión de la sequía.

Palabras clave: sequía 2019-2023, impactos, disponibilidad hídrica, adaptación, resiliencia.

ABSTRACT

Drought conditions in the Paraná River Basin between the end of 2019 and the beginning of 2023 have generated multiple impacts of varying magnitude, threatening productive development, well-being of populations, and ecosystems functioning. In this sense, the present work includes the identification, integration and analysis of the impacts described in various sources of information that consider the social, economic and natural resources system. Identified impacts affected water availability for human supply in urban and rural areas, food and energy production, navigation and commerce, health, well-being associated with tourism as well as biodiversity and ecosystems, particularly considering fish mortality and reproductive crisis, fire disasters, algae blooms (cyanobacteria) and wetland disturbance. References on interjurisdictional opportunities and conflicts as well as hydrometric measurement systems problems were also added. The results of the work provide basic knowledge on the impacts occurred during the last extreme event of drought in the Argentine Litoral Region and contribute with a better understanding of the effects, as input to define future measures within the framework of drought resilience, adaptation and management policies.

Keywords: drought 2019-2023, impacts, water availability, adaptation, resilience.

INTRODUCCIÓN

La Conferencia de las Partes (COP15) de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD) llevada adelante en el año 2022 ofreció un espacio para respuestas concretas a los desafíos interconectados de la degradación de la tierra, el cambio climático y la pérdida de biodiversidad.

Las condiciones de sequía en la Cuenca del río Paraná en Argentina y Brasil entre finales del año 2019 e inicio del año 2023 (en adelante sequía 2019-2023), han sido una de las peores desde 1944 (Naumann et al., 2022). Las variaciones de la circulación general de la atmósfera, la precipitación y la temperatura han generado impactos de variada magnitud, amenazando el desarrollo productivo, el bienestar de las poblaciones y el funcionamiento de los ecosistemas.

Para Argentina, el evento extendido de sequía fue monitoreado por organismos nacionales e internacionales a fin de acompañar el fenómeno con pronósticos e información para tomadores de decisiones, usuarios y sociedad en general. Se citan como ejemplo los informes mensuales de la Mesa Nacional de Monitoreo de Sequías integrada por especialistas de instituciones nacionales que integran la Red de Organismos Científico Técnicos para la Gestión del Riesgo de Desastres de Argentina (Red GIRCyT) y los informes del Sistema de Información sobre Sequías para el sur de Sudamérica (SISSA), en el marco del Centro Regional del Clima para el sur de América del Sur (CRC-SAS) (Naumann et al., 2022; Naumann et al., 2023).

Las sequías no se caracterizan por su impetuosidad, sino que suponen la limitación de acceso al agua, lo que en contextos de incertidumbre hace necesario incorporar el riesgo como un elemento más en la planificación y en la definición de políticas del recurso (Paneque et al., 2021; Paneque y Vargas Molina, 2018; Vargas Molina y Paneque, 2019).

En este sentido, el presente trabajo incluye la identificación, integración y análisis de los impactos del evento extremo de sequía 2019-2023 los cuales han sido descriptos por diversas fuentes de información que abarcan las dimensiones social, económica y de los recursos naturales.

OBJETIVOS

Contar con la identificación, integración y análisis de los impactos ocurridos en la Región del Litoral Argentino generados por la sequía en la Cuenca del río Paraná entre los años 2019 y 2023, a fin de lograr una mejor comprensión del tipo de efectos -ya sea a nivel económico, social y/o ambiental- relacionados con eventos extremos analizados en el contexto de la gestión del riesgo.

METODOLOGÍA

Se recopilan antecedentes científicos y de gestión sobre la sequía a nivel regional y en particular de la bajante en la Cuenca del Plata (Baigún y Minotti, 2021; Cacik et al., 2021; Naumann et al., 2022; Naumann et al., 2023; Paneque y Vargas Molina, 2021; entre otros). Paralelamente se identificaron numerosos artículos periodísticos sobre impactos en los sistemas social, económico y de los recursos naturales, de los cuales se citan 72 en el presente trabajo. Por otra parte, resultan relevantes los contenidos desarrollados en Jornadas en línea sobre “La bajante del río Paraná” realizada en 2020 por la Universidad Nacional del Litoral desde Santa Fe (Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - UNL, 10/07/2020).

Se consideran además referencias científicas elaboradas en el marco del Sistema de Información sobre Sequías para el sur de Sudamérica (SISSA). El SISSA es una institución virtual que funciona en el marco del Centro Regional del Clima para el sur de América del Sur (CRC-SAS), el cual está constituido en forma de red, según los principios definidos por la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Son también de interés los informes de seguimiento y pronóstico tanto del Sistema Nacional para la Gestión

Integral del Riesgo y la Protección Civil (SINAGIR), del Servicio Meteorológico Nacional, del Instituto Nacional de Agua (Sistema de Alerta Hidrológica de la Cuenca del Plata y actual Sistema de Información y Alerta Hidrológica) así como de la Mesa Nacional de Monitoreo de Sequías.

Se analizan los documentos e información periodística recopilada y se integran considerando los sectores impactados según los 4 grupos utilizados en el sexto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC AR6):

- Disponibilidad hídrica y producción de alimentos;
- Salud y bienestar;
- Ciudades, asentamientos e infraestructura;
- Biodiversidad y ecosistema.

Se presentan los resultados de manera descriptiva incluyendo un registro fotográfico y detallando lugares y fechas de las referencias de los impactos identificados.

Como síntesis del análisis se agrupa la información por dimensión económica, dimensión social y dimensión ambiental tomando como referencia la visión de Seguridad Hídrica de la Asociación Mundial para el Agua (Global Water Partnership) (Ait-Kadi y Lincklaen Arriens, 2013). Finalmente se elaboran consideraciones como cierre del trabajo realizado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La integración y análisis de la información se realiza sistematizando los antecedentes en función de los sectores impactados, según se presenta en la Figura 1.

Disponibilidad hídrica y producción de alimentos Impacto por disminución niveles de los cursos ✓ Obras de tomas – Abastecimiento humano en zonas urbanas – Producción de alimentos – Producción de energía - Centrales nucleares y térmicas. ✓ Centrales hidroeléctricas ✓ Navegación y comercio ✓ Sistema relevamiento de datos (escalas hidrométricas fuera del rango) Impacto por disminución de disponibilidad hídrica asociada a precipitaciones ✓ Producción agropecuaria, ganaderas y frutihortícolas Impacto por disminución de niveles de las napa freáticas ✓ Producción agropecuaria, ganaderas y frutihortícolas ✓ Abastecimiento humano en zonas rurales Salud y bienestar Impacto por falta de agua segura ✓ Deterioro de la cantidad y calidad de agua en zonas aisladas Impacto sobre la actividad turística ✓ Cataratas del Iguazú Ciudades, asentamientos e infraestructura Impacto relacionado al ordenamiento territorial ✓ Ocupación irregular de zonas inundables. Impacto sobre estabilidad del terreno ✓ Derrumbe de barrancas
--

Figura 1. Agrupamiento por sectores impactados y causas.

Biodiversidad y ecosistema	
Impacto sobre biota/peces	
✓ Mortandad de peces	
✓ Crisis reproductiva de peces	
Impacto por incendios	
✓ Desastre en flora, fauna y el ambiente en general, en humedales y territorio	
Impacto por floraciones algales - cianobacterias	
✓ Producción de sustancias tóxicas	
Impacto sobre humedales	
✓ Cambios de la biota en lagunas que se secan	
✓ Avance de vegetación en cursos de agua	
Otros	
✓ Conflictos/oportunidades internacionales e interprovinciales	
✓ Sistema relevamiento de datos - Escalas hidrométricas fuera del rango	

Figura 1. Agrupamiento por sectores impactados y causas. (continuación)

A continuación, se presenta el detalle para cada uno de los sectores afectados, realizando una descripción del impacto y citando las referencias de las fuentes consultadas.

Obras de toma de agua superficiales para abastecimiento humano en zonas urbanas

En 2021, se identificó que el 60% de tomas de agua en la región nordeste registraron problemas debido a la bajante del río Paraná (UNNEMEDIOS, 06/10/2021).

La situación crítica citada en 2021 continuó en el tiempo y la disminución de los niveles hidrométricos en los cursos de agua generó el principal impacto relacionado con la posibilidad de captar el agua en cantidad suficiente. En varios lugares se produjo una caída en el rendimiento de las bombas que toman el agua cruda y por lo tanto se debió ampliar la capacidad de bombeo incorporando nuevas bombas hasta lograr cubrir la demanda existente. Por otra parte, también la calidad de agua sufrió variaciones por diversos factores asociados al evento extremo (salinidad, cianobacterias, sedimentos, entre otros).

Luego de realizar una selección de artículos periodísticos, se citan como referencias algunas localidades e impactos:

- Gran Resistencia (Chaco): Se registró en abril de 2020 al menos un 25% menos de caudal, en función de la pérdida de los rendimientos de las bombas, sumando además un mayor consumo para decantadores y lavados de filtros por sedimentos (Norte, 23/04/2020).

- Puerto Iguazú (Misiones): En mayo de 2021 el municipio pone en práctica un plan de contingencia para mejorar la distribución de agua potable mediante entrega de tanques para almacenamiento, distribución mediante camiones cisternas y realizando perforaciones de pozos ubicados en diferentes puntos de la ciudad (Corresponsalía Puerto Iguazú, 04/05/2021).

- Paraná (Entre Ríos): La municipalidad construyó un dique alimentado por bombas para mantener la prestación del servicio de agua potable a pesar de la emergencia (Infobae, 27/07/2021).

- Tomas santafesinas que incluyen los grandes acueductos (Santa Fe): La empresa ASSA que gestiona estas tomas de agua, concretó diversas acciones y reforzó la captación del sistema río Paraná, a la vez que solicitó el uso racional por la bajante (El Litoral, 18/06/2021).

En la Tabla 1 se presenta un registro fotográfico del impacto sobre obras de tomas en Chaco, Entre Ríos y Santa Fe.

La bajante de los niveles del río implicó readecuaciones de varias obras de toma para poder continuar

brindando los servicios. En algunos casos, se bajaron las cotas de captación –como el caso de la Toma Hernandes en Santa Fe–, se agregaron nuevas bombas o se instalaron tomas flotantes que acompañaron el descenso de nivel –como los casos de las obras de toma en Puerto Iguazú en Misiones, así como en Rincón y Romang en Santa Fe–. En este último caso, la toma flotante tuvo problemas con el repunte del río en 2022 y los embalsados de carrizales fueron trasladados por la corriente dañando la cañería de aducción.

El Instituto Nacional del Agua –basado en el relevamiento de Prefectura Naval Argentina y otras fuentes–, identificó 64 tomas de agua para abastecimiento directo de poblaciones de la Región Litoral y se realizó un análisis de datos hidrológicos y estructurales en obras de captación seleccionadas, identificando los niveles mínimos que permiten captar el agua en cantidad suficiente acorde a la demanda (Mazzón et al., 2023).

Tabla 1. Artículos periodísticos sobre impactos en obras de toma de agua superficiales.

 Gran Resistencia (Chaco) (Norte, 23/04/2020)	 Paraná (Entre Ríos) (Infobae, 27/07/2021)	 Tomas santafesinas (El Litoral, 18/06/2021)
---	--	--

Obras de toma superficiales para producción de alimentos

En el caso de la producción de alimentos que depende de las captaciones de aguas en cursos superficiales, las áreas a sembrar se dimensionan de acuerdo a la futura disponibilidad de agua y a la capacidad de bombeo y en algunos casos también se considera la posibilidad de tomar el agua necesaria de las napas, redundando en aumento de costos de producción.

Seleccionando artículos de fuentes periodísticas, se citan algunas referencias sobre impactos de la sequía en la producción de arroz y frutillas:

- En el Litoral: Por los problemas de abastecimiento resultado de la bajante del río Paraná, los productores entrerrianos de arroz tienen que usar bombas para extraer agua subterránea; debido a la sequía, las napas descendieron y esto redundó en mayores costos (Infobae, 07/12/2021).

- En Coronda (Santa Fe): Para la producción de frutilla el aumento de la salinidad debido a la bajante genera entre un 40% y 70% de disminución en la producción (Agrositio, 23/09/2021).

Obras de tomas para producción de energía - Centrales nucleares y térmicas.

Las obras de tomas para centrales nucleares y termoeléctricas también se han visto afectadas por la bajante. Las centrales nucleares requieren agua para refrigerar el circuito de generación eléctrica y en el caso de Atucha I y II se consideró el riesgo asociado a la bajante (Gárnica, 26/08/2021) y se tomaron las medidas correspondientes. Las centrales térmicas que funcionan con gasoil, necesitan agua para enfriar y controlar el nivel de emisiones de gases. Como referencia de esta situación se citan además a Bellato (15/07/2021) y Berisso (21/07/2021). En la Tabla 2 se visualiza la Central Térmica de Vuelta de Obligado donde se instaló un nuevo sistema de bombas de contingencia para proveer a la central del agua necesaria para operar de manera eficiente con márgenes seguros (Central Vuelta Obligado, 2023).

Centrales hidroeléctricas – Producción de energía

La disminución del caudal genera un impacto asociado a la menor generación hidroeléctrica. En particular en julio de 2021, se publicó que la Central Hidroeléctrica Yacyretá se vio afectada con una reducción del 50% de generación de energía, operando con 12 de sus 20 turbinas generadoras (Ortiz, 22/07/2021; Berisso, 21/07/2021). La potencia nominal entregada en esa fecha al Sistema Argentino de Interconexión (SADI) era de aproximadamente 1100 megavatios (MW), frente a una capacidad instalada de 3100 MW (Spaltro, 21/07/2021).

Se destaca que durante la bajante de referencia que inició en 2019, Argentina llevó adelante reuniones bilaterales con Brasil y con Paraguay para hacer frente a la problemática común y acordar acciones para su mitigación (Borús, 03/01/2022).

Navegación y Comercio

La bajante extraordinaria también afectó la navegación principalmente en los ríos Paraná y Paraguay. Desde abril de 2020 se registraron varaduras de buques y trenes de barcasas, como producto de la disminución del calado en los ríos.

Se citan a continuación algunas referencias sobre el tema:

- Puertos de Rosario: El descenso histórico en el nivel del río Paraná tuvo un singular impacto en la logística de exportación de granos y subproductos, según advirtió la Bolsa de Comercio de Rosario (BCR). Esta situación generó que buques Panamax disminuyeran la carga hasta 7000 toneladas (Mundo Marítimo, 13/04/2020).

- Buques varados por la bajante: En el tramo que va de Rosario a Ramallo se concentró la mayoría de las varaduras. Al norte de la hidrovía también hubo problemas: un convoy de 150 barcasas estuvo detenido casi un mes cerca de Ituzaingó. El problema más grave se producía cuando la varadura de un buque obstruía el canal de navegación y generaba demoras en toda la cadena logística (Neffen, 28/06/2020).

- Manejo integrado de hidroeléctricas con navegación: La Central Hidroeléctrica Yacyretá (argentino-paraguaya) abrió sus compuertas por la histórica bajante del Paraná. Se trató de una habilitación parcial del pase del agua para garantizar la navegabilidad de barcasas que transportan la producción cerealera a los puertos de la región de Rosario. Comúnmente el agua almacenada en Yacyretá es descargada en los meses posteriores a mayo, durante el denominado “período seco”. Pero ante la grave situación provocada por la bajante histórica, y ante la necesidad del tráfico fluvial comercial, se decidió anticipar esta apertura de las compuertas (Larripa, 17/02/2022; Mundo Marítimo, 20/05/2020). Durante el período de la sequía prolongada, en total se realizaron cuatro descargas programadas denominadas “ventana de navegación” que facilitaron el tráfico fluvial en la región.

En la Tabla 2 se presentan algunos registros fotográficos de referencia sobre el tema.

Según los especialistas de la Bolsa de Comercio de Rosario (BCR) la bajante provocó 5 impactos sobre el comercio de granos (Agrofy News, 08/04/2020): (a) Necesidad de ajustar el volumen de carga de los buques. (b) Demoras en el proceso de exportación: “La bajante obliga a mayor prudencia de los pilotos y prácticos en las maniobras con los buques, en particular en los canales de acceso y pasos críticos ya que existe una posibilidad creciente que se registren varaduras en el río, lo cual puede afectar la óptima navegación en el sistema” (c) Demoras en la llegada de las barcasas proveniente de Paraguay con soja: demoras entre 10 y 15 días. (d) Posibles demoras en la carga de buques con aceite de soja: Se generan inconvenientes en las fábricas que tienen suficiente stock de mercadería para moler, pero tiene que demorar el ritmo de molienda, para no saturar la capacidad de almacenaje de aceite. (e) Ralentización del programa de embarques.

Tabla 2. Artículos periodísticos sobre impactos en producción de energía, navegación y comercio.

		
Toma de Agua Central Térmica (Central Vuelta Obligado, 2023)	Puertos de Rosario (Mundo Marítimo, 13/04/2020)	Yacyretá y Navegación (Larripa, 17/02/2022)

Producción agropecuaria, ganadera, forestal y frutihortícolas

La producción de alimentos en la región Litoral se ha visto afectada de manera negativa por el fenómeno meteorológico "La Niña" durante tres años consecutivos, el cual produjo la extraordinaria sequía con importantes impactos en los diversos sectores. Según el informe de la Mesa Nacional de Monitoreo de Sequías de la Red GIRCyT, en el país "más de 173 millones de hectáreas del territorio nacional se encuentran en condiciones de sequía, correspondiendo más de 11.4 millones de hectáreas agrícolas de cultivo y registrándose más de 24.3 millones de cabezas de stock bovino afectadas en la superficie restante. Pero lo más sobresaliente es el aumento en 19 millones de hectáreas de la categoría severa. Esto significa un empeoramiento de las condiciones en áreas que ya estaban afectadas, lo cual se refleja un incremento del impacto sobre sistemas ganaderos, cultivos y población" (Argentina.gob.ar, 10/04/2023).

Seleccionando artículos de fuentes periodísticas que reflejan los impactos en este sector, se citan a continuación algunas referencias por provincias de la Región Litoral.

- En Misiones: La actividad cítrica se ve afectada por la sequía en la producción de limones. La sequía no solo afecta a los cultivos extensivos de la zona central del país, sino que también a otras producciones, como las intensivas y regionales. Una de ellas es la cítrica del noroeste del país. Allí, el déficit hídrico arrecia y existen zonas o situaciones puntuales en las cuales el estrés es muy grande y la primera floración del limón ya se perdió y se empiezan a afectar muchos otros procesos en las plantas (Radio Bicentenario, 07/10/2020). A finales de 2020 se estimaba una merma de entre 55 y 70% de producción de cítricos para el 2021 (Primera Edición, 26/12/2020).

- En Formosa: El año 2020 es uno de los peores para la producción bananera formoseña de las últimas décadas y el año próximo habrá una merma importante de fruta. La Federación Agraria Argentina (FAA) explicó que esta situación se debe a una prolongada sequía, altas temperaturas y heladas tardías, sumado a incendios en varias parcelas y precios que fueron muy por debajo de lo necesario (La Nación Campo, 05/11/2020). La extrema sequía también generó las condiciones propicias para propagar incendios y quemar producciones, como por ejemplo plantaciones de bananas (Urdangarin, 01/10/2020).

- En Chaco: La provincia también declaró la emergencia agropecuaria, con un paquete de asistencia de \$2500 millones. Según el gobierno, unas 100000 hectáreas se vieron perjudicadas por la sequía y la ola de calor, lo cual significó una pérdida de generación de valor de alrededor de \$34000 millones. El Gobierno de Chaco acordó con los representantes del campo que participan del Comité de Emergencia Agropecuaria la declaración del estado de emergencia por 180 días para el sector agrícola, apícola y ganadero, en 15 departamentos de esa provincia (InfoCampo, 09/02/2022).

- En Santa Fe: El norte provincial sufre las consecuencias de la sequía. Hay productores sin agua y mortandad de animales. Los productores están llevando la hacienda de un lado a otro y están muy comprometidos. Se alertó también sobre la falta de pasto y se adelantó que la preñez va a ser espantosa (un 20% o 30% menos que lo normal) debido al estado corporal de los animales. Con relación a los cultivos, las cosechas de trigo no fueron buenas y con las de girasol, algunos algo cosecharon. El algodón recién se está sembrando y con la soja se está a la expectativa (Redacción UNO Santa Fe, 27/12/2022). En el año 2023 se secaron los cauces de arroyos, riachos y lagunas, ocasionando la pérdida de unas 3000 cabezas de ganado, de

importantes volúmenes de cosechas y de una gran cantidad de ejemplares de distintas especies (Télam Digital, 11/01/23). Como referencia destacada también se menciona que por efecto de la sequía los embarques de trigo en los puertos del sur de Santa Fe en enero de 2023 cayeron un 86% respecto a los embarques del mismo mes del año anterior (UNO Santa Fe, 10/02/2023).

- En Corrientes: Desde el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) informaron que la sequía prolongada y las altas temperaturas en Corrientes está afectando fuertemente a 10543 hectáreas de producción forestal (El Litoral de Corrientes, 08/01/2023). También los medios periodísticos reflejan el problema asociado a los niveles freáticos. A los productores del campo correntino les cuesta conseguir agua hasta por métodos artificiales. Desde la Sociedad Rural de Lavalle aseguran que la mortandad del ganado es una realidad palpable (RadioDos, 12/01/2023). Se registran también situaciones dramáticas relacionadas a la producción de yerba mate (Infobae, 28/01/2022) y a los incendios que afectaron al 12% del territorio provincial (La Nación Campo, 08/03/2022).

- En Entre Ríos: Por la sequía se declara la emergencia y desastre agropecuario. La medida comprende desde el 1 de diciembre de 2022 hasta el 30 de junio de 2023 para las explotaciones agrícolas de maíz, cítricos, hortícolas y apícolas. En el caso de las explotaciones ganaderas bovinas, caprinas, ovinas, equinas y tamberas, el periodo se extiende hasta el 30 de noviembre de 2023. Alcanza a todos los departamentos de la provincia (Perfil, 28/12/2022).

En la Tabla 3 se incluye un registro fotográfico de los impactos sobre la producción agropecuaria, ganadera, forestal y frutihortícola.

Tabla 3. Artículos periodísticos sobre impactos en producción agropecuaria, ganadera, forestal y frutihortícola.

		
Misiones (Primera Edición, 26/12/2020)	Formosa (Urdangarin, 01/10/2020)	Chaco (InfoCampo, 09/02/2022)
		
Santa Fe (Redacción Aire Digital, 27/12/2022)	Corrientes (Infobae, 28/01/2022)	Entre Ríos (Revista Chacra, 20/11/2020)

Abastecimiento humano en zonas rurales

La disponibilidad hídrica en zonas rurales para consumo humano y producción de subsistencia se vió seriamente afectada durante este evento extremo de la sequía 2019-2023. Muchos parajes rurales aislados no cuentan con acceso a agua potable y deben recurrir a represas, pozos y arroyos cuyo suministro no es apto para el consumo humano. Muchas familias dependen del almacenamiento de agua de lluvia o de camiones cisterna para poder sobrevivir. El caudal subterráneo que se obtiene de los pozos suele contener altos niveles de salinidad y en algunos casos arsénico. El agua no apta para consumo humano impacta en la salud, en el desarrollo de la agricultura familiar, en los alimentos y bebida para el ganado y repercute en el tiempo que se dispone a actividades educativas (Tuchin, 14/08/2022).

Se citan a continuación algunas referencias de situaciones particulares de problemas de abastecimiento de agua, sumadas a otras reflejadas en la Tabla 4.

- En el impenetrable chaqueño, la sequía hizo estragos en la producción ganadera de distintas zonas rurales. Cientos de familias padecieron el fuerte impacto producto de la falta de grandes lluvias que prácticamente estuvieron ausentes en este primer semestre del año (Diario el Norte de Resistencia, 16/07/2020). Poblaciones indígenas de las provincias de Chaco y Salta presentaron serias dificultades al acceso al agua producto de la sequía y en particular se cita un artículo del periódico Página 12 (Urbano, 30/08/2020).

-En la zona rural de Puerto Bermejo (Chaco), en una localidad de 3200 habitantes a 150 kilómetros de Resistencia, es muy fuerte ver como una familia pone en riesgo su propia hidratación para priorizar a los animales. En esta zona se ven problemas para conseguir el agua o de salud más vinculados con la mala calidad del agua que produce diarrea (Urdinez, 21/03/2020).

- En 2020, el drama también se sintió en escuelas rurales que no tienen agua segura para garantizar el regreso a clases. Se cita en particular el artículo del periódico Infobae (Ruth, 05/08/2020) mostrando a la Escuela Aula Satelite Ka'aguy Yvate de Hipólito Irigoyen (Misiones) donde los chicos apenas acceden al agua de un arroyo a través de baldes y palanganas; también se menciona a la Escuela N° 943 de San Felipe (Santiago del Estero) donde el aljibe no cubre con sus necesidades y terminan sacando el agua de un estanque donde también beben los animales.

- En el norte de la provincia de Santa Fe, luego del tercer año consecutivo de padecer un duro período de sequía, la gente empezó a pelearse por el agua. Las represas de los productores están secas, así como los espejos de agua que había en la zona. Las napas bajaron y se están salinizando, hay problemas con el arsénico y empezó a haber mortandad de ganado. Se están atendiendo y dando prioridad a los sectores más vulnerables, sobre todo los que viven en los parajes de la zona rural del distrito donde no cuentan con red de agua potable. Lo prioritario es el agua para consumo humano y de animales de pequeños productores (Álvarez Arcaya, 02/12/2022).

- En Colonia Unión (Corrientes) unas 200 familias rurales no tienen agua para el consumo humano ni alimentos para sus animales y enfrentan pérdidas millonarias en cultivos de yerba mate (Escobar, 27/02/2023).

Tabla 4. Artículos periodísticos sobre impactos por abastecimiento humano en zonas rurales.

		
Santa Fe (Álvarez Arcaya, 02/12/2022)	Escuelas rurales en el norte del país (Ruth, 05/08/2020)	Santiago del Estero (Tuchin, 14/08/2022)

Salud asociada a la sequía - Deterioro de la cantidad y calidad de agua en zonas aisladas

Algunos de los impactos en la salud que puede producir la sequía histórica son: aumento de contaminantes en el agua, mayor riesgo de enfermedades infecciosas, disminución en la calidad del aire así como resequedad en la piel y el pelo. Uno de los principales efectos en la salud es la dificultad para el abastecimiento de agua potable. El problema más grave es el acceso al agua para consumo en las poblaciones rurales pequeñas que están lejos de los grandes ríos y no cuentan con infraestructura más que la captación de aguas subterráneas que hoy presentan niveles muy bajos. Hay una situación de base donde

una parte de la población empieza a tener desnutrición y entonces no está con tanta competencia inmunológica. Por otro lado, las personas conservan agua y eso puede generar pequeños reservorios alrededor de la casa que concentran vectores como roedores o el mosquito *Aedes* que transmite el dengue. A su vez, la sequía puede desencadenar la migración de animales silvestres hacia zonas más urbanizadas, como el caso de roedores, escorpiones y serpientes que causan accidentes o enfermedades al entrar en contacto con el ser humano. Por otro lado, las condiciones secas, polvorientas y el humo de incendios forestales que suelen acompañar a las sequías pueden irritar el aparato respiratorio y agravar enfermedades crónicas como el asma. Por la exposición al humo los síntomas mas frecuentes son picazón de ojos, lagrimeo, irritación ocular, nariz irritada, dolor de garganta y de cabeza; va mucho más allá porque tiene un impacto serio a largo plazo y sobre todo en niños que tienen su vía aérea y pulmones en desarrollo (Alonso, 21/01/2023).

Sobre el deterioro de cantidad y calidad de agua en zonas aisladas y en particular en comunidades indígenas, se relevó una noticia sobre siete niños wichis en situación crítica por desnutrición en el norte de Salta, donde se expresa que lo que más se dificulta es el acceso al agua y que en ese momento -2020- la sequía estaba devastando la región (El Litoral, 27/01/2020).

Bienestar asociado al turismo

El turismo también se vio afectado por la sequía. A modo de ejemplo, las Cataratas del Iguazú ofrecieron desde principios de abril 2020 una imagen atípica ante la ausencia de lluvias en la región. La mayoría de los saltos estaban secos debido a que los ríos sufrieron una disminución considerable del caudal. Las cataratas estaban prácticamente sin agua, lo que no sólo afectó a la actividad comercial sino también a la fauna y la flora de la zona (Cavanna, 12/04/2020). En la Tabla 5 se incluye el registro fotográfico de la mencionada situación.

Ocupación irregular de zonas inundables – Ordenamiento territorial

Debido a la disminución de los niveles del río y la falta de precipitaciones locales, durante el período de sequía se produjeron asentamientos irregulares en áreas vulnerables susceptibles a inundaciones. Esto incluye valles de inundación, reservorios de sistemas pluviales, terraplenes de defensa contra inundaciones, entre otros.

A modo de ejemplo se cita la construcción de viviendas precarias en áreas inundables en distintas zonas del Gran Santa Fe. Los asentamientos no solo están en zonas bajas o en reservorios, sino que avanzan sobre los taludes de las defensas que protegen a toda la región de potenciales inundaciones de la cuenca del río Paraná y del río Salado. En la Tabla 5 se presenta una referencia de viviendas construidas sobre la defensa de San José del Rincón, cerca del límite con Colastiné Norte (Curiotto, 10/06/2022).

Derrumbe de barrancas

La pérdida de estabilidad de las barrancas puede asociarse a una disminución importante de los niveles del río que genera mayor flujo desde la napa adyacente al cauce por aumento del gradiente hidráulico transversal. Influyen también las características del perfil estratigráfico del suelo de la barranca donde se pueden producir velocidades que ocasionan la erosión de la barranca por oleaje o tubificación a la altura del nivel mínimo del río (sector inferior de la barranca), lo cual la dejaría sin soporte en la base y ocasionaría el colapso de la misma. Las precipitaciones locales también pueden ser otro factor a considerar en este tema (FCEIA, 07/05/2020; Basile et al., 2005).

Con relación a la bajante analizada en este trabajo, a lo largo de la costa santafesina se registraron varias zonas del derrumbe, tales como Parque España de Rosario (Blau Makaroff, 24/07/2021; Pellizzón, 01/08/2022), Puerto Gaboto (Rosario 3, 27/04/2020) y Sauce Viejo en el río Coronda (UNO Santa Fe, 09/09/2021), entre otros. En la Tabla 5 se incluye el registro fotográfico del derrumbe de la barranca en Rosario.

Tabla 5. Artículos periodísticos sobre impacto relacionado al ordenamiento territorial, estabilidad de márgenes y turismo.

 Viviendas y terraplén en Rincón (Curiotto, 10/06/2022)	 Derrumbe de barranca en Rosario (Pellizzón, 01/08/2022)	 Cataratas del Iguazú sin agua (Cavanna, 12/04/2020)
--	---	---

Biodiversidad y ecosistemas

La sequía y la bajante provocaron impactos negativos en los ecosistemas de la región que también se vieron afectados por los numerosos incendios. Se notificaron mortandad de peces, disminución de los desoves, aparición de cianobacterias, cambios en la fauna y la flora, entre otros. A continuación, se citan referencias de cada impacto identificado y en la Tabla 6 se incluye el registro fotográfico de los mismos.

- Mortandad de peces: Las sequías extremas desencadenan disminución de los niveles en los cauces fluviales y cuerpos de agua, los cuales sumados a las altas temperaturas generan déficit de oxígeno y producen mortandad de peces. Como referencia se registra lo ocurrido en el Bañado la Estrella en Formosa (Revista Chacra, 16/09/2020), en el río Salado en Santa Fe (Agencia Télam, 07/12/2020) y en la Laguna de Villa Cañas (Agrofy News, 05/01/2023).

- Crisis reproductiva de peces: Los peces requieren de niveles hídricos en los cauces y corrientes adecuadas en el momento oportuno para la reproducción. Uno de los elementos naturales para que se produzca el desove es el aumento del nivel del río. Durante la sequía 2019-2023 este aumento no se produjo en el momento oportuno y por ende no se logró concretar el desove ni la sobrevivencia. Por tal motivo, se generó una crisis reproductiva y problemas de sustentabilidad del recurso (El Once, 14/12/2020). Las desvinculaciones de cauces fluviales del curso principal también perjudicaron todo el proceso reproductivo antes mencionado.

- Incendios: La pronunciada sequía también provocó serios inconvenientes en muchas zonas con focos de incendios que permanecieron activos por la falta de lluvias y la escasa humedad en los suelos. Esto afectó el ecosistema natural, las actividades pecuarias, agrícolas, forestales y por ende las economías regionales (Infobae, 29/12/2021). Como referencia se citan: “los incendios en el Delta y otras islas del río Paraná afectando la fauna y flora de los humedales” (SWI, 04/08/2020; Página 12, 10/10/2020; Infobae, 04/08/2022), “más de 1 millón de hectáreas forestales quemadas en distintas provincias del país a fines de 2020” (Hojman, 25/12/2020) y “los humedales y los pastizales fueron las áreas más castigadas en Corrientes, superando las 600 mil hectáreas” (La Nación Campo, 08/03/2022).

- Floraciones algales – Cianobacterias: De tonalidad azul-verdosa, las cianobacterias son microorganismos que se nutren de la mayoría de la materia orgánica alojada en el agua y realiza fotosíntesis. Las cianobacterias afloran ante bajos caudales, estancamiento de aguas, exceso de nutrientes disueltos, temperaturas elevadas, entre otros, y pueden producir sustancias tóxicas para la salud. Durante la sequía 2019-2023 se registraron floraciones en varios sectores del río Paraná. Entre las apariciones a lo largo del sistema Paraná se citan las referencias en Página 12 (20/11/2020), El Territorio (01/12/2020) y El Norte (11/01/2023).

- Humedales que se secan: En Santa Fe se secaron importantes lagunas del norte (El Cristal y El Palmar) y en otras zonas de la provincia generando un desastre ambiental (Capeletti, 12/01/2023; Redacción Aire Digital, 10/01/2022). La bajante del río trajo nuevas postales que no solo se reflejan en el paisaje, sino que la fauna de la zona desapareció o murió producto de los bruscos cambios en su hábitat. En algunos casos se realizaron

rescate de fauna, como en el caso de tortugas de agua y peces, construyendo canales de escape al río (UNO Santa Fe, 11/01/2022). También se registraron avances de vegetación en cursos de agua hasta llegar en algunos casos a generar embalsados como en la laguna Setúbal en la ciudad de Santa Fe (Loyarte, 21/03/2023).

Tabla 6. Artículos periodísticos sobre impacto relacionado a biodiversidad y ecosistemas.

		
Mortandad de peces Bañado La Estrella - Formosa (Revista Chacra, 16/09/2020)	Incendios - Humo Parque Nacional Iberá - Corrientes (Argentina Forestal, 02/02/2022)	Animales carbonizados Delta del Paraná (Página 12, 10/10/2020)
		
Cianobacterias en el Paraná - Misiones (El Territorio, 01/12/2020)	Laguna Cristal seca - Santa Fe (Capeletti, 12/01/2023)	Tortuga del agua - Santa Fe (UNO Santa Fe, 11/01/2022)

Conflictos/oportunidades interjurisdiccionales

Los conflictos interjurisdiccionales en situaciones críticas pueden ser oportunidades de trabajo conjunto para encarar las soluciones de manera integrada. A nivel internacional, Argentina y Brasil mantuvieron reuniones de trabajo conjunto para el seguimiento de la situación crítica y acordaron en varios momentos, aumentar el caudal del río Paraná para afrontar la sequía (Mundo Marítimo, 21/04/2020). También Argentina y Paraguay en el ámbito del manejo de compuertas de la Central Hidroeléctrica Yacyretá acordaron generar ventanas de navegación para permitir el tráfico fluvial y la salida de producción agrícola (Larripa, 17/02/2022). A nivel nacional, se produjeron conflictos interprovinciales tales como entre la provincia de Santiago del Estero y la provincia de Santa Fe por el paso de agua en el río Salado (Rodrigo, 02/12/2020; Vaquero, 04/01/2023).

Sistema relevamiento de datos – Escalas hidrométricas

Durante los períodos más críticos de la bajante, escalas hidrométricas distribuidas sobre los cursos de los ríos Paraná y Paraguay quedaron fuera de rango de medición, generando la necesidad de readecuarlas para continuar con los registros de los niveles hidrométricos. A continuación, se presentan algunos casos particulares de las escalas de Formosa sobre el río Paraguay y Reconquista, y Paraná sobre el río Paraná. En la Tabla 7 se incluye el registro fotográfico de los mismos.

- Formosa: “La bajante del río Paraguay es histórica y se complica el tránsito fluvial”. El jefe de la Prefectura Formosa confirmó que “en el Puerto local la altura del río Paraguay se encuentra sin escala oficial; es decir, el agua está por debajo de la escala” perteneciente a la Dirección de Vías Navegables del Ministerio de Transporte de la Nación (Chaco día por día, 05/10/2020).

- Reconquista: En 2021 el Puerto de Reconquista quedó sin escala en dos oportunidades. La primera se

registró el 23 de mayo, cuando el nivel estuvo por debajo de 110 cm (en ese momento era el fin de la escala); se retomó la medición agregando 20 cm. de la regla para abajo. La segunda vez -el 7 de junio de 2021- quedó nuevamente sin escala al caer por debajo de los 90 cm (ReconquistaHoy, 10/06/2021).

- Paraná: En el puerto de la capital entrerriana el nivel del río Paraná “bajó a cero centímetros por lo que desde Prefectura Naval Argentina indicaron que se quedaron sin escala de referencia para las mediciones de aquí en adelante” según informado en Diario Victoria (DiarioVictoria.com.ar, 22/06/21).

Tabla 7. Artículos periodísticos sobre impactos en escalas hidrométricas.

		
Formosa (Chaco día por día, 05/10/2020)	Reconquista (ReconquistaHoy, 10/06/2021)	Paraná (DiarioVictoria.com.ar, 22/06/2021)

Impactos considerando dimensiones económica, social y ambiental.

Considerando el desarrollo y análisis cualitativo de los impactos relevados, se realiza una integración de los mismos tomando en cuenta las diversas dimensiones (económica, social y ambiental) de la seguridad hídrica, resaltando subjetivamente la afectación de cada sector. Los resultados se presentan en la Tabla 8.

CONSIDERACIONES FINALES

En las últimas décadas, los efectos e intensidades de las sequías parecen haberse acentuado en América Latina y el Caribe, con múltiples impactos sociales, económicos y ambientales (UNESCO, 2021). Las características propias de la sequía como riesgo sitúan su gestión en el plano de la percepción, que en muchos casos deriva de la propia comprensión y gestión de los recursos. La complejidad e incertidumbre consustanciales al riesgo de sequía hacen que este debate sea especialmente susceptible a la aparición de diferentes percepciones, definiciones y soluciones (Sonnett et al., 2006; Wilhite y Buchanan-Smith, 2005). De ahí la dificultad en la comprensión de la sequía, la medición de sus impactos, la definición de las medidas más adecuadas para su gestión y la relevancia pública que adquieren las situaciones de conflicto que genera la aparición de nuevos episodios (Paneque y Vargas Molina, 2015; Vargas Molina et al., 2021).

En este sentido, el presente trabajo ha permitido avanzar en el análisis de los impactos así como visibilizar y destacar los efectos de la sequía integrados a nivel económico, social y ambiental. Estos resultados posibilitan contar con una visión de la magnitud y ubicación (areal y temporal) de los impactos en los distintos sectores que se vieron afectados a lo largo de sequía 2019-2023.

Este análisis cualitativo ha permitido sentar bases de una futura evaluación cuantitativa de la magnitud de los efectos y su cuantificación en términos económicos. Es importante que los tomadores de decisión de la región tengan un conocimiento detallado sobre estos fenómenos, para que puedan consolidar políticas y avanzar en acciones concretas considerando resiliencia, adaptación y gestión de la sequía. La integración a nivel regional también permitirá una mejor coordinación, reemplazando las acciones reactivas de mitigación por un enfoque proactivo a través de mejoras en el monitoreo, alerta temprana, preparación y planificación en el contexto de la gestión del riesgo de manera conjunta.

Tabla 8. Integración de los impactos considerando dimensiones de la seguridad hídrica.

Sectores impactados	Dimensión		
	Económica	Social	Ambiental
Disponibilidad hídrica y producción de alimentos			
Abastecimiento humano urbano - Obras de toma superficiales			
Producción de alimentos - Obras de toma superficiales			
Producción de energía - Centrales nucleares, térmicas e hidro.			
Navegación y comercio			
Producción agropecuaria, ganadera, forestal y frutihortícola			
Abastecimiento humano en zonas rurales			
Salud y bienestar			
Salud asociada a la sequía			
Bienestar asociado al turismo			
Ciudades, asentamientos e infraestructura			
Ocupación irregular de zonas inundables			
Derrumbe de barrancas			
Biodiversidad y ecosistema			
Mortandad de peces y crisis reproductiva de peces			
Incendios			
Floración algas - Cianobacterias			
Lagunas que se secan y avances de la vegetación			
Otros			
Conflictos/oportunidades interjurisdiccionales			
Sistema relevamiento de datos – Escalas hidrométricas			

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ing. Ricardo Giacosa por revisión y aportes al borrador del trabajo.

REFERENCIAS

- Agencia Télam (07/12/2020). Bajante del río Salado provoca mortandad de peces en Santa Fe. *Periódico online La Voz*. <https://www.lavoz.com.ar/ciudadanos/bajante-del-rio-salado-provoca-mortandad-de-peces-en-santa-fe>
- Agrofy News (05/01/2023). Se viralizan imágenes impactantes con miles de peces muertos por la sequía en el sur de Santa Fe. *Página web de AgrofyNews*. <https://news.agrofy.com.ar/noticia/203126/se-viralizan-imagenes-impactantes-miles-peces-muertos-sequia-sur-santa-fe>
- Agrofy News (08/04/2020). Los 5 impactos que genera sobre el mercado de granos una bajante histórica del Paraná. *Página web Agrofy News*. <https://news.agrofy.com.ar/noticia/186407/5-impactos-que-genera-mercado-granos-bajante-historica-parana>
- Agrositio (23/09/2021) Baja histórica del río Paraná afecta producción de frutillas en Argentina. *Periódico online Agrositio*. <https://www.agrositio.com.ar/noticia/218951-baja-historica-del-rio-parana-afecta-produccion-de-frutillas-en-argentina>
- Ait-Kadi, M. y Lincklaen Arriens, W. (2013). Documento de perspectiva. *Aumentar la seguridad hídrica – un imperativo para el desarrollo*. https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/perspective-papers/perspectives-paper_water-security_spanish.pdf
- Alonso M. (21/01/2023). De mayor riesgo de enfermedades a problemas en la piel: los impactos de la sequía en la salud. *Página web Télam Digital*. <https://www.telam.com.ar/notas/202301/617909-salud-sequia-enfermedades-piel.html>
- Álvarez Arcaya, J. (02/12/2022). Sequía en el norte de Santa Fe: "La gente se está empezando a pelear por el agua", admitió la intendenta de Vera. *Página web de AireDigital*. <https://www.airedesantafe.com.ar/santa-fe/sequia-el-norte-santa-fe-la-gente-se-esta-empezando-pelear-el-agua-admitio-la-intendenta-vera-n397914>

- Argentina Forestal (02/02/2022). Corrientes en llamas: el desastre ambiental y económico por incendios continúa, la provincia enfrenta más de 100 mil hectáreas quemadas por el fuego en enero. *Página web de Argentina Forestal*. <https://www.argentinaforestal.com/2022/02/02/corrientes-en-llamas-el-desastre-ambiental-y-economico-por-incendios-continua-la-provincia-enfrenta-mas-de-100-mil-hectareas-quemadas-por-el-fuego-en-enero/>
- Argentina.gob.ar (10/04/2023). Nuevos beneficios para productores afectados por la sequía. *Página web Argentina.gob.ar*. <https://www.argentina.gob.ar/noticias/nuevos-beneficios-para-productores-afectados-por-la-sequia>
- Baigún, C. y Minotti, P. (2021). Conserving the Paraguay-Paraná Fluvial Corridor in the XXI Century: Conflicts, Threats, and Challenges. *Sustainability* 2021, 13, 5198. <https://doi.org/10.3390/su13095198>
- Basile, PA, Riccardi, GA, Garcia, ML y Stenta, HS. (2005). Análisis de Estabilidad de Márgenes mediante Modelación Matemática del Proceso De Colapso Masivo Originado por Falla Plana. *Cuadernos del Curiham*, Vol 11, nro 2. UNR Editora. pp.35-41.
- Bellato, R. (15/07/2021) Sequía histórica del Paraná: Yacyretá al 50%, problemas en usinas térmicas y contingencia en Atucha por la toma de agua de las centrales nucleares. *Periódico online EconoJournal*. <https://econojournal.com.ar/2021/07/sequia-historica-del-parana-yacyreta-al-50-problemas-en-usinas-termicas-y-contingencia-en-atucha-para-garantizar-la-toma-de-agua-de-centrales-nucleares/>
- Berisso, S. (21/07/2021). Bajante histórica del Paraná: cuál es el impacto sobre la generación eléctrica. *Periódico Energia Online*. <https://www.energiaonline.com.ar/bajante-historica-del-parana-cual-es-el-impacto-sobre-la-generacion-electrica/>
- Blau Makaroff, H. (24/07/2021). Autoridades coinciden: el derrumbe en el Parque España de Rosario fue por la bajante histórica del río. *Página web El Mirador*. https://www.miradorprovincial.com/index.php/id_um/309961-autoridades-coinciden-el-derrumbe-en-el-parque-espana-de-rosario-fue-por-la-bajante-historica-del-rio-puede-haber-derrumbes-linderos
- Borús, J. (03/01/2022). Bajante extraordinaria del río Paraná. *Sitio web Argentina.gob.ar / Ministerio de Obras Públicas / Instituto Nacional del Agua (INA)*. <https://www.argentina.gob.ar/noticias/bajante-extraordinaria-del-rio-parana>
- Cacik, P., Collins, P., D'Elia, M., Dominguez, RL, Garcia, D., Hämmerly, R., Huespe, J., Latosinski, F., López Weibel, C., Marchetti, Z., Paira, A., Paoli, C., Paris, M., Pérez, M., Prendes, H., Ramonel, C., Serra Menghi, P., Veizaga, E., Wolansky, S. y Szupiany, R. (2021). *El río Paraná en su tramo medio: nuevas temáticas y enfoques para el desarrollo sostenible de un gran río de llanura*. Editado por Paoli C. y Schreider M. 2d ed. Santa Fe. Ediciones UNL.
- Capeletti, G. (12/01/2023). Desastre ambiental: se secaron las dos lagunas más imponentes del norte de Santa Fe. *Periódico online El Litoral*. https://www.ellitoral.com/regionales/sequia-santa-fe-cristal-palmar-campos_0_QZ5qT4YhTi.html
- Cavanna, J. (12/04/2020). Cataratas en cuarentena: sin agua ni visitantes, el drama del principal punto turístico de la Argentina. *Periódico online Infobae*. <https://www.infobae.com/sociedad/2020/04/12/cataratas-en-cuarentena-sin-agua-ni-visitantes-el-drama-del-principal-punto-turistico-de-la-argentina/>
- Central Vuelta Obligado (2023). *Bombas Auxiliares de Contingencia*. Página web Central Vuelta Obligado. <https://www.cvosa.com.ar/>
- Chaco día por día (05/10/2020). Por la histórica bajante, en el puerto de Formosa “el río se encuentra sin escala”. *Periódico online Chaco día por día*. <https://www.chacodiapordia.com/2020/10/05/por-la-historica-bajante-en-el-puerto-de-formosael-rio-se-encuentra-sin-escala/>
- Corresponsalía Puerto Iguazú (04/05/2021). Lanzan plan de contingencia para frenar la falta de agua. *Periódico online El Territorio*. <https://www.elterritorio.com.ar/noticias/2021/05/04/702764-lanzan-plan-de-contingencia-para-frenar-la-falta-de-agua>
- Curiotto, J. (10/06/2022). Crecen los asentamientos sobre las defensas del Gran Santa Fe y en zonas inundables. *Página web Aires de Santa Fe*. <https://www.airedesantafe.com.ar/santa-fe/crecen-los-asentamientos-las-defensas-del-gran-santa-fe-y-zonas-inundables-n322198>
- Diario el Norte de Resistencia (16/07/2020). La sequía hace estragos en el impenetrable chaqueño. *Página web de La Red del Campo - Chacra*. <https://www.revistachacra.com.ar/nota/35919-la-sequia-hace-estragos-en-el-impenetrable-chaqueno>
- DiarioVictoria.com.ar (22/06/21). Por la bajante, Prefectura se quedó sin escala en Paraná para medir la altura del río. *Página web DiarioVictoria.com.ar*. <https://diariovictoria.com.ar/por-la-bajante-prefectura-se-queda-sin-escala-en-parana-para-medir-la-altura-del-rio/>

- El Litoral (27/01/2020). Hay siete niños wichí en situación crítica por desnutrición en el norte salteño. *Periódico online El Litoral*. https://www.ellitoral.com/nacionales/ninos-wichi-situacion-critica-desnutricion-norte-salteno_0_dZe5r8EKYI.html
- El Litoral (18/06/2021). Assa refuerza la captación de agua y pide uso racional por la bajante del Río Paraná. *Periódico online El Litoral*. https://www.ellitoral.com/index.php/id_um/303893-assa-refuerza-la-captacion-de-agua-y-pide-uso-racional-por-la-bajante-del-rio-parana-en-santa-fe-y-la-region-area-metropolitana-en-santa-fe-y-la-region.html
- El Litoral de Corrientes (08/01/2023). En Corrientes la sequía afecta a 10.543 hectáreas de la producción forestal. *Periódico online El Litoral de Corrientes*. <https://www.ellitoral.com.ar/corrientes/2023-1-8-1-0-0-en-corrientes-la-sequia-afecta-a-10-543-hectareas-de-la-produccion-forestal>
- El Norte (11/01/2023). Cianobacterias en el río Paraná contamina el agua y a los seres que lo habitan. *Periódico online El Norte*. <https://www.diarioelnorte.com.ar/cianobacterias-en-el-rio-parana-contaminan-el-agua-y-a-los-seres-que-lo-habitan/>
- El Once (14/12/2020). Por la bajante del río, "hace tres años que no hay desoves viables. *Página web de El Once Sociedad*. <https://www.elonce.com/secciones/sociedad/652259-por-la-bajante-del-rno-quot-hace-tres-anos-que-no-hay-desoves-viables-quot.htm>
- El Territorio (01/12/2020). Detectan alta presencia de algas en el Paraná. *Periódico El Territorio edición electrónica*. <https://www.eltterritorio.com.ar/noticias/2020/12/01/684450-detectan-alta-presencia-de-algas-en-el-parana>
- Escobar, P. (27/02/2023). Sequía en Corrientes | En Colonia Unión unas 200 familias rurales no tienen agua para el consumo humano ni alimentos para sus animales y enfrentan pérdidas millonarias en cultivos de yerba mate. *Página web Argentina Forestal.com*. <https://www.argentinaforestal.com/2023/02/27/sequia-en-corrientes-2/>
- Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - UNL (10/07/2020). *Jornadas en línea "La bajante del río Paraná". Panel: La gestión de recursos hídricos en la Cuenca del Paraná en el contexto de eventos extremos*. https://www.youtube.com/watch?v=OgI63PckeBo&list=PLhED1QHZKhQYXYXzOpV_FBxYLedadY-cy&index=2
- FCEIA (07/05/2020). *Investigador del CURIHAM informó sobre el derrumbe de la barranca*. Página web de Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario. <https://web.fceia.unr.edu.ar/es/noticias-fceia/1610-investigador-del-curiam-inform%C3%B3-sobre-el-derrumbe-de-la-barranca.html>
- Gárnica, S. (26/08/2021). La Casa Rosada en alerta por posible crisis energética, falta de agua, incendios forestales y la refrigeración de una importante central nuclear. *Periódico online A24*. <https://www.a24.com/politica/la-casa-rosada-alerta-posible-crisis-energetica-falta-agua-incendios-forestales-y-la-refrigeracion-una-importante-central-nuclear-n857223>
- Hojman, IF (25/12/2020). Incendios forestales: más de un millón de hectáreas fueron arrasadas en el año. *Sitio web Télam Digital*. <https://www.telam.com.ar/notas/202012/539450-en-el-2020-mas-de-un-millon-de-hectareas-fueron-arraasadas-por-el-fuego-en-el-pais.html>
- Infobae (27/07/2021). Cómo buscará la ciudad de Paraná enfrentar la falta de agua potable, ante la histórica bajante del río Paraná. *Periódico online Infobae*. <https://www.infobae.com/sociedad/2021/07/27/como-buscara-la-ciudad-de-parana-enfrentar-la-falta-de-agua-potable-ante-la-historica-bajante-del-rio-parana/>
- Infobae (07/12/2021). El drama de la bajante del Paraná: productores de arroz tienen que usar bombas para extraer agua y no logran cubrir los costos. *Periódico online Infobae*. <https://www.infobae.com/economia/campo/2021/12/07/el-drama-de-la-bajante-del-parana-productores-de-arroz-tienen-que-usar-bombas-para-extraer-agua-y-no-logran-cubrir-los-costos/>
- Infobae (29/12/2021). Sequía y altas temperaturas: los incendios arrasan con áreas forestales, ganaderas, agrícolas, yerbales y frutales. *Periódico online Infobae*. <https://www.infobae.com/economia/campo/2021/12/29/sequia-y-altas-temperaturas-los-incendios-arrasan-con-areas-forestales-ganaderas-agricolas-yerbales-y-frutales/>
- Infobae (28/01/2022). Dramática situación de los productores yerbateros por la sequía en Misiones y Corrientes. *Periódico online Infobae*. <https://www.infobae.com/economia/campo/2022/01/28/dramatica-situacion-de-los-productores-yerbateros-por-la-sequia-en-misiones-y-corrientes/>
- Infobae (04/08/2022). Rosario afectada por el humo de los incendios: cede el fuego en el Paraná pero las llamas siguen en ciudades cercanas. *Periódico online Infobae*. <https://www.infobae.com/sociedad/2022/08/04/rosario-afectada-por-el-humo-de-los-incendios-cede-el-fuego-en-el-parana-pero-las-llamas-siguen-en-ciudades-cercanas/>

- InfoCampo (09/02/2022). Chaco también declaró la emergencia agropecuaria, con un paquete de asistencia de \$ 2.500 millones. *Periódico online InfoCampo*. <https://www.infocampo.com.ar/chaco-tambien-declaro-la-emergencia-agropecuaria-con-un-paquete-de-asistencia-de-2-500-millones/>
- La Nación Campo (05/11/2020). Banana: la producción de Formosa registra uno de los peores años en décadas. *Periódico online La Nación*. <https://www.lanacion.com.ar/economia/campo/banana-nid2501004>
- La Nación Campo (08/03/2022). Los incendios en Corrientes afectaron al 12% del territorio de la provincia. *Periódico online La Nación*. https://www.lanacion.com.ar/economia/campo/los-incendios-en-corrientes-afectaron-al-12-del-territorio-de-la-provincia-nid08032022/?gclid=CjwKCAjw52mBhB5EiwA05YKo0Szy6LQknkRyGpr3_yAM_IdtQjCnkiz7Pjj2oa19unJq80IB-LUVRoC5gkQAvD_BwE
- Larripa, G. (17/02/2022). Bajante del Paraná – Yacyretá abrirá las compuertas para asegurar las navegación comercial. *Periodico online Comunidad Nautica*. <https://comunidadnautica.com/bajante-del-parana-yacyreta-abrira-las-compuertas-para-asegurar-las-navegacion-comercial/>
- Loyarte, N. (21/03/2023). Una pared de vegetación acuática dejó tapiado el acceso a la laguna Setúbal. *Periódico El Litoral*. https://www.ellitoral.com/area-metropolitana/embalsados-laguna-setubal-navegacion-taponado-acceso-camalotes_0_OJfRN1fwFn.html
- Mazzón, R., Müller, M. y Rafaelli, S. (2023). *Impactos de Eventos Extremos sobre Obras de Tomas en la Región Litoral de Argentina*. Informe SCRL-INA. <https://www.ina.gov.ar/archivos/publicaciones/IF%20SCRL%20TOMAS%20DE%20AGUA%20-%20LITORAL-%20MARZO%202023%20v6.pdf>
- Mundo Marítimo (13/04/2020). Puertos de Rosario, Argentina: Bajante del río Paraná hace que buques Panamax recorten hasta 7.000 toneladas de carga. *Página web Mundo Marino Información Marítima de Latinoamérica*. <https://www.mundomaritimo.cl/noticias/puertos-de-rosario-argentina-bajante-del-rio-parana-hace-que-buques-panamax-recorten-hasta-7000-toneladas-de-carga>
- Mundo Marítimo (21/04/2020). Argentina y Brasil acuerdan aumentar el caudal del río Paraná para afrontar la sequía. *Página web Mundo Marino Información Marítima de Latinoamérica*. <https://www.mundomaritimo.cl/noticias/argentina-y-brasil-acuerdan-aumentar-el-caudal-del-rio-parana-para-afrontar-la-sequia>
- Mundo Marítimo (20/05/2020). Barcazas varadas en el Río Paraná retomarán viaje a hacia Argentina tras descarga de represa Yacyretá. *Página web Mundo Marítimo Información Marítima de Latinoamérica*. <https://www.mundomaritimo.cl/noticias/barcazas-varadas-en-el-rio-parana-retomaran-viaje-a-hacia-argentina-tras-descarga-de-represa-yacyreta>
- Naumann, G., Podestá, G., Marengo, J., Luterbacher, J., Bavera, D., Arias Muñoz, C., Barbosa, P., Cammalleri, C., Chamorro, L., Cuartas, A., De Jager, A., Escobar, C., Hidalgo, C., Leal de Moraes, O., McCormick, N., Maetens, W., Magni, D., Masante, D., Mazzeschi, M., Seluchi, M., Skansi, MM, Spinoni, J. y Toreti, A. (2022). *El episodio de sequía extrema de 2019-2021 en la Cuenca del Plata*, EUR 30833 ES, Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, Luxemburgo. ISBN 978-92-76-47671-9 (en línea), doi:10.2760/346183, JRC126508
- Naumann, G., Podesta, G., Marengo, J., Luterbacher, J., Bavera, D., Acosta Navarro, J., Arias-Muñoz, C., Barbosa, P., Cammalleri, C., Cuartas, L.A., De Estrada, M., De Felice, M., De Jager, A., Escobar, C., Fioravanti, G., Giordano, L., Hrst Essenfelder, A., Hidalgo, C., Leal De Moraes, O.L., Maetens, W., Magni, D., Masante, D., Mazzeschi, M., Osman, M., Rossi, L., Seluchi, M., De Los Milagros Skansi, M., Spennemann, P., Spinoni, J., Toreti, A. y Vera, C. (2023). Extreme and long-term drought in the La Plata Basin: event evolution and impact assessment until September 2022, EUR 31381 EN, *Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023*, ISBN 978-92-76-61614-6, doi:10.2760/62557, JRC132245
- Neffen, G. (28/06/2020). En cinco meses, nueve buques varados por la bajante del Paraná. *Periódico online Clarin Rural*. https://www.clarin.com/rural/meses-buques-varados-bajante-parana_0_ELTLsUDk9.html
- Norte (23/04/2020). Falta de agua: un serio problema para el Gran Resistencia. *Periódico online Norte*. <https://www.diarionorte.com/191233-falta-de-agua-un-serio-problema-para-el-gran-resistencia>
- Ortiz, I. (22/07/2021) Yacyretá entrega el 50% de la energía total que podría aportar al sistema por la bajante del Paraná. *Página web Télam Digital*. <https://www.telam.com.ar/notas/202107/562268-yacyreta-energia-bajante-parana.html>

- Página 12 (10/10/2020). Incendios en el Delta del Paraná: el fuego arrasó 300 mil hectáreas y devastó la fauna y flora de los humedales. *Periódico online Página 12*. <https://www.pagina12.com.ar/298291-incendios-en-el-delta-del-parana-el-fuego-arraso-300-mil-hec>
- Página 12 (20/11/2020). El Paraná se tiñó de verde tóxico. *Periódico online Página 12*. <https://www.pagina12.com.ar/306908-el-parana-se-tino-de-verde-toxico>
- Paneque, P., Lafuente, R., Vargas Molina, J. y Pérez, R. (2021). Sequía, agua y cambio climático. Percepción social, opinión pública y valoración de medidas de gestión. *Observatorio Ciudadano de la Sequía*. Colaboración de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología - Ministerio de Ciencia e Innovación. <https://doi.org/10.46661/RIO.11700>
- Paneque, P. y Vargas Molina, J. (2015). Drought, social agents and the construction of discourse in Andalusia. *Environmental Hazards: Human and Policy Dimensions*, 14(3), 224–235. <https://doi.org/10.1080/17477891.2015.1058739>
- Paneque, P. y Vargas Molina, J. (2018). Categorización socio-ecológica del riesgo de sequía. En: A. Embid Irujo (Coord.): *Sequía e inundaciones como fenómenos hidrológicos extremos*. Thomson Reuters Aranzadi.
- Paneque, P. y Vargas Molina, J. (2021). *Gestión y planificación del riesgo de sequía: capacidad de adaptación, percepción social y opinión pública*, del Libro: *Inundaciones y Sequías. Análisis Multidisciplinar para Mitigar el Impacto de los Fenómenos Climáticos Extremos*. Editores: Melgarejo Moreno, J., López Ortiz, MI y Fernández Aracil, P. ISBN: 978-84-1302-138-6. https://www.researchgate.net/publication/355491903_Gestion_y_planificacion_del_riesgo_de_sequia_capacidad_de_adaptacion_percepcion_social_y_participacion_publica
- Pellizzón, I. (01/08/2022). A un año del derrumbe en la barranca del parque España: por qué no comienzan las obras. *Página web El Mirador*. https://www.miradorprovincial.com/index.php/id_um/355694-a-un-ano-del-derrumbe-en-la-barranca-del-parque-espana-por-que-no-comienzan-las-obras-rosario#group-1
- Perfil (28/12/2022). Por la sequía, Entre Ríos declara la emergencia y desastre agropecuario. *Periódico online Perfil*. <https://www.perfil.com/noticias/economia/por-la-sequia-entre-rios-declara-la-emergencia-y-desastre-agropecuario.phtml>
- Primera Edición (26/12/2020). Por la sequía, calculan que habrá 70% menos de producción citrícola. *Periódico online Primera Edición - Diario de Misiones*. <https://www.primeraedicion.com.ar/nota/100380288/por-la-sequia-calculan-que-habra-70-menos-de-produccion-citricola/>
- Radio Bicentenario (07/10/2020). La actividad citrícola se ve afectada por la sequía en la producción de limones. *Página web Radio Bicentenario*. <https://www.radiobicentenario.com.ar/nota/tucuman/18975/actividad-citricola-se-ve-afectada-sequia-produccion-limones.html>
- RadioDos (12/01/2023). Sequía extrema: En Corrientes ya escasean las napas subterráneas. *Página web RadioDos*. <https://www.radiodos.com.ar/130252-sequia-extrema-en-corrientes-ya-escasean-las-napas-subterraneas>
- ReconquistaHoy (10/06/2021). Imágenes de Puerto Reconquista en la peor bajante que pudimos ver en la historia, peor que hace 50 años, ya que esta transita su segundo año consecutivo. La opinión de un ambientalista. *Periódico online ReconquistaHoy*. <https://www.reconquistahoy.com/47330-imagenes-de-puerto-reconquista-en-la-peor-bajante-que-pudimos-ver-en-la-historia-peor-que-hace-50-anos-ya-que-esta-transita-su-segundo-ano-consecutivo-la-opinion-de-un-ambientalista>
- Redacción Aire Digital (10/01/2022). Bajante histórica: se secó el enorme humedal del balneario de Laguna Paiva. *Página web Aire Digital*. <https://www.airedesantafe.com.ar/santa-fe/bajante-historica-se-seco-el-enorme-humedal-del-balneario-laguna-paiva-n259482>
- Redacción Aire Digital (27/12/2022). Sequía en el norte de Santa Fe: "Los animales ya no tienen fuerza ni para pararse". *Periódico online Aire Digital*. <https://www.airedesantafe.com.ar/actualidad/sequia-el-norte-santa-fe-los-animales-ya-no-tienen-fuerza-ni-pararse-n407752>
- Redacción UNO Santa Fe (27/12/2022). El norte provincial sufre las consecuencias de la sequía: "Hay productores sin agua y hay mortandad de animales". *Periódico online UNO Santa Fe*. <https://www.unosantafe.com.ar/santa-fe/el-norte-provincial-sufre-las-consecuencias-la-sequia-hay-productores-agua-y-hay-mortandad-animales-n10037725.html>
- Revista Chacra (16/09/2020). Afirman que la mortandad de peces en el Bañado la Estrella es por la extrema sequía. *Página web de Revista Chacra*. <https://www.revistachacra.com.ar/nota/37286-afirman-que-la-mortandad-de-peces-en-el-banado-la-estrella-es-por-la-extrema-sequia/>
- Revista Chacra (20/11/2020) Sequía: se extiende por buena parte de Entre Ríos. *Página web de Revista Chacra*. <https://www.revistachacra.com.ar/nota/38586-sequia-se-extiende-por-buena-parte-de-entre-rios/>

- Rodrigo, L. (02/12/2020). Otra vez, Santiago se apropia del río Salado. *Periódico online El Litoral*. https://www.ellitoral.com/index.php/id_um/271094-otra-vez-santiago-se-apropia-del-rio-salado-dificil-panorama-para-el-departamento-9-de-julio-politica.html
- Rosario 3 (27/04/2020). Preocupación en Puerto Gaboto: “El derrumbe fue a 50 metros del centro del pueblo”. *Página web Rosario 3*. <https://www.rosario3.com/informaciongeneral/Preocupacion-en-Puerto-Gaboto-El-derrumbe-fue-a-50-metros-del-centro-del-pueblo-20200427-0042.html>
- Ruth, C. (05/08/2020). El drama de las 4500 escuelas rurales que no tienen agua segura para garantizar el regreso a clases. *Periódico online Infobae*. <https://www.infobae.com/sociedad/2020/08/05/el-drama-de-las-4500-escuelas-rurales-que-no-tienen-agua-segura-para-garantizar-el-regreso-a-clases/>
- Sonnett, J., Morehouse, B., Finger, T., Garfin, G. y Rattray, N. (2006). Drought and declining reservoirs: Comparing media discourse in Arizona and New Mexico, 2002–2004. *Global Environmental Change*, 16(1), 95–113. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2005.11.004>
- Spaltro, S. (21/07/2021). Bajante del Río Paraná: cuánto pierde Yacyretá por la falta de agua y cuál es el costo para la Argentina. *Periódico online El Cronista*. <https://www.cronista.com/economia-politica/bajante-rio-parana-yacyreta-falta-agua-costo-energia-argentina/>
- SWI (04/08/2020). La biodiversidad del Delta del Paraná, amenazada por incendios históricos. *Página web Swissinfo.ch*. <https://www.swissinfo.ch/spa/afp/la-biodiversidad-del-delta-del-paran%C3%A1--amenazada-por-incendios-hist%C3%B3ricos/45947072>
- Télam Digital (11/01/23). La sequía y la bajante del río Paraná provocaron severos daños económicos. *Página web Télam Digital*. <https://www.telam.com.ar/notas/202301/616978-sequia-parana-bajante-perdidas.html>
- Tuchin, F. (14/08/2022). Un laboratorio de ideas rural para la falta de agua en Argentina. *Periódico online ElPaís de España*. <https://elpais.com/planeta-futuro/2022-08-14/un-laboratorio-de-ideas-rural-para-la-falta-de-agua-en-argentina.html>
- UNESCO (2021). *Caracterización, monitoreo y naturaleza de las sequías*. Seminario en línea, 19 al 22 de abril 2021. <https://events.unesco.org/event?id=4150143266&lang=3082>
- UNNEMEDIOS (06/10/2021). El 60% de tomas de agua en la región nordeste registraron problemas por la bajante excepcional de ríos. *Periódico online UNNEMEDIOS*. <https://medios.unne.edu.ar/2021/10/06/el-60-de-tomas-de-agua-en-la-region-nordeste-registraron-problemas-por-la-bajante-excepcional-de-rios/>
- UNO Santa Fe (09/09/2021). Impactante derrumbe de barranca en un complejo de cabañas en Sauce Viejo. *Periódico online UNO de Santa Fe*. <https://www.unosantafe.com.ar/santa-fe/impactante-derrumbe-barranca-un-complejo-cabanas-sauce-viejo-n2686847.html>
- UNO Santa Fe (11/01/2022). Rescatistas salvaron tortugas de la laguna Bedetti, que no tiene ni una gota de agua. *Periódico online UNO Santa Fe*. <https://www.unosantafe.com.ar/santa-fe/rescatistas-salvaron-tortugas-la-laguna-bedetti-que-no-tiene-ni-una-gota-agua-n2706535.html>
- UNO Santa Fe (10/02/2023). Efecto sequía: los embarques de trigo en los puertos del sur de Santa Fe cayeron un 86%. *Periódico online UNO Santa Fe*. <https://www.unosantafe.com.ar/la-provincia/efecto-sequia-los-embarques-trigo-los-puertos-del-sur-santa-fe-cayeron-un-86-n10045833.html>
- Urbano, L. (30/08/2020). Comunidades wichí buscan alternativas de agua segura para no enfermarse. *Periódico online Página 12*. <https://www.pagina12.com.ar/288615-comunidades-wichi-buscan-alternativas-de-agua-segura-para-no-enfermarse>
- Urdangarin, C. (01/10/2020). Hace 50 años que producen pero el fuego arrasó con sus plantaciones en Formosa: “No quedó nada”. *Periódico online InfoCampo*. <https://www.infocampo.com.ar/hace-50-anos-que-producen-pero-el-fuego-arraso-con-sus-plantaciones-en-formosa-no-quedo-nada/>
- Urdinez, M. (21/03/2020). Vivir sin agua: en épocas de sequía, primero toman los animales y después la familia. *Periódico online La Nación*. <https://www.lanacion.com.ar/comunidad/vivir-sin-agua-epocas-sequia-primero-toman-nid2345096/>
- Vaquero, K. (04/01/2023). Desesperado pedido en Santa Fe para que abran las compuertas de los diques en Salta y Santiago del Estero. *Periódico online Clarín*. https://www.clarin.com/rural/minima-apertura-compuertas-santiago-estero-rio-salado-sigue-seco-animales-mueren_0_1DYhUetlR5.html
- Vargas Molina, J. y Paneque, P. (2019). Challenges for the integration between water resource management and drought risk management in Spain. *Sustainability*, 11(308). <https://doi.org/10.3390/su11020308>
- Vargas Molina, J., Paneque, P. y Breda, P. (2021). Drought-related media analysis from Andalusia and São Paulo. *Environmental Hazards-Human and Policy Dimensions*. <https://doi.org/10.1080/17477891.2021.1932712>

Wilhite, D. y Buchanan-Smith, M. (2005). Drought as hazard: Understanding the natural and social context. En Wilhite, DA (Ed.), *Drought and water crisis: Science, technology, and management issues* (pp. 3–29). Taylor & Francis.

Trabajo recibido el 31/07/2023 y aceptado por el Consejo Editorial para su publicación el 30/08/2023.

COMO CITAR

Mazzón, R. y Rafaelli, S. (2023). Impactos Generados por la Sequía 2019-2023 en la Región del Litoral Argentino. *Cuadernos del CURIHAM, Edición Especial (2023): Bajante del río Paraná*. e219. <https://doi.org/10.35305/curiham.vi.219>

ROLES DE AUTORÍA

RM y SR realizaron en conjunto el proceso de investigación, recopilación de datos, análisis, conceptualización y completaron la preparación, creación y redacción del trabajo. Aprobaron la versión para ser publicada y son capaces de responder respecto a todos los aspectos del manuscrito.

LICENCIA

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



Este trabajo se enmarca dentro de la EDICIÓN ESPECIAL (2023): Bajante del río Paraná de la revista Cuadernos del CURIHAM

ANÁLISIS DE CAUDALES DEL RÍO PARANÁ Y CONTEXTUALIZACIÓN DE LAS BAJANTES EN LOS AÑOS HIDROLÓGICOS 2019/20, 2020/21 Y 2021/22

FLOW ANALYSIS OF THE PARANA RIVER AND CONTEXTUALIZATION OF LOW FLOWS IN 2019/20, 2020/21 AND 2021/22 HYDROLOGICAL YEARS

Pedro A. Basile^{(1)(2)(*)} y Gerardo A. Riccardi^{(1)(2)(3)(**)}

⁽¹⁾Departamento de Hidráulica – Escuela de Ingeniería Civil (FCEIA – UNR), Argentina.

⁽²⁾Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (FCEIA – UNR), Argentina.

⁽³⁾Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario (CIUNR), Argentina.

^(*)e-mail: pbasile@fceia.unr.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8826-0621>

^(**)e-mail: riccardi@fceia.unr.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9294-3166>

RESUMEN

En este artículo se presenta el análisis de caudales del río Paraná, a escala temporal diaria, mensual, anual y plurianual; considerando los caudales medios diarios encauzados correspondientes a la serie de años hidrológicos 1904/05-2021/22, observados en la sección de aforos Timbúes. En dicho marco, se contextualizan y caracterizan las bajantes registradas en los años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22. Se observa un incremento de los caudales a partir del inicio de los años '70. Los caudales medios diarios mínimos anuales eran mucho más frecuentes antes del año hidrológico 1971/72; lo contrario ocurre con los correspondientes caudales máximos. El hidrograma medio anual de la sub-serie 1971/72-2021/22, es mayor y muestra menor diferencia entre el caudal máximo y mínimo que el de 1904/05-1970/71. El caudal módulo anual en la sub-serie 1904/05-1970/71 es de 14168 m³/s y en la sub-serie 1971/72-2021/22 es de 17493 m³/s, es decir, se observa un incremento de 3325 m³/s a partir del año 1971/72. En tal contexto se verifican las bajantes de los años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22, las cuales presentan anomalías negativas de caudales medios anuales iguales a -5253 m³/s (2019/20), -7034 m³/s (2020/21) y -7521 m³/s (2021/22), es decir, las mayores anomalías negativas del río Paraná en los 118 años con registros aquí considerados.

Palabras Claves: Análisis de caudales, Río Paraná, Sección aforos Timbúes.

ABSTRACT

This paper presents the flow analysis of the Paraná River, on a daily, monthly, annual and multi-annual time scale; considering the average daily flows corresponding to the series of hydrological years 1904/05-2021/22, observed in the main channel at Timbúes gauging section. In said framework, the low flows registered in the hydrological years 2019/20, 2020/21 and 2021/22 are characterized. An increase in flows is observed from the beginning of the 1970s. Annual minimum daily mean flows were much more frequent before the hydrological year 1971/72; the opposite occurs with the corresponding maximum flows. The mean annual hydrograph of the 1971/72-2021/22 sub-series is higher and shows less difference between the maximum and minimum flow than that of 1904/05-1970/71. The annual module flow in the sub-series 1904/05-1970/71 is 14168 m³/s and in the sub-series 1971/72-2021/22 it is 17493 m³/s, that is, an increase of 3325 m³/s is observed from the year 1971/72. In this context, the low flows of the hydrological years 2019/20, 2020/21 and 2021/22 are verified, which present negative anomalies of annual average flows equal to -5253 m³/s (2019/20), -7034 m³/s (2020/21) and -7521 m³/s (2021/22), that is, the largest negative anomalies of the Paraná River in the 118 years with records considered here.

Keywords: Flow analysis, Paraná River, Timbúes gauging section.

INTRODUCCIÓN

Las variaciones del caudal de un río, a lo largo del año hidrológico, están asociadas a factores físicos de la cuenca, tales como: área, topografía, complejo suelo-vegetación, usos del suelo, etc.; y a factores climáticos, entre los cuales, la magnitud y distribución espacial y temporal de las lluvias juegan un rol fundamental.

De esta manera, en un mismo año hidrológico, es decir, a escala temporal intra-anual; debido a la estacionalidad de las lluvias, se observan períodos de crecientes y bajantes. Asimismo, a escala temporal inter-anual; debido a la variabilidad climática, los años con lluvias anuales superiores a las medias anuales o normales, se denominan “años húmedos”, en los cuales las crecientes pueden ser significativas y, por otra parte, en los años con lluvias anuales inferiores a las normales, denominados “años secos”, las bajantes pueden adquirir relevancia. Los impactos de las crecientes o de las bajantes serán más o menos significativos dependiendo de la magnitud de las anomalías de lluvias.

El régimen hidrológico del río Paraná se caracteriza por ciclos de años “húmedos” y “secos”, que se verifican con diversos grados de severidad y extensión temporal. Estos ciclos se traducen en períodos del río durante los cuales los caudales y correspondientes niveles hidrométricos varían entre estados de aguas bajas, medias y altas.

En este trabajo se presenta el análisis de caudales del río Paraná, a escala temporal diaria, mensual, anual y plurianual; considerando los caudales medios diarios correspondientes a la serie de años hidrológicos 1904/05-2021/22, observados en el cauce principal del río Paraná en la sección de aforos Timbúes-km 456.

El objetivo del trabajo es realizar, en el marco de dicho análisis, la contextualización y caracterización de las bajantes registradas en los años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22; como así también, indagar sobre las causas y describir resumidamente las consecuencias de tales bajantes.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO PARANÁ

El río Paraná nace en la confluencia de los ríos Paranaíba y Grande en Brasil (20°05' S - 51° O). La longitud del río desde dicha confluencia hasta la desembocadura en el río de la Plata (34°20' S - 58°25' O) es de 2570 km, pero si se suma la longitud del río Grande, la misma es de aproximadamente 3900 km. El área de la cuenca del río Paraná, con cierre en el río de la Plata, es de aproximadamente 2.6×10^6 km² e involucra zonas de aporte del Sur de Brasil, todo Paraguay, Norte y Centro de Argentina y Sur-Este de Bolivia, tal como se observa en la Figura 1. En función de la longitud del río (~3900 km) y del área de la cuenca (~2.6 millones de km²), es el segundo sistema fluvial de América del Sur después del Amazonas. Las pendientes del río para aguas medias decrecen gradualmente, con valores que van desde 5×10^{-5} en Corrientes hasta 1.5×10^{-5} en San Pedro.

El principal afluente del río Paraná es el río Paraguay, que nace en la meseta del Mato Grosso en Brasil y confluye sobre margen derecha del río Paraná (27°17' S - 58°36' O) frente a la ciudad de Paso de la Patria en la provincia de Corrientes, unos 30 km aguas arriba de la ciudad de Corrientes. El área de la cuenca del río Paraguay es de 1.1×10^6 km² aproximadamente. La pendiente media del río es del orden de 5×10^{-5} , con valores que disminuyen hasta la mitad cuando atraviesa el Pantanal, una zona de expansión y almacenamiento natural que atenúa y retarda las crecidas del río Paraguay.

Dada la vastedad de la cuenca del río Paraná, en la misma coexisten varios biomas, diversas eco-regiones terrestres y acuáticas, como así también, diferentes zonas climáticas (Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata [CICPLATA], 2017). Las lluvias en las cuencas tributarias de los ríos Paraguay y Alto Paraná (cierre en Paso de la Patria), generan la mayor parte del volumen de agua que fluye por el río Paraná en sus tramos medio e inferior, en territorio argentino desde Paso de La Patria hasta la desembocadura en el río de La Plata. Por otra parte, el río Bermejo, afluente del río Paraguay sobre margen derecha en su tramo inferior (26°51' S - 58°22' O), aporta la mayor parte de la carga de sedimentos del río Paraná.

La magnitud, distribución espacial y temporal de las lluvias a escala regional están gobernadas por el Monzón Sudamericano (Grimm et al., 2005; Misra, 2008; Marengo et al., 2010). Se trata de un sistema de circulación atmosférica estacional de América del Sur, vinculado a los Océanos adyacentes, que gobierna el ciclo de lluvias en el continente sudamericano y, consecuentemente, en la cuenca del río Paraná.

La estación de lluvias, en la parte norte de la cuenca, al norte del Trópico de Capricornio 23°S, es en primavera-verano, con lluvias escasas en otoño-invierno, tal como se observa en los hietogramas de lluvias medias mensuales para Corumbá, Campo Grande, Cuiabá, Brasilia, Goiania, etc. (Figura 1). Sin embargo, al sur del Trópico de Capricornio, en algunos sectores de la cuenca, esta estacionalidad no es marcada, ya que a lo largo del año las lluvias medias mensuales son similares, por ejemplo, esto se observa claramente en los hietogramas correspondientes a Guaira, Porto União, Ciudad del Este, etcétera (Figura 1).

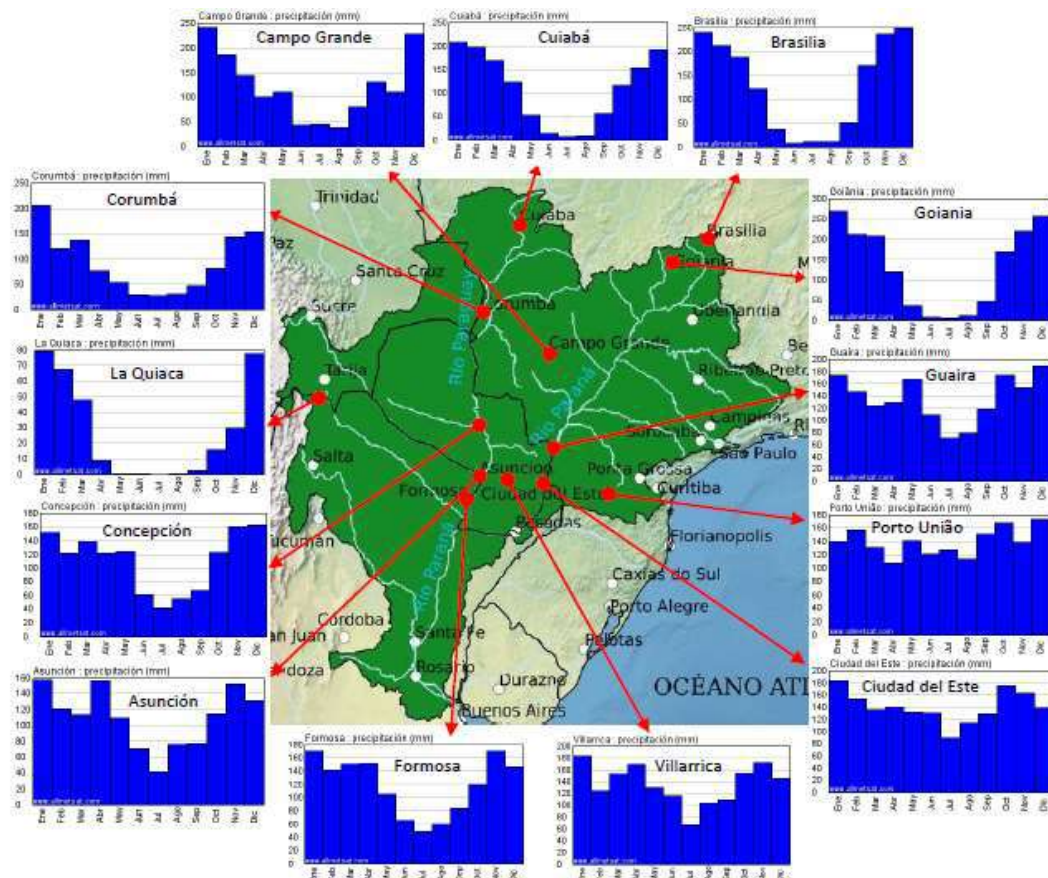


Figura 1. Cuenca río Paraná e hietogramas de lluvias medias mensuales en algunos sectores.

En general, las lluvias máximas trimestrales acumuladas se verifican en diciembre, enero, febrero y las mínimas en junio, julio, agosto. La magnitud de la lluvia media anual en la cuenca es variable y aumenta de Oeste a Este.

En la Figura 2 se observa el mapa de lluvia media anual sobre la parte continental, entre coordenadas 10°-55° S y 80°-35° O, que incluye la cuenca del río Paraná, correspondiente a la serie 1961-1990 (Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur [CRC-SAS], s.f.).

Se registran valores medios anuales inferiores a los 600 mm al Oeste de la cuenca, en sectores con clima

semiárido cálido del Sur de Bolivia y Noroeste de Argentina y núcleos con valores superiores a los 2400 mm al Este, en sectores con clima subtropical húmedo del Sur de Brasil. El valor medio anual, promedio ponderado en el área de la cuenca del río Alto Paraná en Brasil es de 1500 mm (Instituto Nacional de Meteorología de Brasil [INMET], 2021).

La sección de aforos considerada en este estudio se ubica en Timbúes (km 456), es decir, 36 km aguas arriba de Rosario en el km 420 (Figura 1).

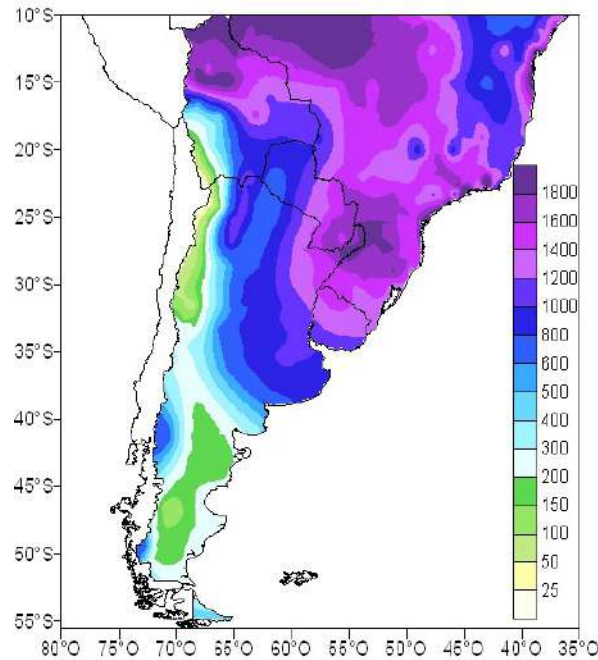


Figura 2. Lluvia media anual 1961-1990 en milímetros (CRC-SAS, s.f.).

MATERIALES Y MÉTODOS

Los caudales medios diarios (Qmd) encauzados, serie 1905-2020, observados en Timbúes y disponibles en la base de datos del Sistema Nacional de Información Hídrica (SNHI) (s.f.) fueron procesados, realizando la depuración y el completamiento de datos faltantes.

A tales fines, con los aforos disponibles en el SNHI y de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) (2004, 2006), conjuntamente con los datos de niveles registrados en el hidrómetro de Puerto San Martín (PSM) (Dirección Nacional de Vías Navegables-Distrito Paraná Inferior [DNVN-DPI], 2022), se construyó la curva nivel-caudal (Figura 3), ajustando a los datos observados una curva polinómica de tercer grado, dada por la ecuación (1); la cual se utilizó para completar los caudales faltantes en años con algunos meses sin datos y los años 2020, 2021 y 2022.

La ecuación polinómica de regresión ajustada tiene la siguiente expresión:

$$Q = 20.8 Z_w^3 - 200.4 Z_w^2 + 2781.8 Z_w - 408.7 \quad (1)$$

donde Q es el caudal en (m³/s) y Z_w en (m) es el nivel de la superficie libre del agua del río Paraná en Puerto San Martín (km 448), referido al Instituto Geográfico Nacional (IGN).

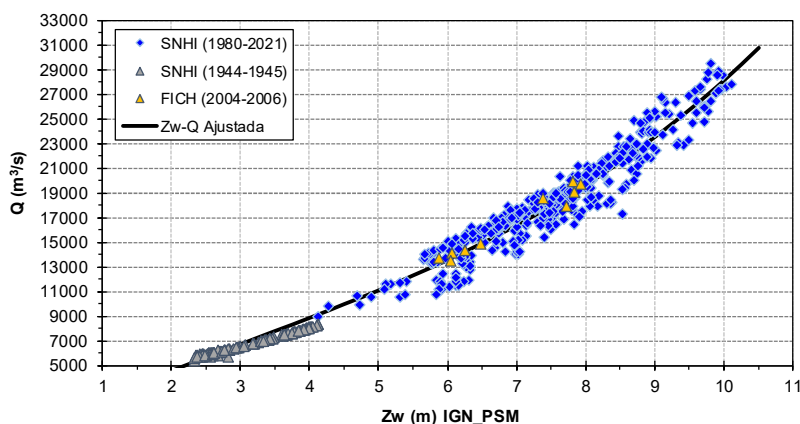


Figura 3. Curva Zw-Q. Río Paraná en PSM (km 448).

En el estudio se procesaron un total de 43200 datos de caudales medios diarios. A partir de los mismos, se determinaron las recurrencias observadas de caudales extremos máximos y mínimos anuales, considerando las dos sub-series que surgen claramente del análisis del comportamiento de los Qmd. Asimismo, mediante un análisis de estadística descriptiva del conjunto total de datos de caudales medios diarios, se construyeron las curvas de duración de caudales correspondientes a cada sub-serie.

Por otra parte, se determinaron los caudales medios mensuales (Qmm) y medios anuales (Qma), a partir de los promedios, a escala temporal mensual y anual respectivamente, de los caudales medios diarios (Qmd). Los caudales módulos mensuales (QMm) se determinaron calculando los promedios de los caudales medios mensuales (Qmm) para la serie de años considerada. Los caudales módulos anuales (QMa) se determinaron calculando los promedios de los caudales medios anuales (Qma), para las sub-series de años consideradas.

El año hidrológico fue definido considerando que comienza el 1 de septiembre de un determinado año y que finaliza el 31 de agosto del año siguiente. De esta manera, todo el período que abarca la estación de lluvias en la cuenca, es decir, en primavera-verano, queda comprendido dentro del año hidrológico.

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Caudales medios diarios

En la Figura 4 se presentan los datos de Qmd cronológicos, encauzados, registrados en la sección de aforos Timbúes; donde se observa claramente un incremento de los caudales Qmd a partir de inicios de la década de 1970. Tal comportamiento ya había sido detectado en estudios precedentes (Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura [FCEIA], 1989) y cuyas causas se analizarán más adelante. Por otra parte, en el contexto temporal de dicho incremento de los Qmd, se observa una apreciable disminución de los mismos en los últimos años 2019, 2020, 2021 y 2022; a tal punto de ser comparables con los registrados antes del inicio de los '70.

En la Tabla 1 se presenta el análisis de los períodos medios de retorno observados (o recurrencias observadas) de algunos valores característicos de Qmd mínimos y máximos anuales, considerando las sub-series de años hidrológicos 1904/05-1970/71 (67 años) y 1971/72-2021/22 (51 años).

Las recurrencias observadas son definidas como $R=T/N$, donde T es el período de años de la sub-serie y N es el número de años en los cuales, durante T, un determinado valor de Qmd es igualado o superado por exceso

(máximos) o por defecto (mínimos), (Chow et al., 1994). Los valores considerados de Qmd máximos y mínimos están representados en la Figura 4 con líneas de distinto color.

Tabla 1. Recurrencias observadas, Qmd máx. y mín. anuales.

Qmd (m ³ /s)	(1904/05-1970/71)		(1971/72-2021/22)	
	N	R (años)	N	R (años)
Qmd máx. ≥ 25000	2	33.50	10	5.1
Qmd mín. ≤ 11000	65	1.03	10	12.8
Qmd mín. ≤ 9000	45	1.50	4 (†)	17.0
Qmd mín. ≤ 7000	20	3.40	1 (*)	51.0

(†) 1971/72, 2019/20, 2020/21, 2021/22. (*) 2021/22

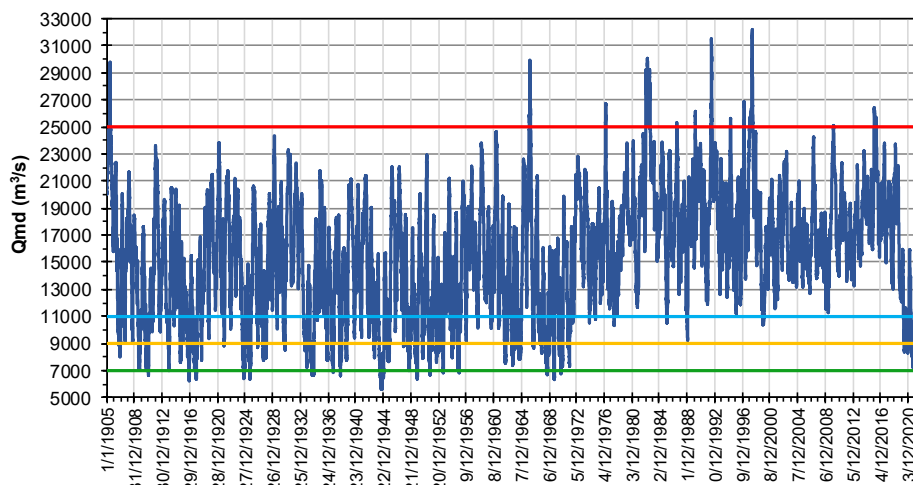


Figura 4. Caudales medios diarios, encauzados en Timbúes (km 456).

En la Tabla 1 se observan recurrencias mucho menores de los Qmd mínimos anuales en la sub-serie 1904/05-1970/71, lo cual indica que los caudales extremos bajos fueron mucho más frecuentes antes del 1971/72. Por ejemplo, antes del 1971/72 el caudal de 9000 m³/s es igualado o superado por defecto cada 1.5 años en promedio; mientras que, después del 1971/72 esto se observa cada 17 años en promedio, con la particularidad que 3 de los 4 valores mínimos se registran en los tres últimos años hidrológicos, es decir, 2019/20 (8360 m³/s), 2020/21 (7230 m³/s) y 2021/22 (6870 m³/s). Cabe señalar que, el Qmd mínimo extremo más severo se produjo en el año hidrológico 1944/45 (5700 m³/s).

Viceversa, para los caudales altos, antes de 1971/72 el caudal de 25000 m³/s es igualado o superado por exceso cada 33.5 años en promedio; mientras que, después del 1971/72 esto se observa cada 5.1 años en promedio. En efecto, después del 1971/72 se registran 10 valores de Qmd ≥ 25000 m³/s (R=5.1 años), entre los cuales se destacan los acontecidos en los años hidrológicos 1982/83 (30050 m³/s), 1991/92 (31400 m³/s) y 1997/98 (32000 m³/s), que produjeron crecidas extraordinarias del río Paraná.

El análisis de estadística descriptiva del conjunto total de Qmd, de ambas sub-series, permite determinar las correspondientes curvas de duración. En tales curvas (Figura 5), en ordenadas se representan los valores de los Qmd registrados y en abscisas el tiempo de excedencia.

El tiempo de excedencia [T exced. (%)], representa el “tiempo adimensional” en número de días respecto al total de días de la sub-serie, durante el cual un determinado Qmd fue igualado o superado. Es decir, es el complemento de la frecuencia relativa acumulada porcentual en términos de número de días.

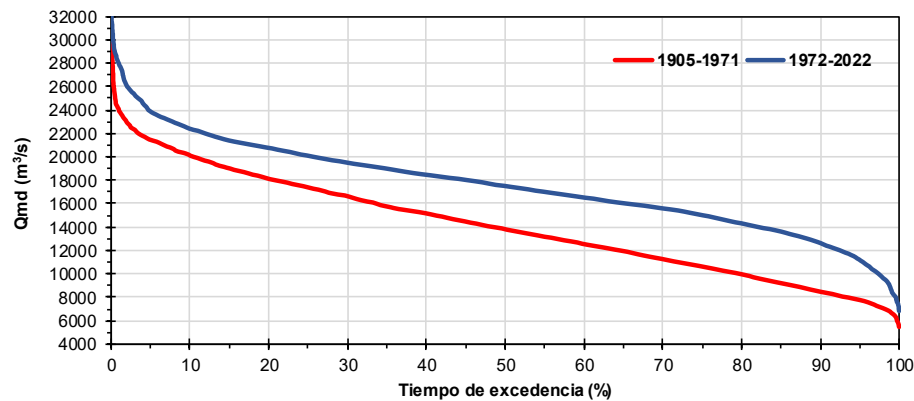


Figura 5. Curvas de duración de Qmd por sub-serie.

Por lo tanto, $[100 - T \text{ exced. (\%)}]$ es el “tiempo adimensional” durante el cual un determinado caudal fue igualado o no superado, o sea, es la frecuencia relativa acumulada porcentual en días. $T \text{ exced.} = 0\%$ se corresponde con el valor máximo de la serie Q_0 y $T \text{ exced.} = 100\%$ se asocia al valor mínimo Q_{100} .

En el río Paraná, la relación Q_0/Q_{100} es aproximadamente igual a 5 para el flujo encauzado, lo cual indica una irregularidad hidrológica muy baja, tal como sucede en otros grandes sistemas fluviales del planeta.

En la Figura 5 se observa que la curva de duración 1972-2022 se encuentra por encima de la correspondiente a 1905-1971 para todo tiempo de excedencia. Es decir, para un mismo tiempo adimensional de excedencia asignado, el caudal medio diario es mucho mayor en la sub-serie 1972-2022, con una diferencia más importante para caudales medios-bajos. Por otra parte, un determinado Qmd fijo es igualado o superado durante un tiempo mucho mayor. Esto describe el incremento de los Qmd observado a partir del 1972 y, consecuentemente, el respectivo aumento de la duración de los mismos.

Caudales medios mensuales

En la Figura 6 se presentan los caudales medios mensuales, donde se observa claramente, a partir de la media móvil de 12 (línea roja), el cambio hacia una mayor magnitud de los caudales a partir del inicio de los '70 y una drástica disminución en los tres últimos años.

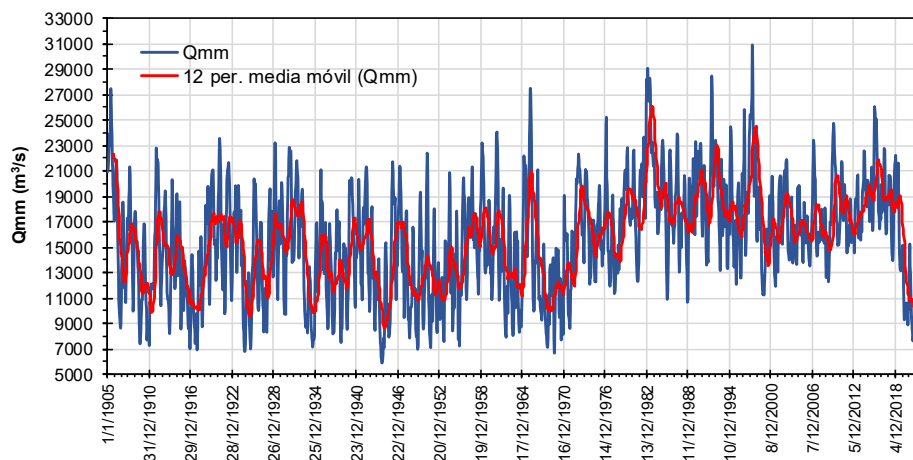


Figura 6. Caudales medios mensuales, encauzados en Timbúes (km 456).

En la Figura 7 se presentan los hidrogramas medios anuales para cada sub-serie, formados por los caudales módulos mensuales QMm de cada sub-serie. Se observa que, el hidrograma medio anual 1971/72-2021/22, es definitivamente mayor y muestra menor amplitud (diferencia entre el caudal máximo y mínimo) que el de 1904/05-1970/71.

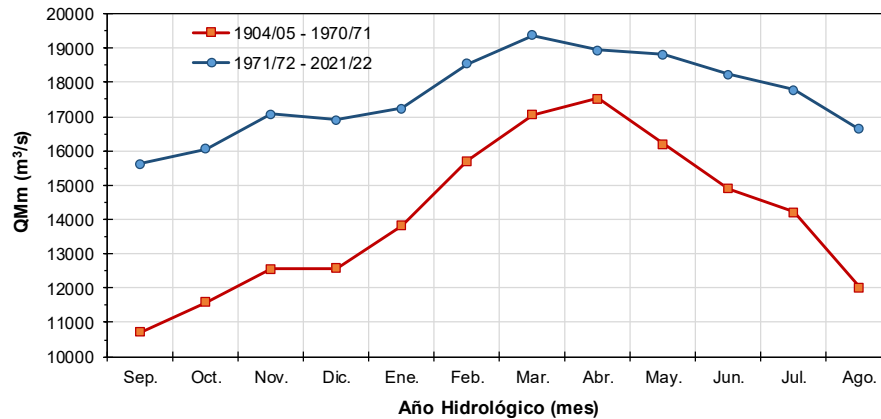


Figura 7. Hidrogramas medios anuales, ambas sub-series, caudales encauzados en Timbúes.

Por otra parte, en términos medios, se observa que, en concordancia con la estacionalidad de las lluvias en la cuenca, es decir, estación lluviosa en primavera-verano y lluvias escasas en otoño-invierno, y con los tiempos de respuesta de la cuenca; el caudal mínimo se observa en septiembre y alcanza el valor máximo en marzo-abril, para luego ir disminuyendo en los meses subsiguientes del año hidrológico.

En la Figura 8 se presentan las anomalías de caudales medios mensuales, $AQmm_{j,i}$, para los años hidrológicos “secos” 1924/25, 1944/45, 2019/20, 2020/21, 2021/22 y el año hidrológico “húmedo” de mayor duración de caudales 1982/83. Dichas anomalías son definidas en la ecuación (2) como:

$$AQmm_{j,i} = Qmm_{j,i} - QMm_{j,n-k} \quad (2)$$

donde $Qmm_{j,i}$ es el caudal medio mensual del j-ésimo mes y del i-ésimo año hidrológico y $QMm_{j,n-k}$ es el caudal módulo mensual del mes j asociado al período de años hidrológicos n-k de cada sub-serie, los cuales se encuentran representados en la Figura 7.

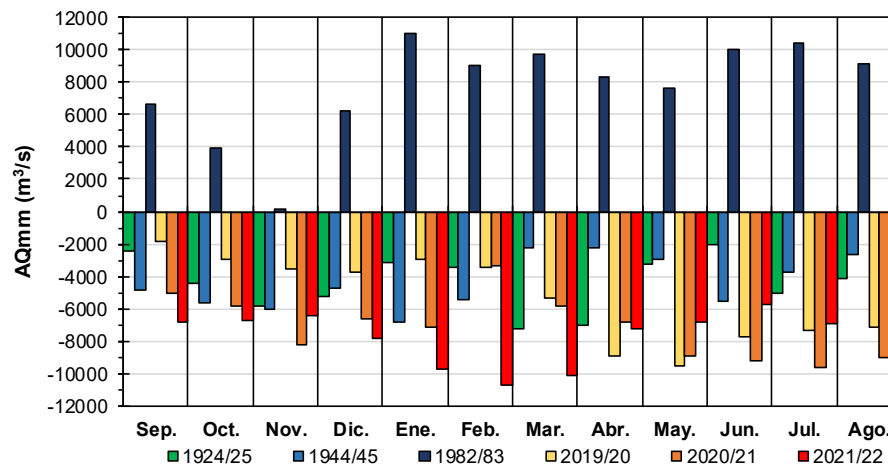


Figura 8. Anomalías de caudales medios mensuales para algunos años hidrológicos.

Las mayores anomalías negativas de Qmm se observan en el año hidrológico 2021/22, en particular para los meses de diciembre, enero, febrero y marzo; correspondientes a los meses de las máximas lluvias acumuladas en la cuenca. Tales anomalías son de $-7821 \text{ m}^3/\text{s}$ (diciembre), $-9731 \text{ m}^3/\text{s}$ (enero), $-10723 \text{ m}^3/\text{s}$ (febrero) y $-10124 \text{ m}^3/\text{s}$ (marzo). Se trata de las anomalías negativas de Qmm más importantes del río Paraná, observadas en los registros considerados en este estudio.

Caudales medios anuales y volúmenes de escurrimiento

En la Figura 9 se presentan los caudales medios anuales (Qma) y los caudales módulos anuales (QMa) en línea continua color marrón correspondientes a cada sub-serie.

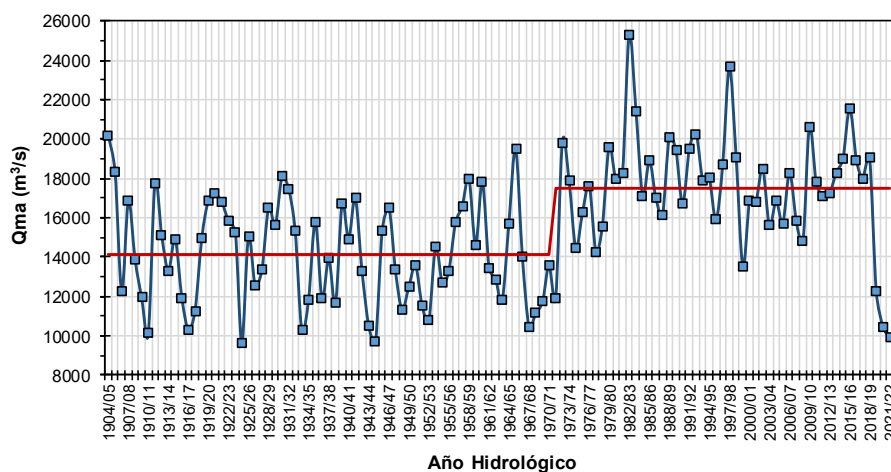


Figura 9. Caudales medios anuales (Qma) y caudal módulo anual por sub-serie (QMa).

En la Figura 9, $QMa=14168 \text{ m}^3/\text{s}$ (1904/05-1970/71) y $QMa=17493 \text{ m}^3/\text{s}$ (1971/72-2021/22), es decir, se observa un incremento de $3325 \text{ m}^3/\text{s}$ en el QMa a partir del 1971/72. Por otra parte, aún en este contexto de incremento del caudal módulo anual QMa, se nota que los caudales medios anuales Qma de los tres últimos años hidrológicos son similares a los observados en años “secos” del periodo 1904/05-1970/71. En la Figura 10 se presentan las anomalías de caudales medios anuales, $AQma_i$, expresadas mediante la ecuación (3):

$$AQma_i = Qma_i - QMa_{n-k} \quad (3)$$

donde Qma_i es el caudal medio anual del i-ésimo año hidrológico y QMa_{n-k} es el caudal módulo anual asociado al periodo de años hidrológicos n-k de cada sub-serie.

Las bajantes observadas en los años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22, presentan anomalías negativas de caudal medio anual del orden de los $-5253 \text{ m}^3/\text{s}$ (2019/20), $-7034 \text{ m}^3/\text{s}$ (2020/21) y $-7521 \text{ m}^3/\text{s}$ (2021/22). Es decir, las mayores anomalías negativas de caudales medios anuales observadas del río Paraná en toda la historia con registros aquí considerada.

Tales bajantes se asocian a volúmenes de escurrimiento en la cuenca similares a los observados en las bajantes ocurridas antes del 1971/72 en años “secos”; tal como se observa en la Figura 11, donde se representan los volúmenes de escurrimientos anuales (Va) del flujo encauzado y los valores promedio (Vma) por sub-serie (línea roja).

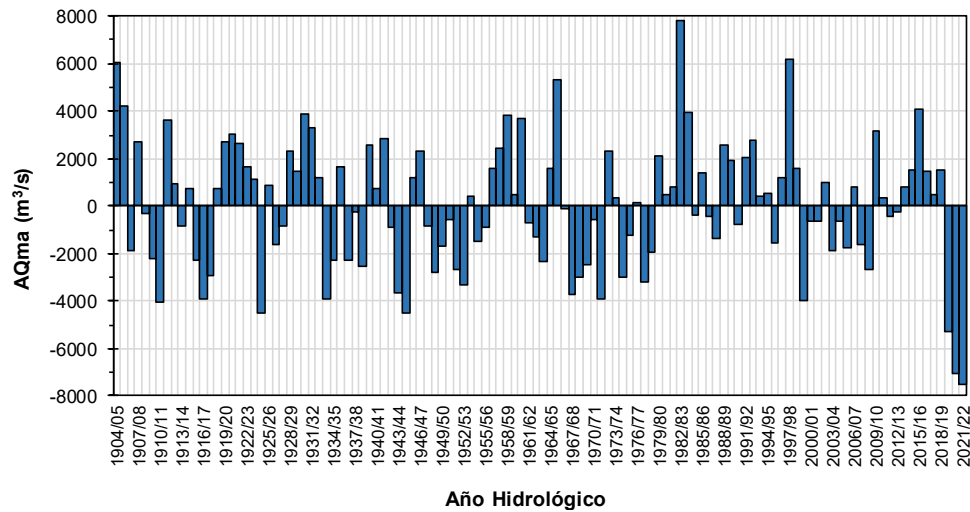


Figura 10. Anomalías de caudales medios anuales (AQma).

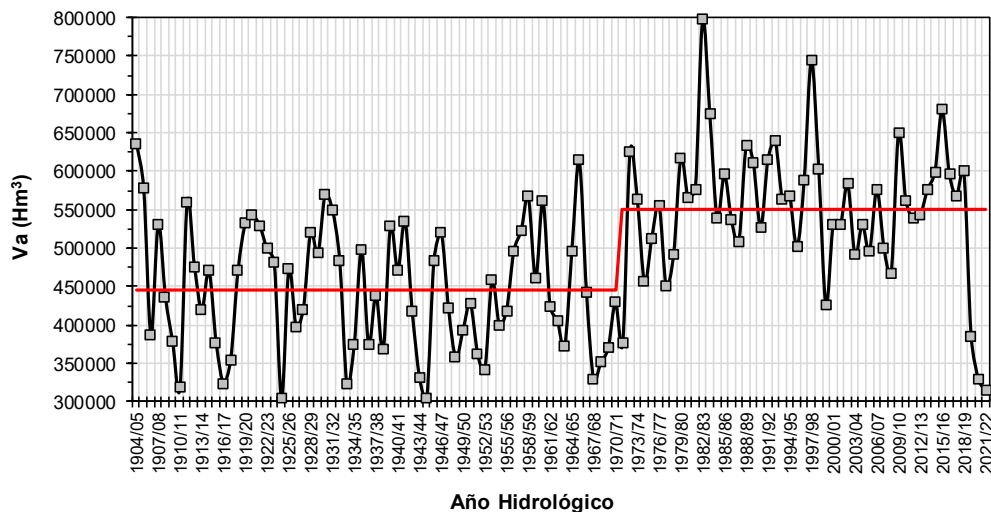


Figura 11. Volúmenes de escurrimientos anuales y valores medios por sub-serie.

En la Tabla 2 se presenta una lista ordenada, en función de los Qma y Va, de los diez años hidrológicos “secos” severos que produjeron las bajantes más significativas del río Paraná. Cabe señalar que estos diez años hidrológicos “secos” se ubican en un rango de Qma muy estrecho (9660 m³/s a 10826 m³/s) y, consecuentemente, también en lo que respecta a los volúmenes de escurrimientos anuales Va (304625 Hm³ a 341349 Hm³). Se observa que, de las diez bajantes más significativas, ocho se verifican en el período 1904/05-1970/71 y las dos que restan se ubican en el período 1971/72-2021/22, particularmente en los dos últimos años hidrológicos: 2021/2022 (en el puesto 3) y 2020/21 (en el puesto 7).

A los efectos de poner en evidencia la extensión temporal de los años “secos”, en la Tabla 3 se presenta el número de años hidrológicos consecutivos que evidenciaron anomalías de caudales medios anuales AQma < -2000 m³/s. En la sub-serie 1904/05-1970/71 se observan cuatro períodos con 2 años secos consecutivos y dos períodos con 3 años secos consecutivos. En la sub-serie 1971/72-2021/22, el único período de 3 años secos consecutivos se observa en los tres últimos años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22.

En la Figura 12 se presentan las anomalías de volúmenes de escurrimientos anuales, AVa_i , expresadas mediante la ecuación (4):

$$AVa_i = Va_i - VMa_{n-k} \quad (4)$$

donde Va_i es el volumen de escurrimiento anual del i-ésimo año hidrológico y VMa_{n-k} es el volumen medio anual asociado al período de años hidrológicos n-k de cada sub-serie.

Tabla 2. Ranking de las 10 bajantes más significativas.

Orden #	Año Hidrológico	Qma (m³/s)	Va (Hm³)
1	1924/25	9660	304625
2	1944/45	9694	305720
3	2021/22	9972	314464
4	1910/11	10126	319334
5	1933/34	10273	323977
6	1916/17	10291	324551
7	2020/21	10459	329820
8	1967/68	10468	330110
9	1943/44	10522	331836
10	1952/53	10826	341394

Tabla 3. Número de años hidrológicos consecutivos con AQma < -2000 m³/s.

Número M	Años Hidrológicos	Qma (m³/s)	AQma (m³/s)
2	1909/10	11989	-2179
	1910/11	10126	-4042
3	1915/16	11931	-2237
	1916/17	10291	-3877
	1917/18	11265	-2903
2	1933/34	10273	-3895
	1934/35	11867	-2301
2	1943/44	10522	-3646
	1944/45	9694	-4474
2	1951/52	11513	-2655
	1952/53	10826	-3342
3	1967/68	10468	-3700
	1968/69	11154	-3014
	1969/70	11733	-2435
3	2019/20	12240	-5253
	2020/21	10459	-7034
	2021/22	9972	-7521

En concordancia con las anomalías de Qma descritas anteriormente, en la Figura 12 se observa que las mayores anomalías negativas de Va se verifican en los tres últimos años hidrológicos: -165862 Hm³ (2019/20), -221849 Hm³ (2020/21) y -237205 Hm³ (2021/22).

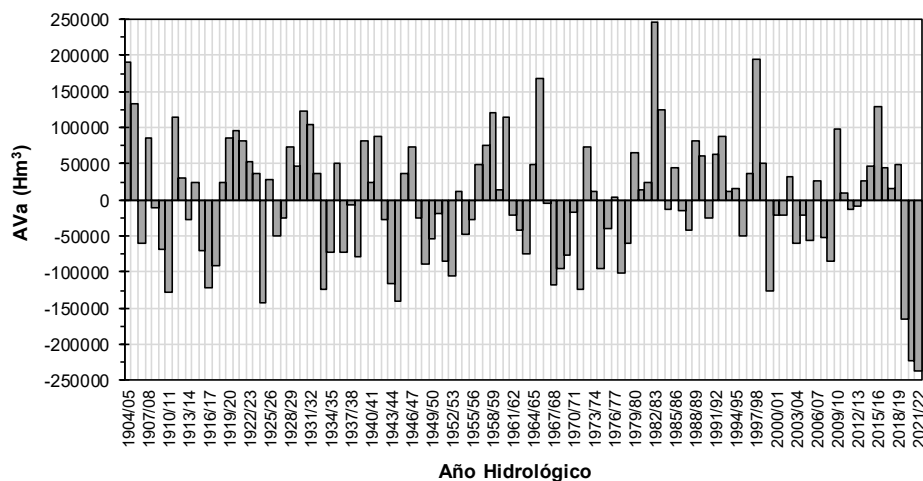


Figura 12. Anomalías de volúmenes de escurrimientos anuales (AVa).

CONSIDERACIONES SOBRE EL CAMBIO OBSERVADO A PARTIR DEL 1971/72

El cambio en el régimen hidrológico del río Paraná a partir del año hidrológico 1971/72, es caracterizado por un incremento del caudal transportado, el cual se explica por diversos factores observados en la cuenca desde inicios de la década del '60; los cuales contribuyeron progresivamente a generar mayores volúmenes de escurrimiento en la cuenca y son consistentes con el cambio observado. Es en ese contexto donde se verifica la drástica disminución del caudal del río, observada durante los tres últimos años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22.

Dentro de los factores que propiciaron el incremento de los caudales del río a partir de 1971/72 se identifican: i) el aumento de lluvias, ii) la deforestación y cambio de uso del suelo y iii) la construcción de presas para aprovechamientos hidroeléctricos.

Aumento de lluvias en la región

Las tendencias de incremento de las precipitaciones en esta región han estado entre las más grandes observadas a lo largo del siglo XX (Cavalcanti et al., 2015). Desde la década de 1970 se ha observado un aumento de las precipitaciones, particularmente en primavera-verano (Haylock et al., 2006; Jacques-Coper y Garreaud, 2015).

Las tendencias positivas de precipitación sobre la cuenca del Plata en la segunda mitad del siglo XX han sido analizadas por varios investigadores (Liebman et al., 2004; Boulanger et al., 2005; Berbery et al., 2006; Seager et al., 2010). El mayor aumento del número de precipitaciones extremas en la región, de noviembre a mayo, fue observado en el sur de Brasil y el noreste de Argentina (Berbery et al., 2006).

Liebmann et al. (2004) identificaron tendencias estacionales lineales de precipitación desde el centro de América del Sur durante 1976-99 y mostraron que la mayor tendencia positiva ocurrió al sur de los 20°S durante enero-marzo y se focalizó en el sur de Brasil; mientras que, de 1948 a 1975 la tendencia también es positiva, pero con menos de la mitad de la pendiente. La tendencia se debe a un aumento en el porcentaje de días lluviosos y un aumento en el promedio de días lluviosos.

Una mirada más amplia sobre los cambios de precipitación asociados con la transición climática de la década de 1970 fue proporcionada por Carvalho et al. (2011), quien estudió el Sistema de circulación Atmosférica del Monzón Sudamericano (SAMS) y documentó una transición hacia un inicio más temprano y una finalización

más tardía del mismo a partir del 1971-1972, es decir, el SAMS experimentó una mayor duración a partir de inicios de la década del '70.

Deforestación y cambio de uso del suelo

La cobertura vegetal representada por los bosques constituye el primer nivel de almacenamiento transitorio debido a la intercepción del follaje, la cual propicia una disminución del volumen de lluvia que alcanza directamente el terreno. Además, la vegetación y la biomasa que existen debajo de los bosques reducen la velocidad del escurrimiento superficial y favorecen la infiltración de la lluvia que alcanza el terreno, disminuyendo el aporte de escurrimiento superficial. Por otra parte, este aumento de infiltración, genera agua disponible en el perfil de suelo, la cual posteriormente retorna a la atmósfera vía la evapotranspiración y parte puede recargar eventualmente el almacenamiento subterráneo. Por lo tanto, la destrucción de cobertura vegetal en general, induce un aumento del escurrimiento superficial y de los caudales pico, una disminución de la evapotranspiración y de los caudales de base aportados por el almacenamiento subterráneo. Este proceso de alteración del ciclo hidrológico pudo comprobarse en la cuenca del río Paraná.

Algunos estudios hidrológicos de transformación lluvia-caudal, realizados a escala de la Cuenca del Plata completa, han puesto en evidencia que, en la generación de escurrimiento, las forzantes climáticas son dominantes en relación a los cambios localizados de uso de suelo (Collischonn et al., 2001; Tucci, 2003). A escala de las subcuencas, tanto el clima como también el cambio de uso del suelo tienen efectos sobre la respuesta hidrológica de las cuencas (Saurral et al., 2008). Los estudios realizados en la cuenca alta del río Grande en Brasil, mostraron que la conversión de bosques en pasturas generó un aumento de la escorrentía total y del caudal máximo, y una disminución del caudal base y de la evapotranspiración (Oliveira et al., 2018).

En el caso de la cuenca del Paraná, este proceso de destrucción de cobertura vegetal (deforestación, desmonte, etc.) se ha realizado en zonas de alta sensibilidad para la respuesta hidrológica de la cuenca, como es la zona del Bosque Atlántico del Alto Paraná (BAAP), cuya superficie original de 471204 km² (casi la mitad del área de la cuenca del Alto Paraná con cierre en Corrientes), se extiende desde las laderas occidentales de la Serra do Mar en Brasil hasta el Este de Paraguay y la provincia de Misiones en Argentina (Figura 13).

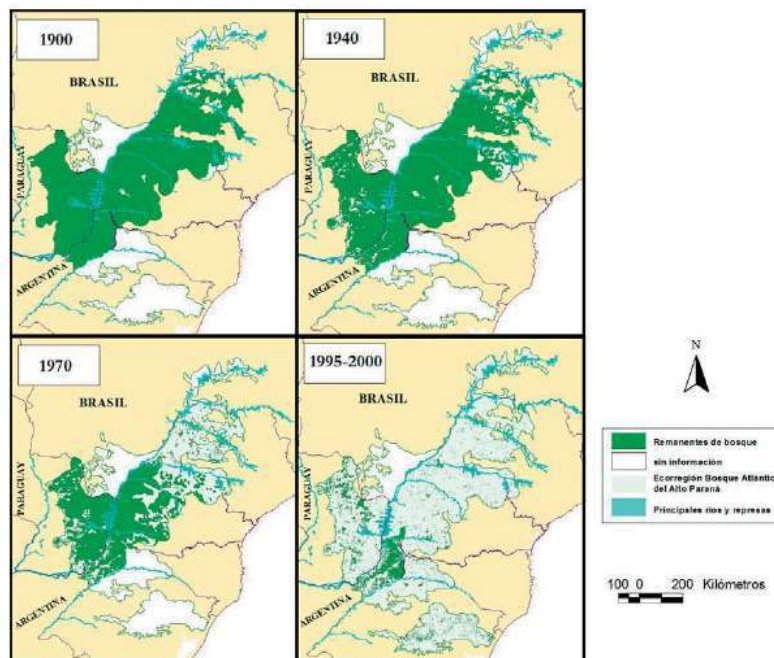


Figura 13. Deforestación del Bosque Atlántico del Alto Paraná (Di Bitetti et al., 2003).

El BAAP ha sufrido una deforestación muy importante, comenzando en los '60 en Brasil y en los '80 en Paraguay. Se estima un 92.2% de pérdida del Bosque Atlántico del Alto Paraná, acelerada a partir de la mitad de la década del '60. De los 471204 km², solo queda actualmente un 7.8% de la cobertura boscosa original aproximadamente, es decir, 36754 km²; tal como se observa en la Figura 13 (Di Bitetti et al., 2003).

La deforestación del BAAP implicó, además, un cambio de uso de suelo con fines de agricultura, ganadería, minería y consolidación de asentamientos urbanos; se estima que 25 millones de personas ocupan actualmente el área original del BAAP (Di Bitetti et al., 2003). Lo anteriormente descripto, explica en buena medida el aumento del volumen de escurrimiento en la cuenca y el consiguiente incremento del caudal en el río Paraná, observado a partir de 1971/72.

Por otra parte, la alta sensibilidad a la respuesta hidrológica se debe a la magnitud de las lluvias que se verifican en esa región (lluvias medias anuales superiores a los 1500 mm) y a la importante red hidrográfica del río Alto Paraná que drena dicha zona.

Construcción de presas en la cuenca alta

Hay más de 63 presas con fines de generación hidroeléctrica, construidas sustancialmente en la cuenca del río Alto Paraná en Brasil (Naumann et al., 2021). En la Figura 14 se observan los desarrollos hidroeléctricos operativos, en construcción y proyectados, etc., en la cuenca del Alto Paraná en Brasil (Stevaux et al., 2007).

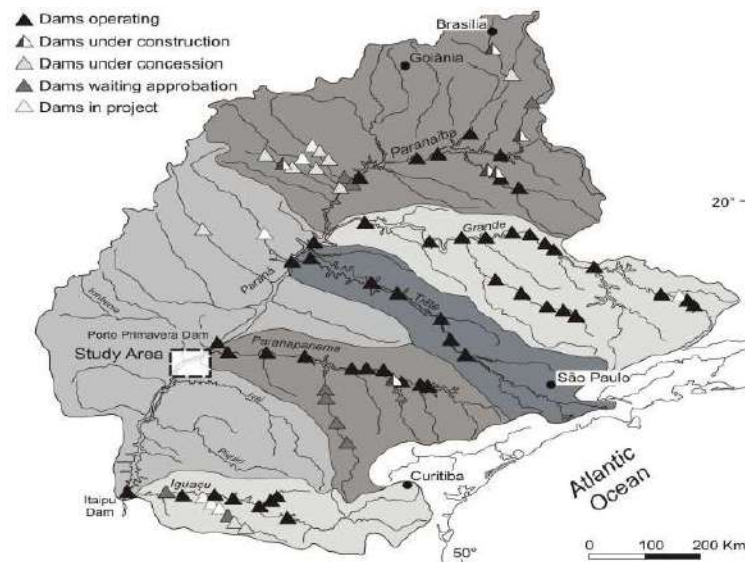


Figura 14. Presas en la cuenca del río Alto Paraná en Brasil (Stevaux et al., 2007).

Es necesario aclarar que, las presas solo regulan el caudal y, durante los períodos de lluvias muy por debajo de las normales en la cuenca, contribuyen (con un margen de operación limitado) a mitigar fundamentalmente el impacto de las bajantes; manteniendo los caudales mínimos más elevados de los que se producirían sin la presa. Esto es debido al turbinado continuo para generación de energía y a la posibilidad de realizar erogaciones controladas de cierta parte del volumen almacenado en el embalse.

En estas bajantes pronunciadas se observan claramente los aumentos de caudal aguas abajo (sobre todo en 2020 y 2021), como consecuencia de las erogaciones controladas de las presas de Itaipú y Yacretá, lo cual ayudó a paliar, en cierta medida, los problemas derivados de la disminución del caudal en los ríos.

Por otra parte, las presas contribuyen en menor proporción a atenuar los caudales máximos en las crecientes, dado que el des-almacenamiento se considera como una pérdida económica. Debe quedar claro que, las presas para aprovechamientos con fines de generación hidroeléctrica, pueden ser responsables de una larga lista de impactos y daños ambientales, pero en la regulación de los caudales hacia aguas abajo juegan un papel favorable para evitar la severidad adicional que producen las bajantes en los ríos.

En particular, en el análisis realizado en este estudio se observa que el incremento de los caudales medios-bajos es más significativo que el incremento de los caudales altos, tal como queda evidenciado a partir de las curvas de duración de caudales medios diarios y de los hidrogramas medios anuales para las dos sub-series.

BAJANTES 2019/20, 2020/21, 2021/22 Y SEQUÍA METEOROLÓGICA PERSISTENTE

La deforestación realizada del BAAP y el cambio de uso del suelo, contribuyeron a generar mayores volúmenes de escurrimiento en los últimos 51 años, tal como ha sido determinado a partir del análisis de la evolución de los caudales del río Paraná. Dichos cambios en la cuenca subsisten en la actualidad. Por otra parte, las presas, que están construidas y siguen operativas, continúan regulando los caudales y, mediante erogaciones controladas han ayudado mitigar parcialmente el efecto de las bajantes. Por tales motivos, la drástica disminución de los caudales del río Paraná, observada en los años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22; se relaciona fundamentalmente a lluvias anuales muy por debajo de las consideradas normales en el periodo de tiempo analizado en este estudio.

En efecto, la escasez de lluvias y consecuente sequía meteorológica comenzó a mediados del año 2019, afectando en primer lugar la parte norte de la cuenca, para luego extenderse espacialmente hasta cubrir toda la superficie de la cuenca.

Debido a su persistencia, la sequía meteorológica (déficit de precipitaciones) se propagó a través del ciclo hidrológico, afectando a la humedad del suelo, los caudales y niveles hidrométricos en los ríos, los almacenamientos de aguas superficiales (lagunas, humedales, etc.), los almacenamientos de aguas subterráneas (acuíferos) y la vegetación (Global Drought Observatory [GDO], 2021; World Meteorological Organization [WMO], 2021; Naumann et al., 2021, 2022).

De acuerdo al informe de pronóstico climático realizado por el Instituto Nacional de Meteorología de Brasil en el 2021 (INMET, 2021); las anomalías de lluvias anuales en la cuenca del río Alto Paraná en Brasil, fueron de -200 mm (2019), - 360 mm (2020) y -390 mm (2021).

Según Marengo et al. (2021a), la escasez de lluvias durante los veranos de 2019 y 2020 se debió a la reducción del transporte de aire cálido y húmedo desde la Amazonía hacia el Pantanal, durante el pico de la temporada del Monzón Sudamericano. Esto llevó a prolongadas condiciones de sequía extrema en toda la región. En particular, la sequía en la región del Pantanal puede ser considerada como la mayor en los últimos 50 años (Marengo et al., 2021a).

Por otra parte, las altas temperaturas generaron olas de calor sostenidas, acentuando los efectos adversos de la sequía, e impactando tanto en el ciclo hidrológico como en la salud de los habitantes de la región (Marengo et al., 2021b). Desde el punto de vista meteorológico, la sequía en la cuenca del Paraná puede ser tipificada como “muy severa”, cercana a “excepcional” y ubicada entre las cinco mayores sequías observadas desde el año 1950 (Naumann et al., 2021, 2022).

En la Figura 15 se muestra el Índice de Precipitación Estandarizado-9 meses, para los años 2019, 2020, 2021 y 2022, donde se observan condiciones “extremadamente secas” y “severamente secas” especialmente a partir del 2020 y alcanzando su máxima extensión superficial de condiciones extremadamente secas, principalmente en las cuencas de los ríos Paraguay y Alto Paraná, en el año 2021 (Naumann et al., 2022).

Dada la duración y severidad de la sequía meteorológica, que se propagó por los diferentes subsistemas del ciclo hidrológico, la misma ha tenido consecuencias socio-ambientales considerables y ha generado (Naumann et al., 2021, 2022):

- i) Problemas en el suministro de agua potable a poblaciones, debido sustancialmente a la posición altimétrica de las obras de toma sobre el río Paraná, las cuales han sido diseñadas para niveles hidrométricos mínimos del río más elevados. No es un problema de cantidad de caudal disponible, ya que con solo 5 m³/s (~0.071% de 7000 m³/s mínimo observado en las ultimas bajantes) se pueden abastecer 1.73 millones de habitantes con una dotación de 250 l/hab. día;
- ii) Restricciones considerables para el transporte fluvial de cargas en los ríos Paraguay y Paraná. En la actualidad esto tiene mucho más impacto que en el pasado, debido a la evolución de las flotas de buques de carga hacia mayores dimensiones (eslora y manga) y calado, con la consecuente mayor capacidad de carga;
- iii) Reducción considerable de generación de energía hidroeléctrica, con el consecuente aumento del costo de la electricidad, principalmente en Brasil, que es altamente dependiente de esa fuente de energía;
- iv) Pérdidas en pesquerías artesanales;
- v) Disminución de rendimientos agrícolas;
- vi) Afectación de la ganadería;
- vii) Aumento de incendios forestales en las cuencas de los ríos Amazonas y Paraná;
- viii) Impactos negativos sobre los ecosistemas y la biodiversidad de los humedales, especialmente en el Pantanal, los Esteros del Iberá y el valle aluvial del río Paraná medio e inferior.

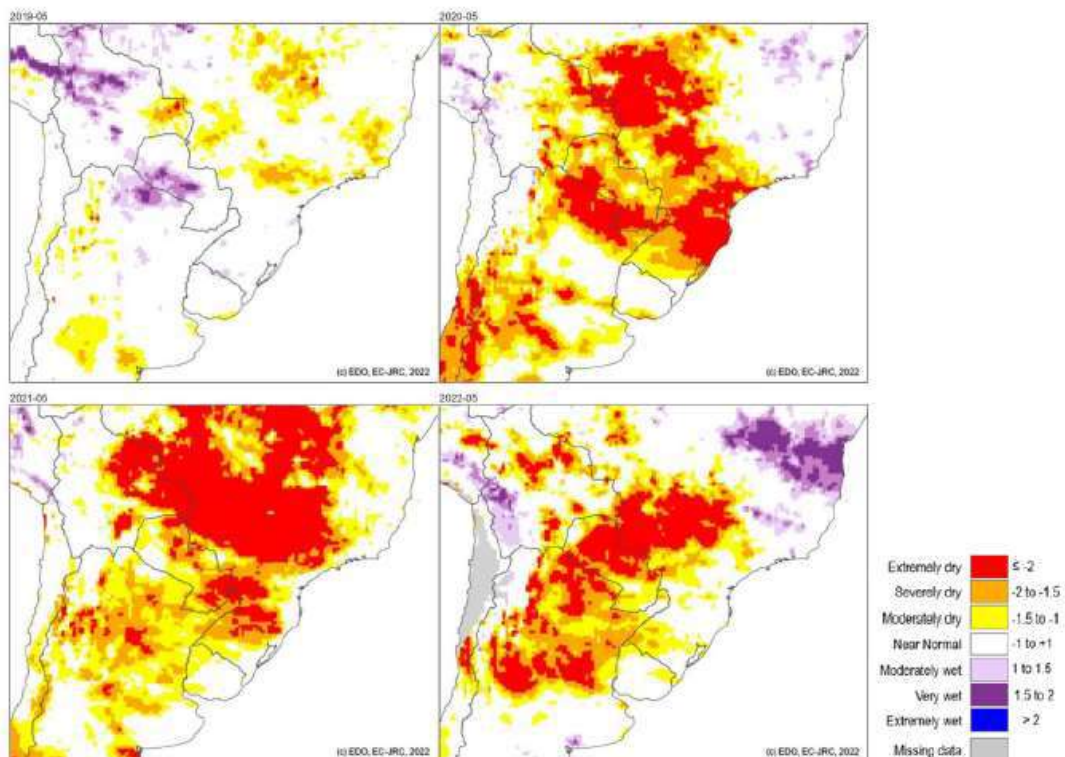


Figura 15. Índice de Precipitación Estandarizado-9 meses (IPS-9): 2019 (sup. izq.), 2020 (sup. der.), 2021 (inf. izq.) y 2022 (inf. der.), (Naumann et al., 2022).

El Monzón Sudamericano y las lluvias en la cuenca del río Paraná

El sistema de circulación atmosférica del Monzón Sudamericano (SAMS-South American Monsoon System en inglés) gobierna el régimen de precipitaciones en el continente sudamericano (Mechozo et al., 2005; Grimm et al., 2005; Misra, 2008; Marengo et al., 2010). La humedad que se evapora del Atlántico tropical, preponderantemente durante el verano austral, ingresa al noreste de la Amazonía a través de los vientos alisios. A medida que avanza por el bosque, se producen lluvias importantes, y a su vez, parte de las mismas son de vueltas a la atmósfera en forma de vapor por medio de la evapotranspiración generada por el bosque amazónico, en lo que se denomina “reciclado de precipitaciones” (Marengo, 2006; Machado Rocha et al., 2018). Un alto volumen de humedad llega al suroeste de la Amazonía y se encuentra con la Cordillera de los Andes, desde donde se genera una corriente atmosférica de chorro de bajo nivel-SALLJ (South American Lower Level Jet en inglés) que se desarrolla a 1-3 km de la superficie terrestre, la cual se redirige hacia el sureste de Brasil, extendiéndose por todo el continente y transportando el remanente de humedad proveniente de la evaporación del Atlántico y la evapotranspiración del bosque Amazónico (Marengo et al., 2009, 2010; Machado Rocha et al., 2018).

A escala regional, la Amazonía es una fuente importante de humedad que contribuye al régimen de precipitaciones en otras regiones de América del Sur (Marengo, 2006; Misra, 2008; Machado Rocha et al., 2018). Es decir, existe una relación estrecha entre las lluvias en la cuenca del río Paraná y la corriente atmosférica SALLJ al este de los Andes, alimentada por la evapotranspiración de la cuenca del Amazonas que ingresa a la cuenca del Paraná. Por lo cual, una alteración de la evapotranspiración en el Amazonas, como por ej., la reducción de la misma debido a la deforestación, los incendios (gran cantidad de focos en 2020-2022), etc.; puede disminuir notablemente el vapor de agua en la corriente atmosférica de chorro de bajo nivel SALLJ y afectar el monto de precipitaciones, tal como señalado por Marengo et al. (2021a).

Esto sumado a la variabilidad climática que impone el fenómeno de El Niño Oscilación Sur (ENOS), que, durante años Niñas (anomalías negativas de la temperatura del Océano Pacífico Ecuatorial) el SAMS se debilita y consecuentemente también la SALLJ. Viceversa, durante fases Niño (anomalías positivas de la temperatura del Océano Pacífico Ecuatorial), SAMS y SALLJ se refuerzan (Misra et al., 2002; Berbery y Barros, 2002; Silva et al., 2009; Santos y Reboita, 2018). En los años 2020-2022 se verificaron anomalías negativas de temperaturas superficiales del Océano Pacífico tropical (región 3-4), las cuales se correspondieron con un evento de Niña del ENOS (Becker, 14 de julio de 2022).

Las simulaciones numéricas con modelos climáticos acoplados, realizadas por Nobre et al. (2009), mostraron reducciones de lluvia de hasta el 60% debido a la deforestación en la Amazonía, y respuestas atmosféricas remotas significativas a los escenarios de deforestación, sugiriendo una mayor actividad de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) sobre el Pacífico, y una retroalimentación positiva que contribuye a la reducción adicional de precipitaciones sobre el Amazonas.

La deforestación en la Amazonia se viene realizando en forma sistemática y actualmente alcanza un 19% del área total de 5.3 millones de km². Algunas investigaciones sostienen que sobrepasado el umbral del 25% de deforestación del área del bosque Amazónico, en conjunción con el calentamiento global propiciado por las emisiones de CO₂; se puede experimentar una metamorfosis climática, induciendo un cambio de selva tropical a sabana desértica (Nobre et al., 2009; Nobre y Borma, 2009).

En efecto, las simulaciones con modelos climáticos muestran el riesgo de un reemplazo abrupto e irreversible de los bosques amazónicos por vegetación de tipo sabana, con posibles impactos a gran escala sobre el clima, la biodiversidad y las personas (Betts et al., 2004; Cox et al., 2004; Salazar et al., 2007; Sampaio et al., 2007; Sitch et al., 2008), en un proceso denominado "muerte regresiva" de la Amazonía. Después de alcanzar un "punto de inflexión" en el clima (concentración de CO₂, temperatura del aire), el bosque deja de comportarse como un sumidero de carbono y se convierte en una fuente de carbono. Tras lo cual, el bosque entra en un estado de colapso y luego es reemplazado por vegetación de tipo sabana ("sabanización" de la región Amazónica). Por lo tanto, la resiliencia del bosque a las presiones combinadas de la deforestación y el cambio climático es motivo de gran preocupación, ya que algunos de los principales modelos climáticos

predicen una sequía severa de la Amazonía en el siglo XXI (Betts et al., 2004; Malhi et al., 2008, 2009; Nobre y Borma, 2009).

La probabilidad de que ocurra este escenario de extinción de la selva Amazónica sigue siendo un tema de investigación abierto. El mismo es motivo de preocupación, ya que, de producirse tal escenario, implicaría una verdadera catástrofe ambiental, no solo para la cuenca del río Paraná, sino para el entero continente Sudamericano y con repercusiones en todo el planeta.

CONCLUSIONES

Se realizó el análisis de caudales del río Paraná; a escala temporal diaria, mensual, anual y plurianual, considerando la serie de años hidrológicos 1904/05 – 2021/22. Se observa un claro cambio en el régimen hidrológico del río, a partir del inicio de los años '70, caracterizado por un incremento de los caudales y volúmenes de escurrimiento en la cuenca.

Los caudales medios diarios mínimos anuales eran mucho más frecuentes antes del año hidrológico 1971/72. Antes del 1971/72 el caudal de 9000 m³/s es igualado o superado por defecto cada 1.5 años en promedio; mientras que, después del 1971/72 esto se observa cada 17 años en promedio; con la particularidad que 3 de los 4 valores mínimos de la sub-serie de 51 años se registran en los últimos tres años hidrológicos, es decir, 2019/20 (8360 m³/s), 2020/21 (7230 m³/s) y 2021/22 (6870 m³/s). Cabe señalar que, el caudal medio diario mínimo extremo más severo se produjo en el año hidrológico 1944/45 (5700 m³/s).

Lo contrario ocurre con los caudales medios diarios máximos anuales. Antes de 1971/72 el caudal de 25000 m³/s es igualado o superado por exceso cada 33.5 años en promedio; mientras que, después del 1971/72 esto se observa cada 5.1 años en promedio.

El hidrograma medio anual correspondiente a la sub-serie 1971/72-2021/22, formado por los caudales módulos mensuales QMm de la sub-serie, es definitivamente mayor y muestra menor amplitud (diferencia entre el caudal máximo y mínimo) que el de 1904/05-1970/71. El caudal módulo anual QMa es de 14168 m³/s (1904/05-1970/71) y 17493 m³/s (1971/72-2021/22), es decir, se observa un incremento de 3325 m³/s en el QMa a partir del año 1971/72.

Tal cambio en el régimen hidrológico del río se explica por diversos factores observados en la cuenca a partir de la década del '60, como los aumentos de lluvias a escala regional y la deforestación del BAAP con el consiguiente cambio del uso del suelo; que contribuyeron a generar mayores escurrimientos en la cuenca y son consistentes con el cambio observado. Por otra parte, las represas hidroeléctricas operativas en la cuenca del Alto Paraná, solo regulan el caudal, aumentando principalmente los caudales mínimos en años de lluvias muy por debajo de las medias anuales.

Las bajantes observadas en los años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22 se dan en ese contexto de incremento de caudales a partir de inicios de los años '70. Tales bajantes presentan anomalías negativas de caudal medio anual iguales a -5253 m³/s (2019/20), -7033m³/s (2020/21) y -7521m³/s (2021/22), las cuales representan las mayores anomalías negativas de caudales medios anuales observadas del río Paraná en toda la historia con registros aquí considerada. Las mismas se asocian a volúmenes de escurrimiento en la cuenca, similares a los observados en las bajantes ocurridas antes del 1971/72 en años “secos”.

Dado que los factores que contribuyeron a generar mayores volúmenes de escurrimiento en los últimos 51 años siguen actuando, o sea, la deforestación del BAAP y el cambio de uso de suelo son una realidad; la disminución observada de los caudales en los años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22, se relaciona con la sequía meteorológica persistente que afectó a la cuenca.

La sequía comenzó a mediados de 2019 y se propagó por el ciclo hidrológico afectando la humedad del suelo y la vegetación, los almacenamientos de aguas superficiales, los almacenamientos de aguas subterráneas, los

caudales y niveles hidrométricos en los ríos. La escasez de lluvias se debió a la reducción del transporte de aire cálido y húmedo desde la Amazonía, durante el pico de la temporada del Monzón Sudamericano. Esto llevó a prolongadas condiciones de sequía extrema en toda la región.

Debido a la importancia ambiental, cultural y socio-económica de la cuenca del río Paraná para todos los habitantes de los países que la integran, estas anomalías negativas de caudales observadas en las últimas bajantes, encienden una alarma e introducen una incertidumbre muy fuerte sobre la futura evolución de los volúmenes de escurrimiento, caudales y niveles hidrométricos en el sistema fluvial del río Paraná.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la UNR por el apoyo brindado a través de los proyectos: PID 80020190300073UR y PID 80020190300002UR.

REFERENCIAS

- Becker, E. (14 de julio de 2022). July 2022 La Niña update: comic timing. *ENSO Blog* en NOAA Climate.gov. <https://www.climate.gov/news-features/blogs/july-2022-la-niña-update-comic-timing>
- Berbery, E. H. y Barros, V. R. (2002). The hydrological cycle of the La Plata Basin in South America. *Journal of Hydrometrology* 3, 630–645.
- Berbery, E. H., Doyle, M. y Barros, V. R. (2006). Tendencias regionales en la precipitación. En: Barros, V., Clarke, R. y Silva Dias, P. (Eds.), *El Cambio climático en la cuenca del Plata*. Buenos Aires, CIMA/CONICET, pp. 67–79.
- Betts, R., Cox, P. M., Collins, M., Arris, P. P., Huntingford, C. y Jones, C. D. (2004). The role of ecosystem-atmosphere interactions in simulated Amazonian precipitation decrease and forest die back under global climate warming. *Theoretical and Applied Climatology* 78, 157–166.
- Boulanger, J. P., Leloup, J., Penalba, O. C., Rusticucci, M. M., Lafon, F. y Vargas, W. M. (2005). Observed precipitation in the Paraná-Plata hydrological basin: long-term trends, extreme conditions and ENSO teleconnections. *Climate Dynamics* 24, 393–413.
- Carvalho, L. M. V., Jones, C., Silva, A. E., Liebmann, B. y Silva Dias, P. L. (2011). The South American Monsoon System and the 1970s climate transition. *Int. J. Climatol.* 31, 1248–1256. DOI:10.1002/joc.2147.
- Cavalcanti, I. F. A., Carril, A. F., Penalba, O. C., Grimm, A. M., Menéndez, C. G., Sanchez, E., Cherchi, A., Sörensson, A., Robledo, F., Rivera, J., Pántano, V., Bettolli, L. M., Zaninelli, P., Zamboni, L., Tedeschi, R. G., Dominguez, M., Ruscica, R. y Flach, R. (2015). Precipitation extremes over La Plata Basin—Review and new results from observations and climate simulations. *Journal of Hydrology* 523, 211–230.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill Interamericana S.A., Bogotá, Colombia. ISBN 958-600-171-7.
- Collischonn, W., Tucci, C. E. M. y Clarke, R. T. (2001). Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay: part of a wider phenomenon of climate change? *Journal of Hydrology* 245, 218–238.
- Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata. (2017). *Ecosistemas acuáticos en la Cuenca del Plata*. Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata – Ira Ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Libro digital, PDF. https://cicplata.org/wp-content/uploads/2017/04/ecosistemas_acuaticos_en_la_cuenca_del_plata_20170424.pdf
- Cox, P., Betts, R., Collins, M., Harris, P., Huntingford, C. y Jones, C. (2004). Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21th century. *Theoretical and Applied Climatology* 78, 137–156.
- Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur. (s.f.). *Sistemas de Información sobre Sequías para el Sur de Sudamérica*. Organización Meteorológica Mundial. <https://www.crc-sas.org/es/>
- Di Bitetti, M. S., Placci, G. y Dietz, L. A. (2003). *Una Visión de Biodiversidad para la Ecorregión del Bosque Atlántico del Alto Paraná: Diseño de un Paisaje para la Conservación de la Biodiversidad y Prioridades para las Acciones de Conservación*. Washington, D.C., World Wildlife Fund.

- Dirección Nacional de Vías Navegables-Distrito Paraná Inferior.(2022). *Datos de niveles hidrométricos diarios del río Paraná en Puerto San Martín (km 448)*. Dirección Nacional de Vías Navegables-Distrito Paraná Inferior, Argentina.
- Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. (1989). *Estudio hidráulico y morfológico del tramo km 410-440 del Río Paraná*. Departamento de Hidráulica e Ing. Sanitaria. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA) – Universidad Nacional de Rosario.
- Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. (2004). *Estudios Hidráulicos y Morfológicos Zona Isla de La Invernada, Río Paraná*. Informe final. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) – Universidad Nacional del Litoral, Diciembre 2004.
- Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. (2006). *Estudios Complementarios Hidráulicos y Morfológicos de la Zona de la Isla de La Invernada*. Informe final. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) – Universidad Nacional del Litoral, Julio 2006.
- Global Drought Observatory. (2021). *GDO Analytical report. Drought in centre-south Brazil – June 2021*. JRC Global Drought Observatory (GDO) of the Copernicus Emergency Management Service (CEMS). <https://edo.jrc.ec.europa.eu/gdo/php/index.php?id=2050>
- González, M. P. (2023). *Sequia en Brasil*. CRC-SAS. Centro regional del Clima para el Sur de América del Sur. SISSA-Sistema de Información de Sequías para el Sur de Sudamérica. <https://sisssa.crc-sas.org>.
- Grimm, A. M., Vera, C. y Mechoso, R. (2005). The South American Monsoon System. En: *The Global Monsoon System: Research and Forecast*, Chang, C. P., Wang, B. y Lau, N. C. G. (eds), WMO/TD 1266 – TMRP: pp. 542.
- Haylock, M. R., Peterson, T. C., Alves, L. M., Ambrizzi, T., Anunciação, Y. M., T., Baez, J., Barros, V. R., Berlato, M. A., Bidegain, M., Coronel, G., Corradi, V., Garcia, V. J., Grimm, A. M., Karoly, D., Marengo, J. A., Marino, M. B., Moncunill, D. F., Nechet, D., Quintana, J., Rebello, E., Rusticucci, M., Santos, J. L., Trebejo, I. y Vincent, L. A. (2006). Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature. *Journal of Climate* 19, 1490–1512.
- Instituto Nacional de Meteorologia de Brasil (2021). *Prognóstico climático 2021. Anexo I. Variação climática da chuva na bacia do Rio Paraná – Crise Hídrica*. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de Brasil.
- Jacques-Coper, M. y Garreaud, R. D. (2015). Characterization of the 1970s climate shift in South America. *International Journal of Climatology* 35, 2164–2179.
- Liebmann, B., Vera, C. S., Carvalho, L. M. V., Camilloni, I., Hoerling, M. P., Barros, V. R., Baez, J. y Bidegain, M. (2004). An observed trend in central South American precipitation. *Journal of Climate* 17, 4357–4367.
- Machado Rocha, V., Teixeira da Silva, P. R., Brito Gomes, W., Alves Vergasta, L. y Jardine, A. (2018). Precipitation Recycling in the Amazon Basin: A Study Using the ECMWF Era-Interim Reanalysis Dataset. *Revista do Departamento de Geografia* 35, 71-82. Universidade de São Paulo. Brasil.
- Malhi, Y., Aragão, L., Galbraith, D., Huntingford, C., Fisher, R., Zelazowski, P., Sitch, S., McSweeney, C. y Meir, P. (2009). Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. *PNAS* 106(49): pp. 20610–20615, DOI:10.1073/pnas.0804619106
- Malhi, Y., Roberts, J. T. R., Betts, R. A., Killeen, T. J., Li, W. y Nobre, C. A. (2008). Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science*, 319, 169–172, DOI:10.1126/science.1146961.
- Marengo, J. A., Ambrizzi, T. y Soares, W. R. (2009). Jato de BaixosNiveisao longo dos Andes. En: Cavalcanti, I. F. A.; Ferreira, N. J.; Silva, M. G. A. J. da; Dias, M. A. F. da Silva (Orgs) *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, pp. 169-180.
- Marengo, J. A., Liebmann, B., Grimm, A. M., Misra, V., Silva Dias, P. L., Cavalcanti I. F. A., Carvalho, L. M. V., Berbery, E. H., Ambrizzi T., Vera, C. S., Saulo, A. C., Nogue-Paegle, J., Zipser, E., Seth A. y Alves, L. M. (2010). Review recent developments on the South American monsoon system. *International Journal of Climatology* 32; 1-21.
- Marengo, J. A. (2006). On the Hydrological Cycle of the Amazon Basin: A historical review and current State-of-the-art. *Revista Brasileira de Meteorologia* 21, 3a, 1-19.
- Marengo, J. A., Cunha, A. P., Cuartas, L. A., Deusdará Leal, K. R., Broedel, E., Seluchi, M. E., Michelin, C. M., De Praga Baião, C. F., Chuchón Ángulo, E. y Almeida, E. K. (2021a). Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. *Frontiers in Water* 3, 13.

- Marengo, J. A., Ambrizzi, T., Barreto, N., Cunha, A. P., Ramos, A. M., Skansi, M., Carpio, J. M. y Salinas, R. (2021b). The Heat Wave of October 2020 in Central South America. *International Journal of Climatology* 42, 2281–2298 (2022).
- Mechoso, C. R., Robertson, A. W., Ropelewsky, C. F. y Grimm, A. M. (2005). The American monsoon systems: An introduction. En: Chang, C. P.; Wang, B.; Lau, N. C. G. (Eds.). *The global monsoon system: research and forecast*. Ginebra: World Meteorological Organization, WMO/TD, n. 1266 (TMRP Rep. n. 70), pp. 197-206.
- Misra, V. (2008). Coupled air, sea, and land interactions of the South American Monsoon. *Journal of Climate* 21: 6389–6403.
- Misra, V., Dirmeyer, P. A., Kirtman, B. P., Juang, H. M. y Kanamitsu, M. (2002). Regional simulation of inter-annual variability over South America. *Journal of Geophysical Research* 107, 8036, DOI:10.1029/2001JD900216.
- Naumann, G., Podesta, G., Marengo, J., Luterbacher, J., Bavera, D., Arias Muñoz, C., Barbosa, P., Cammalleri, C., Chamorro, L., Cuartas, A., de Jager, A., Escobar, C., Hidalgo, C., Leal de Moraes, O., McCormick, N., Maetens, W., Magni, D., Masante, D., Mazzeschi, M., Seluchi, M., Skansi, M. M., Spinoni, J. y Toreti, A. (2021). *The 2019-2021 extreme drought episode in La Plata Basin*. EUR 30833 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021, ISBN 978-92-76-41898-6 (online), DOI:10.2760/773 (online), JRC126508.
- Naumann, G., Podesta, G., Marengo, J., Luterbacher, J., Bavera, D., Acosta Navarro, J., Arias Muñoz, C., Barbosa, P., Cammalleri, C., Cuartas, A., de Estrada, M., de Felice, M., de Jager, A., Escobar, C., Fioravanti, G., Giordano Harst Essenfelder, A. L., Hidalgo, C., Leal de Moraes, O., Maetens, W., Magni, D., Masante, D., Mazzeschi, M., Osman, M., Rossi, L., Seluchi, M., de los Milagros Skansi, M., Spennemann, P., Spinoni, J., Toreti, A y Vera, C. (2022). *Extreme and long-term drought in the La Plata Basin: event evolution and impact assessment until September 2022*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, DOI:10.2760/62557, JRC132245.
- Nobre, C. A. y Borma, L. S. (2009). Tipping points for the Amazon forest. *Current Opinion in Environment Sustainability* 1, 28–36.
- Nobre, P., Malagutti, M., Urbano, D. F., de Almeida, R. A. F. y Giarolla, E. (2009). Amazon Deforestation and Climate Change in a Coupled Model Simulation. *Journal of Climate* 22, 5686–5697.
- Oliveira, V. A., de Mello, C. R., de Viola, M. R. y Srinivasan, R. (2018). Land-use change impacts on the hydrology of the upper Grande river basin, Brazil. *Cerne* 24, 334–343.
- Salazar, L. F., Nobre, C. A. y Oyama, M. D. (2007). Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. *Geophysical Research Letters* 34: L09708.
- Sampaio, G., Nobre, C. A., Costa, M. H., Satyamurty, P., Soares-Filho, B. S. y Cardoso, M. (2007). Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophysical Research Letters* 34: L17709. DOI:10.1029/2007GL030612.
- Santos, D. F. y dos Reboita, M. S. (2018). Jatos de baixos níveis a leste dos Andes: Comparação entre duas reanálises. *Revista Brasileira de Climatologia*, 22, 423-445.
- Saurral, R. I., Barros V. R. y Lettenmaier, D. P. (2008). Land use impact on the Uruguay River discharge. *Geophysical Research Letters* 35, L12401. DOI:10.1029/2008GL033707
- Seager, R., Naik, N., Baethgen, W., Robertson, A., Kushnir, Y., Nakamura, J. y Jurburg, S. (2010). Tropical Oceanic Causes of Interannual to Multidecadal Precipitation Variability in Southeast South America over the Past Century. *Journal of Climate* 23, 5517–5539. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3578.1>
- Silva, G. A. M., Ambrizzi, T. y Marengo, J. A. (2009). Observational evidences on the modulation of the South American Low Level Jet east of the Andes according the ENSO variability. *Annales Geophysicae*, 27, 645–657, 2009.
- Sistema Nacional de Información Hídrica. (s.f.). *Base de Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica, Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica, Ministerio de Obras Públicas*. <https://snih.hidricosargentina.gov.ar>
- Sitch, S., Huntingford, C., Gedney, N., Levy, P. E., Lomas, M., Piao, S. L., Betts, R., Ciais, P., Cox, P., Friedlingstein, P., Jones, C. D., Prentice, I. C. y Woodward, F. I. (2008). Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs). *Global Change Biology* 14, 2015–2039.

- Stevaux, J. C., Martins, D. P. y Meurer, M. (2007). *Changes in the Paraná River Channel introduced by the Porto Primavera Dam, Brazil*. Workshop on Morphodynamic Processes in Large Lowland Rivers. 12-16 Nov. 2007, Santa Fe, Argentina.
- Tucci, C. E. (2003). Flood flow forecasting. *Bulletin of the World Meteorological Organization* 52, 46–52.
- World Meteorological Organization. (2021). *State of the Climate in Latin America and the Caribbean 2020*. World Meteorological Organization WMO-No. 1272.

Trabajo recibido el 11/08/2023 y aceptado por el Consejo Editorial para su publicación el 27/09/2023.

COMO CITAR

Basile, P. A. y Riccardi, G. A. (2023). Análisis de caudales del río Paraná y contextualización de las bajantes en los años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22. *Cuadernos del CURIHAM, Edición Especial (2023): Bajante del río Paraná*. e01. <https://doi.org/10.35305/curiham.ed23.e01>

ROLES DE AUTORÍA

Nombre y Apellido de Autores	Colaboración Académica													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Pedro Abel Basile	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Gerardo Adrián Riccardi	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

1. Administración del proyecto; 2. Adquisición de fondos; 3. Análisis formal; 4. Conceptualización; 5. Curaduría de datos; 6. Escritura - revisión y edición; 7. Investigación; 8. Metodología; 9. Recursos; 10. Redacción - borrador original; 11. Software; 12. Supervisión; 13. Validación; 14. Visualización.

LICENCIA

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



Este trabajo se enmarca dentro de la EDICIÓN ESPECIAL (2023): Bajante del río Paraná de la revista Cuadernos del CURIHAM

AGRONEGOCIO Y CRISIS HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO PARANÁ

AGRIBUSINESS AND WATER CRISIS IN THE PARANÁ RIVER BASIN

Álvaro Álvarez

Instituto de Geografía, Historia y Ciencias Sociales (CONICET- UNCPBA).
Centro de Investigaciones Geográficas (FCH-UNCPBA). Tandil, Argentina.
e-mail: aalvarez@fch.unicen.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3648-357X>

RESUMEN

En las últimas tres décadas se dio un proceso de expansión persistente del agronegocio y los monocultivos sobre la cuenca del río Paraná. Dicha expansión obedeció a un aumento de la demanda internacional de commodities lo que impulsó la denominada pampeanización del noreste argentino. Este fenómeno trajo aparejados dos procesos entrelazados: la construcción de una hidrovía sobre el río Paraná que permite la circulación y exportación de la producción agraria desde los principales puertos, y la expansión de los monocultivos sobre bosques nativos y humedales. La triada: agronegocios, deforestación e hidrovía, constituyen las dimensiones más importantes de análisis en esta investigación, que desde una mirada sistémica y compleja busca poner en contexto la crisis hídrica que atraviesa la región en general, y la bajante extrema del río Paraná en particular, para desentramar sus principales causas.

Palabras clave: Agronegocio, Hidrovía, Deforestación, Crisis hídrica.

ABSTRACT

In the last three decades there has been a process of persistent expansion of agribusiness and monocultures in the Paraná River basin. This expansion was due to an increase in the international demand for commodities, which drove the so-called "pampeanization" of northeastern Argentina. This phenomenon brought about two intertwined processes: the construction of a waterway on the Paraná River that allows the circulation and export of agricultural production from the main ports, and the expansion of monocultures on native forests and wetlands. The triad: agribusiness, waterway and deforestation, constitute the most important dimensions of analysis in this research, which from a systemic and complex viewpoint seeks to put into context the water crisis that the region is going through in general and the extreme low water level of the Paraná River in particular, in order to unravel its main causes.

Keywords: Agribusiness, Waterway, Deforestation, Water crisis.

INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo intenta ser un aporte a la comprensión de un fenómeno ambiental complejo, cuya expresión más evidente entre los años 2019 y 2022 fue la bajante extraordinaria del río Paraná, que se manifestó como un emergente de una crisis general, multidimensional y sistémica, que altera los equilibrios ecológicos de toda la cuenca. En tal sentido, es necesario afirmar que para estudiar la bajante del río, aspecto central de este trabajo, es oportuno comenzar situando al río en su contexto territorial más amplio: la cuenca del Plata.

La cuenca del Plata está conformada por los ríos Paraguay, Paraná, Uruguay y del Plata, por sus dimensiones constituye uno de los sistemas fluviales más importantes de la región y del mundo. Su extensión suma una superficie de 3200000 km², lo que constituye aproximadamente el 20% del territorio de Suramérica. Pese a la diversidad de usos que se desarrollan sobre esta hidrorregión, en los últimos años la expansión del agronegocio y la transformación de los ríos Paraguay y Paraná en una vía fluvial para las producciones primarizadas de la región es el que cobra, en el debate público y en los estudios académicos, mayor notoriedad (Álvarez, 2021).

Suscita especial atención en este trabajo las transformaciones hídricas acontecidas en los últimos años sobre la cuenca del Paraná -subcuenca de la cuenca del Plata-. Dividida en alto, medio y bajo Paraná, es la más importante de la Argentina con una superficie aproximada de 2700000 km² y un importante caudal. El Paraná tiene un caudal promedio de 17300 m³/s, de acuerdo a datos presentados por la Comisión Mixta argentino-paraguaya del Río Paraná (s.f.), que puede alcanzar un máximo de 65000 m³/s debido a la influencia de las lluvias sobre su nacimiento, su recorrido y el de sus afluentes. Presenta su punto máximo entre febrero y marzo y el mínimo entre agosto y septiembre. Es decir, el régimen del río siempre se caracteriza por ciclos y alternancias de crecidas y bajantes.

Según datos del Instituto Nacional del Agua (INA, s.f.) durante la bajante extraordinaria ocurrida en el período de los años 2019 y 2022 el caudal del río cayó hasta los 6400 m³/s, apenas por encima del valor mínimo histórico de 5800 m³/s, registrado en el año 1944, lo que demuestra la magnitud de la bajante del Paraná como un indicador de una crisis hídrica más general que afectó a la totalidad de la cuenca.

El Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata (CIC), cuyo primer estatuto fue aprobado por la II Reunión de Cancilleres celebrada en Santa Cruz de la Sierra en 1968, es el órgano encargado de coordinar las políticas gubernamentales sobre la Cuenca. Dicho comité geo-referencia a la Cuenca del Plata y sus subcuencas de la siguiente manera (Figura 1).

OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es hacer un aporte a la comprensión de las causas de la bajante del río Paraná acontecida entre el año 2019 y 2022.

Partiendo de la idea de la multicausalidad de las problemáticas ambientales es posible caracterizar dos tipos de incidencias: las que tienen que ver con comportamientos naturales y estructurales del orden climático, como el fenómeno de “La Niña”¹. Y las de origen antrópico, sobre las que se trabajará en esta investigación, como las modificaciones en los usos del suelo como consecuencia de la expansión de la agricultura y sus efectos asociados: la deforestación, la eliminación de bajos naturales, quemas e incendios, canalizaciones, entre otras. Para hacerlo recurriremos a trabajos preexistentes, fuentes documentales, informes técnicos y

¹ El fenómeno de la Niña tiene registros históricos desde hace miles de años y su desarrollo perturba las temperaturas y los ciclos de precipitaciones en diversas partes del mundo. Desde el 2019 estas alteraciones fueron muy importantes en la región del Mato Grosso do Sul, en las nacientes de los ríos Paraná y Paraguay, afectando indudablemente la cuenca de ambos ríos.

diversos trabajos de campo realizado en el contexto de la bajante extrema del Paraná desde el año 2019.

Partimos en tal sentido, recuperando los aportes de García (2006) al estudio de las problemáticas ambientales, de una premisa fundamental: no es posible analizar dichas problemáticas como desastres naturales, sino más bien como problemáticas emergentes de la antropización, en este caso del proceso de especialización primario exportadora de los territorios, donde los actores económicos concentrados del agronegocio juegan un rol central.



Figura 1. Cuenca del Plata y subcuencas (Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata, 2017).

METODOLOGÍA

El territorio y los sistemas complejos

El desarrollo de un trabajo de investigación que pretende dar cuenta del impacto ambiental del agronegocio en la producción del territorio, en este caso manifestado en una crisis hídrica, nos exige

recuperar algunas de las discusiones que se han dado en el marco de los estudios geográficos en particular y de las ciencias sociales en general, en relación al vínculo entre lo local y lo global, entre el lugar y la totalidad, entendiendo que la producción del territorio en el capitalismo periférico está condicionada por lógicas y demandas globales.

Santos (1996) y Silveira (1995) afirman que el lugar no es la parte y el mundo la totalidad. El lugar no es un fragmento sino la propia totalidad que a través de los objetos, las acciones y las normas, se afirma y se niega modelando un subespacio del espacio global (Silveira, 1995). En este sentido Silveira plantea que: “el pensamiento dialéctico niega la existencia empírica del fragmento como independiente, como parte aislada, pero reconoce el lugar empíricamente como funcionalización del todo. Y hoy, esa totalidad se empiriza y se torna más concreta” (Silveira, 1995, p. 57). La bajante extrema del Paraná en los últimos años expresa esa empirización de la totalidad, a la que se refiere la autora. En una etapa de crisis ambiental global como la que desarrolla en las últimas décadas y de aumento de la demanda de bienes primarios en la región, con una fuerte presión sobre la naturaleza, la sequía materializa en el lugar aspectos de una totalidad en crisis.

Hay una totalidad compleja que explica el origen de la crisis hídrica y en esa complejidad podemos entender procesos que se interdefinen, no son unívocos e implican conflictos. En tal sentido García (2006) sostiene que estos problemas y conflictos en los cuales están involucrados el medio físico biológico, la producción, la tecnología, la organización social y la economía “se caracterizan por la confluencia de múltiples procesos cuyas interrelaciones constituyen una estructura de un sistema que funciona como una totalidad organizada a la cual llamamos sistema complejo” (García, 2006, p. 87). Dicho abordaje supone también el reconocimiento de la existencia de procesos de diferentes niveles, en distintas escalas de análisis, y en las que actúan múltiples actores (Álvarez, 2021). Según el autor, las características determinantes de los sistemas complejos son la heterogeneidad, la interdefinibilidad y la mutua dependencia de los elementos que los conforman.

El presente trabajo se propone una aproximación a la complejidad a partir del análisis de las formas de uso y apropiación de un territorio estratégico en América del Sur, la cuenca del río Paraná, puntualizando en los efectos hídricos de las intervenciones realizadas en las últimas décadas sobre ese espacio geográfico.

En este proceso de apropiación del territorio se establecen y desarrollan formas de ejercicio del poder generalmente asimétricas y desiguales. Manzanal (2014) afirma al respecto que “la producción de los territorios se dinamiza con efectos diferenciales sobre las poblaciones que los habitan y sobre las formas de ejercicio del poder y de la dominación de los mismos” (Manzanal, 2014, p. 26). Para la autora recién cuando el territorio aparezca claramente asociado con el ejercicio del poder expresará su esencia más sustantiva, porque “la producción social del espacio no es otra cosa que el resultado del ejercicio de relaciones de poder” (Manzanal, 2014, p. 27).

Para Porto Gonçalves (2003), ese ejercicio del poder sobre el espacio geográfico está vinculado a las diferentes formas de apropiación del mismo. Afirma que la materialidad del espacio geográfico es siempre significada y resignificada, puesto que es siempre apropiada. Toda sociedad al constituirse en cuanto tal constituye un espacio geográfico. Como una relación social el espacio geográfico es también una relación natural entre sociedad y naturaleza. La sociedad mientras se produce a si misma transforma y se apropia de la naturaleza (Porto Gonçalves, 2003).

Nos interesa a los fines de este trabajo, para poder dar cuenta de las causas que inciden en la crisis hídrica del río Paraná, abordar tres procesos entrelazados e interdependientes: la expansión del agronegocio en la cuenca -puntualizando en el monocultivo de soja-, la deforestación e incendios intencionales sobre los bosques nativos y la construcción de una hidrovía sobre el río Paraná. La siguiente figura gráfica esos procesos entrelazados, de manera interdependiente, en la problemática de análisis (Figura 2).



Figura 2. Procesos interdependientes en la crisis hídrica en la cuenca del río Paraná.

El agronegocio y los monocultivos sobre la cuenca del río Paraná

Dos dinámicas interdependientes, vinculadas a transformaciones técnicas en materia de ingeniería de transporte y logística, ingeniería hídrica e ingeniería genética, contribuyeron a la expansión de los monocultivos transgénicos sobre la cuenca del río Paraná. Por un lado, se reconvirtieron los macrosistemas técnicos, fundamentalmente en el transporte, emplazando sobre el río una hidrografía con múltiples articulaciones portuarias y logísticas, por donde circulan 5000 buques por año (Álvarez, 2021). Por otro lado, y paralelamente, se profundizó el desarrollo de cultivos transgénicos -con organismos genéticamente modificados- fundamentalmente soja, a partir de un aumento de la demanda internacional de materias primas, traccionado fundamentalmente por el consumo asiático, como plantea Méndez:

La “sojización” del campo argentino ha sido imparable. Si en la temporada 1995-1996 el área cultivada era de seis millones de hectáreas, para 2014-2015 la cifra se había multiplicado por tres. En el mismo período de tiempo, la producción pasó de 12.4 millones de toneladas a 61.3 millones de toneladas de soja, convirtiendo a Argentina en el tercer mayor productor del mundo, sólo por detrás de Estados Unidos (106 millones) y Brasil (93 millones). Hoy la soja es la reina de los granos y cereales argentinos (supone más de la mitad del total) y ha ido sustituyendo los terrenos que antes se dedicaban al maíz, el trigo y la ganadería. Uno de los protagonistas detrás de esta transformación ha sido China. El gigante asiático es con mucha diferencia el mayor comprador de esta leguminosa, con hasta el 65% de las importaciones mundiales. (Méndez, 06/09/2019)

Si analizamos la producción de las provincias que conforman la cuenca del Paraná veremos un crecimiento exponencial de la superficie sembrada con monocultivos de soja en los últimos 30 años, explicando el grueso de la producción sojera a nivel nacional. Hacemos una breve descripción de este crecimiento según los datos de estimaciones agropecuarias del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (s.f.).

La provincia de Buenos Aires es la que mayor tierra productiva destina a la soja y pasó de 1213300 ha de superficie sembrada en el año 1991 a un pico en la producción en el año 2014/2015 de 6823729 ha, para luego establecerse en el 2021 con 5036304 ha. Siendo además la mayor productora con 13537109 toneladas. Santa Fe también experimentó un notable crecimiento, de 1991000 ha en el año 1991 a 3038334 ha treinta años después. Siendo la tercera productora en toneladas con 8272320.

Entre Ríos, pasó de ser una provincia con una producción sojera insignificante en 1991, con 54600 ha sembradas, a 1084100 ha en el 2021 con un pico de 1564990 ha en la cosecha record de 2014/2015. La provincia se ubica en el cuarto lugar en producción nacional con 2565755 toneladas.

Chaco, la sexta productora nacional, pasó de 70000 ha en 1991 a 646350 ha en el 2021. Corrientes, una provincia con escasa producción sojera, pasó de 2300 ha en 1991 a 5000 ha en el 2021 con un pico de 25000 ha en el 2013/2014. Por último Misiones que sólo tenía 300 ha con soja en 1991 pasó a destinar 3500 ha en el 2021, una provincia con un incipiente desarrollo en la producción de esa oleaginosa, pero cuyo territorio está marcado por el monocultivo forestal, proceso que también es posible de observar en Corrientes.

Esta expansión de la superficie destinada para la producción sojera en las provincias de la cuenca del Paraná ha llevado a la región a ser una de las tres mayores productoras de poroto de soja a nivel mundial, detrás de EEUU y Brasil, y liderar el ranking en la producción de aceite de soja. ¿Qué impactos hídricos ha generado esta creciente expansión de la frontera sojera sobre la cuenca del Paraná?

Los impactos del agronegocio sobre las fuentes de agua son diversos. La producción de alimentos demanda consumo de agua, lo cual convierte a este recurso en el principal componente en la producción de cualquier bien (Pengue, 2006). En la actualidad a nivel mundial, se ha producido un incremento en el consumo de agua dulce, el Banco Mundial (2023) estima que actualmente la agricultura representa el 70% del agua dulce que se extrae en el mundo y una proporción aún mayor del “uso consuntivo del agua”, debido a la evapotranspiración de los cultivos.

Pengue (2006) nos advierte que para producir 1 kg de granos, se necesitan entre 1000 y 2000 kg de agua, lo que equivale alrededor de 1 a 2 m³ de agua. El establecimiento de un comercio internacional marcadamente desigual donde los países periféricos se establecieron como abastecedores de bienes primarios y alimentos para los centros industrializados implica una feroz transferencia de bienes comunes donde los recursos hídricos ocupan un lugar preponderante. El agua “virtual” que circula en el comercio internacional se sustenta en un aumento indefinido del consumo en los centros y un incremento del estrés hídrico en las periferias. Cómo advierte Pengue:

La circulación de agua virtual ha aumentado regularmente con las exportaciones de los países agrícolas durante los últimos cuarenta años. Se estima que aproximadamente el 15% del agua utilizada en el mundo se destina a la exportación en forma de agua virtual (Hoekstra y Hung, 2002). El 67% de la circulación de agua virtual está relacionado con el comercio internacional de cultivos. En el último quinquenio del siglo XX el trigo y la soja representaron ambos el 47% del total de estas salidas. Ni en los cultivos de alto o bajo valor en el comercio internacional, ni las comunidades finales que los consumen, reconocen en sus cuentas aún, este importante uso de recursos (Chapagain y Hoekstra, 2003). Es evidente que el comercio del agua virtual genera un importante ahorro de agua en los países importadores y un posible deterioro en los exportadores, que hacen un uso intensivo o a nivel de la sobreexplotación. (Pengue, 2006, p. 2-3)

En la actualidad la soja representa más del 60% de la superficie cultivada en Argentina. La expansión del cultivo ha tenido distintos impactos sobre lagunas, arroyos y otros humedales. Drenajes y canalizaciones, endicamientos, alteos, terraplenes, infraestructura para riego², son intervenciones más difundidas para la apropiación de las fuentes de agua en función de las necesidades de producción. Todo esto sumado al uso de agroquímicos, constituyen algunas de las prácticas que afectan de manera significativa los cursos y reservas de agua (Andelman et al., 2019).

La eutroficación y la contaminación del agua con agroquímicos y fertilizantes es una problemática difundida en la cuenca del Paraná. Argentina es uno de los países del mundo con más uso de agrotóxicos por hectárea y en la actualidad supera los 600 millones de kg/l anuales de tóxicos empleados en la producción agrícola. La cuenca del Paraná, en este sentido, detenta el récord mundial de agroquímicos en peces. En un estudio realizado por investigadores del CONICET y la Universidad Nacional del Litoral (UNL) sobre los sábalos

² Para producir 1 Tn de grano se necesita una lámina de agua 125 – 160 mm dependiendo de los rendimientos zonales y de cuestiones de manejo. Por ello cuando la suma del contenido de humedad del suelo al momento de la siembra más las precipitaciones ocurridas desde mediados de noviembre al momento de la cosecha no alcanza ese valor se debe suplementar con riego (Castiglione, s.f.).

que habitan el tramo inferior del río Salado en la provincia de Santa Fe -se relevaron más de 100 km de río-, se registraron las concentraciones más altas a nivel mundial de nueve biocidas, encontrando insecticidas, herbicidas y fungicidas de uso masivo en cultivos transgénicos, principalmente de soja, maíz y algodón (Lajmanovich et al., 2023).

Por último, es necesario mencionar que esos agrotóxicos y la siembra directa impermeabilizan el suelo de la cuenca, inhibiendo la absorción del agua en los humedales, acelerando el ritmo de bajadas del agua y generando alteraciones ecosistémicas que van en detrimento de la cantidad y calidad de los recursos hídricos.

Deforestación e incendios intencionales

El desarrollo de un nuevo ciclo de primarización económica en América Latina, impulsado por un aumento creciente de la demanda internacional de materias primas, generó y genera transformaciones territoriales diversas. La construcción de un complejo entramado de obras de infraestructura, materializado desde comienzos del siglo XXI en proyectos como la Iniciativa para la Integración en Infraestructura Regional Suramericana (Álvarez, 2022) posibilitó dos décadas ininterrumpidas de crecimiento de modelos extractivistas hacia territorios antes no valorados por el capital. Esto se vincula con lo que Harvey (2005) conceptualizó como una dinámica de acumulación por despojo, el capital se mueve de un territorio a otro -intentado escapar a la crisis de sobreacumulación con su consecuente devaluación-, en busca de rentabilidad y expansión productiva, vulnerando los ritmos de la naturaleza y formas preexistentes de uso del espacio geográfico.

Esta espacialización del agronegocio significó una degradación del medio natural y una destrucción acelerada de los bosques nativos en toda la cuenca del Paraná. La pretensión Argentina de llegar a 100 mil millones de dólares anuales de exportación (Masso, 01/03/2023), en el marco del Plan Federal Agroindustrial 2023/2033, en producciones agroindustriales, forestales y pesqueras genera un nuevo escenario de presión sobre los territorios de la cuenca, avanzando sobre bosques nativos y humedales como es el caso de los bajos submeridionales (8 millones de hectáreas en las provincias de Santiago del Estero, Chaco y Santa Fe), comprometiendo aún más el equilibrio ecológico de la cuenca y alterando el ciclo hídrico (Castilla y Álvarez, 09/09/2023).

Para poner en contexto la problemática es necesario decir que en los últimos 20 años se deforestaron 15 millones de hectáreas en los países que integran la cuenca del Paraná para el avance de la agroganadería (Ortiz et al., 26/10/2022). Hasta principios de los años '90, previa expansión de la soja en la cuenca, las tierras en las que hoy se ven monocultivos eran humedales, selvas, bosques y cerrados que cumplían una función ecosistémica de equilibrio, almacenaban la humedad, regulaban el ciclo de lluvia y el caudal de los ríos, lagos, lagunas, esteros y arroyos. La alteración, en muchos casos irreversible, de ese equilibrio natural fue en detrimento de esas funciones reguladoras y es una de las causas fundamentales de la actual crisis hídrica.

Según cálculos hechos a través de las imágenes satelitales, entre 2000 y 2021 se perdieron cerca de 15 millones de hectáreas de árboles, plantas y arbustos de diversas especies y formas, una disminución del 19%. De ellas, solo 469000 hectáreas se perdieron por incendios forestales, según datos de Global Forest Watch (s.f.). El resto es atribuible principalmente al incremento de la producción de cinco materias primas muy apetecidas por el mercado global: carne vacuna, soja, maíz, trigo y caña de azúcar (Ortiz et al., 26/10/2022).

Es Argentina el país más deforestado de la cuenca del Paraná en los últimos 20 años. Según el último monitoreo de la superficie de bosque nativo en la Argentina, con datos de 2021, ese año se alcanzaron las 205492 hectáreas deforestadas. El 33% de esta pérdida se debió a los incendios forestales. El año anterior, en 2020, fueron 333222 las hectáreas deforestadas y el 54% de estas pérdidas fue a causa de los incendios sobre bosques nativos. La ONG Greenpeace (Castro, 22/02/2023) denunció en junio de 2023 que detectó, mediante el uso de imágenes de satélite, que durante el primer semestre del año 51600 hectáreas del norte argentino fueron deforestadas, un 25% más que en el mismo período de 2022. Según la organización, la situación más grave se da en las norteñas provincias de Chaco y Santiago del Estero, donde la mayoría de los desmontes son ilegales.

En el acumulado de 20 años Argentina perdió 7.62 millones de hectáreas, en un país que tiene el 37.5% de la superficie de la cuenca baja del Paraná. Esto, sumado a la deforestación en el alto Paraná y las afecciones sobre la selva Amazónica, ponen en riesgo la reproducción de ciclo hidrológico dado que la pérdida de la cobertura forestal, al ritmo del avance de la frontera del agronegocio, interrumpe la evaporación del agua del suelo y la transpiración de las plantas que vuelven a la atmósfera para luego caer como lluvia. La deforestación hizo desaparecer también a los ríos voladores, contenedores de agua que retroalimenta el cauce del Paraná.

La Hidrovía Paraguay-Paraná

El proceso de pampeanización (traslado de una serie de actividades productivas propias del bioma de pampa húmeda a otros territorios modificando fuertemente los ecosistemas) del noroeste y noreste argentino tuvo un gran impacto, en múltiples dimensiones, sobre la espacialización de la cuenca del Paraná. Se dio un proceso de transnacionalización de las actividades económicas que se fueron imponiendo, sobre todo las agroexportadoras, lo que llevó aparejada la concentración en la tenencia y usos de la tierra. Esto fue favorecido por políticas neoliberales de desregulación y liberalización de los últimos cincuenta años.

Ante el desmembramiento de los mecanismos de intervención estatal sobre la actividad económica, iniciados con las dictaduras militares y profundizados en los años '90, Rofman (1993) argumenta que “la formación de los precios quedó totalmente reservada a las transacciones dentro de un mercado donde los agentes oligopsónicos o monopsónicos puján, en condiciones muy favorables, con muy numerosos y dispersos vendedores de su producción agrícola o agroindustrial” (p. 170). Esta modificación en las políticas de Estado generó en la década de los '90 la desaparición de más de 160000 productores agrícolas, de los cuales el 65% eran “extrapampeanos” (Lapolla, 23/06/2005).

La citada expansión del agronegocio fue transformando al río Paraná paulatinamente en una hidrovía. En la medida en que los monocultivos se expandían creció también la demanda de transporte y la exigencia de reducción de los costos de circulación. La hidrovía comenzó a cumplir una función análoga a la que desarrollara el ferrocarril desde el último tercio del siglo XIX hasta el primer tercio del siglo XX: facilitar la expansión de la frontera agropecuaria y ser vía de tránsito de bajo costo. Este proceso, de gran intervención sobre el medio físico, fue acompañando la expansión de la superficie agrícola cultivada, que pasó de un total de 16.8 millones de hectáreas con una producción de 35.5 millones de toneladas en 1990, a 40 millones de hectáreas aproximadamente con 147 millones de toneladas cosechadas en 2019 (Álvarez, 2021), año en el que la bajante del Paraná haría evidentes los límites del sistema hidroviario.

En estos años de desregulación y de intervenciones técnicas en el río Paraná se generaron las condiciones para un aumento considerable de la circulación de buques de gran porte, sobre todo desde Santa Fe al Océano, donde el dragado y balizamiento cumplió un rol central viabilizando la salida de commodities los 365 días del año.

Este aumento en la circulación y profundización de la hidrovía con el dragado tiene efectos ambientales aún no avizorados completamente por la falta de estudios pertinentes sobre el impacto ambiental de estas obras. En este sentido los números son contundentes: hasta el año 1995 la profundidad de la vía navegable desde Puerto General San Martín al Océano era de 26 pies, y en ocasiones podía ser menor a 22 pies, luego de una década de funcionamiento hidroviario y con la gestión operativa en manos de la transnacional Jan De Nul se llevó el calado a 34 pies lo que obligó a un dragado anual permanente de 30 millones de metros cúbicos de sedimentos (Álvarez, 2021).

La situación operativa de la hidrovía se tornó crítica durante el año 2019 y hasta el 2022 por la bajante extraordinaria del Paraná lo que llevó a impulsar intervenciones de sobredragado de la ruta troncal lo que implicó una remoción mayor de los bancos de arena y una canalización profunda del fondo del río, sin estudios de impacto ambiental (EIA) sistemáticos y generalizados. El sobredragado agravó la situación crítica de los humedales -afectados además por grandes incendios- porque el agua se profundiza en la ruta troncal

para permitir el tránsito de grandes buques, desnudando el valle de inundación y generando transformaciones en las islas e impactos eco-sistémicos profundos en esteros, lagunas, arroyos y ríos. Cómo plantean Rabuffetti et al. (2022):

Ante los escenarios climáticos futuros propuestos, y las condiciones hidroclimáticas en desarrollo (bajante histórica del río Paraná) cabe mencionar la necesidad de contar con EIA realmente representativos de los impactos de la Hidrovía en el sistema, a la hora, por ejemplo, de evaluar acciones de profundización de la vía navegable o cualquier otra modificación del estilo que implique cambios en la geomorfología fluvial. (Rabuffetti et al., 2022, p. 38)

La bajante extrema del Paraná, que puso en riesgo la circulación granaria, punto nodal del modelo del agronegocio, impulsó a los actores económicos concentrados a exigir intervenciones técnicas con un fuerte impacto en la morfología del río. Lejos de ser una solución, el sobre dragado implica una profundización de la problemática de fondo: el desarrollo de un modelo productivo, que en toda su cadena -producción, circulación y consumo- atenta fuertemente contra los equilibrios de la naturaleza.

CONCLUSIONES

Para iniciar estas conclusiones, como se ha planteado en el desarrollo de este trabajo de investigación, reafirmamos que la bajante extrema del Paraná en los últimos años expresa la empirización de una totalidad en crisis. En una etapa de crisis ambiental global como la que se desarrolla en las últimas décadas, y de aumento de la demanda de bienes primarios en la región, con una fuerte presión sobre la naturaleza, la sequía materializa en el lugar aspectos de una crisis multidimensional y con diferentes escalas de realización.

En tal sentido la bajante extraordinaria del río Paraná, entre los años 2019 y 2022, es consecuencia tanto de fenómenos naturales, como el ciclo de “La Niña”, que alteró profundamente el nivel de precipitaciones en toda la cuenca, como de procesos antrópicos desencadenantes de problemáticas ambientales complejas, como la deforestación, los incendios intencionales y el tránsito hidroviario, que al modificar el equilibrio natural de la cuenca profundizan la crisis hídrica.

Las intervenciones antrópicas sobre el medio natural, como consecuencia del desarrollo del agronegocio en la región hídrica de la cuenca del Paraná, han generado un estrés hídrico de magnitud, modificando de tal manera la morfología de la cuenca que nos permite hablar hoy, como conclusión de esta investigación, que estamos frente a una ruptura metabólica, dado que la dinámica de reproducción del agronegocio vulneró y vulnera los tiempos de reproducción de la naturaleza.

El desarrollo de este trabajo y el abordaje de tres procesos entrelazados sobre la cuenca del Paraná -la expansión de los monocultivos, la deforestación y la hidrovía- en los últimos 30 años, confirma las afirmaciones que el geógrafo brasileiro Porto Gonçalves (2016) realizó hace casi una década: “la industrialización de la agricultura implica la ampliación de la ruptura metabólica con la imposición del tiempo de la industria, sometido al tiempo de la competitividad entre capitales por aumentar sus lucros, medido cuantitativamente por un plus (valía) que implica el aumento de la productividad de las cosas materiales” (p. 299). Esta ruptura metabólica empuja a la naturaleza a una crisis de reproducción que se evidencia fundamentalmente en el ciclo del agua.

Para finalizar es importante aseverar que la bajante extraordinaria del Paraná evidencia la espacialización de tiempos diferenciales sobre los territorios de la cuenca del Paraná. Por un lado, el tiempo de reproducción de la naturaleza, que históricamente se conjugó con tiempos y prácticas comunitarias que garantizaron su reproducción sin alterar los equilibrios ecosistémicos. Por otro lado, los tiempos de la reproducción del capital, que en su dinámica exportadora se expande sobre la naturaleza vulnerando territorios y prácticas preexistentes.

Frenar el ciclo metabólico del agronegocio, para restablecer el equilibrio eco-sistémico, implica discutir el modelo de producción y de inserción internacional del país, así como cambiar de raíz las lógicas productivas e infraestructurales que crearon las condiciones para una crisis hídrica inédita en la cuenca del Paraná.

REFERENCIAS

- Álvarez, A. (2021). Extractivismo, producción del territorio y conflicto en la Hidrovía Paraguay-Paraná. *Revista Realidad Económica*, Vol. 51, Núm. 344 (2021): Las venas abiertas, pp. 39-68. Buenos Aires. ISSN 0325-1926.
- Álvarez, A. (2022). *Hidrovía Paraguay-Paraná: Entre el río y la autopista fluvial del agronegocio*. Taller Ecologista, CAUCE, FARN. Buenos Aires.
- Andelman, M., Penedo, C., Blanco, D. y Heinrich, J. (2019). *Agua, soja y humedales. Aportes hacia un manejo responsable*. Wetlands International. Programa para América Latina y el Caribe. https://lac.wetlands.org/wp-content/uploads/sites/2/dlm_uploads/2019/04/Agua-soja-y-humedales.pdf
- Banco Mundial. (2023). *El agua en la agricultura*. <https://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture>
- Castiglione, M. (s.f.). *Soja - Consumo de Agua*. Ministerio de Producción, Gobierno de la Provincia de Santa Fe. <https://www.santafe.gob.ar/index.php/web/content/download/57995/282564/file/De>
- Castilla, M. y Álvarez, A. (09/09/2023). Bajos Submeridionales: el agronegocio avanza sobre humedales sin medir sus impactos. *Agencia Tierra Viva*. <https://agenciaterraviva.com.ar/bajos-submeridionales-el-agronegocio-avanza-sobre-humedales-sin-medir-sus-impactos/>
- Castro, M. (22/02/2023). Otro año de destrucción en el Norte Argentino: menos bosques, más deforestación e incendios. *Blog de Greenpeace Argentina*. <https://www.greenpeace.org/argentina/blog/problemas/bosques/otro-año-de-destrucción-en-el-norte-argentino-menos-bosques-mas-deforestación-e-incendios/>
- Comisión Mixta argentino-paraguaya del Río Paraná. (s.f.). *La importancia del Río Paraná*. Recuperado de: <https://comip.org.ar/el-rio-parana/#1496769761211-17a2c291-a779>
- Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata. (2017). *Sistema Soporte para la Toma de Decisiones en la Cuenca del Plata*. <http://sstd.cicplata.org/sstd/mapa/categorizado>
- García, R. (2006). *Sistemas Complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*. Barcelona, España. Editorial Gedisa.
- Global Forest Watch. (s.f.). *Monitoreo de bosques diseñado para la acción*. <https://www.globalforestwatch.org/>
- Harvey, D. (2005). El nuevo imperialismo: acumulación por desposesión. En: Leo Panitch y Colin Leys (eds.), *El nuevo desafío imperial*, Socialist Register 2004. Buenos Aires. CLACSO.
- Instituto Nacional del Agua. (s.f.). *Escenarios alternativos de la bajante*. Bajante río Paraná, Alerta Hidrológico Cuenca del Plata. Ministerio de Obras Públicas. <https://www.ina.gob.ar/alerta/index.php?seccion=8>
- Lajmanovich, R., Repetti, M., Cuzziol Boccioni, A., Michlig M., Demonte L., Attademo, A. y Peltzer, P. (2023). Cocktails of pesticide residues in *Prochilodus lineatus* fish of the Salado River (South America): First record of high concentrations of polar herbicides. *Science of The Total Environment*, 870. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162019>
- Lapolla, A. J. (23/06/2005). *Estado y economía: algunos aspectos relacionados a la biotecnología transgénica en la Argentina y sus efectos sociales*. Documento de BiodiversidadLA. <https://www.biodiversidadla.org/documentos/estado-y-economia-algunos-aspectos-relacionados-a-la-biotecnologia-transgenica-en-la-argentina-y-sus-efectos-sociales>
- Manzanal, M. A. (2014). Desarrollo. Una perspectiva crítica desde el análisis del poder y del territorio. *Realidad Económica* 283, pp. 17-48. Buenos Aires. Editorial IADE.
- Masso, J. (01/03/2023). Plan Federal Agroindustrial 2023/2033 – Propuestas para el desarrollo sostenible de la agroindustria argentina: para generar USD 100 mil millones anuales en exportaciones agroindustriales, forestales y pesqueras y 878 mil empleos nuevos en 10 años. *Conectividad digital*, Consejo Agroindustrial Argentino. <https://consejoagroindustrialargentino.org.ar/plan-federal-agroindustrial-2023-2033-propuestas-para-el-desarrollo-sostenible-de-la-agroindustria-argentina-para-generar-usd-100-mil-millones-anuales-en-exportaciones-agroindustriales-forestales/>
- Méndez, D. (06/09/2019). La demanda china de la soja y la “sojización” del campo argentino. *Zaichina*. <https://zaichina.net/2019/09/la-demanda-china-de-la-soja-y-la-sojizacion-del-campo-argentino/>

- Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca. (s.f.). *Estimaciones agrícolas*. Datos de estimaciones agropecuarias. Presidencia de la Nación. <https://datoestimaciones.magyp.gob.ar/>
- Ortiz, A., Rojas, C., Catalán, G., Mena, N. y Aguirre, F. (26/10/2022). Casi 15 millones de hectáreas de bosque arrasadas. Así devasta la agrogranadería la cuenca del Paraná. *El País*. Asunción, Paraguay. <https://elpais.com/america-futura/2022-10-26/casi-15-millones-de-hectareas-de-bosque-arrasadas-asi-devasta-la-agrogranaderia-la-cuenca-del-parana.html#:~:text=Seg%C3%BAn%20c%C3%A1lculos%20hechos%20a%20trav%C3%A9s,datos%20de%20Global%20Forest%20Watch>
- Pengue, W. A. (2006). Agua virtual, agronegocio sojero y cuestiones económico-ambientales futuras. *Revista Fronteras*, 223, Grupo de Ecología del Paisaje y Medio Ambiente (GEPAMA) del Centro de Estudios Avanzados de la Universidad de Buenos Aires. ISSN 1667-3999.
- Porto-Gonçalves, C. W. (2003). A geograficidade do social: uma contribuição para o debate metodológico sobre estudos de conflitos e movimentos sociais na América Latina. En: José Seoane (org.), *Movimientos sociales y conflicto en América Latina*, (pp. 261-277). Buenos Aires, Argentina. Editorial Clacso-Osal.
- Porto-Gonçalves, C. W. (2016). Lucha por la Tierra. Ruptura metabólica y reapropiación social de la naturaleza. *Polis Revista Latinoamericana*, 15(45), pp. 291-316. Santiago, Chile. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-65682016000300015>
- Rabuffetti, A. P., Abrial, E. y Espínola, L. (2022). *Evaluación temporal de la gestión ambiental de la Hidrovía Paraguay-Paraná en el tramo medio e inferior del río Paraná*. Cauce, Humedales sin Frontera, Taller Ecologista. <https://tallerecologista.org.ar/wp-content/uploads/2022/11/Informe-Hidrovia-EvaluacionTemporal2022.pdf>
- Rofman, A. (1993). Las economías regionales. Un proceso de decadencia estructural. En: P. Bustos (comp.), *Más allá de la estabilidad estructural*, pp. 161-189. Buenos Aires, Argentina. Fundación Friedrich Ebert.
- Santos, M. (1996). *De la totalidad al lugar*. Barcelona, España. Editorial Oikos-Tau.
- Silveira, M. L. (1995). Totalidad y Fragmentación: el espacio global, el lugar y la cuestión metodológica. Un ejemplo argentino. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 14, pp. 53-61. Madrid.

Trabajo recibido el 13/09/2023, aceptado por el Consejo Editorial para su publicación el 17/10/2023 y publicado el 17/11/2023.

COMO CITAR

Álvarez, A. (2023). Agronegocio y crisis hídrica en la cuenca del río Paraná. *Cuadernos del CURIHAM, Edición Especial (2023): Bajante del río Paraná*. e02. <https://doi.org/10.35305/curiham.ed23.e02>

ROLES DE AUTORÍA

Álvaro Álvarez desarrolló la investigación y la redacción del presente trabajo. La metodología y el desarrollo conceptual es parte de una serie de abordajes e investigaciones desarrolladas por el autor en relación a la temática. El autor aprobó la versión para ser publicada.

LICENCIA

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



Este trabajo se enmarca dentro de la EDICIÓN ESPECIAL (2023): Bajante del río Paraná de la revista Cuadernos del CURIHAM

MODELACIÓN HIDRODINÁMICA EN EL TRAMO KM 232-480 DEL RÍO PARANÁ DURANTE LA BAJANTE 2020 A 2022

HYDRODYNAMIC MODELING IN THE KM 232-480 REACH OF THE PARANÁ RIVER DURING THE 2020 TO 2022 LOW WATER FLOW

Gerardo A. Riccardi^{(1)(2)(*)} y Pedro A. Basile^{(1)(**)}

⁽¹⁾Departamento de Hidráulica y Centro de Investigaciones Rosario de Investigaciones Hidroambientales, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

⁽²⁾Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario. Argentina.

^(*)e-mail:riccardi@fceia.unr.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9294-3166>

^(**)e-mail: pbasile@fceia.unr.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8826-0621>

RESUMEN

Se presenta la simulación hidrodinámica en un tramo del cauce principal del río Paraná entre los km 232 y km 480 en un período que comprende la reciente bajante desde el 01/01/2020 al 31/12/2022, mediante un modelo de complejidad reducida cuasi-2D. El modelo utilizado permitió describir nivel, caudal y velocidad media integrada en la vertical en el dominio espacial discretizado en celdas de 100 m x 100 m. En el tramo existe una importante infraestructura portuaria por lo que resulta de interés la simulación hidrodinámica para aportar a la planificación de las actividades antrópicas y a la evaluación hidroambiental del aprovechamiento, control y gestión del recurso hídrico. En el período de estudio se observaron caudales entre 6800 m³/s y 16000 m³/s correspondiendo al trienio de menor volumen escurrido en lo que va de la serie moderna de niveles desde el año 1971 a la fecha. La señal de entrada consistió en la serie de caudales medios diarios en el borde aguas arriba. Para evaluar la calidad de la simulación se compararon niveles diarios observados y calculados en los hidrómetros en 6 sitios: Puerto San Martín (km 448), Rosario (km 416), Villa Constitución (km 368), San Nicolás (km 353), Ramallo (km 325) y San Pedro (km 276). Asimismo, se evaluaron valores máximos, mínimos y medios de niveles y amplitud del rango de variación de niveles. Además, se compararon las permanencias de niveles y relaciones niveles-caudales en los sitios. En la integralidad del ajuste logrado, los resultados pueden calificarse como muy buenos.

Palabras clave: hidrodinámica, río Paraná, bajante, modelación cuasi2D, modelo de complejidad reducida.

ABSTRACT

The hydrodynamic simulation of the Parana River in the reach km 232-480 during the low flows years 2020-2022 is presented. The simulations were carried out by using a reduced complexity quasi-2D hydrodynamic model, appropriated to represent the evolution of water level, discharge and depth integrated mean flow velocity in the modeled domain discretized with 100 m x 100 m grid cells. In the modeled river reach there is an important port infrastructure, so hydrodynamic simulations are of interest to contribute to the planning of anthropogenic activities and the hydro-environmental evaluation of the use, control and management of water resources. During the period of time simulated in this study, discharges between 6800 m³/s and 16000 m³/s were observed, corresponding to the three-year period with the lowest drained volume registered in the modern series of water levels from 1971 to date. The series of mean daily discharges were assigned as the upstream boundary condition. In order to evaluate the quality of the simulation, daily water levels observed and calculated in the hydrometers at 6 sites were compared: Puerto San Martín (km 448), Rosario (km 416), Villa Constitución (km 368), San Nicolás (km 353), Ramallo (km 325) y San Pedro (km 276). Moreover, maximum, minimum and average values of water levels and amplitude of the range of variation were evaluated. In addition, the duration of water levels and stage-flow relationships in the 6 sites were compared. In the comprehensiveness of the adjustment achieved, the results can be described as very good.

Keywords: hydrodynamics, Paraná river, low flows, quasi-2D modeling, reduced complexity.

INTRODUCCIÓN

El tramo en estudio comprende una longitud del río de 248 km aproximadamente, cuyo cauce principal presenta múltiples bifurcaciones y confluencias, conformando una red de cauces de diversas jerarquías e islotes centrales. El tramo se ubica al oeste del humedal o planicie de inundación del río, la cual es sometida a ciclos de crecidas y bajantes de acuerdo a los hidrogramas entrantes desde el tramo Paraná medio, como así también, a perturbaciones de niveles (especialmente en la zona aguas abajo) debido al ciclo periódico de las mareas en el océano y a sudestadas que también se presentan en la desembocadura en el río de la Plata. En el tramo se emplazan sobre la margen derecha diversas ciudades de distintas magnitudes como Puerto San Martín, San Lorenzo, Fray Luis Beltrán, Capitán Bermúdez, Granadero Baigorria, Rosario, Villa Gobernador Gálvez, Arroyo Seco, Villa Constitución, San Nicolás, Ramallo y San Pedro por lo cual, se sitúan también diversas obras de toma de agua, descargas de efluentes pluviales, cloacales e industriales que pueden verse perturbadas en su funcionamiento en función de los niveles del río. Las variaciones de los niveles también pueden condicionar las actividades laborales y recreativas de los diferentes actores del territorio costero. En el mismo sentido un importante número de instalaciones portuarias (puertos de carga, comerciales y náuticos) se ubican en el tramo pudiendo ser afectados su funcionamiento en períodos críticos tanto de bajantes como de crecientes. Además, sobre el cauce principal se desarrolla la vía de navegación troncal (VNT) Santa Fe-Océano. En la misma se sitúan 14 pasos críticos donde regularmente se hacen trabajos de dragado para garantizar profundidades efectivas compatibles con las de diseño. Resulta evidente que en estos casos una certera determinación de los niveles de agua resulta de importancia para la realización de las operaciones de dragado de mantenimiento y el cómputo de los volúmenes de sedimentos involucrados.

En este marco, se plantea el desafío de describir la hidrodinámica del sistema con la mayor confiabilidad técnica compatible con una herramienta de simulación de baja complejidad en el contexto de la bajante severa del río Paraná entre 2020 y 2022. Las características del tramo modelado en su extensión territorial, la disponibilidad de datos y la factibilidad de llevar adelante una modelación computacionalmente ventajosa hace que sea factible emplear modelos de complejidad reducida (Nicholas et al., 2012) los que, con ecuaciones más simplificadas que los modelos completos y a un costo computacional menor, permiten describir las variables principales del flujo con un aceptable nivel de aproximación en dominios espacio/temporales de extensas zonas de inundación y a largo plazo (Wilson et al., 2009). Hasta el momento se ha avanzado en la modelación hidrodinámica del curso principal experimentando con una grilla de cálculo del tipo cuadrangular con 100 m de lado. Se busca con esta discretización establecer una escala de representación de la bidimensionalidad del flujo en el cauce principal en un extenso tramo, compatible para la futura incorporación de la planicie de inundación con similar nivel de detalle.

En un sub-tramo del orden de 50 km han sido implementados modelos hidrodinámicos 2DH completos, tanto en condiciones de flujo permanente considerando un amplio rango de caudales desde aguas bajas a altas; como así también, en flujo impermanente (Basile et al., 2016; Peruzzo et al., 2017). Por su parte el trabajo de Garcia et al. (2015, 2017) comprendió la modelación hidrodinámica e hidrosedimentológica y estudio de aforos en el cauce principal y el valle de inundación en un tramo desde la zona desde Diamante a Ramallo, con un dominio de celdas irregulares. La modelación fue realizada con el CTSS8 (Riccardi, 2000) y FLUSED (Basile et al., 2007).

En el tramo completo simulado en el presente estudio, han sido realizadas modelaciones antecedentes donde se ha verificado el funcionamiento del modelo de complejidad reducida cuasi-2D en régimen impermanente en crecientes, con un rango de caudales variando entre $15900 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 26400 \text{ m}^3/\text{s}$, verificándose una calificación global del ajuste en términos de niveles diarios entre buena y muy buena (Peruzzo et al., 2016). Otros avances de modelaciones parciales durante el transcurso de la bajante se presentaron en Riccardi et al. (2022) y Riccardi y Basile (2023).

Otros trabajos de simulación en un tramo que involucró gran parte de los ríos y canales del delta del río Paraná fueron realizados por Sabarots Gerbec (2014) quien aplicó un modelo matemático hidrodinámico unidimensional en la red de ríos y canales del río Paraná en la región del Delta Superior (Diamante a Villa Constitución) y Delta Medio (Villa Constitución a Puerto Ibicuy). El software utilizado fue el conocido HEC-

RAS. La serie temporal modelada comprendió desde 2010 a 2013 con una discretización media de 10 km. En el período los niveles del río se pueden caracterizar como estados de aguas medias y medias altas. El autor concluye que, si bien los errores en la simulación no son menores, el traslado de la onda de crecida fue bien representado por indicadores de bondad de ajuste, como el coeficiente de Nash-Sutcliffe con valores próximos a la unidad.

Re et al. (2015) presentan la descripción espacial del comportamiento de los niveles en el Delta del río Paraná incorporando el Delta Inferior (Ibicuy a río de la Plata) a partir de los resultados de una modelación hidrodinámica unidimensional en un período temporal de 1994 a 2013. La discretización espacial fue de 5 km. El modelo hidrodinámico se basó en el propuesto por Sabarots Gerbec (2014) que incluyó Delta Superior y Medio y la representación del Delta Inferior de Bombardelli et al. (1994). Los autores concluyen que el modelo permitió realizar análisis conceptuales sobre el comportamiento de la red de canales y la comprensión del comportamiento de distintos brazos durante crecidas y la relación de caudales en las bifurcaciones, y las implicancias de la onda de marea en el Bajo Delta. Re et al. (2015) destacan como el principal resultado de su trabajo a la caracterización estadística de niveles en cualquier sitio del delta del río Paraná a partir de series obtenidas con simulaciones.

En el trabajo de Sabarots Gerbec y Borus (2016) se lleva a cabo la caracterización hidrodinámica en aguas bajas para la VNT partiendo del modelo numérico validado por Sabarots Gerbec (2014). El modelo fue validado tanto para niveles y caudales, y a partir de la simulación desde 1975 a 2016 se obtuvieron resultados de niveles y caudales para los principales puertos de la VNT entre Santa Fe y el río de la Plata, considerándose como confiables los resultados para estaciones aguas arriba de Baradero. A partir de los resultados, los autores concluyen que los mismos constituyen un punto de referencia útil para el diseño y operación de terminales portuarias.

Sabarots Gerbec et al. (2018) presenta simulaciones realizadas con una actualización geométrica del modelo precedente presentado por Re et al. (2015), obteniendo resultados en lo que respecta a la repartición de caudales en diferentes bifurcaciones en la red de canales que componen el Delta del río Paraná. Fue simulada una serie desde 1997 a 2013. Las particiones obtenidas se describieron en función dos variables: (i) el caudal ingresante a la bifurcación y (ii) el nivel de superficie libre en la desembocadura en el río de la Plata. Los autores concluyen que cuando hay grandes caudales en el río Paraná y niveles bajos de restitución en el río de la Plata implican dispersiones bajas en los rangos de partición. En el caso de bajos caudales y altos niveles de restitución el rango determinado en la partición es mucho más disperso con casos de presentación de flujo inverso.

Morale et al. (2020) presentan la aplicación de un modelo hidrodinámico bidimensional para su utilización en el marco de un esquema de toma de decisiones para el desarrollo espacial sustentable en el territorio del Delta del río Paraná. El modelo se empleó para evaluar los impactos de diferentes intervenciones antrópicas en el delta. El área de trabajo comprendió desde la zona deltaica de Villa Constitución hasta Campana y Canal Nuevo.

Guizzardi et al. (2022) desarrollaron la implementación de un sistema de pronósticos de niveles de aguas en diferentes sitios del delta del río Paraná. El sistema se compone de una estructura integrada de modelización y predicción, teniendo en cuenta las interacciones del escurrimiento, las tormentas, oleaje y las mareas. La estructura está compuesta por un modelo hidrodinámico unidimensional aplicado en la red de ríos y canales componentes del delta del río Paraná desde Paraná (aguas arriba) hasta el río de la Plata, un modelo bidimensional del estuario del Río de la Plata, dos modelos de predicción numérica del tiempo y esquemas de modelos autorregresivos para corregir los pronósticos con datos observados. El modelo unidimensional implementado es una actualización de los trabajos de Re et al. (2015). Originalmente el modelo estuvo basado en la propuesta de Sabarots Gerbec (2014), que incluye el Delta Superior y el Delta Medio. Según documenta Guizzardi et al. (2022), la incorporación del Bajo Delta fue tomada de la representación de Bombardelli et al. (1994). Además, el modelo fue utilizado anteriormente para generar estadísticas de niveles en el Delta del río Paraná (Re et al., 2015) y para la caracterización de niveles mínimos en la hidrovía (Borús y Sabarots Gerbec, 2015). Este modelo resuelve la hidrodinámica unidimensional de la compleja red de

cursos de agua desde Paraná hasta el río de la Plata. Los modelos del estuario del río de la Plata proveen las condiciones de borde para el modelo unidimensional de la red de ríos y canales. La estructura integrada fue denominada HIDRO-DELTA, concluyendo que la performance del sistema es satisfactoria como herramienta de pronóstico de niveles de agua.

OBJETIVOS

El objetivo principal del trabajo fue evaluar al modelo matemático cuasi-2D de baja complejidad CTSS8RIO en sus capacidades de reproducción de la hidrodinámica de la bajante extrema en el cauce principal de río Paraná Inferior en vista a su utilización como herramienta de pronóstico de niveles en escenarios donde se imponga como señal de entrada una serie de caudales medios diarios ingresantes al tramo y en el borde aguas abajo una relación altura-caudal.

METODOLOGÍA

En la primera etapa de la modelación se impusieron condiciones de borde del tipo altura-tiempo, tanto en el borde aguas arriba como en el borde aguas abajo y se realizaron simulaciones variando el coeficiente de rugosidad de Manning. Para cada proposición de rugosidades, se determinaron los niveles de agua en cada una de las celdas del dominio espacial. En los 6 sitios de los hidrómetros se compararon los niveles simulados con los niveles observados provistos por la Dirección Nacional de Vías Navegables Delegación Paraná Inferior (DNVN-DPI) (2023). Además, se determinó el hidrograma entrante, que fue comparado con los caudales aforados por el Sistema Nacional de Información Hidrológica (SNIH) (2023) y también con los caudales medios diarios estimados por SNIH (2023) y los caudales estimados en Basile y Riccardi (2023).

La segunda etapa de la modelación consistió en la evaluación del modelo como herramienta de predicción. En el borde aguas abajo se definió una relación H-Q, de modo que, considerando como señal de entrada en el borde aguas arriba el hidrograma determinado en la primera etapa, se simularon los niveles con la mayor aproximación posible a los niveles observados en los hidrómetros. Esta potencialidad del modelo permite su utilización como predictor en cualquier evento real o hipotético de caudales que se requiera analizar. Para establecer la bondad de los resultados se compararon las series de niveles hidrométricos calculados y observados, como así también, las curvas de permanencias de los niveles hidrométricos y de las profundidades efectivas en la VNT a lo largo del trienio.

MATERIALES Y METODOS

El modelo de simulación hidrodinámica

El modelo de simulación empleado es el CTSS8RIO, que se trata de una versión adaptada del CTSS8 (Riccardi, 2000) conjuntamente con la plataforma de pre y post-procesamiento SIMULACIONES 2.0 (Stenta et al., 2005), siendo de tipo cuasi-2D difusivo, no contemplando efectos inerciales ni de cierre de turbulencia. El planteo de las ecuaciones para resolver el tránsito hidrodinámico en forma simplificada en dos dimensiones es (Figura 1):

Ecuación de continuidad:

$$A_{S_{k,i}} \frac{dz_{k,i}}{dt} = P_{k,i(t)} + \sum Q_x + \sum Q_y \quad (1)$$

Ecuaciones de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial z}{\partial x} + \eta_x^2 \frac{(Q_x/A_{tx}) \sqrt{(Q_x/A_{tx})^2 + (Q_y/A_{ty})^2}}{h_x^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} + \eta_y^2 \frac{(Q_y/A_{ty}) \sqrt{(Q_x/A_{tx})^2 + (Q_y/A_{ty})^2}}{h_y^{4/3}} = 0 \quad (3)$$

Donde $z_{k,i}$ es el nivel del agua en la celda i ; $A_{sk,i}$ es el área superficial mojada en la celda i ; $P_{k,i}$ es el ingreso/egreso de caudales externos; Q_x y Q_y , η_x y η_y , h_x y h_y , A_{tx} y A_{ty} son los caudales intercambiados, los coeficientes de rugosidad de Manning, las profundidades de flujo y las áreas transversales consideradas entre las celdas vinculadas en el sentido x e y respectivamente.

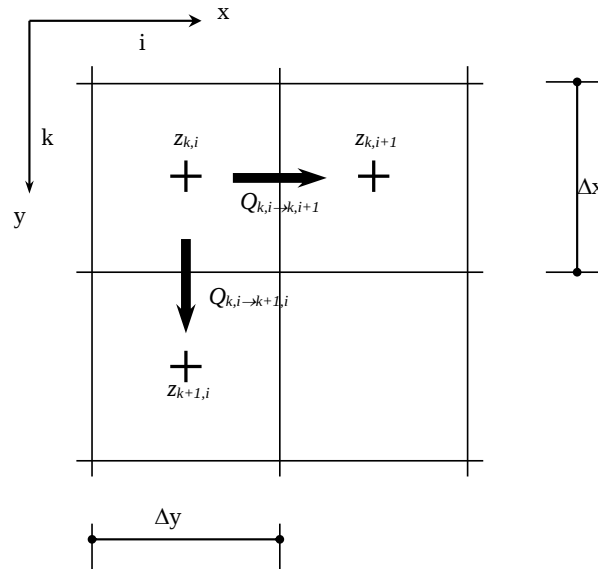


Figura 1. Definición de variables de flujo en la grilla.

El tramo en estudio

El tramo modelado tiene una extensión de 248 km, abarcando 502 km² del cauce principal del río Paraná, cauces secundarios e islas centrales (Figura 2). Se extiende desde el km 232 cercano a la denominada “bifurcación” donde se bifurca en el Paraná de las Palmas y el Paraná Guazú, hasta el km 480 sitio aguas arriba de Puerto San Martín y aguas abajo de Diamante. El ancho del curso principal es altamente variable con valores desde 700 m hasta 2200 m. En zonas donde se conformaron islas centrales el ancho total llega en algunos sitios a 4600 m. A macro-escala, el cauce principal muestra una configuración morfológica caracterizada por una sucesión de expansiones, donde se observan islas vegetadas, interconectadas con tramos más estrechos y profundos (Basile et al., 2015). El lecho es de arena con d_{50} variando entre 0.26 mm y 0.32 mm (Basile y Riccardi, 2002).

En el tramo se emplazan 6 hidrómetros en los cuales se miden niveles diarios y en el caso de Prefectura Naval Argentina, 2 niveles diarios. Los lugares y ceros considerados en este estudio de los hidrómetros se sintetizan en la siguiente Tabla 1. La información de relevamientos batimétricos como de niveles de agua aforados en los diferentes hidrómetros fueron convertidos en cotas con referencia IGN mediante los ceros indicados en Tabla 1.

A lo largo del tramo se emplazan en su margen derecha múltiples obras de toma de agua y obras de volcamiento de efluentes pluviales, cloacales e industriales, instalaciones portuarias, como así también, se desarrolla parte de la VNT Océano-Confluencia, obras cuyos funcionamientos e impactos producidos pueden verse fuertemente modificados por los bajos niveles del río. En la VNT se sitúan 14 pasos críticos donde regularmente se hacen trabajos de dragado para garantizar profundidades efectivas compatibles con las de diseño. La profundidad de diseño actual de la VNT es de 10.97 m (36 pies) hasta el km 460 y de 8.23 m (27 pies) desde km 460 hacia aguas arriba, vinculándose a los denominados niveles de referencia (NR) que se definen en cada sitio de localización de los hidrómetros. Cada NR corresponde a un nivel que es igualado o superado un 80% del tiempo (permanencia), y se establece a partir series históricas de niveles. El brazo principal donde se desarrolla la VNT tiene anchos variables entre 400 m y 2800 m y profundidades que pueden variar entre los 45 m y 10 m. La VNT tiene una traza (variable) que involucra las zonas más profundas, con un ancho en su mayor parte de 116 m.

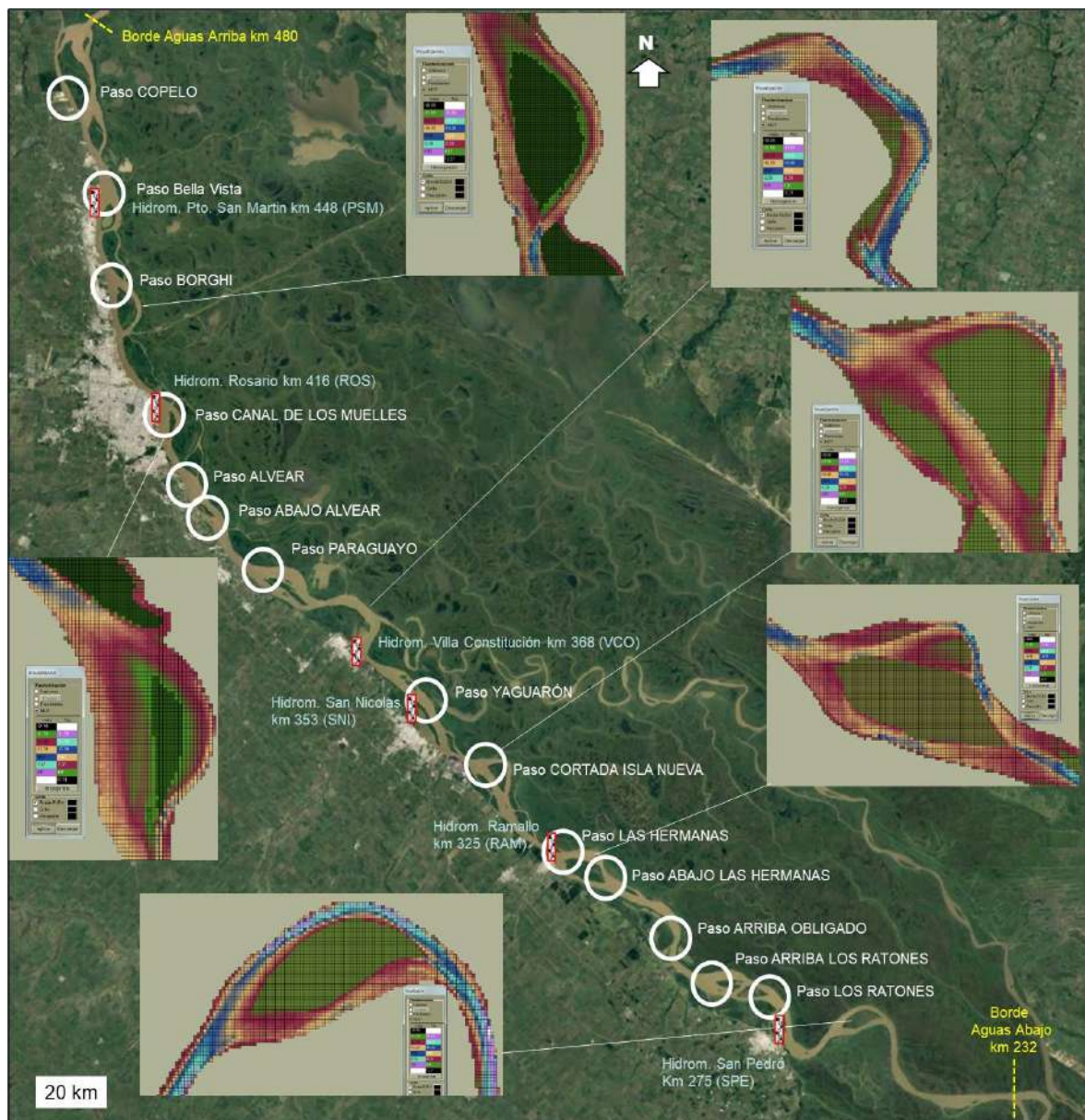


Figura 2. Zona de estudio (figura base extraído de Google Earth®).

Tabla 1. Hidrómetros situados en el tramo

Denominación	Abreviatura	Progresiva sobre Vía de Navegación Troncal (VNT) (km)	Cero hidrómetro IGN (m) (*)
Puerto San Martín	PSM	448	3.63
Rosario	ROS	416	3.03
Villa Constitución	VCO	368	2.12
San Nicolás	SNI	353	1.98
Ramallo	RAM	325	1.48
San Pedro	SPE	276	0.91

(*) Fuente: Subsecretaría de Puertos y Vías Navegables SSPyVN citada en Instituto Nacional del Agua (s.f.)

El modelo digital del fondo del cauce

El modelo digital con que se representó el cauce del río e islas interiores fue construido a partir de las siguientes fuentes de información:

- (i) Cauce principal río Paraná. Relevamiento Batimétrico (DNVN-DPI, 2014)
- (ii) Cartas Náuticas. Servicio de Hidrografía Naval (SHN) (2018) (Figura 3)
- (iii) Relevamientos Batimétricos Canal de Navegación. Subsecretaría de Puertos, Vías Navegables y Marina Mercante (SSPVNyMM) (2020)
- (iv) Estudios Complementarios Hidráulicos y Morfológicos de la Zona de la Isla de la Invernada. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) (2006).

Los relevamientos de fondo del cauce disponibles y provistos por DNVN-DPI (2014) estaban sectorizados cada 10 km, medidos sobre el eje de la VNT y referenciados a un cero interpolado entre los 2 hidrómetros más cercanos. Por lo cual hubo que vincular al 0 del IGN cada tramo y luego realizar la integración completa del tramo a modelar. Los perfiles transversales disponibles se ubicaron cada 100 m (en la dirección de flujo) y los puntos en la dirección transversal cada 20 m. En el canal de navegación la morfología del fondo fue mejorada a partir de los relevamientos descargados de la página de la SSPVNyMM (2020), donde se contó con cotas del fondo cada 10 m en el sentido del flujo y sobre 3 alineaciones longitudinales en el eje de la VNT y sobre los veriles derecho e izquierdo. En la zona de islas la cota de terreno fue extractada a partir del modelo digital del terreno (MDT) disponible en Google Earth®. Con la información de cota de fondo en cauce principal e islas referidas al IGN, se construyó un modelo digital de elevación (MDE) del fondo en una grilla cuadrangular de 100 m x 100 m mediante el método de krigging, utilizando el software Surfer 9.0®. En la Figura 4 se presenta el MDT empleado en la modelación.

Sobre la representación del fondo del cauce

Tal como mencionado anteriormente, la información de cotas del fondo estuvo mayormente extraída a partir de perfiles transversales (con trayectoria en sentido perpendicular a la corriente principal) cada 100 m y en cada perfil transversal puntos cada 20.0 m. Por lo tanto, ni en el relevamiento ni en el MDT del fondo construido, se representa en detalle las formas de fondo con dimensiones menores a 100 m en el sentido de la corriente. A modo de ejemplo ilustrativo se presenta en Figura 5(a) un perfil longitudinal relevado en el año 2016 en el eje del canal de navegación por el Organismo de Control de la VNT Santa Fé-Océano con la discretización original de 1 punto cada 10 m y una discretización agregada a 1 punto cada 100 m a los efectos de su uso en la modelación. En la Figura 5(b) se presenta un detalle ejemplificativo en el tramo km 355-357. Claramente, puede inferirse que la representación del fondo por parte del relevamiento base debe considerarse como una aproximación al valor medio del fondo y por lo tanto el modelo no podrá representar la rugosidad por formas de fondo por lo que esta característica se deberá representar como un agregado “ficticio” a la rugosidad de superficie.

Asimismo, vale destacar que las dunas se desplazan con movimiento ondulatorio con una celeridad, diferenciada a la del flujo, hacia aguas abajo modificando amplitudes y longitudes. La amplitud y la longitud de

estas formaciones está directamente vinculada (entre otras cosas) con la profundidad de flujo. En este contexto, cuando se modela este tipo de cauces fluviales lo que se representa es una conformación “media del fondo”, donde se asume que la forma de fondo que se incorpora al modelado es el valor medio de los puntos altos (cresta) y puntos bajos (valle) de las diferentes dunas que circulan por el fondo. En la Figura 5(c) se presenta la banda de oscilación de la cota de fondo al superponer perfiles longitudinales de 2010 a 2015 en un tramo de 10 km, dicha banda en el subtramo entre km 419 a 429 desarrolla una dimensión en altura entre 4 a 5 m.

En lo que respecta a la representación de los perfiles transversales la agregación de la información trae como consecuencia que el perfil real se aproxime a un perfil escalonado con discretización de 100 m. A modo de ejemplo se presentan las siguientes Figuras 6(a) a 6(d), donde se puede visualizar la aproximación introducida en 4 secciones cualquiera del dominio espacial de modelación. Además, en la Figura 6(e) se representa la variación de cotas de fondo por los movimientos de las formaciones de fondo en la sección transversal del km 421.6 entre los años 2009 a 2018.

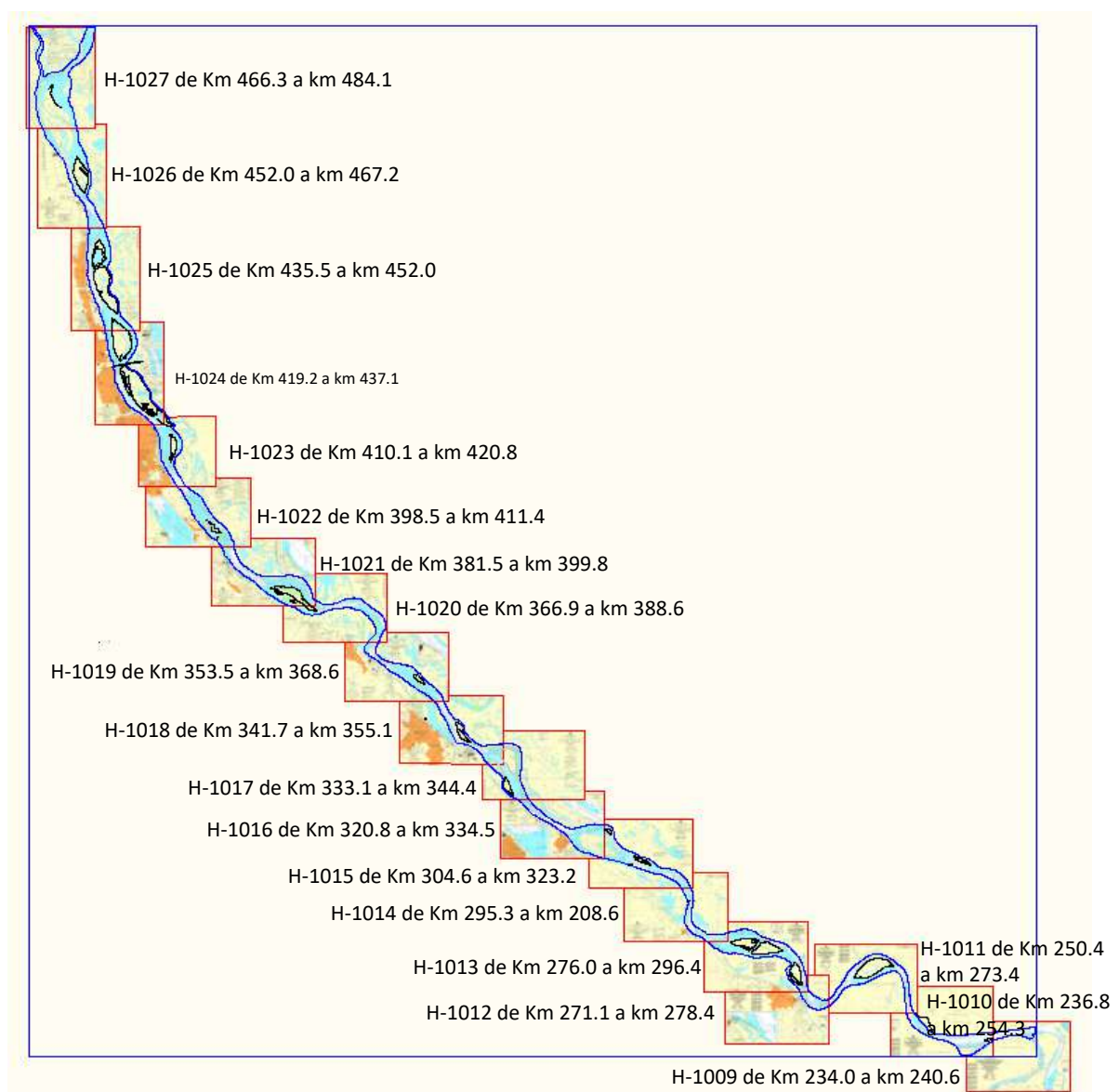


Figura 3. Cartas Náuticas comprendidas en el tramo de modelación.

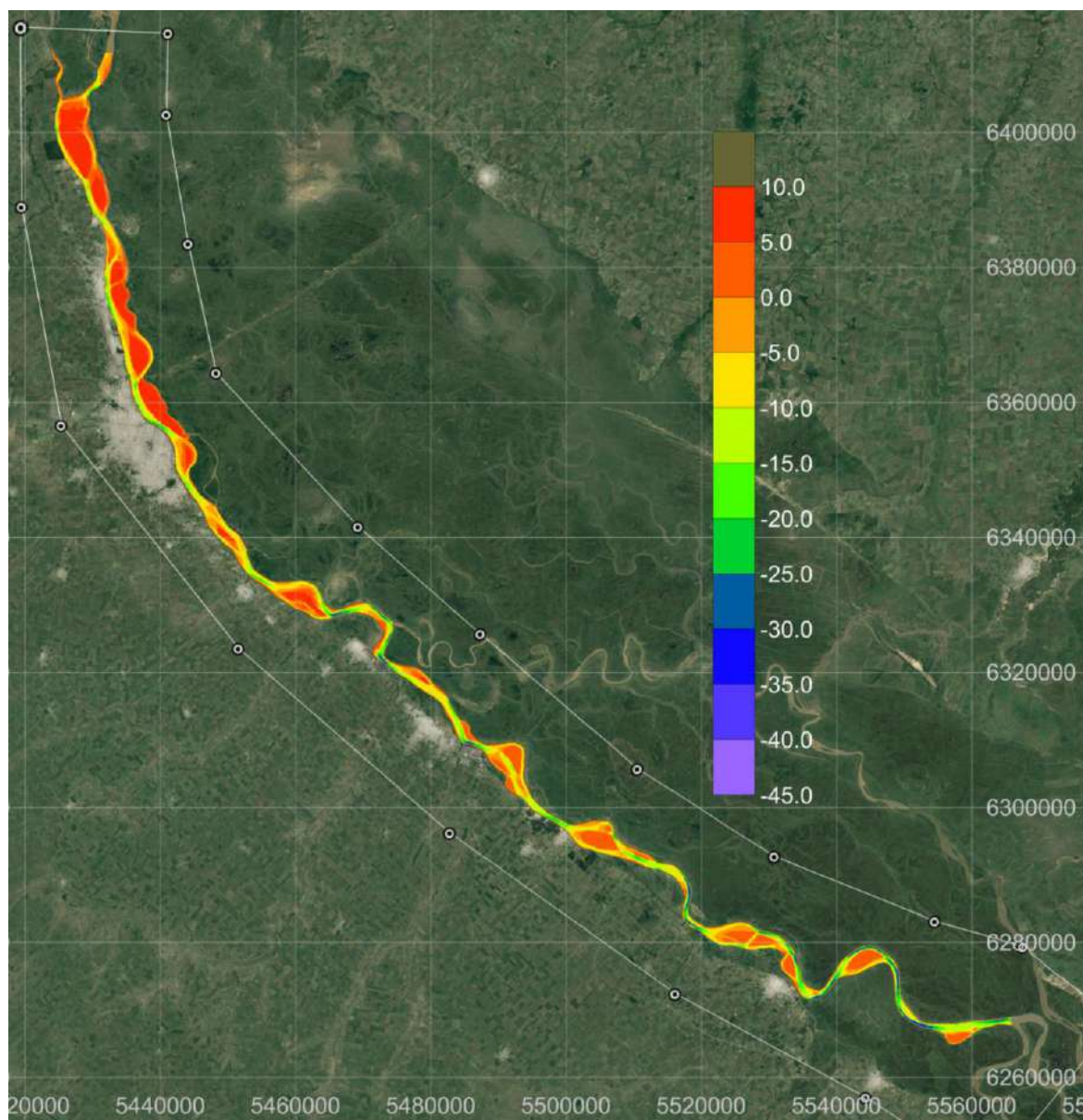


Figura 4. Modelo digital del fondo rasterizado en celdas de 100 m x 100 m. Cotas de fondo en (m), referidas a IGN. Georreferenciación en Sistema de Proyección Gauss-Kruger Faja 5.

Pasos críticos para la navegación en la VNT

Sobre la VNT se sitúan 14 pasos críticos y entrepasos (EP) donde regularmente se hacen trabajos de dragado (y volcamiento) para garantizar profundidades efectivas compatibles con las de diseño. Durante la bajante se presentaron una determinada cantidad de días donde no se garantizaron las profundidades de proyecto por lo cual existieron restricciones al calado de los buques que navegaron por la VNT. En la Figura 2 se presentan las ubicaciones de los pasos críticos en tanto que en la Tabla 2 se presentan las denominaciones de los pasos y entrepasos y las progresivas aproximadas de sus ubicaciones a la VNT. Precisamente tanto en la etapa de calibración como de explotación del modelo una de las comparaciones para evaluar la performance del modelo fue comparar las curvas de permanencias observadas y calculadas de niveles hidrométricos.

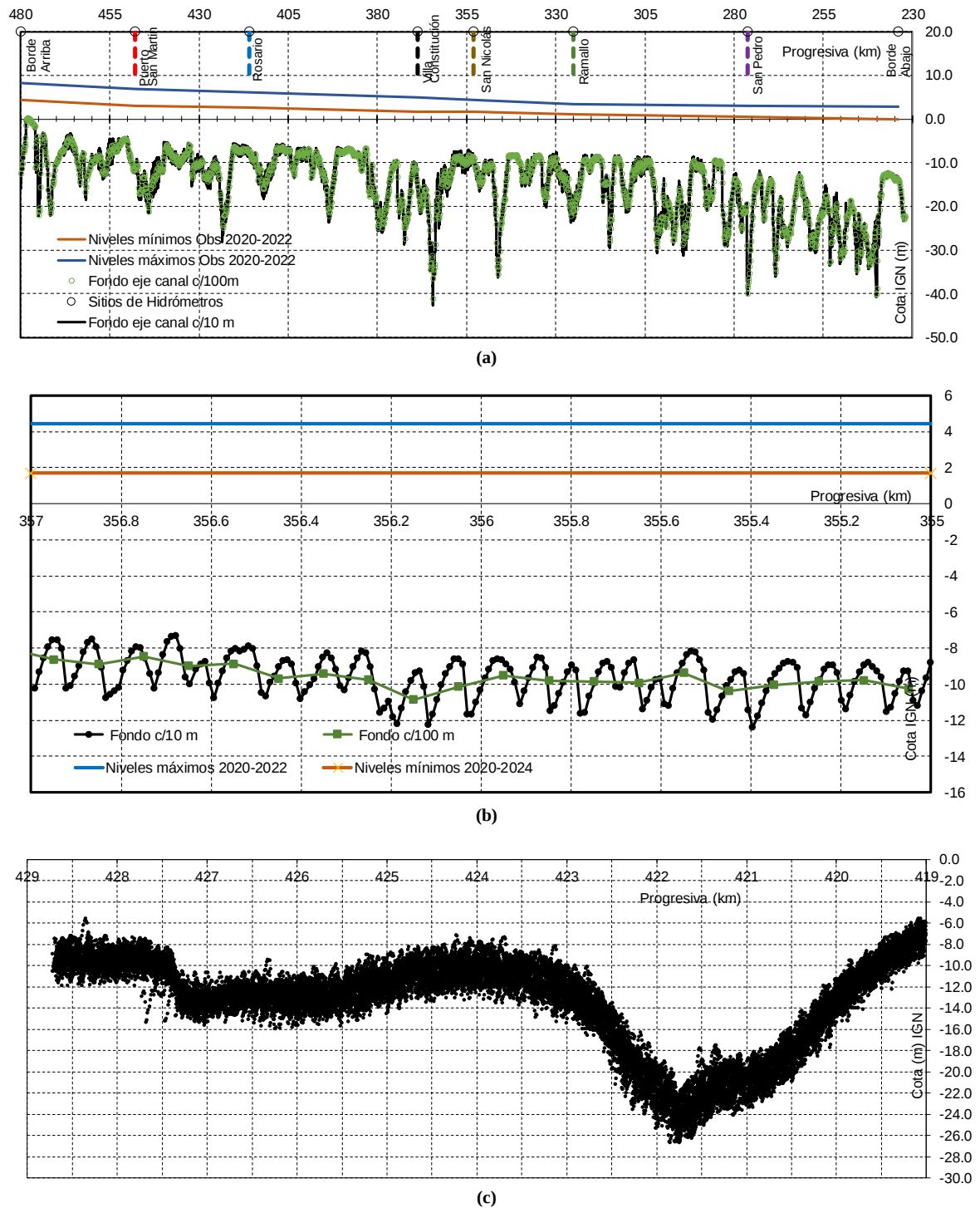


Figura 5. Perfiles longitudinales del fondo en el eje de la VNT; (a) Relevamiento discretizado c/10 m e interpolado c/100 m (relevamiento año 2016); (b) Detalle de representación en tramo km 355 a 357 c/10 m y c/100 m (relevamiento año 2016); (c) Entorno de oscilación de formaciones de fondo en tramo km 419 a 429 (relevamientos de años 2009 a 2018).

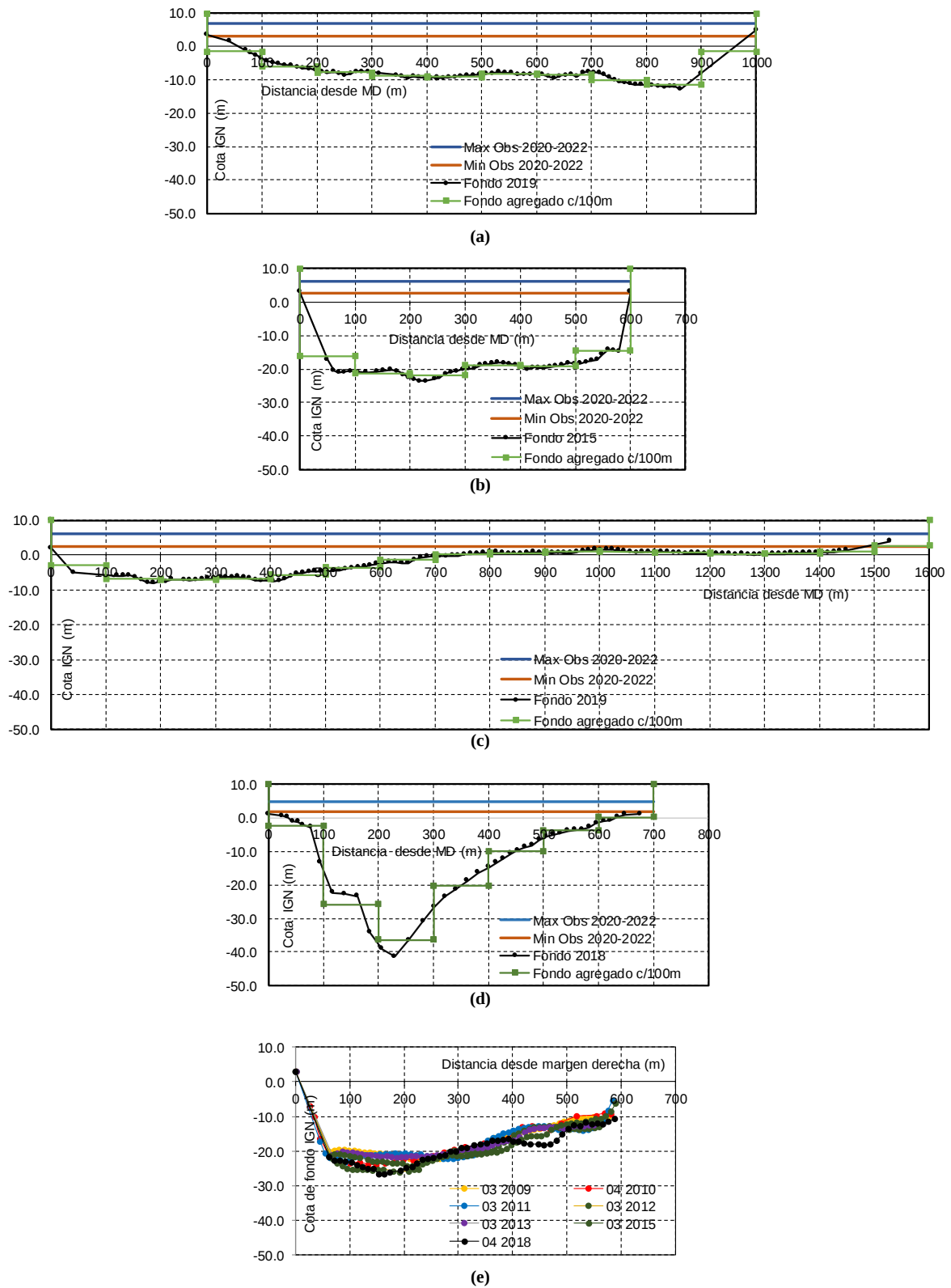


Figura 6. Perfiles transversales relevados y modelados: (a) km 448; (b) km 421; (c) km 416; (d) km 364; (e) Variación del fondo por movimiento de formaciones de fondo km 421.6 de 2009 a 2018.

Tabla2. Pasos y Entrepasos sobre la VNT en el tramo en estudio

Denominación Paso (P) y Entrepaso (EP)	Desde (km)	Hasta (km)
P. Abajo Los Ratones (brazo derecho)	282.4	288.0
EP. Abajo Los Ratones / Los Ratones	288.0	291.4
P. Los Ratones	291.4	295.7
EP. Los Ratones/Arriba Obligado	295.7	308.5
P. Arriba Obligado	307.0	313.0
EP. Arriba Obligado/Abajo Las Hermanas (brazo derecho)	313.0	315.1
P. Abajo Las Hermanas	315.1	316.9
EP. Las Hermanas Bd/Cort. Isla Nueva	316.9	320.0
P. Las Hermanas	320.0	325.8
EP. Las Hermanas BD/Cort. Isla Nueva	325.8	334.7
P. Cortada Isla Nueva	334.7	344.6
EP. Cortada Isla Nueva/Yaguaron	344.6	352.0
P. Yaguaron	352.0	358.4
EP. Yaguaron/Paraguayo	358.4	381.0
P. Paraguayo	381.0	390.8
EP.Paraguayo/Abajo Alvear	390.8	398.6
P. Abajo Alvear	398.6	402.7
EP. Abajo Alvear/Alvear	402.7	403.4
P. Alvear	403.4	408.2
EP. Alvear/Canal de los Muelles Pto. Rosario	408.2	412.0
P. Canal de los Muelles Pto. Rosario	412.0	418.5
EP. C. de los Muelles Pto. Rosario/Borghi	418.5	428.0
P. Borghi	428.0	438.1
EP. Borghi/Bella Vista	438.1	447.0
P. Bella Vista	447.0	454.1
EP Bella Vista/Copelo	454.1	462.6
P. Copelo	462.6	464.7

Constitución del modelo

De acuerdo con la discretización espacial escogida para el modelado (celdas cuadradas de 100 m x 100 m), se emplearon 50244 celdas y 97129 vinculaciones. De total de celdas aproximadamente un 40% corresponden a la representación de islas centrales y zonas márgenes del curso, en tanto que un 60% corresponde al cauce principal y cauces secundarios.

La información necesaria de cada celda es su cota de fondo y la necesaria en cada vinculación es la rugosidad.

Las condiciones de borde fijadas en el modelo durante la calibración fueron (i) nivel en función del tiempo $H(t)$, en celdas del borde entrante y (ii) nivel en función del tiempo, $H(t)$ en celdas del borde saliente. Es necesario destacar que se consideraron dos bordes salientes. El borde saliente principal se ubicó en el extremo aguas abajo del modelo (km 232) donde escurre aproximadamente un 95% del caudal entrante, en tanto que se fijó también un borde saliente coincidente con la derivación de río Pavón a la altura del km 368 en las proximidades del hidrómetro de Villa Constitución.

Las condiciones de borde fijadas en la segunda etapa consistieron en (i) borde entrante ídem a la primera etapa y (ii) borde saliente se propusieron condiciones del tipo nivel-caudal $Q(H)$. Como se mencionó, la operación del modelo imponiendo la condición de borde $H(Q)$ permitió evaluar la performance del modelo para emplearse en simulaciones de escenarios hipotéticos donde no se conocen previamente las relaciones $H(t)$ en ningún punto interno ni en los bordes entrantes y salientes.

Calibración del modelo

Al tratarse de un modelo de baja complejidad, el único parámetro de calibración con que cuenta es el coeficiente de rugosidad en las 2 direcciones ortogonales fijadas al constituir el modelo. En la definición de las ecuaciones del modelo, la velocidad es vinculada a la profundidad de agua mediante la ecuación de Manning por lo que el coeficiente de rugosidad de Manning se convierte en el parámetro que representa la resistencia al escurrimiento pero así también engloba, en forma aproximada, otros mecanismo de resistencia al escurrimiento que no son descriptos por las ecuaciones gobernantes (1), (2) y (3).

El proceso de calibración comprendió una serie de simulaciones considerando rugosidad uniforme en todo el tramo y variando el coeficiente de rugosidad en el rango $0.027 \text{ s/m}^{1/3} \leq \eta \leq 0.032 \text{ s/m}^{1/3}$. Las simulaciones se realizaron en el trienio del 01/01/2020 al 31/12/2022.

Cabe destacar que al proponer la modelación para calibración con señal de entrada $H(t)$ en el borde entrante y $H(t)$ en el borde saliente, el modelo genera internamente en función de su constitución y fundamentalmente de la rugosidad propuesta, el caudal intercambiado y velocidad entre cada celda constitutiva como así también el volumen de agua almacenado para cualquier tiempo de la modelación. En función de esto, la bondad de la calibración fue evaluada a partir del mejor ajuste en términos de niveles diarios en cada uno de los 6 hidrómetros y la comparación del hidrograma generado en el borde entrante y su comparación con los estimados por la SNIH (2023) y los aforados por SNIH (2023).

Tras las corridas de calibración se comprueba que con los coeficientes de rugosidad variando en el rango indicado anteriormente, los ajustes a los limnigramas observados en los 6 hidrómetros son calificados como muy buenos. Por otro lado, los caudales generados en la modelación constituyen una banda en la cual quedan agrupados el 97% de los caudales diarios estimados por SNIH (2023), los aforados por SNIH (2023) en la estación Timbues (próxima a PSM) y los estimados por Basile y Riccardi (2023). Tras esta valoración del ajuste se asumió como mejor ajuste el que se logra con un coeficiente de rugosidad $\eta = 0.0295 \text{ s/m}^{1/3}$ y considerando un margen de error ± 0.0025 ($\pm 9.0\%$). En la Figura 7 se presentan el hidrograma generado con el mejor ajuste considerado, los valores de caudales medios diarios (serie discontinuada) estimados por SNIH (2023) y los caudales aforados en PSM por SNIH (2023), además en la curva de caudales generados se han agregado las barras de error determinadas en un $\pm 9.0\%$.

En la Figura 8 se presentan los limnigramas observados y simulados asociados a cada uno de los 6 sitios de hidrómetros del tramo. En Tabla 3 se presentan un resumen de los errores evaluados en cada limnigrama al comparar valores de niveles diarios simulados con observados. En lo que concierne a errores de valores extremos individuales fueron determinados los errores entre valores máximos y valores mínimos y en lo que concierne a errores globales se determinaron la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS), el coeficiente de correlación (R2) y el error típico (ET).

Al analizar los errores de valores mínimos, el modelo tiende a determinar niveles mínimos inferiores a los observados en tanto que no evidencia una tendencia en lo que tiene que ver con los valores máximos. Asimismo, se evidencia en los hidrómetros aguas abajo de SNI, RAM y SPE errores de extremos mayores en valor absoluto a los de agua arriba. Se hipotetiza que estos errores se deben mayormente a mecanismo del escurrimiento asociados a los ciclos diarios de mareas como así también las ocasionales sudestadas que se manifiestan en el río de la Plata, cuyos movimientos no pueden ser descriptos en su totalidad por este modelo de baja complejidad. Si bien en este proceso de calibración los niveles aguas abajo como aguas arriba están ciertamente condicionados o “atados” por las condiciones de borde impuestas de $H(t)$ en cada frontera, se evidencia una multiplicidad de mecanismos hidrodinámicos que no pueden ser representados en su totalidad por el modelo. Cabe agregar que la discretización temporal de la información de borde de 1 día, no permite introducir alteraciones del régimen de niveles subdiarias que pueden introducir tanto las mareas o tormentas y que se propagan hacia aguas arriba.

Por otro lado, la evaluación de bondad del ajuste de las series temporales mediante el ET se acota en 0.17 m, el NS tiene promedio de 0.90 con un mínimo de 0.80 y R2 toma valores entre 0.93 y 1.00, pudiéndose calificar como un ajuste Muy Bueno.

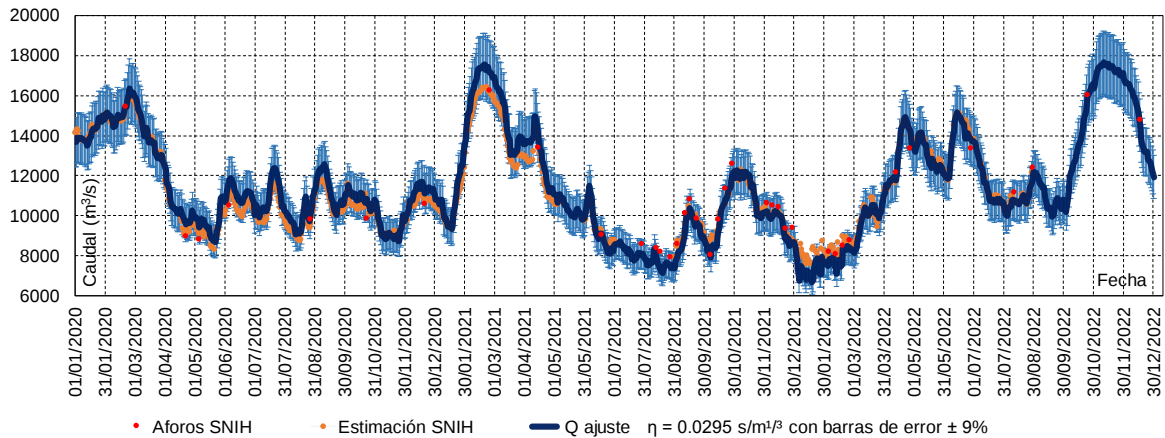


Figura 7. Hidrograma entrante generado en la calibración del modelo.

Tabla 3. Valores de variables y errores evaluados en calibración para mejor ajuste.

Variables / Hidrómetros	PSM	ROS	VCO	SNI	RAM	SPE
Zmax obs	6.85	6.07	4.99	4.34	3.48	2.95
Zmin obs	3.11	2.55	1.66	1.64	1.03	0.57
Rango de Zmax - Zmin obs(m)	3.74	3.52	3.33	2.70	2.45	2.38
Zmax sim (m)	6.86	6.07	4.86	4.59	4.01	3.00
Zmin sim (m)	2.80	2.32	1.38	1.20	0.82	0.16
Rango Zmax Zmin sim (m)	4.06	3.75	3.48	3.39	3.19	2.84
Errores						
Error (m) Zmax	0.01	0.00	-0.13	0.25	0.53	0.05
Error (m) Zmin	-0.31	-0.23	-0.28	-0.44	-0.21	-0.41
Error Rango (m)	0.32	0.23	0.15	0.69	0.74	0.46
ET (m)	0.05	0.07	0.17	0.11	0.14	0.07
NS	0.96	0.96	0.93	0.87	0.80	0.90
R2	1.00	0.99	0.95	0.97	0.93	0.98

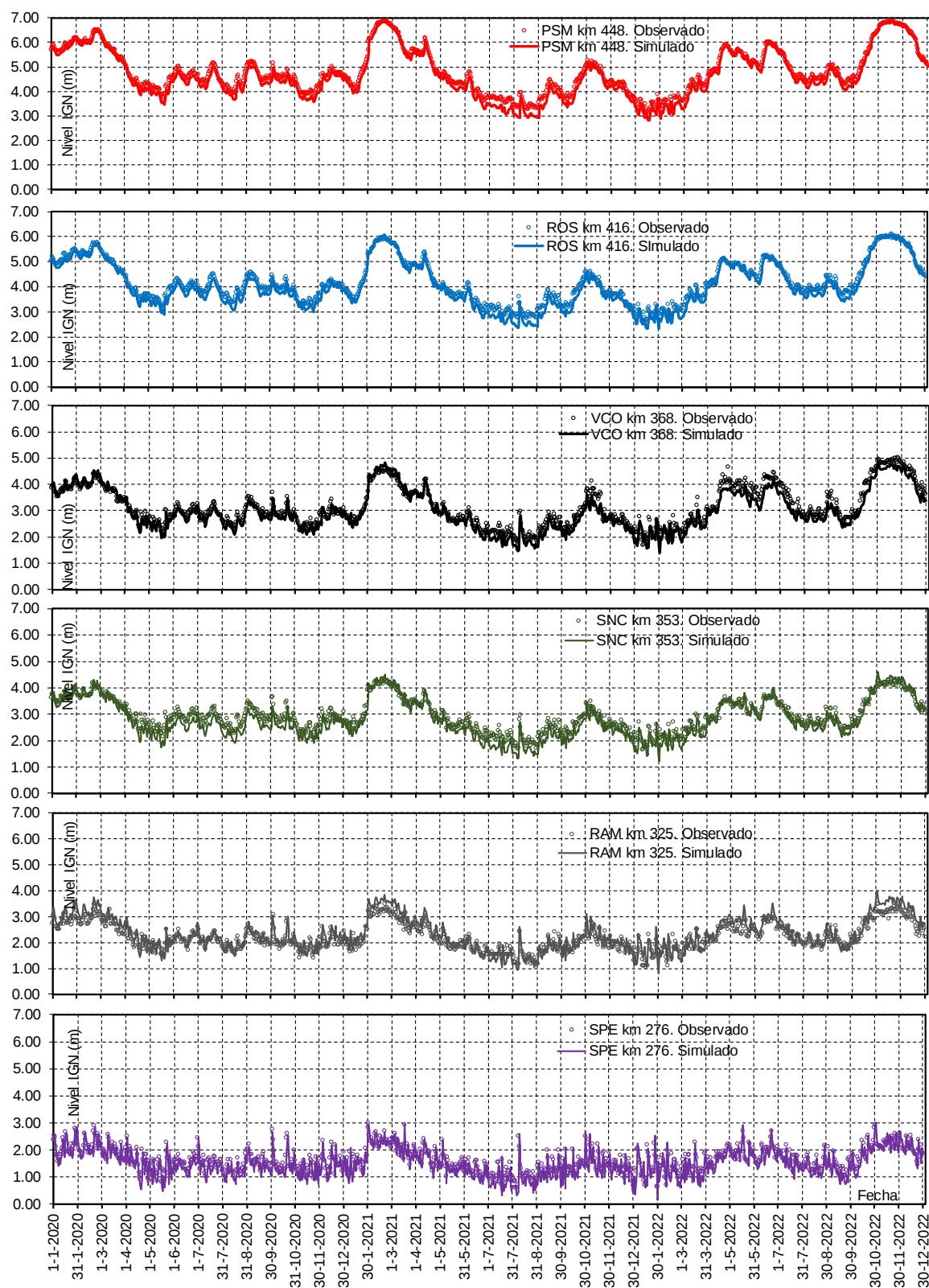


Figura 8. Limnigramas Observados y Simulados en los sitios de los hidrómetros.

EVALUACIÓN DEL MODELO COMO HERRAMIENTA DE PREDICCIÓN

Como fuera mencionado, en esta etapa de la modelación se aplicó el modelo como herramienta de predicción evaluándose su bondad. Se buscó analizar esta capacidad para verificar su aptitud como predictor en cualquier evento real o hipotético de caudales que se requiera analizar. Para lograr que el modelo se comporte como una herramienta de predicción se procedió a cambiar las condiciones de borde planteada en el proceso de calibración. En este sentido, se utilizó como señal en el borde entrante una relación $Q(t)$ y en los bordes aguas abajo se testearon diversas relaciones H-Q.

Para las nuevas condiciones de borde el modelo fue alimentado en el borde aguas arriba con un hidrograma que correspondió al generado en la primera etapa del estudio y en los bordes aguas abajo se trabajó de forma diferenciada. En el borde del río Pavón se asumió que el caudal saliente fue del orden del 5% del caudal entrante y se fijó una relación H-Q a partir de condiciones geométricas e hidráulicas. En cambio, en el borde aguas abajo del km 232, claramente influenciado por los ciclos diarios de mareas y por tormentas en el río de la Plata se forzó la definición de una relación biunívoca H-Q que estableciera la mejor bondad de ajuste en la comparación de los limnigramas calculados y observados en los sitios de los hidrómetros. Además, se compararon las curvas de permanencias de los niveles hidrométricos y de las profundidades efectivas en la VNT a lo largo del trienio.

En la Figura 9 se presenta la curva H-Q propuesta en el borde aguas abajo que determinó el mejor ajuste en la prueba de bondad del ajuste. Claramente puede observarse la relación cota-caudal no es biunívoca, lo que condiciona la respuesta de este modelo y cualquier otro de mayor complejidad.

Evaluación de funcionamiento como predictor de niveles en los sitios de los hidrómetros

Para evaluar la bondad de la modelación con el coeficiente de rugosidad uniforme $\eta = 0.0295 \text{ s/m}^{1/3}$ y con la relación H-Q biunívoca impuesta en el borde abajo se utilizaron los mismos indicadores que en la primera etapa, adicionándose el análisis de la capacidad del modelo para determinar las curvas de permanencias de las profundidades efectivas.

En la Tabla 4 se presenta un resumen de los errores evaluados en cada limnigrama al comparar valores de niveles diarios simulados con observados, los errores entre valores máximos y valores mínimos, la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS), el coeficiente de correlación (R^2) y el error típico (ET). En esta configuración del modelo también fueron evaluados los niveles calculados en los bordes aguas arriba (km 480) y aguas abajo (km 232). Se aclara que el nivel en la condición de borde saliente en el río Pavón no se incorpora en la Tabla 4 pues se asume incluida con la evaluación de los niveles en el sitio VCO (km 368). En la Figura 10 se presentan las graficaciones de los limnigramas observados y simulados en las 6 localizaciones de los hidrómetros.

Del análisis global de los errores de valores extremos y de la series integrales se evidencia que excepto en el sitio del hidrómetro SPE (km 276) y en el borde saliente aguas abajo (km 232), la calificación de la aproximación puede considerarse entre Excelente y Muy Buena, incluso se mejoran algunos indicadores respecto a las modelaciones imponiendo relaciones $H(t)$ en ambos bordes, cuando se ajustó el coeficiente de rugosidad. Respecto a la bondad de la aproximación en la zona de SPE, solo alcanza un valor entre Regular-Aceptable y No Aceptable en el borde aguas abajo. Sin dudas el forzado de una condición H-Q biunívoca tan disímil a la relación observada (Figura 9) se traduce en un rango de cálculo de alturas en las cercanías del borde aguas abajo mucho menor al real observado. Si analizamos la curva H-Q propuesta, el rango de variación de niveles observados para caudales mínimos ($\sim 7000 \text{ m}^3/\text{s}$) está en un rango desde $-0.10 \text{ m} \leq Z_{\text{aba obs}} \leq 2.65 \text{ m}$ en tanto que en la zona de caudales máximos ($> 16000 \text{ m}^3/\text{s}$) está en un rango entre $0.90 \text{ m} \leq Z_{\text{aba obs}} \leq 2.40 \text{ m}$, por otro lado la curva H-Q resultante de la mejor aproximación en el tramo, se logró forzando a que tomara valores de $Z_{\text{aba sim}} = 1.00 \text{ m}$ para $Q = 6300 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Z_{\text{aba sim}} = 1.50 \text{ m}$ para $Q = 16700 \text{ m}^3/\text{s}$.

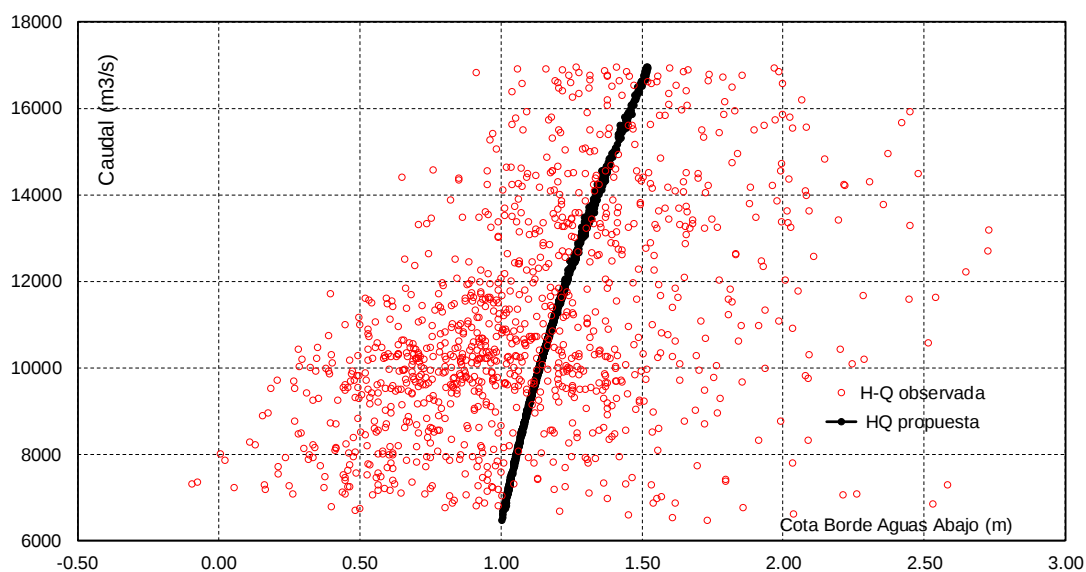


Figura 9. Relación H-Q propuesta en borde aguas abajo.

Tabla 4. Valores de variables y errores evaluados en testeo como predictor.

Variables / Ubicación	km 480 Borde Arriba	km 448 PSM	km 416 ROS	km 368 VCO	km 353 SNI	Km 325 RAM	km 276 SPE	km 232 Borde Abajo
Zmax obs	8.18	6.85	6.07	4.99	4.34	3.48	2.95	2.73
Zmin obs	4.38	3.11	2.55	1.66	1.64	1.03	0.57	-0.09
Rango de Zmax-Zmin obs (m)	3.80	3.74	3.52	3.33	2.70	2.45	2.38	2.82
Zmax sim (m)	8.19	6.87	6.06	4.74	4.41	3.68	2.33	2.12
Zmin sim (m)	4.38	2.88	2.45	1.82	1.71	1.48	1.14	1.00
Rango Zmax Zmin sim (m)	3.81	3.99	3.61	2.92	2.70	2.19	1.19	1.12
Errores								
Error (m) Zmax	0.01	0.02	-0.02	-0.25	0.07	0.20	-0.62	-0.61
Error (m) Zmin	0.00	-0.23	-0.10	0.16	0.07	0.45	0.57	1.10
Error Rango (m)	0.02	0.25	0.09	-0.41	0.00	-0.26	-1.19	-1.71
ET (m)	0.05	0.05	0.07	0.17	0.11	0.14	0.07	0.41
NS	1.00	0.97	0.96	0.91	0.88	0.71	0.54	0.13
R2	1.00	0.99	0.98	0.92	0.91	0.84	0.55	0.21

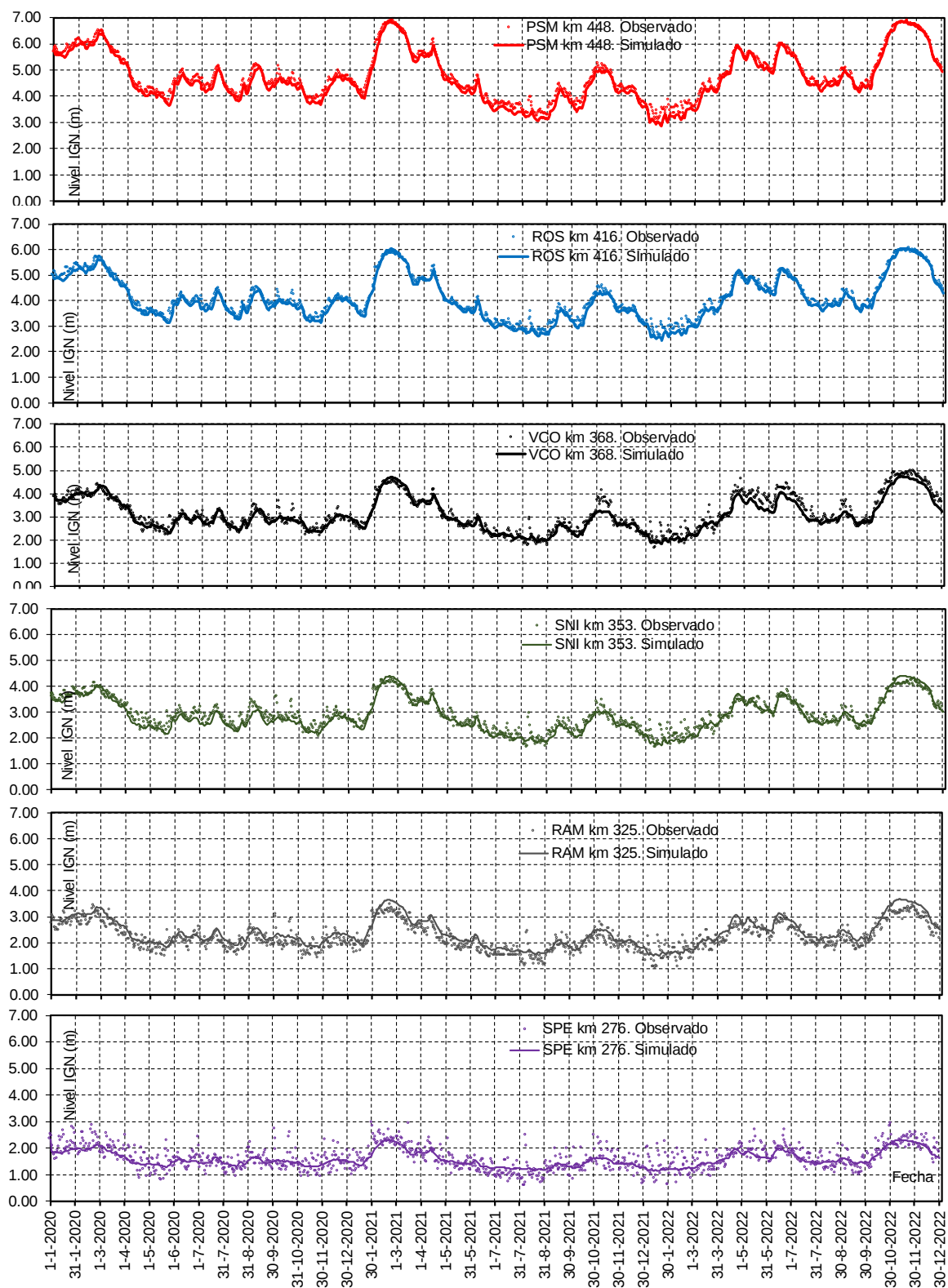


Figura 10. Limnigramas observados y simulados en evaluación del modelo como predictor.

Permanencias de profundidades efectivas en la Vía de Navegación Troncal en el trienio de la bajante

Sin duda que, además de predecir los niveles con un adecuado umbral de exactitud, otra de las capacidades de interés del modelo y de esta modelación en particular, es evaluar la bondad con que permite predecir las permanencias de los niveles en determinados sitios de interés. Una particular importancia de esta capacidad del modelo lo constituye para la planificación de la navegación y posibles operaciones de dragado y mantenimiento en la VNT. En este sentido, a partir de la existencia antecedente de una profundidad de diseño de la VNT de 36 pies (10.97 m) en gran parte del tramo en estudio, se analizó la permanencia de las profundidades efectivas observadas y simuladas en los sitios de los hidrómetros. En la Figura 11 se presentan las representaciones gráficas resultantes del análisis y se adicionan también los errores evaluados a nivel de serie con la eficiencia NS y el coeficiente de correlación R2. La bondad de la aproximación puede considerarse entre Excelente y Buena para sitios de PSM, ROS, VCO, SNI y RAM y Regular para SPE.

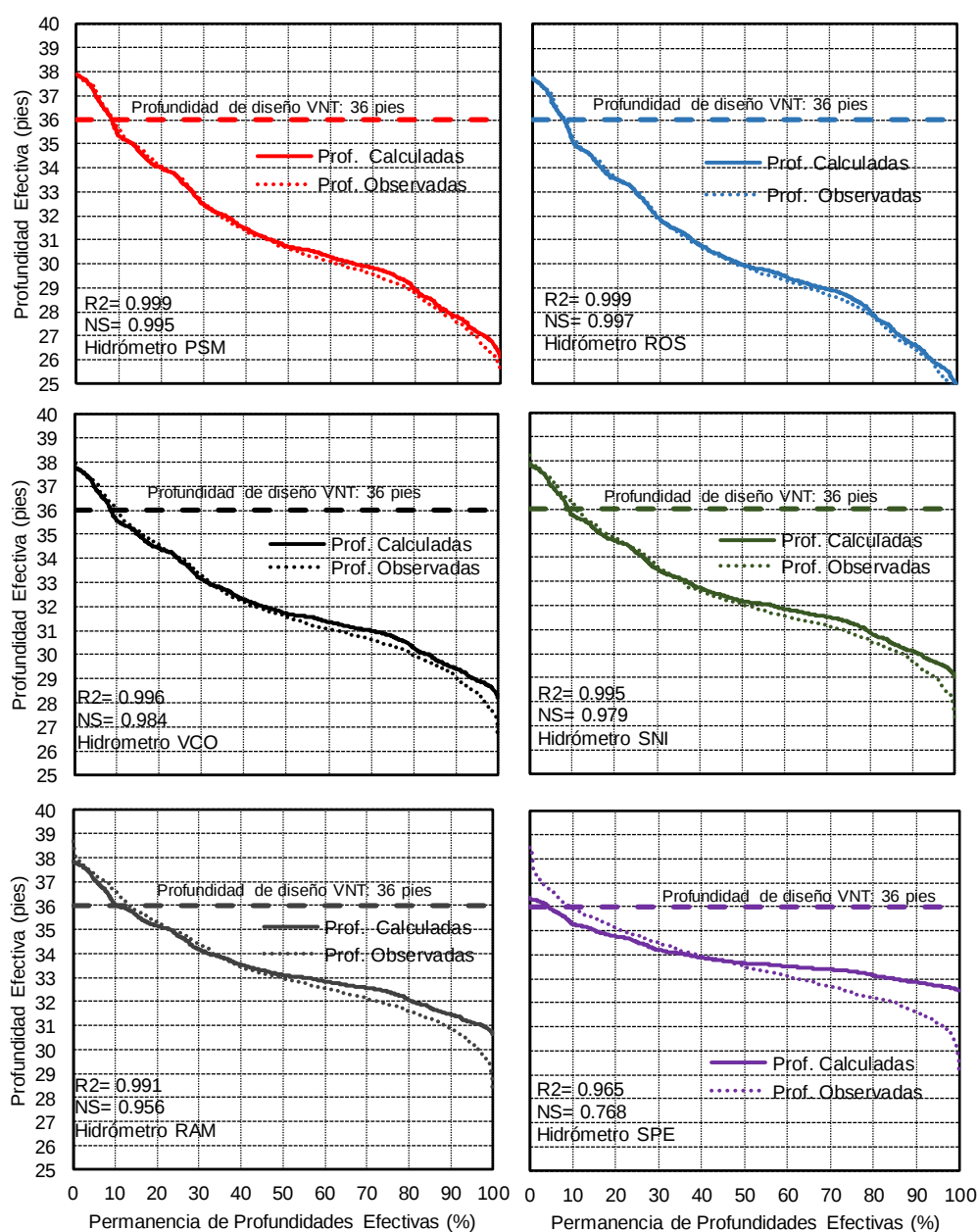


Figura 11. Permanencia de Profundidades Efectivas en los sitios de los Hidrómetros.

A modo de resumen para una visualización integral del tramo en estudio se presenta en la Figura 12 el perfil longitudinal del fondo del río en el eje de la VNT, el fondo de diseño de la VNT, los perfiles longitudinales hidráulicos de los niveles máximos y mínimos observados y simulados en el trienio de la bajante y de los niveles referencia de la VNT (80% de permanencia), la ubicación de los hidrómetros y los pasos críticos y los anchos del cauce del río. Se constata, tanto a partir de los niveles observados como de los simulados, que los 36 pies de la profundidad de proyecto de la VNT pudieron asegurarse en los pasos críticos solo durante la presentación de niveles cuyas permanencias en cada hidrómetro son inferiores al 10% del tiempo total de la bajante.

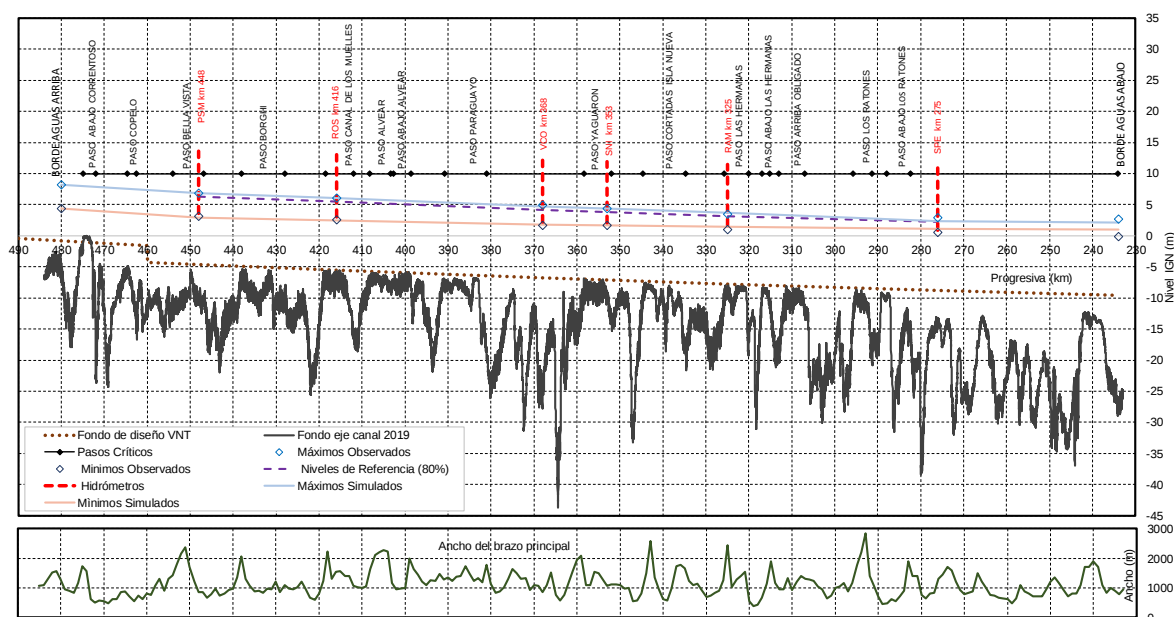


Figura 12. Perfil longitudinal del fondo del río en eje de la VNT, fondo de diseño de la VNT, perfiles hidráulicos máximo y mínimo y de referencia, ubicación de hidrómetros y pasos críticos y anchos del cauce del río.

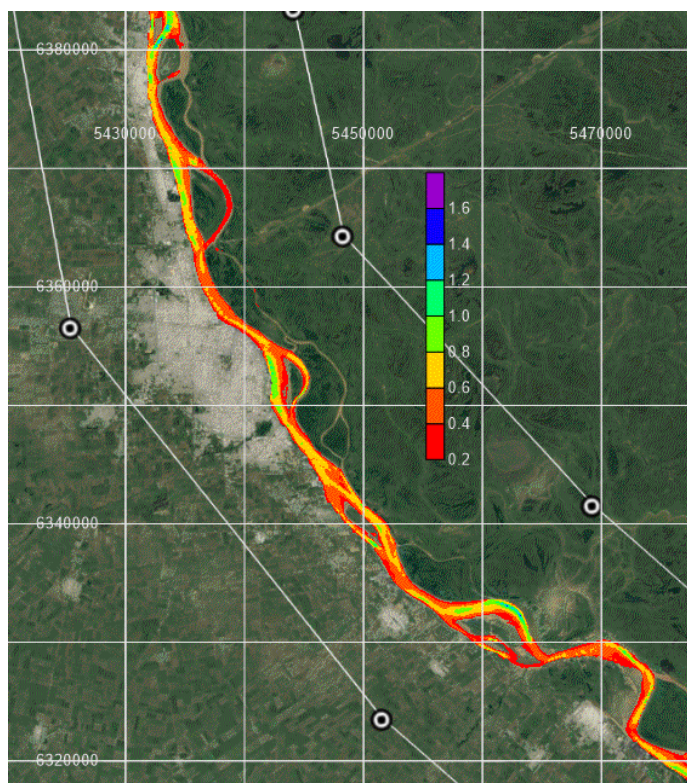
Definición de módulo de velocidades integradas en la vertical

A manera ilustrativa se presenta la potencialidad del modelo para genera campos areales del modulo de la velocidad integrada en la vertical. Si bien no se cuentan con aforos con los que se puede constatar la bondad del ajuste entre velocidades observadas y simuladas durante el período de la bajante, se muestran como ejemplos, las velocidades computadas para caudales cercanos a los extremos observados en un tramo cercano a ROS (km 416). La Figura 13(a) corresponde a un caudal circulante de 16000 m³/s y la Figura 13(b) corresponde a un caudal circulante de 6800 m³/s. Si bien no pueden emplearse los mapas de modo cuantitativo, puede verse claramente con los tonos de colores de los contornos rellenos el contratarse entre los campos de velocidades de caudales tan disímiles.

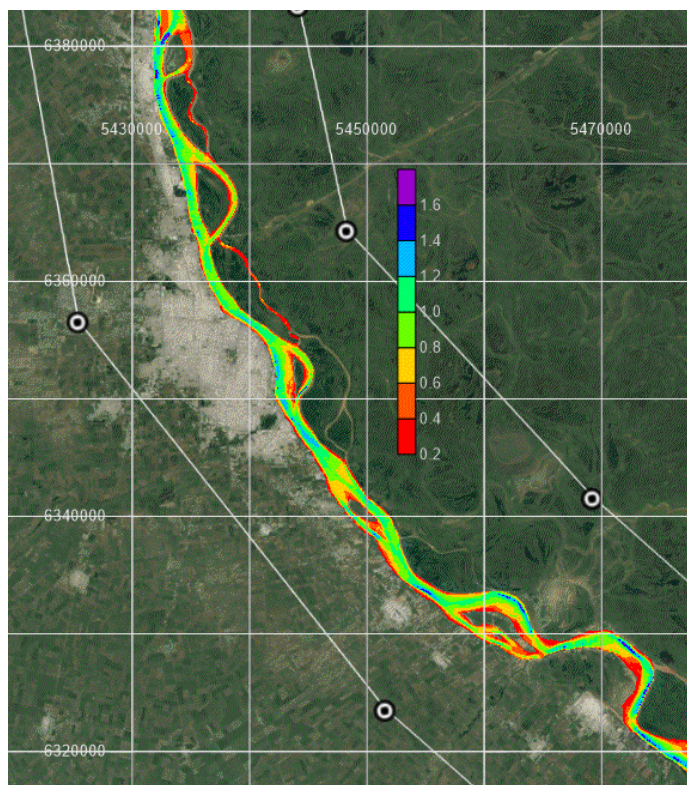
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Permanencias de niveles hidrométricos extremos

Se presenta a continuación el análisis de permanencias de niveles extremos en los 4 sitios donde se evidenció el mejor comportamiento del modelo en su utilización como predictor. En la Figura 14 se presentan las permanencias de las series de niveles y niveles máximos y mínimos e histogramas observados y simulados y nivel de referencia de la VNT, tanto para la serie completa de niveles como para la serie moderna (1972-2022) en PSM, ROS, VCO y SNI. Además, se presentan los histogramas de frecuencias relativas de los niveles dentro del trienio de la bajante. En la Tabla 5 se presentan la permanencias observadas y simuladas.



(a)



(b)

Figura 13. Campo de velocidades (m/s) integradas en la vertical en km 416. (a) $Q = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$ y (b) $Q = 16000 \text{ m}^3/\text{s}$.

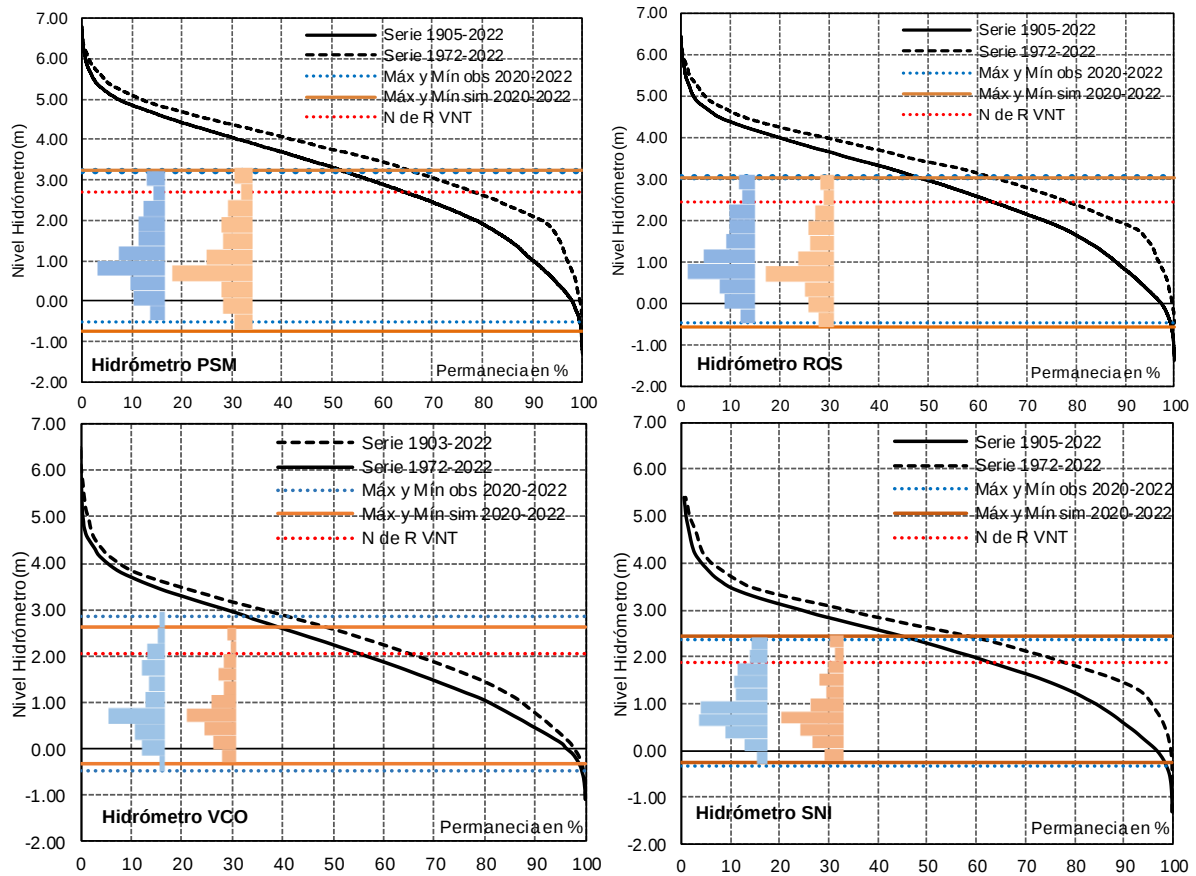


Figura 14. Permanencias de las series de niveles y niveles máximos y mínimos e histogramas observados y simulados y nivel de referencia de la VNT.

Tabla 5. Permanencias de niveles extremos observados y simulados.

		H_{hidrom} (m)	% en Serie completa	% Serie 1972- 2022
PSM	Max Obs	3.22	52.0	65.5
	Min Obs	-0.52	>99.0	100
	Max Sim	3.24	52.4	65.2
	Min Sim	-0.75	>99.0	100
ROS	Max Obs	3.04	47.8	62.8
	Min Obs	-0.48	>99	100
	Max Sim	3.03	48	63
	Min Sim	-0.58	>99	100
VCO	Max Obs	2.87	40.5	51.3
	Min Obs	-0.46	>99	100
	Max Sim	2.62	48.8	61.6
	Min Sim	-0.30	>99.0	>99.0
SNI	Max Obs	2.36	47.8	62.0
	Min Obs	-0.34	98.9	100
	Max Sim	2.43	45.4	69.1
	Min Sim	-0.27	98.9	>99.0

En PSM el máximo nivel observado corresponde al 52% de permanencia en la serie de niveles completa (1905-2022) en tanto que en la serie moderna (1972-2022) se asocia a un 65.5% de permanencia. En lo que concierne a los valores simulados las permanencias resultaron de 52.4% y 65.2% (errores absolutos menores al 0.4%). En niveles mínimos observados, el menor corresponde a >99% y 100% de permanencia en la serie completa y en la moderna respectivamente. Por otro lado, en niveles mínimos simulados, las permanencias son idénticas a las correspondiente a mínimos observados.

En ROS el máximo nivel observado corresponde al 47.8% de permanencia en la serie de niveles completa (1884-2022) en tanto que en la serie moderna (1972-2022) se asocia a un 62.8% de permanencia. En lo que concierne a los valores simulados las permanencias resultaron de 48.0% y 63.0% (errores absolutos menores al 0.2%). En niveles mínimos observados y simulados se da el mismo comportamiento que en el caso de PSM.

En VCO el máximo nivel observado corresponde al 40.5% de permanencia en la serie de niveles completa (1904-2022) en tanto que en la serie moderna (1972-2022) se asocia a un 51.3% de permanencia. En lo que concierne a los valores simulados las permanencias resultaron de 48.8% y 61.6% (errores absolutos menores a 9.7%). En niveles mínimos observados y simulados se da el mismo comportamiento que en el caso de PSM y ROS.

En SNI el máximo nivel observado corresponde al 47.8% de permanencia en la serie de niveles completa (1905-2022) en tanto que en la serie moderna (1972-2022) se asocia a un 62.0% de permanencia. En lo que concierne a los valores simulados las permanencias resultaron de 45.4% y 69.1% (errores absolutos menores a 7.1%). En niveles mínimos observados y simulados se da el mismo comportamiento que en el caso de PSM, ROS y VCO.

Se concluye que las determinaciones de las permanencias a partir de los niveles simulados, tienen una elevada coincidencia con los niveles observados en PSM y ROS y muy buena coincidencia en VCO y SNI.

Además de la observación de los histogramas de frecuencias relativas puede demostrarse que el intervalo de clase donde se dieron las mayores valores de frecuencia han coincidido entre las series de valores observados y simulados.

Al contrastar los niveles observados con el nivel de referencia, puede inferirse que durante la bajante, los niveles hidrométricos del río se situaron en promedio un 90.6% de los días por debajo de los niveles de referencia establecidos para el diseño de la VNT. A partir de valores de permanencias de los niveles se reafirma la severidad de la bajante observada en el río Paraná durante el trienio 2020-2022.

En la Figura 15 se presenta en el subtramo del río entre PSM y SNI, el rango de oscilación de los niveles observados y calculados (por razones de escala de representación la diferencia es imperceptible en la figura) en el trienio 2020 a 2022 y los niveles extremos observados en la serie completa de niveles desde 1904 a 2022 y en la serie moderna desde 1972 a 2022, conjuntamente con el perfil del fondo en el eje de la VNT en 2019. La representación permite una mirada adicional acerca de la rigurosidad de los niveles registrados en la bajante en relación a sus extremos históricos.

Curvas H-Q observadas y simuladas

Un tópico de interés al plantear la comparación entre niveles observados y simulados, tanto de la calibración como de la explotación del modelo como predictor, es en función de las relaciones altura-caudal en cada uno de los sitios de los hidrómetros.

En las Figuras 16 y 17 se presentan las relaciones H-Q entre los niveles hidrométricos y los caudales observados y simulados. Se aclara que solo se contó con caudales observados en el sitio de PSM, en el resto de los sitios se asumió que el caudal observado es igual al simulado durante la etapa de calibración.

La Figura 16 corresponde a las curvas H-Q originadas en la calibración donde se impusieron niveles en función del tiempo en ambos bordes. Puede observarse claramente que a medida que avanzamos hacia aguas

abajo las relaciones tanto en valores observados como simulados tiene una notable dispersión en relación a un planteo de biunicidad. Precisamente, tal como se mencionara anteriormente, los forzantes de niveles en el borde aguas abajo propagan su efecto hacia aguas arriba, pudiéndose evidenciar que solamente en ROS y PSM no cobra demasiado importancia la propagación de la perturbación en el borde abajo.

La Figura 17 corresponde a las curvas H-Q originadas en la explotación del modelo como predictor. Se evidencia que la biunicidad de las relaciones entre H y Q que se fuerzan aguas abajo se propagan hacia aguas arriba. La imposición de la condición de borde aguas abajo que le otorga al modelo capacidades como predictor, hace que la modelación pierda bondades de cálculo en la región cercana al borde aguas abajo.

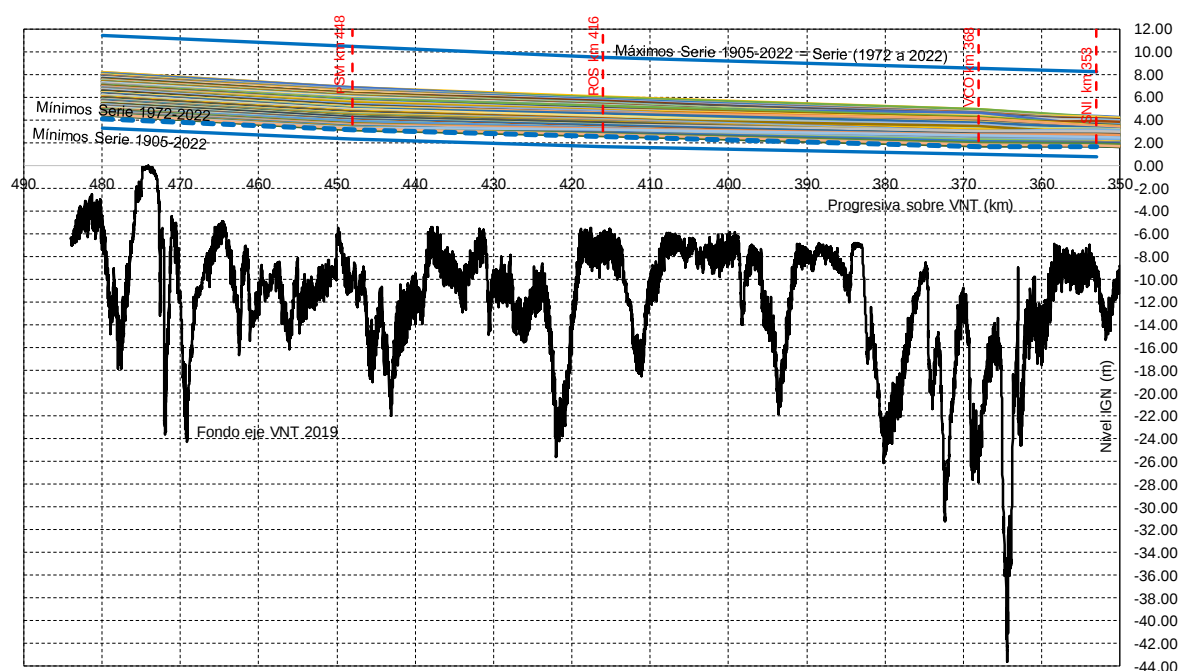


Figura 15. Rango de Niveles en trienio 2020-2022 y Extremos en Series (1904-2022) y (1972-2022) en subtramo desde PSM a SNI.

CONCLUSIONES

La estadística descriptiva de los niveles hidrométricos observados en el trienio 2020 a 2022 sin lugar a dudas ratifica que se trató de una de las más severas bajantes del río Paraná desde que se realizan mediciones. Si se analizan los niveles en las curvas de permanencias (ocurrencias de niveles mayores o iguales) se evidencia que los niveles observados entre 2020 a 2022 en el decil de mayor frecuencia relativa con respecto a las curvas de permanencias de la serie completa (1904 a 2022), se determina en las estaciones PSM, ROS, VCO y SNI un valor promedio de 89% y si comparamos con la serie contemporánea (1972-2022) la permanencia asociada al grupo de niveles del decil de mayor frecuencia relativa es de 97%.

En lo referente a la calibración del modelo de simulación hidrodinámica de baja complejidad empleado, se ha logrado aproximar la mejor respuesta del mismo, en un escenario en que se incorporan en ambos bordes las condiciones $H(t)$ observadas, con un coeficiente de Manning uniforme en todo el tramo e igual a $\eta = 0.029 \text{ s/m}^{1/3}$. Al tratarse de un modelo simplificado de baja complejidad en sus ecuaciones gobernantes, el coeficiente de resistencia encapsula parcialmente y en forma aproximada otros mecanismos que no son debidamente contemplados por las ecuaciones gobernantes simplificadas.

Los ajustes de limnigramas han sido Muy Buenos en todos los sitios de los hidómetros PSM, ROS, VCO, SNI, RAM y SPE. Se evidencia en todas las estaciones de aforos que los mínimos simulados son inferiores a

los observados y en menor medida los máximos simulados son mayores a los observados en las 3 estaciones aguas abajo (SNI, RAM y SPE).

Cuando se realiza el análisis de sensibilidad del coeficiente de Manning ajustado, los niveles de agua no cambian significativamente debido a los forzantes impuestos a los mismos en los bordes aguas arriba y abajo, en cambio, varía el caudal intercambiado. En el escenario calificado como de mejor ajuste, los caudales generados internamente en PSM por el modelo para $0.027 \text{ s/m}^{1/3} \leq \eta \leq 0.032 \text{ s/m}^{1/3}$ establecieron una franja valores que incluyen el 97% de los caudales calculados por el SNIH (2023), caudales aforados por SNIH (2023) y los determinados por Basile y Riccardi (2023).

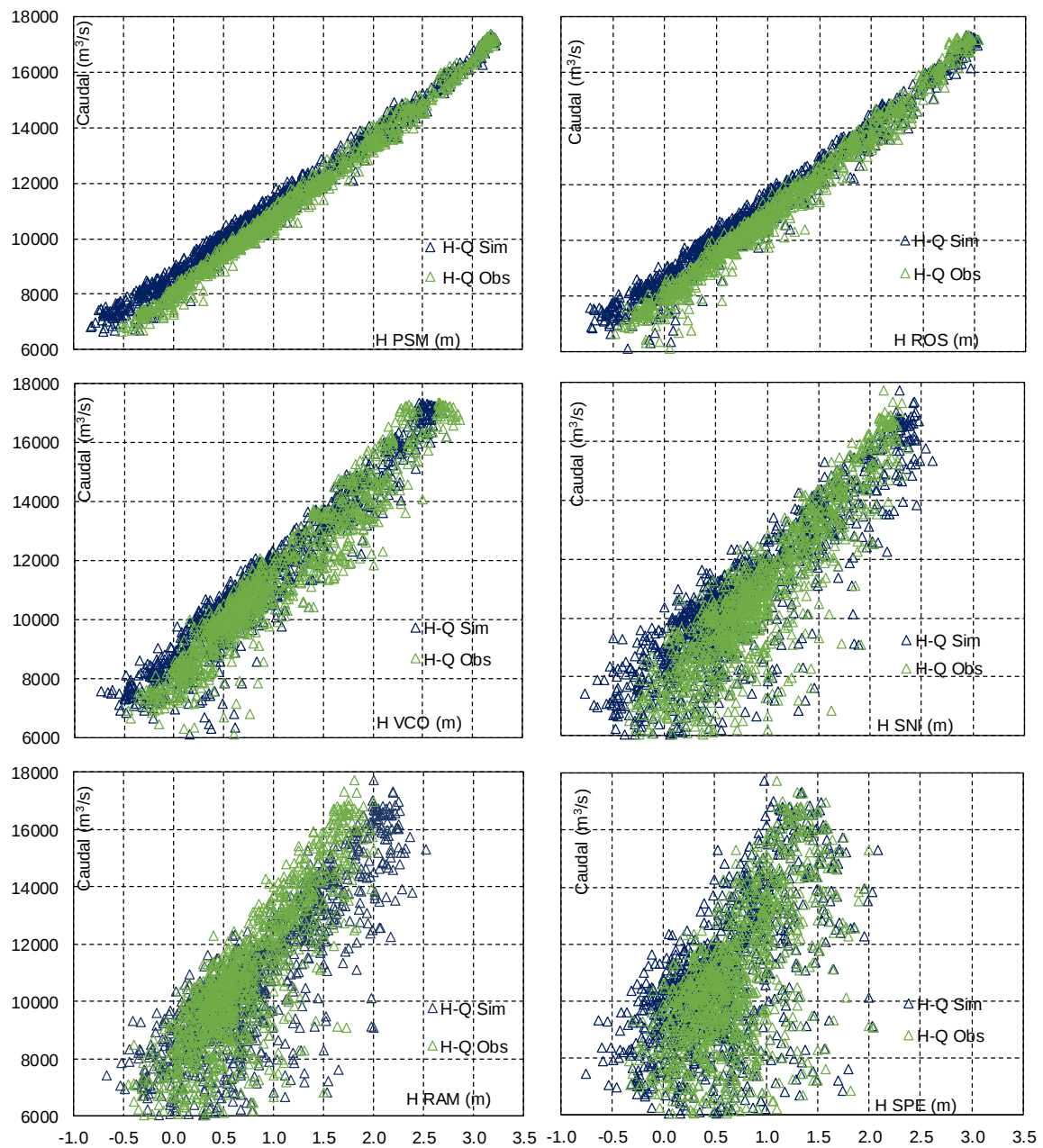


Figura 16. Relaciones H-Q en calibración con imposición de condiciones de borde H(t) y H(t).

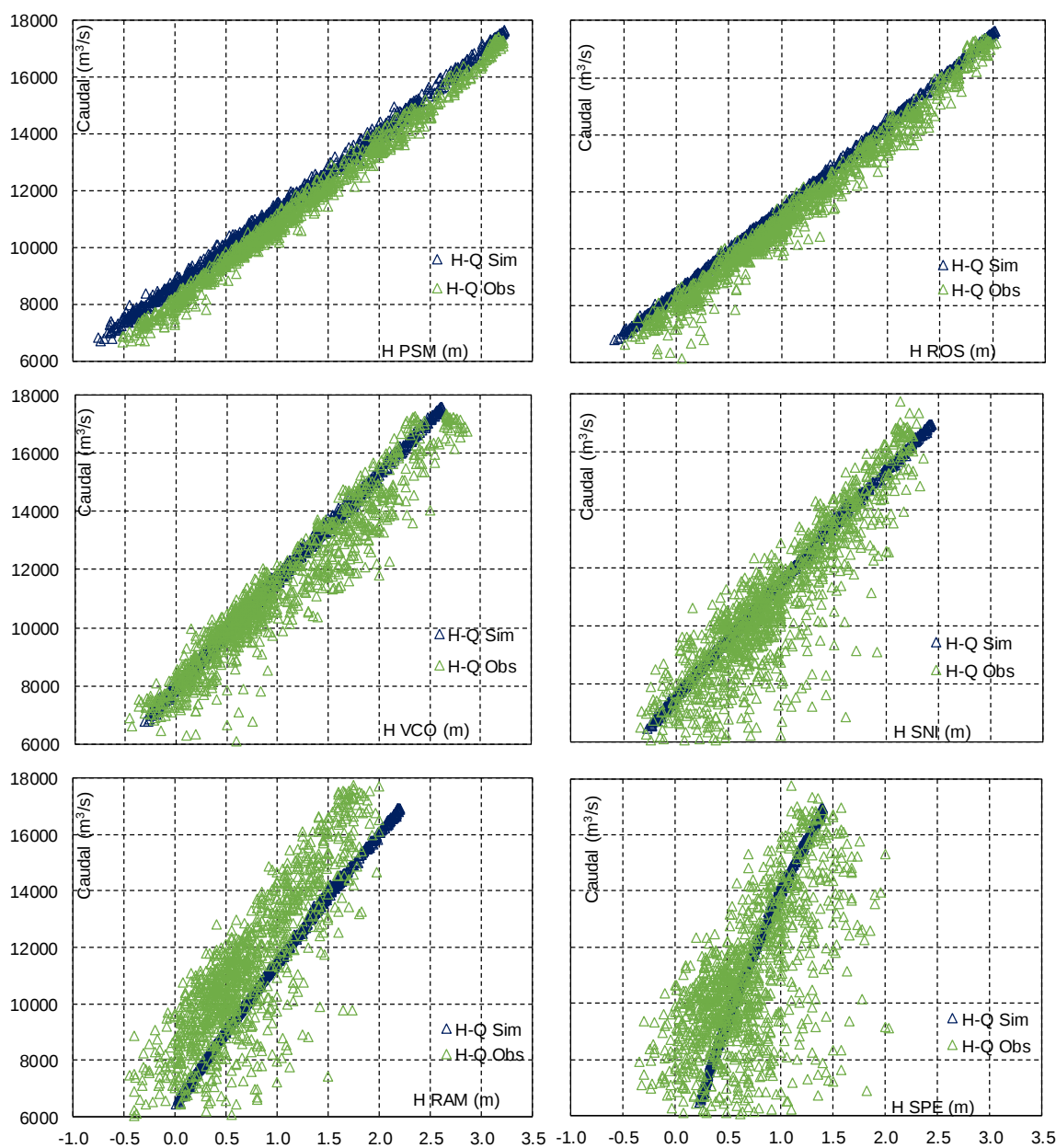


Figura 17. Relaciones H-Q en explotación del modelo como predictor con imposición de condiciones de borde $Q(t)$ y H-Q.

Se evidencia un factor no menor que influye fuertemente en la condición de borde aguas abajo, que es la oscilación de niveles debido al ciclo diario de mareas y las alteraciones aleatorias no regulares de niveles por oleaje y tormentas en el río de la Plata. Sin dudas, este modelo no describe con sus ecuaciones los mecanismos hidrodinámicos adicionales y además el introducir la condición de borde cada 24 hs, tampoco permite reproducir las perturbaciones y su propagación hacia aguas arriba de las variaciones subdiarias de niveles. Esto hace que el ajuste vaya descendiendo en su calidad desde el sitio VCO hacia aguas abajo.

No obstante, en la calibración cuando se comparan las curvas H-Q observadas y simuladas el ajuste puede considerarse entre Muy Bueno y Bueno en todas las estaciones de comparación.

En la evaluación del modelo como herramienta de predicción, se lo alimentó con el hidrograma de caudales medios diarios generado con el mejor ajuste logrado en la calibración e imponiendo en el borde aguas abajo una condición H-Q biunívoca resultante de múltiples pruebas de aproximación. Puede verificarse que la relación entre niveles y caudales observadas en el borde abajo se aleja de forma importante de una relación biunívoca y esto no lo puede representar el modelo por lo que, los resultados en términos de niveles de agua en las estaciones de SPE y RAM no son buenos. En la comparación de limnigramas las bondades de la aproximación pueden calificarse como Muy Buenas entre el borde aguas arriba (km 480) y SNI (km 353), Aceptables en RAM (km 325) y Pobres en SPE (km 276) y en el borde aguas abajo (km 232).

La elección de la curva H-Q en el borde aguas abajo constituyó una variable de ajuste para el uso del modelo como herramienta de predicción. En este sentido, fueron evaluadas diferentes relaciones y hasta una relación $H(t)$ constante, adoptándose la que menor error de niveles provocaba en las estaciones cercanas al borde aguas abajo. Resulta pertinente mencionar que si bien la influencia de la curva H-Q en el borde aguas abajo se atenúa hacia aguas arriba, el modelo computó pequeñas variaciones de niveles, propagadas hasta PSM. Se evidencia que, al fijar como condición de borde aguas abajo en el km 232 una relación H-Q, el modelo gana capacidad como predictor pero pierde calidad en la reproducción de los niveles observados en la región cercana al borde.

Otra característica que ha resultado satisfactoria cuando se procesan los niveles calculados en la modelación, es el establecimiento de las permanencias de los mismos y su comparación con las permanencias observadas. Se destaca que la proyección de las permanencias de niveles ante una determinada señal de entrada al tramo resulta de importancia para la planificación entre otras de la navegación comercial. En este sentido, la permanencia de las profundidades efectivas en la VNT como los histogramas de frecuencias relativas de los niveles en el trienio, fueron considerados entre Excelentes a Buena desde PSM a RAM y Regular en SPE.

El problema introducido por la condición de borde aguas abajo puede mejorarse considerando el traslado hacia aguas abajo y lo óptimo será hasta el río de la Plata (como se reporta por otros autores en trabajos antecedentes con modelos unidimensionales). No obstante a partir del km 232 el río se bifurca en el Paraná de las Palmas y el Paraná Guazú y otros cauces, por lo que todo esto involucrará una sustancial complejización del escenario de modelación.

En lo que concierne a la hipótesis de bifurcación de escurrimiento planteada en el río Pavón considerando una derivación de 3 al 5% de caudal, fue verificada indirectamente y es considerada adecuada. No obstante, debe ser verificada con información generada en mediciones.

Una cuestión que amerita una próxima consideración tanto en el MDE del fondo del cauce como en las proyecciones a cotas IGN de los niveles, es la posible corrección de los ceros de los hidrómetros a partir de lo presentado en la página del Instituto Nacional del Agua (INA) (s.f.) y también en INA (2018). En este trabajo no se han considerado las correcciones por detectarse en algunos casos, importantes diferencias con estudios antecedentes.

En una síntesis del trabajo realizado podemos concluir que, la herramienta de simulación se proyecta con capacidad para ser implementada en la estimación de niveles de agua y profundidades efectivas disponibles en la VNT, en posibles evaluaciones de escenarios futuros donde se disponga de la predicción de caudales entrantes al tramo en un determinado período, de modo de aportar a la mejor gestión sustentable posible de (i) la operación de obras de tomas de agua y volcamiento de efluentes; (ii) el funcionamiento de estructuras portuarias; (iii) la previsión de las restricciones del transporte fluvial y (iv) la mitigación de los impactos negativos sobre los ecosistemas presentes y la biodiversidad constitutiva de los humedales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la UNR por el apoyo brindado en el marco de los PIDs 80020190300002UR y 80020190300073UR y a la DNVN-DPI por los datos topobatimétricos e hidrométricos facilitados.

REFERENCIAS

- Basile, P. A. y Riccardi, G. A. (2002). A Quasi-2D Hydro-Morphological Mathematical Model: An Application to the Argentinean Paraná River. *International Journal of Sediment Research*, 17 (1), 20-30.
- Basile, P. A. y Riccardi, G. A. (2023). Análisis de caudales del río Paraná y contextualización de las bajantes en los años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22. *Cuadernos del CURIHAM, Edición Especial (2023): Bajante del río Paraná*. e01. <https://doi.org/10.35305/curiham.ed23.e01>
- Basile, P. A., Riccardi, G. A., Garcia, M. L. y Stenta, H. R. (2007). *Quasi-2D modeling of hydro-sedimentological processes in large lowland river-floodplain systems*. Workshop on Morphodynamics Processes in Large Lowland Rivers. Santa Fe, Argentina.
- Basile, P. A., Riccardi, G. A., Peruzzo, F. C. y Trivisonno, F. (2015). *Modelación Hidrodinámica de un Tramo del Río Paraná Inferior*. Séptimo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Montevideo, Uruguay.
- Basile, P. A., Riccardi, G. A., Peruzzo, F. C. y Garcia, M. L. (2016). Modelación Hidrodinámica Bidimensional del río Paraná Inferior. *Revista Aqua-LAC, Vol. 8, N° 2*, pp. 1-13. ISSN 1688-2873.
- Bombardelli, F. A., Menéndez, A. N., Brea, J. D., Lapetina, M. R. y Uriburu Quirno, M. (1994). *Estudio hidrodinámico del Delta del río Paraná mediante modelación matemática*. Informe LHA-INCyTH 137-03-95, Ezeiza, Argentina.
- Borús, J. y Sabarots Gerbec, M. (2015). *Caracterización de Niveles Mínimos en la Vía Navegable del río Paraná*. XXV Congreso Nacional del Agua, Paraná, Argentina.
- Dirección Nacional de Vías Navegables Delegación Paraná Inferior (2014). *Cartografía de río Paraná. Datos topobatemétricos tramo km 234 – 480*. Comunicación institucional. Rosario, Argentina.
- Dirección Nacional de Vías Navegables Delegación Paraná Inferior (2023). *Planilla de Alturas en hidrómetros de tramo Paraná Inferior*. Comunicación institucional. Rosario, Argentina.
- Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (2006). *Estudios Complementarios Hidráulicos y Morfológicos de la Zona de la Isla de la Invernada*. Informe final. UNL. Santa Fe, Argentina.
- García, M. L., Basile, P. A., Riccardi, G. A. y Rodríguez, J. F. (2015). Modelling extraordinary floods and sedimentological processes in a large channel-floodplain system of the Lower Paraná River (Argentina). *International Journal of Sediment Research*, 30 (2015), 150-159.
- García, M. L., Basile, P. A. y Riccardi, G. A. (2017). *Estudio de Aforos y Modelación Hidro-sedimentológica del Cauce y Planicie Aluvial del río Paraná*. VIII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Córdoba. Argentina.
- Guizzardi, S., Bianchi, J., Cortese, J., Uriburu Quirno, M. y Sabarots Gerbec, M. (2022). *Forecast System Implementation in the Paraná Delta*. Proceedings of the 39th IAHR World Congress 19-24 June, Granada, Spain.
- Instituto Nacional del Agua (2018). *Informe LHA 02-373-18. Campaña de relevamiento de ceros hidrométricos Delta Paraná. Estudio hidrodinámico integrador del Delta del río Paraná con fines múltiples*. Ezeiza, Argentina. 133p. https://www.ina.gov.ar/delta/pdf/03_02_INA-DELTA_Info04_CerosHidrometricos.pdf
- Instituto Nacional del Agua (s.f.). *Estudio hidrodinámico integrador del Delta del río Paraná con fines múltiples*. <https://www.ina.gov.ar/delta/index.php?seccion=4>
- Morale, M., Sabarots Gerbec, M. y García, P. (2020). *A Hydrodynamic Model as Input for a Spatial Planning Tool. Case Study: Delta of the Paraná River (Argentina)*. Proceedings of the 1st IAHR Young Professionals Congress. Spain Water and IWHR China.
- Nicholas, A. P., Sandbach, S. D., Ashworth, P. J., Amsler, M. L., Best, J. L., Hardy, R. J., Lane, S. N., Orfeo, O., Parsons, R., Reesink, A. J. H., Sambrook Smith, G. H. y Szupiany, R. N. (2012). Modelling hydrodynamics in the río Paraná, Argentina: An evaluation and inter-comparison of reduced complexity and physics based models applied to a large sand-bed river. *Geomorphology*, 169–170, 192–211.
- Peruzzo, F., Riccardi, G. A., Basile, P. A. y García, M. L. (2016). *Simulación cuasi-2d en cauce principal del tramo Paraná inferior km 234-480*. IFRH 2016, Ezeiza, Argentina. 13p.
- Peruzzo, F., Riccardi, G. A., Basile, P. A. y García, M. L. (2017). *Evaluación de un modelo hidrodinámico bidimensional en un tramo del cauce principal del río Paraná*. VIII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Córdoba. Argentina.
- Re, M., Sabarots Gerbec, M. y Storto, L. (2015). *Estadística de niveles en el Delta del río Paraná mediante modelación hidrodinámica*. VII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Montevideo, Uruguay.

- Riccardi, G. A. (2000). A cell model for hydrological-hydraulic modeling. *Journal of Environmental hydrology*, 8, pp. 1–13. <http://www.hydroweb.com/jeh/jeh2000/riccardi.pdf>
- Riccardi, G. A. y Basile, P. A. (2023). *Análisis de Perfiles Hidráulicos en El Tramo km 232-480 del río Parana durante la Bajante 2020-2022*. XVII Jornadas de Ciencia, Tecnología e Innovación. UNR, Rosario, Argentina. <https://jornadasctei.unr.edu.ar/analisis-de-perfiles-hidraulicos-en-el-tramo-km-232-480-del-rio-parana-durante-la-bajante-2020-2022/>
- Riccardi, G. A., Basile, P. A., Peruzzo, F. y Garcia, M. L. (2022). *Actualización de la Simulación Hidrodinámica de la Bajante en el río Paraná en el tramo km 232-480*. XVI Jornadas de Ciencia, Tecnología e Innovación UNR. Rosario, Argentina. <https://jornadasctei.unr.edu.ar/actualizacion-de-la-simulacion-hidrodinamica-de-la-bajante-en-el-rio-parana-en-el-tramo-km-232-480/>
- Sabarots Gerbec, M. (2014). *Estudio de la dinámica superficial de la red de canales del Delta Medio del río Paraná*. IFRH 2014, 2do. Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos. Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina.
- Sabarots Gerbec, M. y Borús, J. (2016). *Caracterización Hidrodinámica en aguas bajas para la Vía Navegable del río Paraná*. IX Congreso Argentino de Ingeniería Portuaria, Buenos Aires, Argentina.
- Sabarots Gerbec, M., Re, M., Storto, L. y Morale, M. (2018). *Análisis de Repartición de Caudales en Bifurcaciones del Delta del río Paraná*. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Buenos Aires, Argentina.
- Servicio de Hidrografía Naval (2018). *Base de Datos Digital de Cartas Náuticas de río Paraná Inferior*. <http://www.hidro.gov.ar/cartas/cartasnauticas.asp>. Cartas Náuticas descargadas en año 2018.
- Sistema Nacional de Información Hídrica (2023). *Base de Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica, Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica, Ministerio de Obras Públicas*. <https://snih.hidricosargentina.gob.ar>
- Subsecretaría de Puertos, Vías Navegables y Marina Mercante (2020). *Relevamientos Batimétricos Canal de Navegación, Ministerio de Transporte*. <https://www.argentina.gob.ar/transporte/puertos-vias-navegables-y-marina-mercante>. Relevamientos batimétricos en vía de navegación troncal descargados en año 2020.
- Stenta, H., Rentería, J. P. y Riccardi, G. A. (2005). *Plataforma computacional para gestión de información en la simulación hidrológica-hidráulica del escurrimiento superficial*. XX Congreso Nacional del Agua, Mendoza, Argentina, 1, T74, 13p.
- Wilson, M., Bates, P., Alsdorf, D., Forsberg, B., Horritt, M., Melack, J., Frappart, F. y Famiglietti, J. (2009). Modeling large-scale inundation of Amazonian seasonally flooded wetlands. *Geophysical Research Letters*, 34 (2007), pp. L15404. 1029/2007GL030156. hal-00442256.

Trabajo recibido el 02/02/2024, aceptado por el Consejo Editorial para su publicación el 16/02/2024 y publicado el 26/02/2024.

COMO CITAR

Riccardi, G. A. y Basile, P. A. (2024). Modelación hidrodinámica en el tramo km 232-480 del río Paraná durante la bajante 2020 a 2022. *Cuadernos del CURIHAM, Edición Especial (2023): Bajante del río Paraná*. e03. <https://doi.org/10.35305/curiham.ed23.e03>

ROLES DE AUTORÍA

GR y PB realizaron en conjunto el proceso de investigación, recopilación de datos, análisis, conceptualización y completaron la preparación, creación y redacción del trabajo. PB contribuyó en la concepción de la idea; GR contribuyó en el diseño del estudio, recolección, análisis e interpretación de los datos. Ambos aprobaron la versión para ser publicada y son capaces de responder respecto a todos los aspectos del manuscrito.

LICENCIA

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



Este trabajo se enmarca dentro de la EDICIÓN ESPECIAL (2023): Bajante del río Paraná de la revista Cuadernos del CURIHAM