

CUADERNOS DEL CURIHAM

REVISTA DE ESTUDIOS SOBRE LA CUESTION HIDROAMBIENTAL

CUADERNOS DEL CURIHAM / Volumen 28 / Año 2022

Temario

Artículos

- ¿El determinismo implica caos en variables hidrológicas?
- Calibración de simulaciones de crecidas de la cuenca alta del río Sauce Grande, provincia de Buenos Aires, Argentina.
- Adaptación del método propuesto por Fao para evaluar la evapotranspiración real en el modelo de simulación hidrológica SHALL
- Análisis preliminar de la relación entre los isótopos del oxígeno en un sistema hidrológico y en moluscos, en el ámbito de la llanura pampeana (Buenos Aires, Argentina)

Notas Técnicas

- Dinámica hídrica y balance hidrológico en la cuenca del embalse Lago del Fuerte, Tandil
- Características de las precipitaciones en zonas áridas de la Patagonia Norte, Argentina

Editada por



Centro Universitario Rosario de
Investigaciones Hidroambientales

CURIHAM

Centro Universitario Rosario de
Investigaciones Hidroambientales



Universidad
Nacional
de Rosario

ISSN 2683-8168 (en línea)



Volumen 28
Año 2022

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

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 28
Año 2022**

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 DELCURIHAM

Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales
Volumen 28, Año 2022.

UNIVERSIDAD NACIONAL ROSARIO

Rector: Franco Bartolacci
Vicerrector: Darío Masía

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, INGENIERÍA Y AGRIMENSURA

Decana: Dra. Ing. Graciela Utges
Vicedecano: Ing. Damián Portaro

Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales

Director: Hernán Stenta



CUADERNOS DEL CURIHAM
(Revista de Estudios sobre la Cuestión Hidroambiental)
Volumen Nro. 28 – Año 2022

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

Miembros del Consejo Editorial:

Gerardo Riccardi, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
Carlos Scuderí, 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.
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.
Gabriel Caamaño Nelli, Centro de Investigaciones Hídricas Región Semiárida, Córdoba. Argentina
Patricia Saco, University of Newcastle, Australia.
Sergio Montico Facultad de Ciencias Agrarias UNR. Zavalla Santa Fe Argentina

CONSEJO REVISOR

Hernán Stenta, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
Pedro Basile, 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.
Pablo Jacovkis, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Argentina.
Virginia Pacini, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
Leticia Rodriguez, 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 Fernandez, 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 Romay, Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Argentina.
Juan Serra, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Chubut, 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
Tomas Rodriguez, 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

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 lamisma.

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; envió y publicación de los artículos y notas técnicas a la revista.

Todos los artículos / notas técnicas recibidos cumplen con las siguientes instancias. 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).

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

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

INDICE

¿El determinismo implica caos en variables hidrológicas? Sebastián Marotta, Raúl Rivas , Christian Guevara Ochoa, María Florencia Degano.....01 <i>(Artículo)</i>	
Dinámica hídrica y balance hidrológico en la cuenca del embalse Lago del Fuerte, Tandil Marisol Roxana Cifuentes, Corina Iris Rodríguez, Víctor Alejandro Ruíz de Galarreta, Néstor Adrián Gabellone.....15 <i>(Nota Técnica)</i>	
Calibración de simulaciones de crecidas de la cuenca alta del río Sauce Grande, provincia de Buenos Aires, Argentina. Sandra Noemí Fernández, Daniel Enrique Pérez, Carlos Fernando Weis , Miguel Ángel Flores.....25 <i>(Artículo)</i>	
Características de las precipitaciones en zonas áridas de la Patagonia Norte, Argentina Valeria Aramayo, María Victoria Cremona, Roberto J. Fernández, Marcelo D. Nosetto..... 43 <i>(Nota Técnica)</i>	
Adaptación del método propuesto por Fao para evaluar la evapotranspiracion real en el modelo de simulacion hidrológica SHALL Erik Zimmermann..... 59 <i>(Artículo)</i>	
Análisis preliminar de la relación entre los isótopos del oxígeno en un sistema hidrológico y en moluscos, en el ámbito de la llanura pampeana (Buenos Aires, Argentina) María Soledad Gualde, Sebastián Dietrich, María Emilia Zabala, Sabrina Dubny..... 65 <i>(Artículo)</i>	

DOES DETERMINISM IMPLY CAOS IN HYDROLOGICAL VARIABLES?

¿EL DETERMINISMO IMPLICA CAOS EN VARIABLES HIDROLOGICAS?

Sebastián Marotta^{(1)(2)(3)(*)}, **Raúl Rivas**⁽¹⁾⁽³⁾, **Cristian Guevara Ochoa**⁽¹⁾⁽⁴⁾ y **María Florencia Degano**⁽¹⁾⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Instituto de Hidrología de Llanuras. Azul, Buenos Aires, Argentina.

⁽²⁾ Universidad Argentina de la Empresa. Instituto de Tecnología. Buenos Aires, Argentina.

⁽³⁾ Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.

⁽⁴⁾ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Argentina.

(*) e_mail: smmarotta@gmail.com

ABSTRACT

In this paper we present several hydrological time series from Argentina that include, evapotranspiration, precipitation, and stream flow. We survey previous results and apply the 0-1 test for chaos to classify the sequences as regular or chaotic. Previous studies have shown evidence of chaos in several observables from hydrology using the traditional phase space reconstruction method and the computation of Lyapunov exponents. The 0-1 test for chaos can be used as a first step to identify the type of time series, that later can be subjected to the more detailed analysis of the phase space reconstruction. Assuming that the systems that generated these time series are deterministic, the 0-1 test for chaos classifies all of them as chaotic.

Keywords: Hydrology, Time series, 0-1 test for chaos, Evapotranspiration, Precipitation.

RESUMEN

En este artículo presentamos varias series de tiempo hidrológicas de Argentina que incluyen, evapotranspiración, precipitación y caudales. Revisamos previos resultados y aplicamos el test 0-1 de caos para clasificar las secuencias como regulares o caóticas. Estudios previos han demostrado evidencia de caos en muchos fenómenos hidrológicos usando el método tradicional de la reconstrucción del espacio de fase y el cálculo de exponentes de Lyapunov. El test 0-1 de caos puede ser usado como un primer paso para identificar el tipo de serie de tiempo, y que luego puede ser sujeta al análisis más detallado de la reconstrucción del espacio de fase. Si asumimos que los sistemas que generaron estas series de tiempo son determinísticos, el test 0-1 de caos las clasifica a todas ellas como caóticas.

Palabras clave: Hidrología, Series de tiempo, Test 0-1 de caos, Evapotranspiración, Precipitación.

INTRODUCTION

The hydrologic cycle is a large feedback loop that determines the conditions of water on Earth globally and locally, and with strong interactions between different systems at different spatial and temporal scales. The natural phenomena involved in the water cycle are described by physical laws and mathematical models that can explain many aspects at the microscopic and macroscopic levels, and are, in general, represented by nonlinear systems. The water cycle gathers all kinds of materials, fluids, gases, and solids, as well as organic elements with specific characteristics and properties that change with time. On the one hand, there are several external factors that have a periodic nature and are present in these systems, like the ones related to the motion of the Earth around the Sun, the rotation of the Moon around the Earth, and the rotation of the Earth about its axis, among others. These phenomena are responsible for the annual, seasonal, and daily periodic variations found in several hydrological components. On the other hand, the atmospheric agents like temperature, winds, clouds, precipitation, and the local topography and vegetation of the basins imply that the variables, like precipitation or flow discharge, are affected by many other variables in an irregular manner. These conditions represent a challenge for the meteorologist as well as for the hydrologist when trying to determine the state of a part of the system during a specific period of time. The relationship between the different interconnected systems at different scales in space and time is not completely understood.

Chaos theory gives a frame for the study of deterministic systems that present seemingly stochastic behavior and are unpredictable in the long-term. The three main ingredients of chaotic systems are, periodic behavior (regularity), sensitive dependence on initial conditions (unpredictability), and mixing (indecomposability), see (Devaney, 2003). In the last few decades these properties were studied in several mathematical models, laboratory experiments and also natural phenomena, see for example, (Tsonis, 1992; Turcotte, 1997; Schreiber, 1999; Kantz and Schreiber, 2004; Sivakumar and Berndtsson, 2010; Tsonis, 2007; Skokos *et al.*, 2016).

Several techniques have been applied to the study of hydrological time series with many different outcomes. Some researchers consider that the time

series that correspond to some of these hydrological variables may be better understood when interpreted as generated by stochastic processes, and many times the predictions of stochastic models are in good agreement with the observed phenomena. For a discussion of some aspects of these interpretations see (Koutsoyiannis, 2006). Others instead, take a deterministic approach, and in some cases their predictions in the short term may be more accurate than the ones obtained with stochastic models. In 2017, Professor Sivakumar published the first book about chaos in hydrology (Sivakumar, 2017), where the different approaches are described, and the chaotic approach selected from a pragmatic point of view, with the interpretation that chaos theory can bridge the gap between stochasticity and determinism. The book is full of excellent ideas and applications, and shows the results of experiments that many researchers around the world have obtained in the study of hydrological variables. Some of the methods discussed in Sivakumar (2017) involve the phase space reconstruction, the computation of the correlation integral, the computation of Lyapunov exponents, and the study of return maps. The method of phase space reconstruction has been applied to several hydrological phenomena in the past few decades, see for example (Sivakumar, 2017; Pasternack, 1999; Sivakumar, 2000a; Sivakumar, 2002b; Sivakumar-Jayawardena, 2002; Sivakumar and Jayawardena, 2002; Sivakumar, 2004; Sivakumar and Berndtsson, 2005) and references therein.

In 2004, Gottwald and Melbourne (2004) developed a method to differentiate deterministic periodic or quasi-periodic time series from chaotic ones, using the 0-1 test for chaos. In this test, we compute a parameter K that gives a value close to 0, if the behavior of the system is regular, and a value close to 1, if the behavior is chaotic. The 0-1 test for chaos is based on sophisticated mathematics that relate group extensions and dynamics. The test was improved in the following years and has been applied to mathematical systems, laboratory measurements and also natural observables, see (Gottwald and Melbourne, 2005; Falconer *et al.*, 2007; Gottwald and Melbourne, 2009a; Gottwald and Melbourne, 2009b; Gottwald and Melbourne, 2016). For a pedagogical overview of the mathematics behind the test see (Bernardini and Litak, 2016). In some cases, the test has also been shown to perform better than the traditional methods using phase space reconstruction and Lyapunov exponents, when the time series is contaminated

with noise, see (Gottwald and Melbourne, 2016). Applications of the 0-1 test in physics, finance, and oceanography can be found in (Lugo-Fernandez, 2007; Litak *et al.*, 2009a; Litak *et al.*, 2009b; Krese and Goverkar, 2012; Chowdhury *et al.*, 2012; Zachilas and Psarianos, 2012; Xin and Li, 2013; Prabin Devi *et al.*, 2013; Krese and Govekar, 2013; Kriz and Kratochvil, 2014; Kriz, 2014). In particular, we found two applications to hydrological variables related to river flows and runoff time series in (Li *et al.*, 2014; Kedra, 2014). Kedra (2014) used the 0-1 test and the phase space reconstruction approach.

The more traditional method of deciding if a time series is chaotic by reconstructing the phase space, finding the correlation dimension, and measuring Lyapunov exponents is very demanding in terms of computing. Each of the several steps necessary to obtain the information requires large computations and specific considerations that need careful analysis. On the other hand, the phase space reconstruction approach gives a more detailed description of the system like, for example, the minimum number of variables necessary to describe the behavior of the system in phase space. Then, the variables may be used to create a model of the system, and perform short term forecasts.

The 0-1 test has the advantage of being easy to program and work with, and takes short computation time. The test works directly with the time series and the classification is independent of the dimension of the underlying dynamical system under investigation, as well as, independent of the system being continuous (differential equations) or discrete (maps). This is a major difference with respect to the phase space reconstruction approach where the time series is considered the sample of a continuous variable, and where the dimension of the appropriate phase space of the system has to be determined in order to obtain the Lyapunov exponents to classify the system as chaotic.

As with any other test, it is necessary to use caution when applying it. Some of the problems that may arise due to oversampling continuous dynamical systems are discussed in (Melosik and Marszalek, 2016). We remark that the 0-1 test for chaos works assuming that the time series was generated by a deterministic system, and it is not relevant to test sequences generated with stochastic systems, see for example (Hu *et al.*, 2005; Gottwald and Melbourne, 2008) for a discussion about this issue.

Methods to evaluate the evidence of chaos from a time series also require that the time series is sufficiently long to capture all aspects of the dynamics. It is not possible to assert if a natural time series of finite length has this property. For time series that may be too short to allow for convergence of K to either 0 or 1, strong indications for the behavior (regular or chaotic) can be found by looking at the values of K as a function of the length of the time series.

The application of any technique to analyze, describe, and ultimately perform forecasts depend on the characteristics of the system under study. If the system is considered stochastic, then several techniques are available for its study. When the system is considered deterministic and does not show signs of chaotic behavior, the analysis, description, and forecast (in the short and long term) are performed through modeling using differential equations. Finally, when the system is considered deterministic and shows signs of chaotic behavior, the study is of a different nature. Long term forecast is not available in these types of systems. The goal is to use the time series to reconstruct a chaotic attractor in phase space, which can provide a numerical model for the dynamics of the system and can be used for short term forecast, as seen, for example, in (Kedra, 2014). The reconstruction of the attractor is a long and difficult process that may take several months or years to perform, even when a long time series is available. Therefore, it is of great advantage to have a test, like the one described in these notes, to first classify the system as chaotic before considering such a demanding task.

In this paper we analyze several hydrological time series from Argentina that include evapotranspiration, precipitation, and stream flow. We anticipate that all of these time series are classified as chaotic by the 0-1 test. The method provides the hydrologist with a first tool for the identification of chaotic behavior that later can be refined through the use of more detailed and elaborate approaches, like for example, the phase-space reconstruction method, the computation of Lyapunov exponents, the analysis of return maps, and others.

In order to illustrate the method and compare the results, we apply the test to time series derived from the Lorenz system and the quadratic map. See Figures 1 and 2. These systems have been widely studied numerically and theoretically, and their main

properties are well known, see for example, (Devaney-2003, Lorenz-1963). For the quadratic map we show one regular and one chaotic orbit.

DATA AND METHODS

Lorenz's system.

The Lorenz system (Lorenz, 1963) is a simplified model for the phenomenon of convection in fluid dynamics. It is a continuous system of three ordinary differential equations with three parameters given by

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sigma(y - x) \\ \dot{y} &= rx - y - xz \\ \dot{z} &= -bz + xy \end{aligned} \quad (1)$$

where the dot denotes the time derivative of the variable with respect to time. The typical trajectories that are solutions of the Lorenz system are bounded and converge to a strange attractor in phase space. The solutions behave in a non-periodic fashion and the system shows sensitive dependence on initial conditions, that is, the system presents chaotic dynamics for certain values of the parameters. In particular, we use the classical values $\sigma=10$, $r=28$ and $b=8/3$. We consider the Lorenz system as a

prototypical example of a continuous chaotic dynamical system with a strange attractor. Figure 1 shows the time series of the x variable and the trajectory of a solution in phase space.

The quadratic map

The quadratic family of functions $f(x)=x^2+\mu$ with parameter μ , regarded as a map of the form $x_{n+1}=x_n^2+\mu$, is a feedback system that presents chaotic behavior for some values of the parameter μ . It is one of the simplest nonlinear differentiable maps in one dimension, and we use it as a prototype of a discrete chaotic dynamical system, as well as, to test for a regular orbit.

Figure 2 shows two time series corresponding to regular and chaotic behavior, and the orbit diagram. The orbit diagram shows the long term behavior of a typical orbit, and the period-doubling bifurcation route to chaotic behavior characteristic of this type of map (Devaney, 2003). We can see that the value of $\mu = -1.3$ corresponds to an attracting limiting cycle of period 4, and that a value of $\mu = -2$ corresponds to chaotic behavior. Since theoretical results are well known for the quadratic map, we use the 0-1 test on these two sequences for illustration and comparison to the behavior of the other variables.

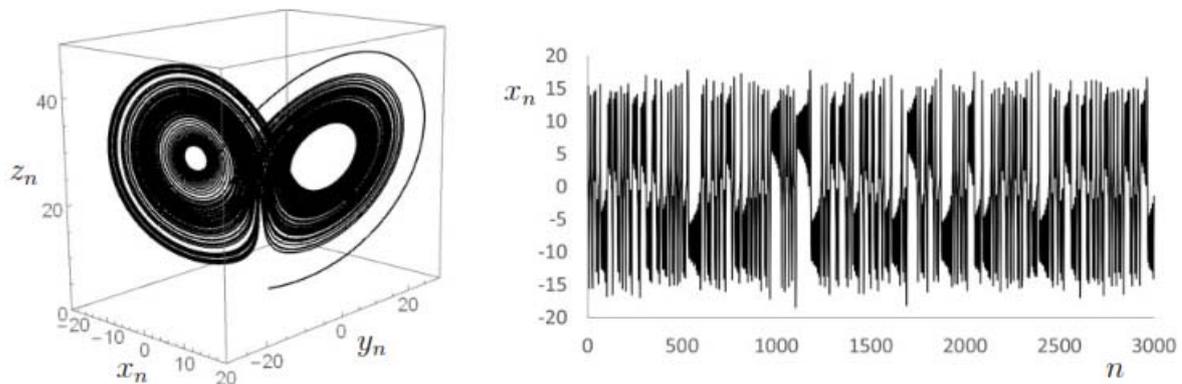


Figure 1. On the left, we see a trajectory of the Lorenz system in phase space, see equation (1). Orbits are attracted to a strange attractor, and go around two rotational centers in a non-periodic fashion. On the right, we see a chaotic time series corresponding to the variable x , for 3000 uniformly sampled points from a trajectory computed using the Runge-Kutta method of order 4 with step size 0.0001.

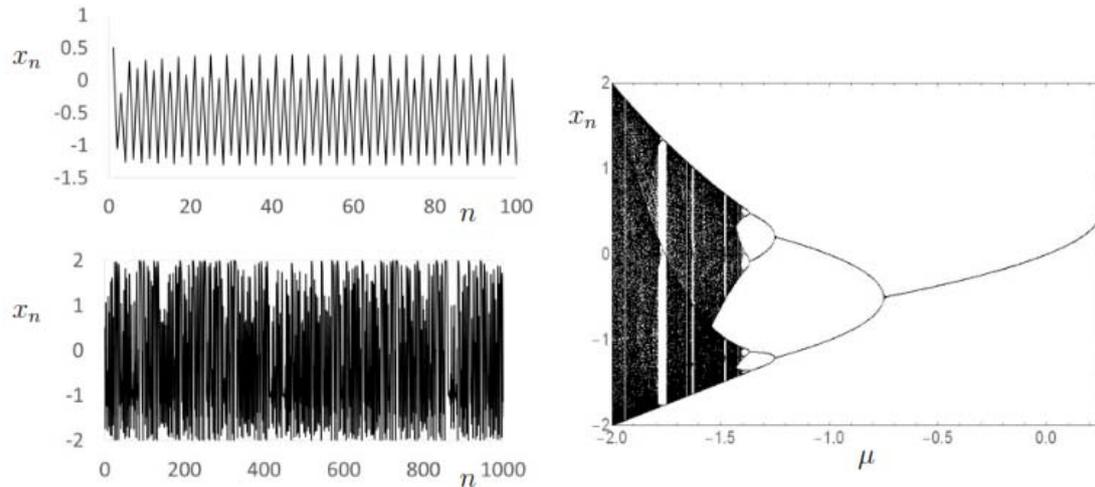


Figure 2. The quadratic family $x_{n+1}=x_n^2+\mu$ presents different dynamical behavior for different values of the parameter μ . On the left, we see the time series of a typical orbit for $\mu=-1.3$ (top), and $\mu =-2$ (bottom). On the right, we see the orbit diagram for the quadratic family in the interval $-2 \leq \mu \leq 0.25$, where we see the long term behavior of typical bounded orbits. The vertical section of the diagram at $\mu =-1.3$ shows a period-4 cycle, that corresponds to regular periodic behavior, and at $\mu =-2$ shows chaotic behavior.

Hydrological data

The hydrological time series of evapotranspiration, precipitation, and stream flow analyzed in this paper come from the Azul and Tandil regions in the central eastern part of Argentina. See Figure 3.

The upper creek basin of Del Azul has an area of 1024 km², see (Guevara Ochoa *et al.*, 2018), and the altitude of the basin varies between 367 and 129m. The highest part is located in the SE, in the Tandilia

system and presents slopes larger than 6%, see (Poire and Spalletti, 2005). Towards the NW the basin lies in a lowland region where the slopes are smaller than 1%, see (Guevara Ochoa *et al.*, 2019).

Figure 4 shows the hydrological time series of evapotranspiration, precipitation, and stream flows studied in this work. Table 1 presents some basic statistics of the distribution of values for the sequences including mean, standard deviation, median, skewness and kurtosis.

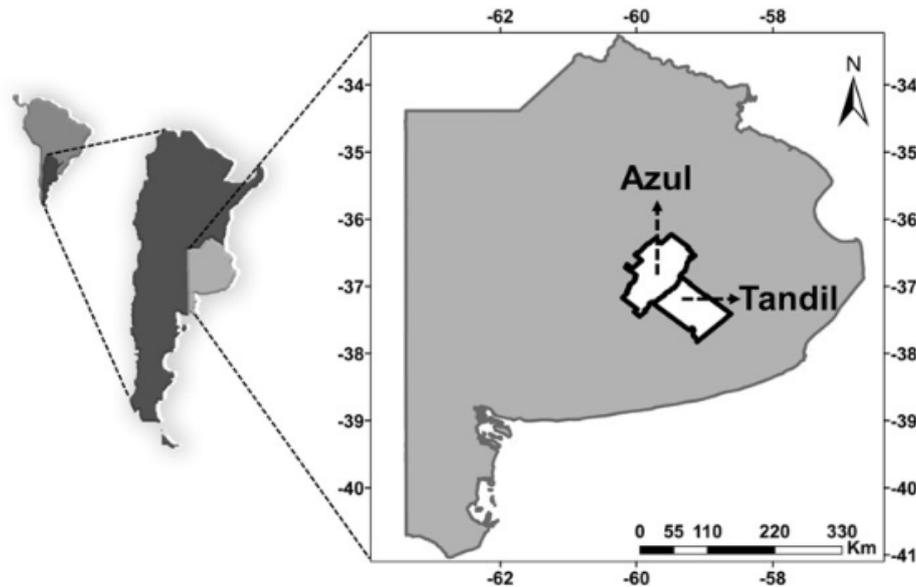


Figure 3. The picture shows, from left to right, the location of Argentina in South America, the location of the province of Buenos Aires in Argentina, and the location of Azul and Tandil areas in the province of Buenos Aires, where the hydrological variables have been measured.

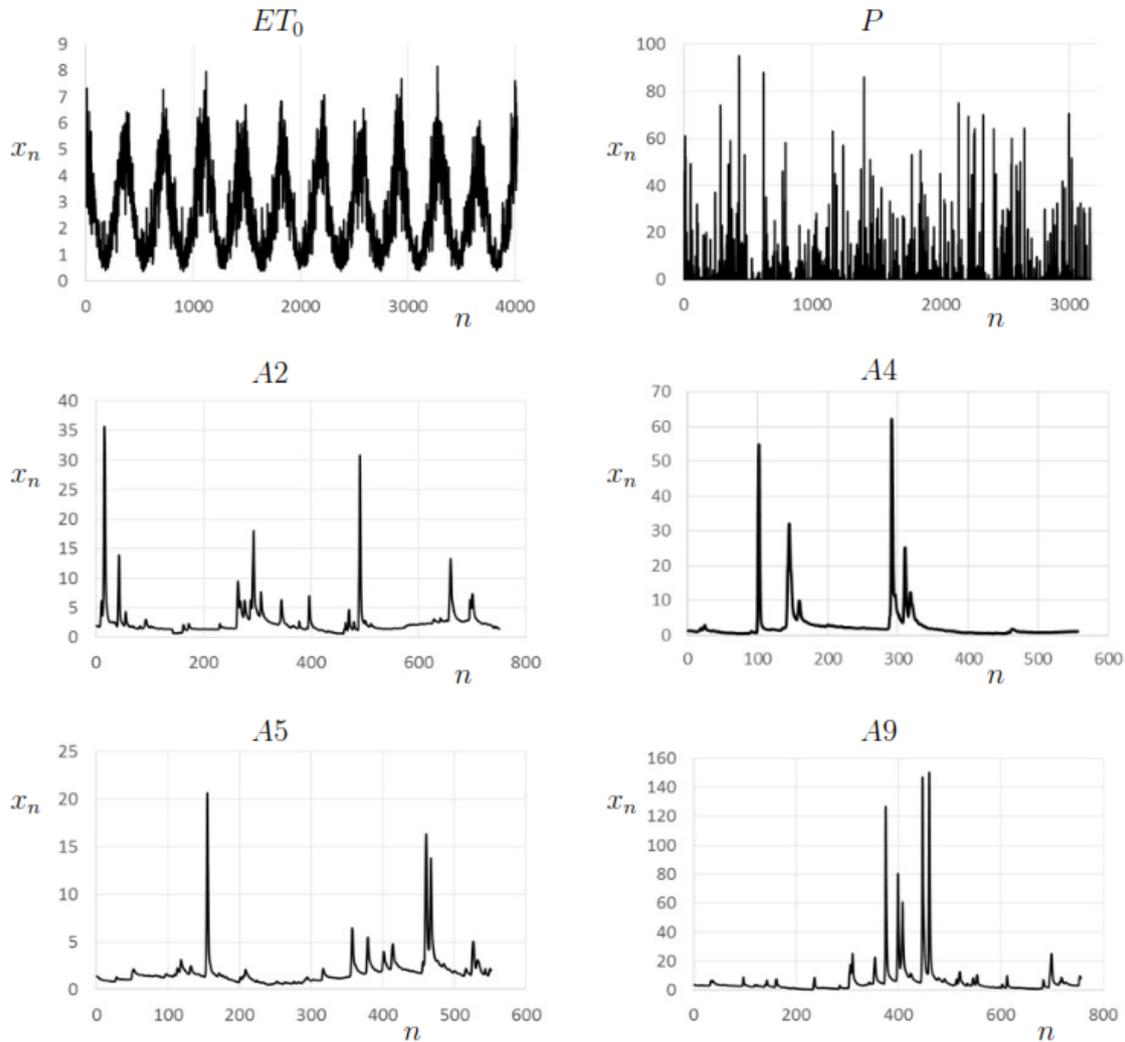


Figure 4. The time series studied in this work including evapotranspiration (ET_0), precipitation (P), and stream flows (A2, A4, A5, and A9). In these plots the horizontal axis corresponds to time in units of days.

Table 1. Basic statistical information about the time series considered in this work. Notice the large skewness characteristic of precipitation and flow time series.

Time series	Length	Mean	Std. Dev.	Median	Skewness	Kurtosis
Lorenz system	3000	-0.67	7.89	-0.98	0.15	2.35
Quadratic map with $\mu = -2$	3000	0.00	1.41	0.02	0.00	1.50
Quadratic map with $\mu = -1.3$	3000	-0.51	0.73	-0.62	0.08	1.14
Evapotranspiration	4018	2.67	1.62	2.33	0.51	2.20
Precipitation	3164	2.46	8.36	0.00	5.20	35.98
Stream flow A2	751	2.60	2.80	1.89	6.48	60.36
Stream flow A4	556	2.76	5.33	1.44	6.55	56.74
Stream flow A5	551	1.83	1.73	1.47	5.85	48.71
Stream flow A9	756	5.92	11.98	3.20	7.55	75.32

Evapotranspiration

Evapotranspiration is the hydrological variable of greatest relevance in the subhumid-humid Pampas, where about 85% of the water that precipitates is lost through this process, see (Weinzettel and Usunoff, 2001; Rivas *et al.*, 2002). The estimation of the potential evapotranspiration in this area is essential, since the primary productivity is directly linked to water availability, see (Degano *et al.*, 2018). The land use in the Azul basin is mainly rural agricultural and pastures. The highest temperatures occur during the period from December to March (summer) with a monthly average of 20°C, and the lowest temperatures occur during the period from June to August with a monthly average of 8°C.

A time series of evapotranspiration from the Tandil region is shown in Figure 4 (top left). We can see a seemingly periodic signal, but the peaks and valleys are not exactly distributed periodically in time and have different magnitudes.

Evapotranspiration from a vegetated surface depends on meteorological parameters, crop factors and environmental conditions. The process is connected to the available energy, whose main source is the direct solar radiation, and to environmental parameters such as air temperature. The driving force of this process is the difference in pressure between the water vapor on the evaporating surface and the water vapor in the surrounding atmosphere, see (Allen *et al.* 1998).

The Oficina de Riesgo Agropecuario (Agricultural Risk Office) calculates the Reference Evapotranspiration ET_0 with the FAO (Food and Agricultural Organization) Penman-Monteith Equation, (Allen *et al.*, 1998), see equation (2). The ET_0 is calculated with in situ biophysical variables provided by the Sistema Meteorológico Nacional of Argentina (SMN), measured at Tandil station (n° 87645), and the data was subjected to the corresponding consistency analysis. A hypothetical reference crop with an assumed crop height of 0.12 m, a fixed surface resistance of 70 s/m, and an albedo of 0.23 were used. ET_0 is reference evapotranspiration in [mm/day], and it is given by

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma 900/(T + 273)\mu_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\mu_2)} \quad (2)$$

where R_n is the net radiation at the crop surface [$\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$], G is the soil heat flux density [MJ

$\text{m}^{-2} \text{day}^{-1}$], T is the mean daily air temperature at 2m height [$^{\circ}\text{C}$], μ_2 is the wind speed at 2m height [m s^{-1}], e_s is the saturation vapor pressure [kPa], e_a is the actual vapor pressure [kPa], the difference $e_s - e_a$ is the saturation vapor pressure deficit [kPa], Δ is the slope of the vapor pressure curve [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$], γ is the psychrometric constant [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$], 0.408 is a conversion factor to mm/day, 900 is a coefficient for the reference crop [$\text{kJ}^{-1} \text{Kg K day}^{-1}$], 273 is a conversion factor to express the temperature in Kelvin degrees, and 0.34 is a coefficient resulting from assuming a crop resistance of 70 s/m and an aerodynamic drag of $208/\mu_2$ for the reference crop [s/m].

The study of Wang *et al.* (Wang *et al.*, 2014) seems to have been the first one to address evidence of chaos in an evapotranspiration time series. They applied the reconstruction method and conducted successful short term forecast experiments using local approximations obtained based on chaos theory.

Precipitation

For this study we counted with the pluviometric information from the Azul hydrometeorological station of the SMN. According to the SMN, the mean annual precipitation is 902 mm. March is the rainy month with an average precipitation of 120mm, and the months of June and July are the driest with an average of 45mm.

A time series of precipitation is shown in Figure 4 (top right). The sequence corresponds to a period of more than 8 years of measurements. The picture shows values of the daily precipitation in millimeters from a meteorological station in the Azul basin.

The precipitation time series are currently being used to reinforce the early alert system of floods in the city of Azul, see (Cazenave and Vives, 2014), and have been evaluated for several hydrometeorological studies like, for example, (Venere *et al.*, 2004; Guevara Ochoa *et al.*, 2017). More information about the Azul region can be found in (Barrucand *et al.*, 2007).

Several studies of precipitation time series from the point of view of chaos theory are reviewed in (Sivakumar, 2017). Precipitation time series are often considered as the result of a stochastic process. However, this seemingly random behavior may be due to the response of a deterministic chaotic system.

Stream flow

We consider four time series of daily Azul stream flows [m³/s] denoted by A2 (751), A4 (556), A5 (551), and A9 (756), see Figure 4 and Table 1. Stream flow time series show complex behavior with a seemingly periodic base flow and peaks that corresponds to floods from irregularly distributed precipitation events. The number of variables that participate in the generation of these time series is large, but it has been found that in some cases, there are only a few generalized variables that may be able to model the behavior of the system. The study of Kedra (2014) is an excellent example of a successful application of the chaotic approach in a study of river flow. For a review of several studies of river flow using chaos theory see (Sivakumar-2017).

THE 0-1 TEST FOR CHAOS

The 0-1 test receives as input a one-dimensional time series x_n for $n = 1, 2, \dots, N$. The data is used to drive a two-dimensional system with components given by

$$\begin{aligned} p_{n+1} &= p_n + x_n \cos(cn) \\ q_{n+1} &= q_n + x_n \sin(cn) \end{aligned} \tag{3}$$

where $c \in (0, 2\pi)$ is a fixed constant. These new sequences, given by p_n and q_n , represent the Euclidean extensions of the system to include symmetries under rotations and translations, see (Bernardini and Litak, 2016). We are interested in the growth rate of the mean squared displacement of the trajectory (p_n, q_n) as a random walk in the plane. The starting point for the walk is set to the origin, so that $p_1=q_1=0$. The time-average mean squared displacement $M_c(n)$ is given by

$$M_c(n) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N ((p_{n+j} - p_j)^2 + (q_{n+j} - q_j)^2)$$

and its growth rate is defined by

$$K_c = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\log M_c(n)}{\log n}$$

The limits $M_c(n)$ and K_c can be shown to exist under general conditions, and K_c takes either the value $K_c = 0$ signifying regular dynamics, or the value $K_c = 1$ signifying chaotic dynamics. This is justified for large classes of dynamical systems, see (Gottwald and Melbourne, 2016) and references therein. In the regular case (periodic or quasiperiodic dynamics) the trajectories for the system given by equation (3) are typically bounded, whereas in the chaotic case the trajectories typically behave like a two-dimensional

Brownian motion with zero drift and hence evolve diffusively. The diffusive or bounded nature of the trajectories can be seen in a plot of the walk (p_n, q_n) . A convenient method for distinguishing these growth rates, bounded or diffusive, is by means of the mean square displacement $M_c(n)$ which accordingly is either bounded or grows linearly. The diagnostic parameter K_c captures this growth rate.

The values of $M_c(n)$ present oscillations that sometimes make the analysis more difficult, and therefore it is convenient to adjust them before estimating the growth rate. The oscillations are computed with the following formula,

$$V_c(n) = \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \right)^2 \left(\frac{1 - \cos cn}{1 - \cos c} \right) \tag{4}$$

Then, the average displacement is changed from $M_c(n)$ to $D_c(n) = M_c(n) - V_c(n)$. When the oscillations are removed it is possible for this quantity to become negative. Then, to further set the estimator we add the term $a \min D_c(n)$ with $a > 1$, so that the new estimator is now denoted by $D_c^*(n) = D_c(n) + a \min D_c(n)$. The value of $a = 1.1$ is used in (Gottwald and Melbourne, 2016), as in this work.

There are several methods to measure the growth rate. The correlation method presents some advantages that have been reviewed recently in (Gottwald and Melbourne-2016), and is the one used in this work. In order to estimate the growth rate, we compute the correlation between the vectors $\xi = \{1, 2, 3, \dots, N\}$, and $D = \{D_c^*(1), D_c^*(2), D_c^*(3), \dots, D_c^*(N)\}$ using the definition,

$$K_c^* = \text{Corr}(\xi, D) = \frac{\text{cov}(\xi, D)}{\sqrt{\text{var}(\xi) \text{var}(D)}}$$

where *cov* and *var* stand for covariance and variance, respectively. The quantity K_c^* measures the level or strength of the correlation of D with a linear growth.

The final diagnostic parameter that provides the output of the test is the number K given by

$$K = \text{median}(K_c^*) \tag{5}$$

where K_c^* is computed for 100 values of c chosen at random in the interval $(\pi/5, 4\pi/5)$. This reduced interval of values of c is used to avoid resonances that can mislead the interpretation of the results. If $K \approx 0$ then the time series is classified as regular (periodic or quasiperiodic), and if $K \approx 1$ then the time series is classified as chaotic. In practice, the estimated parameter K is found

for values of $n \ll N$, and (Gottwald and Melbourne, 2016) recommends the use of $N/10$, as we do here.

enough to capture the full spectrum of the system dynamics.

Finally, it is convenient to plot the values of K as a function of the length of the series in order to see if there are trends, especially when it is not completely clear if the time series under analysis may be long

In order to illustrate the application of the test and compare the results, we applied the test to known chaotic and regular time series from the Lorenz system and the quadratic map. See Figures 5 and 6.

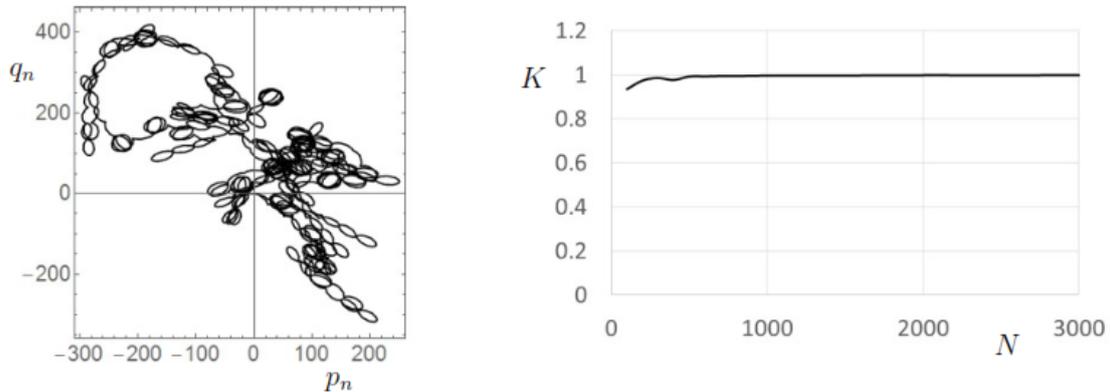


Figure 5. The 0-1 test applied to the time series of the variable x of the Lorenz system for the trajectory in Figure 1. On the left, we present a sample of the random walk of the variables p_n and q_n , given by equation (3), showing diffusive behavior. On the right, we see the parameter K given by equation (4), as a function of the length N of the time series, converging to a value of 1, and indicating chaotic motion.

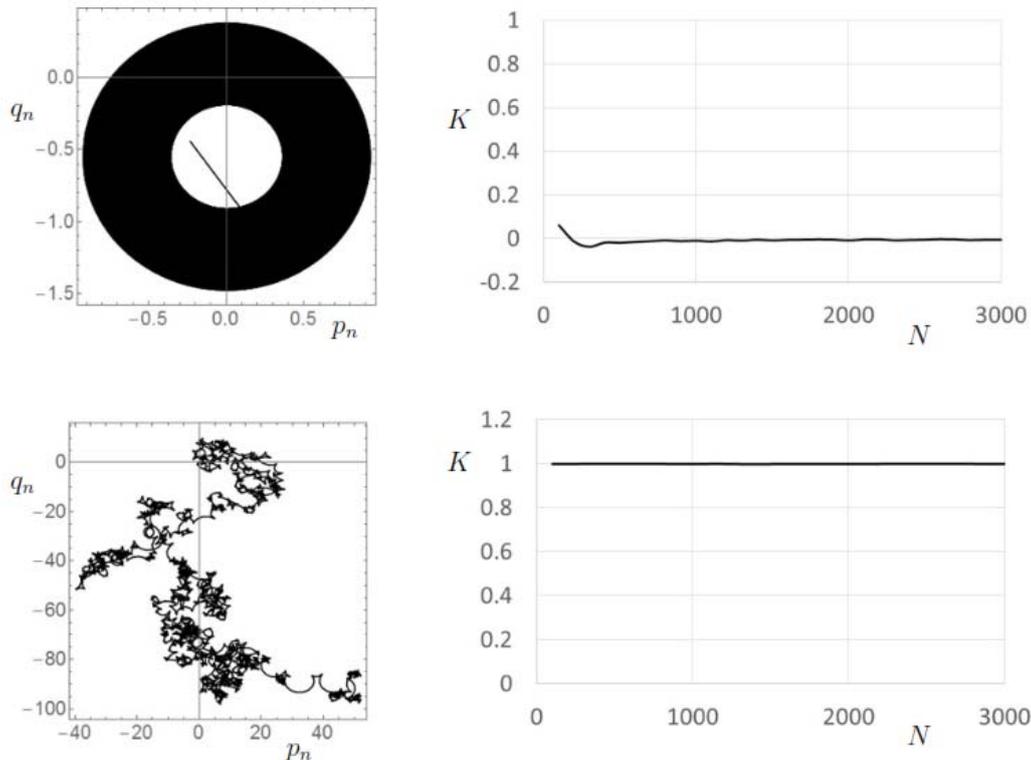


Figure 6. The 0-1 test for chaos applied to two time series from the quadratic map $x_{n+1} = x_n + \mu$. At the top left, we see the random walk in the pq -plane for the case with $\mu = -1.3$. The random walk is bounded. At the top right, we show the parameter K as a function of the length of the sequence, showing convergence to 0. The test classifies this sequence as regular, as expected. At the bottom left, we present the pq -plane showing a diffusive walk for the case $\mu = -2$, and on the right, we see the parameter K converging to 1, as we increase the length of the sequence. The test correctly classifies this sequence as chaotic.

RESULTS

In this section we present the result of the 0-1 test for chaos, show examples of the behavior of the two dimensional walk given by the orbits of (p_n, q_n) , and compute the value of K as a function of the length of the sequence, for the hydrological time series of Figure 4.

The values of K for each one of the time series is presented in Table 2, and except for the regular time series that corresponds to the periodic orbit of the quadratic function, the values of K all lie above 0.99. This means that the 0-1 test for chaos classifies the time series as chaotic.

Table 2. The results of the 0-1 test on the sequences studied in this work. The values of K in the table correspond to the median of K_c^* for 100 values of c selected at random in the interval $(\pi/5, 4\pi/5)$, see equation (5).

Time series	K
Lorenz system	0.998
Quadratic map with $\mu = -2$	0.998
Quadratic map with $\mu = -1.3$	-0.006
Evapotranspiration	0.998
Precipitation	0.997
Stream flow A2	0.992
Stream flow A4	0.998
Stream flow A5	0.998
Stream flow A9	0.995

Figure 7 shows the result of the test for the time series of evapotranspiration, precipitation and stream flow studied in this work. The sample plots of an orbit of (p_n, q_n) present diffusive behavior. Moreover, in all cases, the curve of K as a function of the length of the time series shows convergence of K to 1. Even for the short time series of stream flow it is possible to see a clear trend in the behavior of K towards 1. We present the results for the sequence A9 that is representative of the behavior of the four stream flow time series.

DISCUSSION

We have presented the results of the application of the 0-1 test to several time series. For the Lorenz system and the quadratic map, the test is able to distinguish regular from chaotic behavior. For the hydrological time series of evapotranspiration, precipitation, and stream flow from Argentina, the test classified all the time series as chaotic. This implies that if we assume that these time series were generated by deterministic systems, then these systems behave chaotically. The question in the title refers to the possibility that this result applies to other hydrological observables. We also notice that with sequences of more than 500 points it is enough to have a clear idea of the convergence of the values of K .

We presented the Lorenz system as a prototype of continuous deterministic chaotic dynamics, and the quadratic equation as a prototype of discrete deterministic chaotic dynamics. We may ask if any of the systems analyzed in this work may classified in one of these two types or their several variants, i.e., is there a deterministic low dimensional nonlinear system of differential equations, like the Lorenz system, that can provide an accurate description of the dynamics? Is there a deterministic nonlinear discrete system, like the quadratic map, that could provide a good model for the description of the behavior of these variables? We can also ask if a stochastic approach would be more appropriate for some of them, and if other approaches need to be developed to understand them.

Nature seems to defy all kinds of approaches, stochastic, deterministic and chaotic. These different approaches are applied with the goal of obtaining information about different aspects of nature. However, due to the nonlinear nature of the phenomena that interact at a wide range of spatio-temporal scales, the behavior of the observables is not necessarily well represented by a superposition principle, where the sum of these characteristics gives as a result the behavior that we measure. Natural time series are the result of dynamical systems that may contain at the same time all these characteristics that we can, sometimes, get to see reflected on the results we obtain with our limited knowledge and tools.

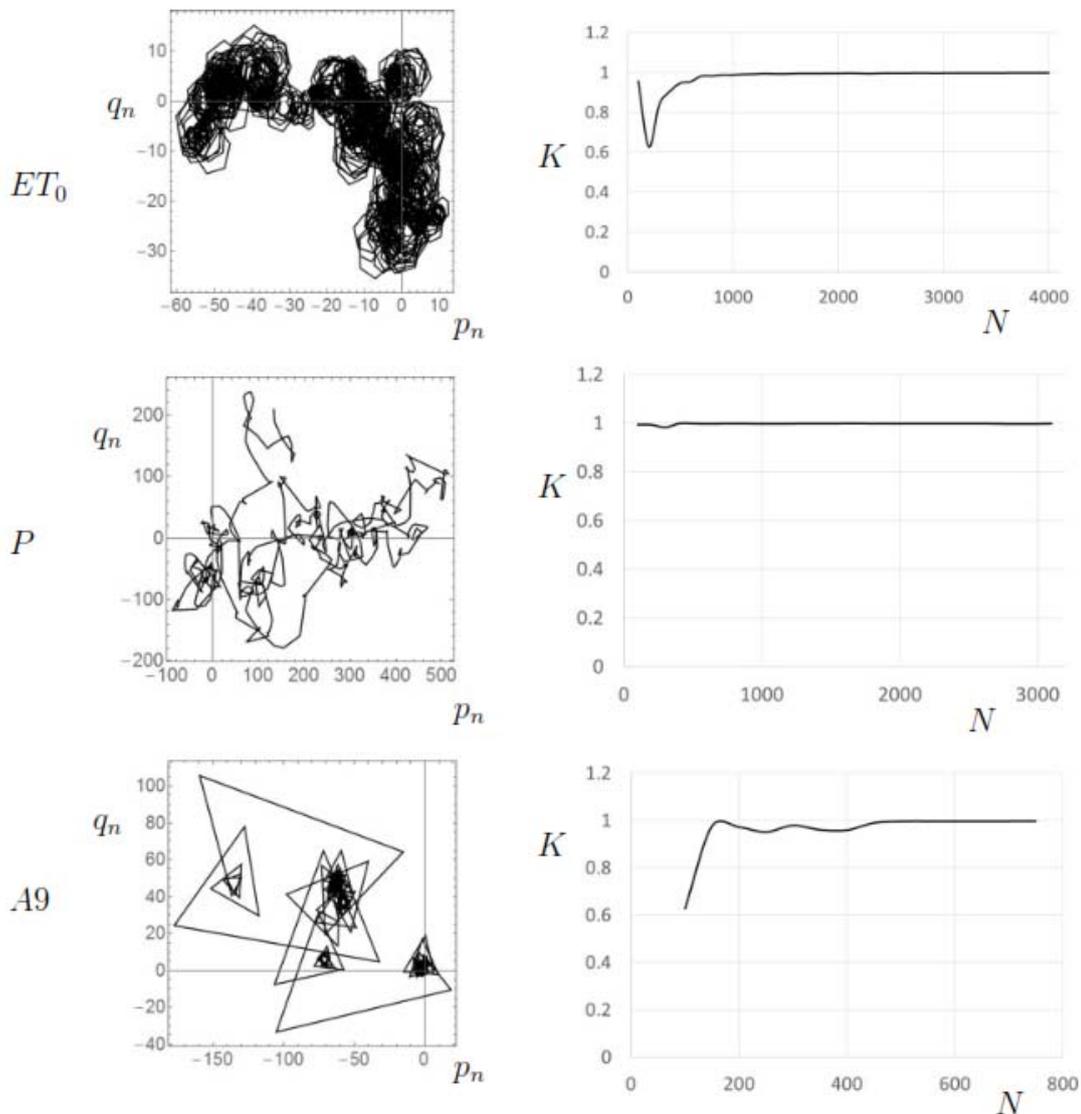


Figure 7. The result of applying the 0-1 test to time series of evapotranspiration (top), precipitation (center), and stream flow A9 (bottom). On the left, we present the random walk in the pq -plane showing diffusive behavior. On the right, we present the graphs of the parameter K as a function of the length of the time series. All sequences show convergence of K towards 1.

We stress the point suggested by the results of this paper: if we assume that the systems under study are deterministic (which not every researcher is comfortable considering as a fact), the test performed in this work classifies them as chaotic. This, in turn, implies the necessity to intensifying the study of chaotic techniques to better understand these systems in order to perform effective short term forecasts, since long term forecasts would not be possible. On the other hand, the historical problem of the availability of complete and long accurate observations is one of the

main reasons that these types of study are so difficult to perform and apply.

The final answer to these types of questions remains still open, and may be considered one of the most difficult and exciting areas of research in contemporary science. Therefore, we hope that this paper provides an example, raises awareness, and underlines the use of some of the tools that are being developed and explored for a better understanding of the behavior of natural phenomena.

The results in this paper support the idea that finding evidence of chaos and performing a more detailed study of these variables may be helpful in the understanding of the dynamics of several hydrological variables, and that a first classification can be made using the 0-1 test for chaos. The study of other methods including the phase space reconstruction approach, the possible modeling of the system with local approximations, and the application of stochastic methods are left for future work.

ACKNOWLEDGEMENTES

We appreciate the Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CICPBA) and the Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), both of Argentina, for funding this research. We would like to thank Dr. Guillermo Collazos for providing us with the sequences of stream flows and for helpful discussions to improve this work. María Florencia Degano acknowledges that this work is part of her doctoral project Desarrollo e implementación de sistemas automáticos de alerta de inundaciones y sequías en el área sur de la cuenca del Rio Salado, provincia de Buenos Aires.} FONARSEC-19/13.

REFERENCES

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 56*, FAO, Rome, Italy.
- Barrucand, M. G., Vargas, W. M., Rusticucci, M. M. (2007). Dry conditions over Argentina and the related monthly circulation patterns. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98(1-2), 99-114.
- Bernardini, D., Litak, G. (2016). An overview of 0-1 test for chaos. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 38(5), 1433-1450.
- Cazenave, G., Vives, L. (2014). Predicción de inundaciones y sistemas de alerta: Avances usando datos a tiempo real en la cuenca del arroyo del Azul. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 33, 83-91.
- Chowdhury, D. R., Iyengar, A. N. S., Lahiri, S. (2012). Gottwald Melbourne (0-1) test for chaos in a plasma. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 19, 53-56.
- Degano, M. F., Rivas, E. E., Sanchez, J.M., Carmona, F., and Niclos, R. (2018). Assessment of the Potential Evapotranspiration MODIS Product Using Ground Measurements in the Pampas. To appear in *Proceedings of the IEEE, ARGENCON*, San Miguel de Tucuman, Tucuman, Argentina, pp. 1-5.
- Devaney, R. L. (2003). *An Introduction to Chaotic Dynamical Systems*. Cambridge, MA, USA: Second Edition. Westview Press.
- Falconer, I., Gottwald, G. A., Melbourne, I., and Wormnes, K. (2007). Application of the 0-1 Test for Chaos to Experimental Data. *SIAM Journal of Applied Dynamical Systems*, 6(2), 395-402.
- Gottwald, G. A., Melbourne, I. (2004). A new test for chaos in deterministic systems. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 460, 603-611.
- Gottwald, G. A., Melbourne, I. (2005). Testing for chaos in deterministic systems with noise. *Physica D*, 212, 100-110.
- Gottwald, G. A., Melbourne, I. (2008). Comment on "Reliability of the 0-1 test for chaos". *Physical Review E*, 77(028201), 1-3.
- Gottwald, G. A., Melbourne, I. (2009a). On the Implementation of the 0-1 Test for Chaos. *SIAM Journal of Applied Dynamical Systems*, 8(1), 129-145.
- Gottwald, G. A., Melbourne, I. (2009b). On the validity of the 0-1 test for chaos. *Nonlinearity*, 22, 1367-1382.
- Gottwald, G. A., Melbourne, I. (2016) The 0-1 Test for Chaos: A Review. Chapter 7. Skokos, C., Gottwald, G. A., Laskar, J. (Eds), *Chaos Detection and Predictability*, Lecture Notes in Physics, volume (915). Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Guevara Ochoa, C., Briceño, N., Zimmermann, E., Vives, L., Blanco, M., Cazenave, G., Ares, G. (2017). Filling series of daily precipitation for long periods of time in plain areas. Case study superior basin of stream del Azul. *Geoacta*, 42(1), 38-62.
- Guevara Ochoa, C., Lara, B., Vives, L., Zimmermann, E., Gandini, M. (2018). A methodology for the characterization of land use using medium-resolution spatial images. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(2), 207-218.
- Guevara Ochoa, C., Vives, L., Zimmermann, E., Masson, I., Fajardo, L., Scioli, C. (2019). Analysis and correction of digital elevation models for plain areas. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 85(3), 209-219.
- Hu, J., Tung, W., Gao, J., Cao, Y. (2005). Reliability of the 0-1 test for chaos. *Physical Review E*, 72(056207), 1-5.
- Kantz, H., and Schreiber, T. (2004). *Nonlinear Time*

- Series Analysis*. Cambridge, UK: Second Edition. Cambridge University Press.
- Kedra, M. (2014). Deterministic chaotic dynamics of Raba River flow (Polish Carpathian Mountains). *Journal of Hydrology*, 509, 474-503.
- Koutsoyiannis, D. (2006). On the quest for chaotic attractors in hydrological processes. *Hydrological Sciences Journal*, 51(6), 1065-1091.
- Krese, B., Govekar, E. (2012). Nonlinear analysis of laser droplet generation by means of the 0-1 test for chaos. *Nonlinear Dynamics*, 67, 2101-2109.
- Krese, B., Govekar, E. (2013). Analysis of traffic dynamics on a ring road-based transportation network by means of 0-1 test for chaos and Lyapunov spectrum. *Transportation Research Part C*, 36, 27-34.
- Kriz, R. (2014). Finding Chaos in Finnish GDP. *International Journal of Automation and Computing*, 11(3), 231-240.
- Kriz, R., Kratochvil, S. (2014). Analyses of the Chaotic Behavior of the Electricity Price Series. In Sanayei, A., Zelinka, I., Rossler, O. E., (Eds.) *Interdisciplinary Symposium on Complex Systems, Emergence, Complexity and Computation*, ISCS 2013, 8, 215-226. Heidelberg, Germany: Springer.
- Li, X., Gao, G., Hu, T., Ma, H., Li, T. (2014). Multiple time scales analysis of runoff series based on the Chaos Theory. *Desalination and Water Treatment*, 52, 2741-2749.
- Litak, G., Radons, G., Schubert, S. (2009a). Identification of chaos in a regenerative cutting process by the 0-1 test. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, 9, 299-300.
- Litak, G., Syta, A., Wiercigroch, M. (2009b). Identification of chaos in a cutting process by the 0-1 test. *Chaos, Solitons and Fractals*, 40, 2095-2101.
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20(2), 130-141.
- Lugo-Fernandez, A. (2007). Is the Loop Current a Chaotic Oscillator? *Journal of Physical Oceanography*, 37, 1455-1469.
- Melosik, M., Marszalek, W. (2016). On the 0/1 test for chaos in continuous systems. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, 64(3), 521-528.
- Pasternack, G. B. (1999). Does the river run wild? Assessing chaos in hydrological systems. *Elsevier Advances in Water Resources*, 23, 253-260.
- Prabin Devi, S., Singh, S. B., Surjalal Sharma, A. (2013). Deterministic dynamics of the magnetosphere: results of the 0-1 test. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 20, 11-18.
- Poire, D. G., Spalletti, L. A. (2005). La cubierta sedimentaria precámbrica/paleozoica inferior del Sistema de Tandilia. In De Barrio, R. E., Etcheverry, R. O., Caballe, M. F., Llambias, E. (Eds.), *Geología y Recursos Minerales de la provincia de Buenos Aires*. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino, pp. 51-68.
- Rivas, R., Caselles, V., and Usunoff, E. (2002). Reference evapotranspiration in the Azul River Basin, Argentina. In Bocanegra, E., Martinez, D., y Massone, H. (Eds.), *Actas XXXII AIH & VI ALHSUD Congress of Groundwater and Human Development*, Mar del Plata, Argentina, pp. 693-700.
- Schreiber, T. (1999). Interdisciplinary application of nonlinear time series methods. *Physics Reports*, 308, 1-64.
- Sivakumar, B. (2000). Chaos theory in hydrology: important issues and interpretations. *Elsevier Journal of Hydrology*, 227, 1-20.
- Sivakumar, B. (2002a). A phase-space reconstruction approach to prediction of suspended sediment concentration in rivers. *Journal of Hydrology*, 258, 149-162.
- Sivakumar, B. (2002b). Is correlation dimension a reliable indicator of low-dimensional chaos in short hydrological time series? *Water Resources Research*, 38(2), 3-1-3-8.
- Sivakumar, B. (2004). Chaos theory in geophysics: past, present and future. *Chaos, Solitons and Fractals*, 19, 441-462.
- Sivakumar, B. (2017). *Chaos in Hydrology. Bridging Determinism and Stochasticity*. Dordrecht, Netherlands: Springer Science+Business Media.
- Sivakumar, B., Jayawardena, A. W. (2002). An investigation of the presence of low-dimensional chaotic behaviour in the sediment transport phenomenon. *Hydrological Sciences Journal*, 47(3), 405-416.
- Sivakumar, B., Berndtsson, R. (2005) A multi-variable time series phase-space reconstruction approach to investigation of chaos in hydrological processes. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 1(1), 35-51.
- Sivakumar, B., Berndtsson, R. (Eds.). (2010). *Advances in Data-Based Approaches for Hydrologic Modeling and Forecasting*. Singapore, Singapore: World Scientific.
- Skokos, C., Gottwald, G. A., Laskar, J. (Eds.). (2016). *Chaos Detection and Predictability. Lecture Notes in Physics*, 915. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Tsonis, A. A. (1992). *Chaos. From Theory to*

- Applications*. New York, USA: Springer-Science+Business media.
- Tsonis, A. A. (2007). Reconstructing dynamics from observables: the issue of the delay parameter revisited. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 17(12), 4229-4243.
- Turcotte, D. L. (1997). *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. New York, USA: Second Edition, Cambridge University Press.
- Venere, M. J., Clause, A., Dalponte, D., Rinaldi, P., Cazenave, G., Varni, M., Usunoff, E. (2004). Simulación de Inundaciones en Llanuras. Aplicación a la Cuenca del Arroyo Santa Catalina-Azul. *Mecánica Computacional*, 23, 1135-1149.
- Wang, W., Zou, S., Luo, Z., Zhang, W., Chen, D., Kong, J. (2014). Prediction of the Reference Evapotranspiration Using a Chaotic Approach. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-13.
- Weinzettel, P., Usunoff, E. (2001). Cálculo de la recarga mediante aplicación de la ecuación de D'arcy en la zona no saturada. In Medina, A., Carrera, J. y Vives, L. (Eds.). *Las caras del agua subterránea, serie hidrogeológica y aguas subterráneas*, Tomo I, pp. 225-232.
- Xin, B., Li, Y. (2013). 0-1 Test for Chaos in a Fractional Order Financial System with Investment Incentive. *Abstract and Applied Analysis*, 2013, 1-10.
- Zachilas, L., Psarianos, I. N. (2012). Examining the Chaotic Behavior in Dynamical Systems by Means of the 0-1 Test. *Journal of Applied Mathematics*, 2012, 1-14.

Tipo de Publicación: ARTICULO.

Trabajo recibido el 29/11/2021 y aprobado para su publicación el 24/02/2022.

COMO CITAR

Marotta, S.; Rivas, R.; Guevara Ochoa, C.; Degano, M.F. (2022). Does determinism imply chaos in hydrological variables?. *Cuadernos del CURIHAM*, 28, 1-14. doi: <https://doi.org/10.35305/curiham.v28i.174>

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>)



DINÁMICA HÍDRICA Y BALANCE HIDROLÓGICO EN LA CUENCA DEL EMBALSE LAGO DEL FUERTE, TANDIL

WATER DYNAMICS AND HYDROLOGICAL BALANCE IN THE LAGO DEL FUERTE RESERVOIR BASIN, TANDIL

Marisol Roxana Cifuentes^{(1)(2)(*)}, Corina Iris Rodríguez⁽¹⁾⁽²⁾, Víctor Alejandro Ruíz de Galarreta⁽¹⁾ y
Néstor Adrián Gabellone⁽²⁾⁽³⁾

⁽¹⁾ Centro de Investigaciones y Estudios Ambientales. Facultad de Ciencias Humanas. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Tandil, Buenos Aires, Argentina.

⁽²⁾ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Buenos Aires, Argentina.

⁽³⁾ Instituto de Limnología. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Buenos Aires, Argentina.

(*) e_mail: cifuentes@fch.unicen.edu.ar

RESUMEN

El conocimiento sobre la cantidad, calidad y dinámica de los recursos hídricos es uno de los puntos cruciales para tender hacia su gestión integrada. El objetivo fue caracterizar la dinámica hídrica de la cuenca del embalse Lago del Fuerte, de la ciudad de Tandil, y efectuar un balance hidrológico del cuerpo de agua con el propósito de generar información de base para la toma de decisiones y futuras investigaciones. El lago ha presentado problemas de eutrofización. Se encuentra emplazado en una cuenca serrana, la cual ha experimentado en los últimos años cambios en los usos del suelo. La metodología combinó la utilización de información antecedente, mediciones en campo y estimaciones de parámetros hidrológicos. Se evaluó la dinámica hídrica superficial y subterránea de la cuenca y se determinó el balance hidrológico del lago. El principal ingreso de agua al lago fue superficial, mediante los arroyos afluentes, mientras que en menor medida ingresó agua subterráneamente y por precipitación directa. El mayor egreso se dio por la salida del embalse y una proporción menor por evaporación. Los volúmenes de entrada y salida fueron similares, a pesar del exceso hídrico del período, con una variación de almacenaje despreciable, debido al tipo de descarga de la presa.

Palabras clave: Cuenca serrana, Embalse, Recursos hídricos, Gestión ambiental.

ABSTRACT

The knowledge about the quantity, quality and dynamics of water resources is one of the key points to move towards their integrated management. The aim of this work was to characterize the water dynamics of the Lago del Fuerte reservoir basin, in the city of Tandil, and carry out a hydrological balance of the water body in order to generate basic information for decision-making and for future researches. The lake has presented eutrophication problems. It is located in a hilly watershed, which has undergone land use changes in recent years. The methodology combined the use of previous information, field measurements and hydrological parameters estimations. The surface and groundwater dynamics of the basin were evaluated, and the hydrological balance of the lake was determined. The main water income was superficial, through tributary streams, while to a lesser extent water entered by groundwater and by direct precipitation. Most of the water exited through the dam and a smaller proportion through evaporation. The inlet volumes were similar to the outlet volumes, despite the excess water for the period, with negligible storage variation, due to the type of discharge from the dam.

Keywords: Hilly watershed, Reservoir, Water resources, Environmental management.

INTRODUCCIÓN

La presión constante y creciente sobre los recursos hídricos, producto de las actividades antrópicas, ha planteado en las últimas décadas la necesidad de tender hacia una gestión integrada, donde el conocimiento sobre su calidad, cantidad y dinámica se tornan en elementos fundamentales (GWP, 2009).

La gestión del agua no es exclusivamente un problema de carácter técnico, sino de política social, donde el conocimiento científico juega un papel clave (Aguilera Klink, 1999). Dicha gestión requiere información confiable, accesible y actualizada sobre el estado de los recursos hídricos y de los ecosistemas relacionados (Custodio, 2011; GWP, 2009).

El conocimiento de la cantidad de agua que circula y se almacena a través de las entradas y salidas de una cuenca o un cuerpo de agua, así como sus variaciones de almacenamiento en un tiempo determinado, son elementos clave para entender su funcionamiento. Sin embargo, muchos sitios carecen de esta información dada la dificultad de realizar mediciones periódicas de los diferentes componentes del ciclo hidrológico (Piman y Babel, 2013).

Si bien la aplicación de balances hídricos es una tarea compleja, constituye una herramienta que permite evaluar de manera cuantitativa el recurso, contribuyendo en la toma de decisiones y su gestión (Sokolov y Chapman, 1981).

El embalse Lago del Fuerte es uno de los principales atractivos turísticos de la ciudad de Tandil. Particularmente la zona aledaña al lago, que posee gran belleza paisajística, ha experimentado en los últimos años un importante incremento poblacional, fundamentalmente debido al crecimiento del uso del suelo residencial y la instalación de emprendimientos turístico-recreativos (Rodríguez, 2014). Dichas tendencias de cambio en los usos del suelo pueden, por un lado, alterar la dinámica de los recursos hídricos de la cuenca de aporte del lago y del embalse en sí mismo, y, por otra parte, contribuir al desarrollo e incremento de conflictos en el uso del agua y del territorio, como los analizados por Guerrero et al. (2015).

Existen trabajos antecedentes que estudiaron algunos aspectos puntuales y zonas parciales de la cuenca (CINEA, 2009; Miranda del Fresno y Ulberich, 2010 y 2011; Rodríguez, 2014), así como el cuerpo de agua que evidenciaron problemas de eutrofización y

presencia de cianobacterias (IHLLA 1995, 2005a y b; Albornoz et al., 2009; Cifuentes, 2012 y 2020).

Teniendo en cuenta la escasez de antecedentes hidrológicos de la cuenca de aporte del Lago del Fuerte, este trabajo tuvo por objetivo realizar una caracterización de la dinámica hídrica de la cuenca y efectuar un balance hidrológico del embalse. La información generada será útil como base para otras investigaciones y para establecer lineamientos para la gestión integrada del agua en la cuenca.

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca de aporte del Lago del Fuerte se encuentra localizada al sur de la ciudad de Tandil (Figura 1). Tiene una superficie de 19.94 km² y está conformada por dos subcuencas correspondientes a los arroyos San Gabriel (ASG) y La Cascada (ALC).

Ambos arroyos desembocan en el Lago del Fuerte, un embalse artificial de 19 hectáreas originado por la construcción de una presa con el objetivo de regular las inundaciones que afectaban a la ciudad de Tandil. La presa, denominada Dique del Fuerte, se construyó entre 1957 y 1962. Fue fundada sobre el basamento cristalino, constituyéndose en el cierre de la cuenca tanto a nivel superficial como subterráneo con el objetivo de regular las crecidas de los mencionados arroyos, disipando la energía del agua superficial y retardando su salida (Ruiz de Galarreta et al., 2010). A partir del pie de la presa, el curso de agua se denomina arroyo Del Fuerte que atraviesa la ciudad mediante un entubamiento y es uno de los afluentes del arroyo Languelyú.

La cuenca del Lago del Fuerte presenta una forma oblonga según el Índice de Gravelius (Kc: 1.51) mientras que de acuerdo al Factor de Horton (IF: 0.77) tiende hacia una forma más redondeada, lo que llevaría a una situación intermedia de peligrosidad ante eventos de crecida (Cifuentes, 2020). La misma, posee un drenaje definido e integrado y el sentido de escurrimiento es hacia el NE, acorde a la pendiente regional (Ruiz de Galarreta et al., 2010). Sus altitudes oscilan entre los 197 y 486 msnm, con un desnivel de 289 m y una pendiente media de 5.41%. Presenta un estadio avanzado en su evolución hidrográfica y alcanza un orden máximo de 4 siguiendo el método de jerarquización de Strahler (1964). La densidad del drenaje (1.24 km.km⁻²) es de baja a moderada (Fuentes Junco, 2004), con un tiempo de concentración de 45 minutos (Cifuentes, 2020).

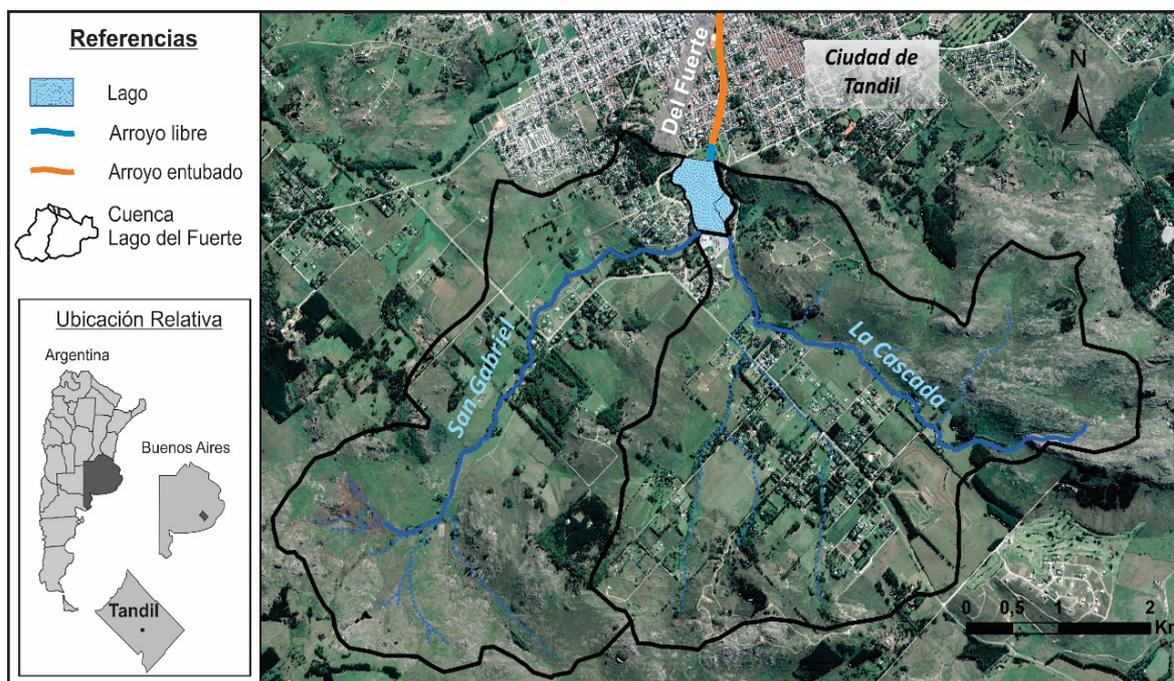


Figura 1. Área de estudio. Cuenca del Lago del Fuerte.

La topografía del ámbito serrano en cabeceras, próximas a los límites de cuenca, determina mayores gradientes y un rápido escurrimiento superficial. En general el flujo del agua subterránea mantiene la dirección de la pendiente topográfica y circulación del flujo superficial. Aguas abajo hacia al embalse, el acuífero libre aporta agua a los cursos superficiales, en donde los arroyos presentan un régimen permanente.

METODOLOGÍA

La investigación presenta un abordaje en dos escalas:

a) Por un lado, se llevó a cabo la caracterización de la dinámica hídrica de la cuenca del embalse Lago del Fuerte. Para tal fin se realizó un análisis de las precipitaciones, un balance hídrico modular y seriado y un análisis de la hidrología superficial y subterránea.

b) Por otro lado, se determinó el balance hidrológico del lago, el cual como fue mencionado, constituye el cierre de la cuenca bajo estudio.

El período de la investigación fue de un año, comprendido entre el mes de febrero de 2015 y el mes de enero de 2016 inclusive.

Balance hídrico modular y seriado

A fin de determinar el ingreso de agua en la cuenca y valorar los excesos y déficits se efectuó el análisis de las precipitaciones acaecidas durante el período de estudio las cuales se compararon con los valores medios regionales. Para esto se desarrolló un balance hídrico modular para el período 1900-2016, según la metodología de Thornthwaite y Mather (1957).

A su vez, siguiendo la misma metodología se realizó el balance hídrico en forma seriada mensual para el período febrero de 2015 a enero de 2016. Se lo efectuó cotejando mes a mes los valores de precipitación (datos obtenidos de la Estación Tandil Aero del Servicio Meteorológico Nacional) versus la evapotranspiración potencial, considerando en cada momento la capacidad de almacenaje de agua del suelo. Ésta se determinó de acuerdo a las asociaciones de suelo presentes en el área de estudio, en base a la información del INTA (1989). Se calculó la superficie que ocupa cada asociación y se le otorgó un valor de almacenaje siguiendo las sugerencias establecidas por Thornthwaite y Mather (1957) de acuerdo al tipo de suelo, espesor y vegetación predominante. Luego se efectuó una ponderación de la capacidad de almacenaje en función de la superficie ocupada para obtener un valor promedio que rondó los 100 mm. El mismo es acorde a las características del área, debido a una

mayor presencia de afloramientos rocosos y menor desarrollo de la capa del suelo propio de la zona de cabecera de la cuenca del arroyo Langueyú, comparado con trabajos antecedentes que aplican un almacenaje de 150 mm para la zona de piedemonte y llanura (Ruiz de Galarreta et al., 2010; Barranquero et al., 2011; Barranquero, 2015).

Una vez completado el ciclo anual, se determinaron los déficits hídricos, los excesos y la evapotranspiración real del período de análisis.

Hidrología superficial

En el arroyo San Gabriel (ASG) las mediciones de aforo de caudal se efectuaron en una zona donde el mismo atraviesa una tubería de alcantarillado (Figura 2) aplicando la fórmula de Manning (Chow et al., 1994). Se midió la altura del agua en la tubería y se aplicaron las ecuaciones (1) y (2) cuyos datos restantes fueron previamente registrados en campo:

$$Q = A \cdot V \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (2)$$

donde Q es el caudal de agua ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), A es el área de la sección del flujo de agua (m^2), V es la velocidad de flujo ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), n es el Coeficiente de rugosidad, R es el radio hidráulico (m) y S es la pendiente de la tubería ($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$).



Figura 2. Sitio de medición de caudal del Arroyo San Gabriel.

También se aplicaron otras técnicas de medición para cotejar los resultados. Entre ellas se realizaron: el cálculo volumétrico (ecuación 3), ante situaciones de bajo caudal y la estimación con flotadores (ecuación 1), debido a la presencia de obstrucciones en el entubamiento, así como ante el ingreso de elevado caudal.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3)$$

donde Q es el caudal de agua ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), V es volumen (L o m^3) y t es el tiempo (seg).

A su vez se estableció el coeficiente de Esgurrimiento Superficial (Coef ES). Este consiste en considerar cuánto de la precipitación caída en el área de estudio en un tiempo particular se convierte en escurrimiento superficial. Para tal fin se compararon datos de precipitación del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) estación Tandil Aero, con mediciones de caudal en la subcuenca del arroyo San Gabriel.

El Coef ES fue de 0.075 (7.5%) y se cotejó con el valor antecedente de la cuenca alta del arroyo Tandileofú (0.068) (Ruiz de Galarreta, 2006) la cual se encuentra lindera a la cuenca de estudio y presenta similitudes en sus características geológicas, geomorfológicas e hidrológicas.

En el arroyo La Cascada (ALC) debido a su bajo y en ocasiones nulo escurrimiento, las mediciones de aforo presentaron mayores dificultades a través de las diferentes técnicas. Sólo se pudieron obtener resultados en momentos de elevado caudal. Para corroborar las mediciones de campo y suplir la ausencia de mediciones en el ALC se consideró el coeficiente de Esgurrimiento Superficial obtenido en la subcuenca del ASG, debido a que ambas presentan características similares.

En el embalse, la altura media y la capacidad de almacenamiento del mismo se obtuvo a partir de la digitalización de la batimetría antecedente realizada en el 2001 por la Dirección Provincial de Saneamiento y Obras Hidráulicas de la Provincia de Buenos Aires. Una vez digitalizada, la misma fue georeferenciada lo que permitió mediante el programa ArcGis (v 10.6) construir polígonos de las diferentes alturas batimétricas y así calcular el área de los mismos. Luego se multiplicó el área de cada polígono por la altura media obteniendo volúmenes

parciales que por sumatoria arrojaron el volumen total del embalse. A su vez, ante la ausencia de una escala hidrométrica, se seleccionó un sitio fijo donde medir las variaciones del nivel del pelo de agua del lago, que se utilizaron para determinar el almacenamiento superficial.

La nivelación de la cota del pelo de agua se llevó a cabo mediante un nivel óptico automático marca South modelo NL-C32, partiendo de la cota topográfica de una ménsula (Rodríguez et al., 2008), ubicada a escasos metros del lugar de medición de la variación de altura.

Para obtener el caudal de salida del embalse se aplicó la ecuación (4) correspondiente a la fórmula para vertederos (Chow et al., 1994). Esta consiste en la siguiente expresión:

$$Q = \varepsilon_1 C . b . h^{3/2} \quad (4)$$

donde Q es el caudal de agua ($m^3.s^{-1}$), b es el ancho del vertido (m), h es altura del agua en el vertedero (m) y $\varepsilon_1 C$ es el Coeficiente de descarga. Para el cálculo de este último término, se inspeccionaron los vertederos, la cantidad y las dimensiones que presentaba cada uno. A partir de ello, se identificaron 2 tipos de vertederos de acuerdo al ancho de 1 y 0.60 m (Figura 3).



Figura 3. Sitio de medición del caudal en los vertederos a la salida del Embalse.

Se calculó el Coeficiente de descarga respectivo para cada ancho para lo cual se midieron sus caudales volumétricamente, la altura del agua en cada vertedero y el ancho. Se obtuvieron los Coeficientes de 2.22 y 1.25 respectivamente, a partir del despeje de la ecuación (4). El caudal total de salida se obtuvo por sumatoria de los caudales parciales de los vertederos.

Los registros de los arroyos, el embalse y la salida de los vertederos se efectuaron a lo largo del período de estudio en momentos de variaciones de las condiciones hidrológicas.

Hidrología subterránea

Para caracterizar la dinámica hídrica subterránea se contó con información antecedente sobre el área de estudio (Ruiz de Galarreta et al., 2010; Barranquero, 2015) y en especial sobre la subcuenca del ALC (CINEA, 2009; Rodríguez et al., 2013; Rodríguez, 2014).

A fin de verificar y actualizar la información hidrogeológica, se seleccionaron sitios distribuidos de modo convergente en el sector del embalse, y se realizaron mediciones del nivel estático en dos momentos: antes de iniciar el período de estudio y durante el mismo, sobre perforaciones que fueron utilizadas en los antecedentes mencionados.

Cada perforación fue georreferenciada mediante el uso de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Para nivelar la boca de pozo de las diferentes perforaciones se realizaron mediciones planialtimétricas con un nivel óptico marca South modelo NL-C32 teniendo en cuenta un punto de cota conocida constituida por una ménsula ubicada dentro de la Isla del Lago del Fuerte (194.5 msnm) a partir de la cual se efectuó el correspondiente transporte de cota.

A partir de la nivelación de cada punto y las mediciones de los niveles freáticos se pudo relacionar la cota del agua subterránea y la cota del pelo de agua en el arroyo y se dibujaron perfiles para corroborar la relación entre el agua superficial y subterránea en la subcuenca del ALC.

Balance Hidrológico del Lago del Fuerte

Se efectuó el balance hidrológico anual del lago en el período ya mencionado de acuerdo a la ecuación (5). Se consideró un régimen no permanente, de manera que la diferencia entre los ingresos y egresos de agua en el lago resulta como una variación de almacenaje.

$$(Pd + Q_{sup} + Q_{sub}) - (EV + Q_s) = \pm \Delta Alm \quad (5)$$

Los ingresos de agua incluyeron: precipitación directa (Pd) sobre el lago, caudal superficial (Q_{sup})

ingresante por los dos arroyos que aportan al lago, y caudal subterráneo (Q_{sub}). Los egresos incluyen: evaporación directa (EV) y caudal superficial de salida (Q_s). El resultado equivale a la variación del almacenaje en el lago (ΔAlm). Todos los términos de la ecuación se expresaron en forma de volumen para el período anual de la investigación.

En el caso de la precipitación directa y la evaporación del lago, obtenidas en forma de lámina, ambas fueron convertidas a volumen teniendo en cuenta la superficie del cuerpo de agua.

Se consideró que el flujo subterráneo aporta a los arroyos afluentes del embalse y al embalse en sí mismo, ya que es prácticamente nula la salida subterránea desde la presa debido a que la misma constituye el cierre de la cuenca a nivel superficial y subterráneo.

Para el caudal superficial ingresante, dadas las dificultades presentadas en los aforos con algunas de las técnicas previamente mencionadas, se optó por utilizar el Coeficiente de Escurrimiento calculado para el área y se aplicó la ecuación (6), donde Q_{sup} es el caudal superficial ($m^3.año^{-1}$), P es la precipitación ($m.año^{-1}$), A es la superficie de la cuenca (m^2) y Coef ES es el coeficiente de escurrimiento (adimensional).

$$Q_{sup} = P \cdot A \cdot \text{Coef ES} \quad (6)$$

El aporte del caudal subterráneo ($m^3.año^{-1}$) se determinó a partir de la resolución de la ecuación (5) y despeje del resto de los términos.

Para la evaporación de la superficie de agua libre se aplicó la ecuación de Priestley y Taylor (1972). Las ecuaciones complementarias necesarias se tomaron de Carmona et al. (2019). Se utilizaron datos brindados por el Instituto de Hidrología de Llanura “Dr. Eduardo Usunoff” (IHLLA), que cuenta con una estación de Balance de Energía ubicada en el Campus Universitario Tandil, la cual se encuentra cercana al área de estudio.

El caudal de salida superficial ($m^3.año^{-1}$), se calculó como un promedio de los aforos verificados según la ecuación (4).

Para la variación del almacenaje en el embalse ($m^3.año^{-1}$), se midieron las diferencias de nivel del pelo de agua del lago al iniciar y finalizar el

balance y se lo multiplicó por la superficie del cuerpo de agua.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Balance hídrico modular

Del balance hídrico modular (1900-2016) (Figura 4) se obtuvo que la precipitación media anual del período fue de 849 mm, la evapotranspiración potencial de 729 mm y la real de 703 mm. El período más lluvioso se concentró entre octubre y marzo, y el menos lluvioso entre junio y agosto. Los excesos (146 mm) se producen en gran parte del año, exceptuando el período estival, donde se registró un déficit poco significativo (26 mm).

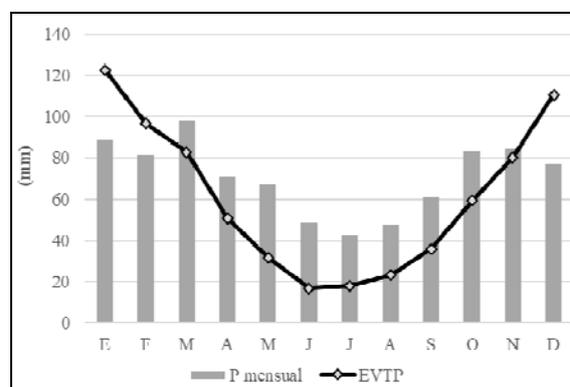


Figura 4. Balance hídrico 1900-2016 (P: precipitaciones, EVTP: Evapotranspiración potencial).

Balance hídrico seriado

Durante el período de estudio, la precipitación anual fue de 994 mm, superando la media modular en 145 mm. Los excesos se dieron desde abril hasta agosto y en octubre y noviembre, acumulando un valor de 346 mm, pero a su vez se registraron importantes déficits en febrero, marzo, septiembre y diciembre de 2015 (90 mm) que superaron el valor promedio.

La Figura 5 compara las precipitaciones medias mensuales del período 1900-2016 con las precipitaciones mensuales y la evapotranspiración potencial para el lapso anual de la investigación.

Se observó la ocurrencia de lluvias durante todo el período de estudio destacándose algunos meses en los que las precipitaciones superaron ampliamente los valores medios mensuales como fue el caso de abril, agosto y noviembre de 2015 y enero de 2016.

A su vez ocurrieron situaciones opuestas en las que las precipitaciones fueron menores en relación a las medias mensuales como sucedió en marzo, septiembre y diciembre de 2015.

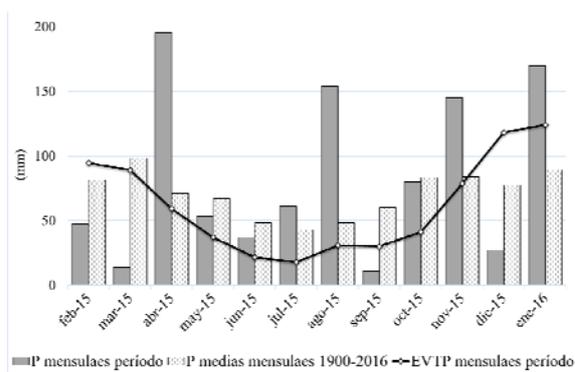


Figura 5. Precipitaciones mensuales históricas y del período de estudio versus evapotranspiración potencial mensual del período.

A partir de la comparación de los meses observados, las precipitaciones para el período de estudio marcaron un incremento en relación a los valores medios. A su vez, la distribución anual fue distinta a la media modular (Figura 5) lo que impactó en los excesos y déficit. Así mismo, se observa una situación de excesos que supera ampliamente la media modular.

Hidrología superficial

En la Tabla 1 se presenta una síntesis de los caudales obtenidos del arroyo San Gabriel y a la salida del embalse, así como las alturas del pelo de agua del embalse durante el período. Sin embargo, cabe mencionar que en las diferentes mediciones se evidenció la existencia de variaciones al comparar la cota del pelo de agua con el caudal de salida, lo que estaría asociado, como se pudo corroborar en campo, a la influencia de la acción del viento, la cual aumenta o disminuye el caudal de salida de acuerdo a su dirección.

Por otra parte, los picos de caudal máximo, tanto en el ASG como en la salida del embalse y las mayores alturas del pelo de agua, se corresponden con momentos de abundantes precipitaciones en días previos a la fecha de medición, períodos de exceso hídrico como sucede en invierno, y a las particularidades de la cuenca de rápida concentración

de las aguas. Por el contrario, los momentos de mínimo caudal y menor nivel del lago se corresponden con la época estival sumada a varios días sin precipitaciones con marcado déficit hídrico.

Tabla 1. Síntesis de los registros de aforos en el arroyo San Gabriel (ASG), a la salida del embalse y cota del pelo de agua del embalse.

Sitios	N	Mínimo	Máximo	Media
Cota del pelo de agua (msnm)	16	194	194.15	194.07
Caudal ASG ($m^3 \cdot s^{-1}$)	16	0.001	0.133	0.032
Caudal salida ($m^3 \cdot s^{-1}$)	16	0.001	0.561	0.081

N= Cantidad de mediciones.

Si bien ambos arroyos que aportan al lago cuentan con similitudes en algunos aspectos (geología, máximos y mínimos de caudal, parámetros morfométricos), el ASG presentó un régimen perenne que permitió efectuar aforos durante el período de la investigación, mientras que el ALC sólo exhibió escurrimiento fluvial y la posibilidad de aforar ante eventos de precipitaciones abundantes y cercanas a la fecha de medición.

Hidrología subterránea

A partir de la determinación de las profundidades del nivel freático se pudo observar que el mismo es somero, con valores que oscilan entre 1.7 y 7.3 metros.

En cuanto a los niveles estáticos calculados, se verificó que los mayores valores se encuentran hacia el Sur de la cuenca de aporte, coincidiendo con la zona de cabecera y mayor altitud topográfica, y disminuyen hacia las cercanías del lago. Esto corrobora que el flujo subterráneo tiene sentido Sur-Norte, aportándole agua a los arroyos y fluyendo hacia el lago.

A su vez, a través de las nivelaciones y mediciones planialtimétricas pudo observarse en los perfiles, las diferencias del terreno y del nivel freático desde el pozo hasta el pelo de agua del ALC en el sitio 1 y sitio 2 (Figura 6, abajo y arriba respectivamente). Se evidencia en dichos perfiles la relación entre las aguas superficiales y subterráneas indicando el aporte del acuífero freático hacia el arroyo ALC.

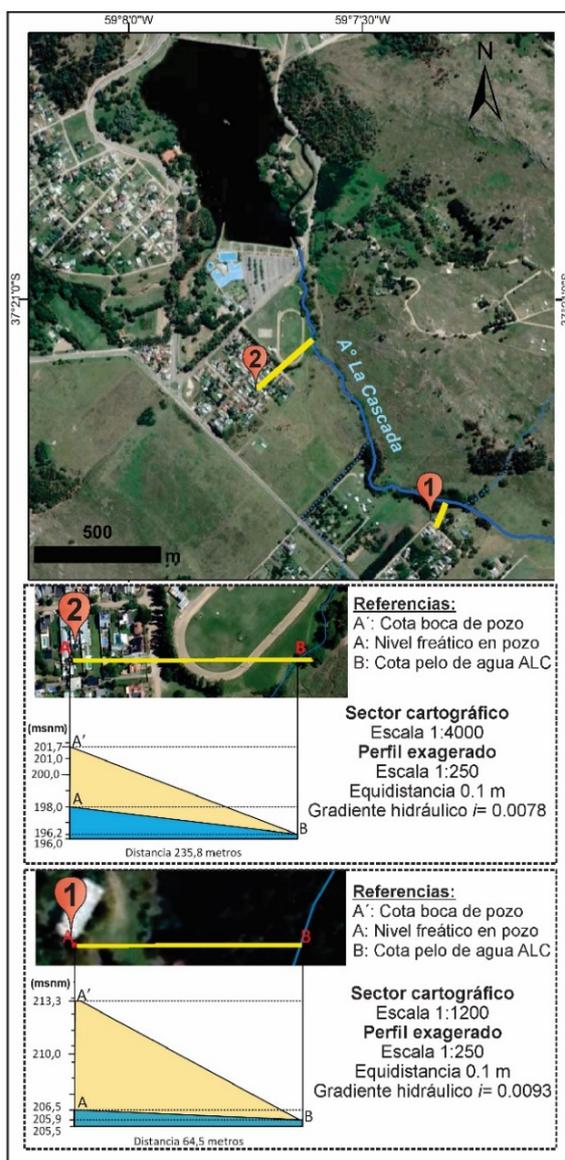


Figura 6. Mediciones planialtimétricas y relación entre las aguas superficiales y subterráneas (abajo pozo 1 y arriba pozo 2)

Balance Hidrológico

En la Tabla 2 se presenta la cuantificación de cada uno de los términos de la ecuación (5), correspondiente al balance hidrológico del Lago del Fuerte, en donde todos los términos constituyen datos calculados, excepto el caudal subterráneo que fue inferido por el despeje de la ecuación.

Se obtuvo que el caudal superficial aportado por los dos arroyos (ASG y ALC) constituye el 77% de los ingresos, mientras que la precipitación directa sobre el lago ronda el 10%. El ingreso restante (13%)

representa el aporte subterráneo al embalse. Por los vertederos egresa el 91% del volumen de agua, mientras que por evaporación se pierde un 9%. El almacenamiento de agua en el embalse descendió apenas 1 cm, por lo que la variación se consideró prácticamente despreciable.

Tabla 2. Ingresos y egresos del balance del Lago del Fuerte.

INGRESOS	
Precipitación directa	188860 m ³ .año ⁻¹
Caudal superficial (ASG+ALC)	1486528 m ³ .año ⁻¹
Caudal subterráneo	261059 m ³ .año ⁻¹
EGRESOS	
Evaporación	172330 m ³ .año ⁻¹
Caudal de salida	1766016 m ³ .año ⁻¹
±Δ Variación Almacenaje (-1 cm) - 1900 m³.año⁻¹	

Debido a la inexistencia de antecedentes en el área de estudio con el nivel de detalle de la presente investigación, no se ha podido realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos.

CONCLUSIONES

Este trabajo permitió caracterizar y comprender la dinámica hídrica de la cuenca bajo estudio y resolver el balance hidrológico del cuerpo de agua.

A partir del mismo se pudieron conocer las magnitudes de los ingresos y egresos e identificar su relevancia.

El aporte de caudal superficial constituyó el principal ingreso de agua al lago, mientras que por la presa del embalse egresó la mayor proporción.

El período de estudio fue más húmedo que un año promedio, con precipitaciones que superaron la media anual modular. Sin embargo, los excesos registrados no se vieron reflejados en el volumen del embalse el cual se mantuvo constante con incrementos transitorios debido al tipo de descarga por rebalse, pero sí impactarían en una mayor tasa de renovación del lago.

Los aportes del presente trabajo constituyen una base para el desarrollo de futuras investigaciones más específicas sobre la cuenca y sobre el cuerpo de agua, como aquellas vinculadas a la dinámica de nutrientes y el estado trófico del lago.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Marcelo Varni por su apoyo en la faz hidráulica y al Dr. Raúl Rivas, por el aporte de información para el cálculo de la evaporación a partir de los datos obtenidos de la estación de balance de energía del Instituto de Hidrología de Llanura “Dr. Eduardo Usunoff” (IHLLA), ubicada en el Campus Universitario Tandil.

A la Dirección de Hidráulica de la Provincia de Buenos Aires de Tandil, por la documentación sobre la construcción del Embalse, especialmente la batimetría del cuerpo de agua.

REFERENCIAS

- Aguilera Klink, F. (1999). Hacia una nueva economía del agua: cuestiones fundamentales. Boletín CF+S N° 8. Madrid. Recuperado de: <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n8/afagu1.html>.
- Albornoz, H., Gonzalez Castelain, J., Cifuentes M. y Rodríguez. L. (2009). Estado trófico y monitoreo de variables limnológicas en un lago artificial (Lago Del Fuerte, Tandil, Prov. De Buenos Aires). *Biología Acuática*, 26, 1-6.
- Barranquero, R., Varni, M., Ruiz de Galarreta, V. A. y Ocampo D. (2011). Evaluación del comportamiento hidrodinámico y cuantificación de la recarga en la cuenca del arroyo Languyú, partido de Tandil. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 27, 63-72.
- Barranquero, R. (2015). Análisis y evaluación del sistema hidrogeológico ambiental en la cuenca del arroyo Languyú, Tandil, Buenos Aires (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.
- Carmona, F., Rivas, R., Faramiñán, A. M. G., Mancino, C., Bayala, M. y Perez, W. (2019). Evaporation process study through in situ and remote sensing data at Tres Quebradas Salt flat. *Revista de Teledetección*, 54, 1-14. doi: <https://doi.org/10.4995/raet.2019.12264>.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santa Fé de Bogotá, Colombia: Ediciones McGraw-Hill.
- Cifuentes, M. R. (2012). Algas cianofitas y aptitud recreativa del Lago del Fuerte (Partido de Tandil) (Tesis de grado). Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.
- Cifuentes, M. R. (2020). Estudio ecohidrológico del embalse eutrófico Lago del Fuerte (Tandil, provincia de Buenos Aires) (Tesis doctoral). Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
- CINEA (Centro de Investigaciones y Estudios Ambientales) (2009). Estudio Hidrogeológico en la zona aledaña a la Avenida Don Bosco de la ciudad de Tandil. Convenio Municipalidad de Tandil-UNICEN. Tandil.
- Custodio, E. (2011). Planificación y gestión del agua subterránea: aspectos generales y retos. En: García, R. y Rocha Fasola, V. (Compiladores). *Actas del VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano Latinoamericano sobre temas actuales de Hidrología subterránea*. (pp. 1-16). Salta, Argentina.
- Fuentes Junco, J. J. A. (2004). Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancitaro. Instituto Nacional de Ecología (INE). Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas. México. Recuperado de: https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2009/02/morfometria_pico_tancitaro.pdf
- Global Water Partnership - Gwp (2009). Manual para la gestión integrada de Recursos Hídricos en Cuencas. Londres. Recuperado de: http://www.gwptoolbox.org/images/stories/Docs/handbook%20inbo_gwp_spanish.pdf.
- Guerrero, E. M., Wagner, L. S., Rodríguez, C. I. y Sosa, B. (2015). Acciones colectivas y recursos naturales en conflicto. Historia ambiental de luchas urbanas por agua y sierras en Tandil, Argentina. *Revista Luna Azul*, 41: 274-295.
- IHLLA (Instituto de Hidrología de Llanuras) (1995). Diagnóstico limnológico, sanitario, ictiológico y estado ambiental del Lago del Fuerte, ciudad de Tandil. Informe final a la Municipalidad de Tandil.
- IHLLA (Instituto de Hidrología de Llanuras) (2005a). Estudio de la calidad del agua del Lago del Fuerte, Tandil. Diagnóstico. Informe N° 3 a la Municipalidad de Tandil.
- IHLLA (Instituto de Hidrología de Llanuras) (2005b). Monitoreo de Toxinas algales (microcistinas). Lago del Fuerte, Tandil. Informe Final a la Municipalidad de Tandil.
- INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) (1989). Mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires, escala 1:500.000. INTA. Buenos Aires.
- Miranda Del Fresno, M. C. y Ulberich, A. (2010). Problemas ambientales derivados del crecimiento urbano en el sector serrano S-SE de la ciudad de Tandil, provincia de Buenos Aires.

- [CD-ROM]. Actas del VI Congreso Nacional Ambiental. San Juan.
- Miranda Del Fresno, M. C. y Ulberich, A. (2011). Técnicas fotocartográficas, una herramienta para la detección de impactos y problemas ambientales. *Revista de Teledetección* 36: 84-97. Asociación Española de Teledetección. Recuperado de: http://www.aet.org.es/revistas/revista36/Numero36_08.pdf.
- Piman, T. y Babel, M. S. (2013). Prediction of rainfall-runoff in an ungauged basin: case study in the mountainous region of Northern Thailand. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(2), 285-296. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000573](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000573).
- Priestley, C. H. B. y Taylor, R. J. (1972). On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81-92. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100%3C0081:OTAOSH%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100%3C0081:OTAOSH%3E2.3.CO;2).
- Rodríguez, C. I. (2014). Evaluación ambiental del uso y gestión del agua subterránea en el partido de Tandil. Pautas para su gestión sustentable (Tesis doctoral). Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
- Rodríguez, C. I., Miranda Del Fresno, M. C., Miguel, R. E., Ulberich, A. C. y Ruiz de Galarreta, V. A. (2013). Cambios de uso del suelo e impactos sobre el agua subterránea en un barrio al sur de Tandil, Buenos Aires, Argentina. *Revista AUGM Domus*. Vol. 5, 75-90. Asociación de Universidades Grupo Montevideo. La Plata.
- Rodríguez, E., Rosa, S. y Salinas, B. (2008). Levantamiento topo-batimétrico de la zona del Lago del Fuerte (Tandil) para apoyo de obras de saneamiento. UNLP. Recuperado de: <http://200.5.74.242/greenstone/collect/facagr/index/assoc/HASHca39.dir/doc.pdf>.
- Ruiz de Galarreta, V. A. (2006). Geohidrología y balance hidrológico de la zona no saturada en la cuenca superior del arroyo Tandileofú, Provincia de Buenos Aires (tesis doctoral). Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
- Ruiz de Galarreta, V. A., Banda Noriega, R., Barranquero, R., Díaz, A. A., Rodríguez, C. I. y Miguel, R. E. (2010). Análisis integral del sistema hídrico, uso y gestión. Cuenca del arroyo Langueyú, Tandil, Argentina. *Boletín Geológico y Minero*. 121 (4), 343-356.
- Sokolov, A. y Chapman, T. (1981). Métodos de cálculo del balance hídrico. Guía internacional de investigación y métodos. Instituto de Hidrología de España & UNESCO. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001377/137771so.pdf>.
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. Section 4-II of *Handbooks of Applied Hydrology*. McGraw-Hill Book Co, New York, USA.
- Thornthwaite, C. W. y Mather, J. R. (1957). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Climatology Drexel Institute of Technology. Laboratory of Climatology, Publication N° 10: 185-311*. Centertown.

Tipo de Publicación: NOTA TECNICA.

Trabajo recibido el 12/11/2021 y aprobado para su publicación el 16/03/2022.

COMO CITAR

Cifuentes, M. R.; Rodríguez, C. I.; Ruíz de Galarreta, V. A. y Gabellone, N. A. (2022). Dinámica hídrica y balance hidrológico en la cuenca del embalse Lago del Fuerte, Tandil. *Cuadernos del CURIHAM*, 28, 15-24. doi: <https://doi.org/10.35305/curiham.v28i.178>

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>)



CALIBRACIÓN DE SIMULACIONES DE CRECIDAS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO SAUCE GRANDE, PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA.

RUNOFF CALIBRATION ON THE SAUCE GRANDE RIVER BUENOS AIRES PROVINCE, ARGENTINA

Sandra Noemí Fernández^{(1)(2)(*)}, Daniel Enrique Pérez⁽¹⁾, Carlos Fernando Weis⁽¹⁾ y Miguel Ángel Flores.⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina

⁽²⁾ Comisión de Investigaciones Científicas, La Plata, Argentina.

^(*)e_mail: sfernand@uns.edu.ar

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es calibrar una herramienta de simulación hidrológica para aplicar a la cuenca alta del Río Sauce Grande (CASG), Provincia de Buenos Aires, Argentina, la cual reviste una importancia central en el Sudoeste Bonaerense. Se utilizan datos de precipitaciones y caudales medidos en campo, con los cuales se alimentó el HEC-HMS v.4.2.1. Se usó el método de número de curva del Soil Conservation Service. El tránsito de avenidas fue resuelto por el método de Muskingum. Se lograron ajustes entre muy buenos y excelentes según el índice de Nash-Sutcliffe. La herramienta hidrológica calibrada utilizada simula satisfactoriamente eventos de tormentas reales. La cuenca muestra un alto grado de sensibilidad al estado inicial de humedad, por lo que es recomendable definir al menos dos escenarios relacionados con los intervalos entre precipitaciones para simulaciones con tormentas de proyecto. Se presentan valores promedio y desvío estándar de los parámetros de ajuste para cada subcuenca.

Palabras clave: río Sauce Grande; escorrentía superficial; simulación de crecidas; HEC-HMS.

ABSTRACT

The objective of the present work is to calibrate a hydrological simulation tool to be used on the Sauce Grande River High Basin (CASG), Buenos Aires Province, Argentina, which is of crucial importance for the Bonaerense southwest. Rain fall and flow rate field data are used to feed the HEC-HMS 4.2.1. Soil Conservation Service Curve number method is implemented. Muskingum method is used to solve the flood routing. Very good to excellent fit is obtained according to the Nash-Sutcliffe efficiency index. The calibrated hydrological tool turns up to simulate satisfactorily real storm events on the basin. Great variability is observed associated to the initial humidity, so at least two initial states related to intervals between storms should be defined to simulate project storms. Adjustment parameters averages and standard deviations are presented for each sub-basin.

Keywords: Sauce Grande River; Runoff; Flood simulation; HEC-HMS.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de los procesos hidrológicos es fundamental ya que es precisamente en las cuencas hidrográficas donde se genera el agua para diferentes usos del suelo y consumo humano. Por tanto, el desarrollo y puesta a punto de herramientas que permitan simular el rendimiento hídrico se revela como estratégico para el manejo del agua.

El río Sauce Grande recorre desde su nacimiento en el Sistema de Ventania una longitud total de 170 km hasta su desembocadura en el océano Atlántico (Figura 1). Su cuenca total es la más importante del sudoeste bonaerense con un área total de 4609 km² (Gil, 2009).

La Cuenca Alta del Río Sauce Grande (CASG), a los fines del presente trabajo, se define desde las nacientes del Sauce Grande en el Sistema de Ventania hasta la Ex-toma de agua de Aguas Corrientes de Obras Sanitarias donde se encuentra la Estación Limnigráfica L2; 6 km aguas arriba del Embalse Paso de las Piedras (Figuras 1 y 2). Posee una superficie de 861 km² y en ella el cauce principal recorre 66 km.

El río transita una zona de producción agrícola ganadera (Aduriz et al., 2003) y presenta una creciente actividad turística. Además, es el aporte primario al Embalse del Dique Paso de las Piedras. Este embalse, de 328 hm³ de volumen máximo (Schefer, 2004) y construido a comienzos de la década de 1970, constituye en la actualidad la principal fuente de abastecimiento de agua potable para las ciudades de Bahía Blanca, Punta Alta y de agua cruda al polo industrial cercano, lo cual pone de relieve la importancia estratégica del mismo. (Fernández et al., 2019)

La zona de estudio del río Sauce Grande (CASG) se encuentra ubicada en el contexto geológico de las Sierras Australes, presentando tres unidades geomorfológicas importantes: las serranías, los niveles de piedemonte con cobertura loésica y el valle del río (Rabassa, 1982). La primera incluye las sierras de la Ventana y de Las Tunas con pendientes pronunciadas en la zona de divisoria de aguas. En esa zona se observan cárcavas de carácter torrencial que dan lugar a la formación de la mayoría de los afluentes, algunos permanentes y otros temporarios, que discurren en pequeños y profundos cañadones sobre las pendientes más pronunciadas. Posteriormente, se presenta la zona del piedemonte,

que alcanza áreas de menores pendientes. Por último, la unidad geomorfológica correspondiente a la llanura aluvial del río, compuesta principalmente por material sedimentario moderno con un espesor variable y pendientes más moderadas. Se destaca la presencia de barrancas cuyas paredes verticales y alturas variables entre 3 y 8 m encajonan y controlan el cauce del río (Luque et al., 1979).

El clima es templado, con una temperatura media en el mes de julio de 7 °C y de 23,5 °C en enero; las precipitaciones anuales en la zona de estudio oscilan entre 650 y 950 mm (Vouilloud et al., 2005). Las lluvias no son regulares a lo largo del año, sino que se concentran principalmente durante primavera y otoño. Esto hace que el río presente variaciones muy importantes en el nivel de agua y en la velocidad de la corriente hasta su llegada al dique, a partir del cual el caudal del río depende de los niveles de erogación del embalse (López Cazorla et al., 2003).

Según Gil (2009), la información de caudales es dispersa y se concentra en los últimos años, de manera tal que no permite realizar un estudio hidrológico detallado, como es el caso de estimación de los períodos de retorno de caudales que generan desbordes en los ríos. La mayor tormenta registrada hasta la actualidad fue la del 7 de abril de 1944 que produjo desbordes e inundación en varios sectores de las localidades de Sierra de la Ventana y Saldungaray con pérdidas de vidas humanas y económicas. Casi 60 años después (6 al 9 de octubre de 2003) se produjo otra crecida, afectando nuevamente a las poblaciones localizadas en la cuenca. En este caso el caudal del río aumentó de forma imprevista llegando a superar los ocho metros sobre el cauce y se produjeron desbordes en algunos sectores de Sierra de la Ventana. Hubo 180 evacuados, sin víctimas mortales.

En la CASG, se suelen producir incendios forestales de considerable magnitud, especialmente en la zona de las nacientes y piedemonte de la cuenca. El principal problema, al momento de combatir el fuego sin control, es el acceso al agua. Una posible acción para mejorar esta situación, sería la construcción de una serie de pequeñas presas distribuidas en la zona que provean espejos de agua accesibles en caso de siniestros. Para encarar una solución de este tipo es fundamental contar con una herramienta hidrológica que permita simular caudales a partir de lluvias y poder de esta manera establecer un plan de acción basado en datos certeros.

La actividad turística en la comarca serrana ha venido en aumento consistentemente por más de 20 años (Aduriz et al., 2003), lo que conlleva a un incremento en la demanda de agua para distintos usos (consumo, piscinas, riego, etc.). Además, se verifica un crecimiento de la población estable en la zona. Por ejemplo, Sierra de la Ventana, Villa Ventana y Saldungaray acusaron un aumento poblacional de 43 %, 37 % y 5 % respectivamente según datos censados por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC, 2001; INDEC, 2010). Similares valores se ven en otros centros turísticos de la zona, lo que implica una sobrecarga a los sistemas de servicio preexistentes, entre ellos, agua potable.

Fernández et al. (2019) presentan una calibración hidrológica con HEC-HMS 4.2.1 en el sector superior de la Cuenca Alta del Río Sauce Grande. La superficie de aporte total es de 177.042 km², la longitud del curso principal de agua más largo medido desde la naciente es de 20.26 km, la pendiente media es de 2.7%, la altitud máxima es cercana a 900 metros sobre el nivel del mar (msnm) y la mínima de 300 msnm. Se reportaron cinco eventos de tormenta observados en la zona durante el año 2015 con sus correspondientes hidrogramas medidos en la Estación Limnigráfica L1 y registros de precipitación de una única Estación Meteorológica con pluviógrafo. Los valores de bondad de ajuste del estadístico de eficiencia de Nash-Sutcliffe muestran ajustes de muy buenos a excelentes, demostrando que el modelo representa adecuadamente la respuesta de la cuenca ante eventos reales. Se procedió a extraer el flujo base del hidrograma observado por medio del método de la pendiente variable. Las pérdidas por infiltración y abstracciones de lluvia se calculan mediante el método del Número de Curva del Soil Conservation Service. Se implementa el método de Muskingum de traslado de onda de crecida. Este trabajo resulta el primero de su clase para la zona estudiada.

Fernández et al. (2021) presentan una validación de dos tormentas en base a cinco calibradas. En este trabajo se seleccionan siete tormentas registradas por tres pluviógrafos de la zona y sus correspondientes hidrogramas, medidos en la estación limnigráfica L1. Si bien el área de estudio coincide con la considerada en la publicación de Fernández et al. (2019), la validación contó con una base de datos pluviográficos provenientes de tres estaciones meteorológicas en lugar de una, cuya información fue procesada mediante el método de

los polígonos de Thiessen. Se cambia, además, la metodología de extracción del escurrimiento base a partir de un algoritmo estocástico de un parámetro en lugar del método gráfico de la pendiente variable. Los coeficientes Nash-Sutcliffe obtenidos indican muy buenos a excelentes valores de calidad del ajuste, tanto para tormentas calibradas como validadas.

Por su parte, Espósito (2014) aplica el modelo HEC-HMS, en su versión 3.3, a la cuenca del arroyo El Divisorio de 400 km² que en su desembocadura aporta el 20% del agua al embalse Paso de las Piedras, aguas debajo de la estación limnigráfica L2. El modelo reproduce satisfactoriamente el comportamiento hidrológico, por ende, resulta una herramienta útil para la estimación de caudales y volúmenes de escorrentías ante la ocurrencia de distintos eventos en esta cuenca.

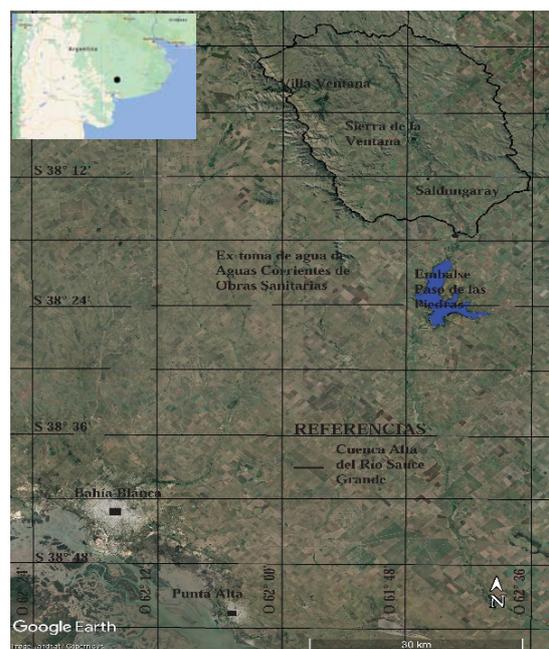


Figura 1: Ubicación del área del estudio (CASG).

OBJETIVOS

Se plantea como objetivo de este trabajo, calibrar una herramienta de simulación hidrológica, que se pueda aplicar a lluvias de proyecto, manejo del recurso hídrico, apoyo a obras civiles en el área (pequeñas presas para consumo de agua y/o recreación, reservas para atacar incendios de verano, defensas, controles de crecida, alcantarillas, etc.), simulación de calidad de agua, transporte de

sedimentos, escenarios de cambio climático, etc.

METODOLOGÍA

Zona de estudio (CASG)

La cuenca a estudiar abarca desde las nacientes del Sauce Grande hasta la estación limnigráfica L2 (Ex-toma de agua de Aguas Corrientes de Obras Sanitarias) y está integradapor 16 subcuencas asociadas a afluentes de Sauce Grande y 9 subcuencas que drenan directamente al curso principal (Figura 2). Los afluentes que aportan son los arroyos del Abra, El Atravesado, Mambaches, de las Piedras, Abra Fea, El Negro, El Toro y Las Mercedes sobre su margen izquierda, y arroyos Destierro Primero, de los Remansos, Horqueta del Sauce, del Oro, Rivero, San Bernardo, San Teófilo y Rivera sobre su margen derecha (Figura 2).

Delimitación de la cuenca

La cuenca estudiada se delimitó mediante la digitalización de las cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional, Escala 1:50.000, correspondientes a Sierra de la Ventana, Saldungaray y Peralta con equidistancias de 25 m; Estancia Gran Chaco, De las Águilas, Sierra de Las Tunas y Tornquist con equidistancia 10 m y Stegmann con equidistancia 5 m. En base a éstas, se realizó un modelo de terreno utilizando la herramienta AutoCAD versión 2010. Se complementó la información con imágenes satelitales provenientes de Google Earth. La georeferenciación de las estaciones meteorológicas y limnigráficas se realizó mediante un GPS Garmin 276C (con altimetría).

Monitoreo hidrometeorológico

Se contó con datos de 2 pluviógrafos de las respectivas estaciones meteorológicas instaladas en la zona. Los mismos miden 0.3 mm de columna de agua por cada caída de las cubetas basculantes. Los datos de precipitación se registraron cada quince minutos. Se cuenta además con los datos de dos estaciones limnigráficas (L1 y L2) que proporcionan mediciones de nivel de agua superficial cada hora. En las mismas el equipo de medición consta de una sonda de acero inoxidable con sensor de presión piezoresistivo (marca GENICA). El conjunto es alimentado por una batería de 12V y todas las

conexiones y dispositivos eléctricos se encuentran alojadas en un abrigo anti vandálico, fabricado en el taller del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional del Sur. En la Tabla 1 se presentan las coordenadas y elevaciones respecto del nivel del mar de las estaciones meteorológicas y limnigráficas utilizadas en este trabajo. Las Figuras 3, 4, 5 y 6 ilustran las estaciones meteorológicas y limnigráficas mencionadas.

Precipitaciones

Las precipitaciones caídas en cada subcuenca se determinaron como promedios ponderados del área de influencia de cada pluviógrafo, la cual fue determinada de la siguiente manera: se une la posición de las estaciones meteorológicas entre sí, trazando luego la mediatriz del segmento de unión. Las intersecciones de esta mediatriz con los límites de la cuenca determinan el área de influencia de cada pluviómetro sobre las distintas subcuencas (Figura 7).

Hidrograma y flujo base

Se cuenta con la curva de altura caudal o curva h-Q en dos secciones de control emplazadas sobre el cauce principal del río Sauce Grande correspondientes a las Estaciones Limnigráficas L1 y L2. Las mediciones de niveles de las aguas superficiales se registran cada hora y se transforman en caudal observado a través de las relaciones h-Q.

Éstas fueron determinadas y calibradas mediante relevamientos -con estación total- de secciones transversales y perfiles longitudinales con elevaciones y progresivas, aplicación del método área-pendiente y la realización de varios aforos con molinete y uso de un correntómetro ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) en distintos estados del río. Las ecuaciones h-Q siguen leyes potenciales y se actualizan periódicamente con nuevos aforos. Con esta herramienta, se producen series de tiempo de caudal en función del tirante de agua.

Las Figuras 8 y 9 muestran las secciones transversales correspondientes a las Estaciones Limnigráficas L1 y L2 con la indicación de los niveles de la superficie libre del agua para los caudales máximos modelados, 7.67 m³/s y 16.92 m³/s respectivamente, junto a fotografías de cada lugar.



Figuras 3, 4, 5 y 6: de izquierda a derecha Estación limnigráfica L2, Estación meteorológica M1, Estación meteorológica M2 y estación Limnigráfica L1. Fuente: Fotografías tomadas por Fernández.

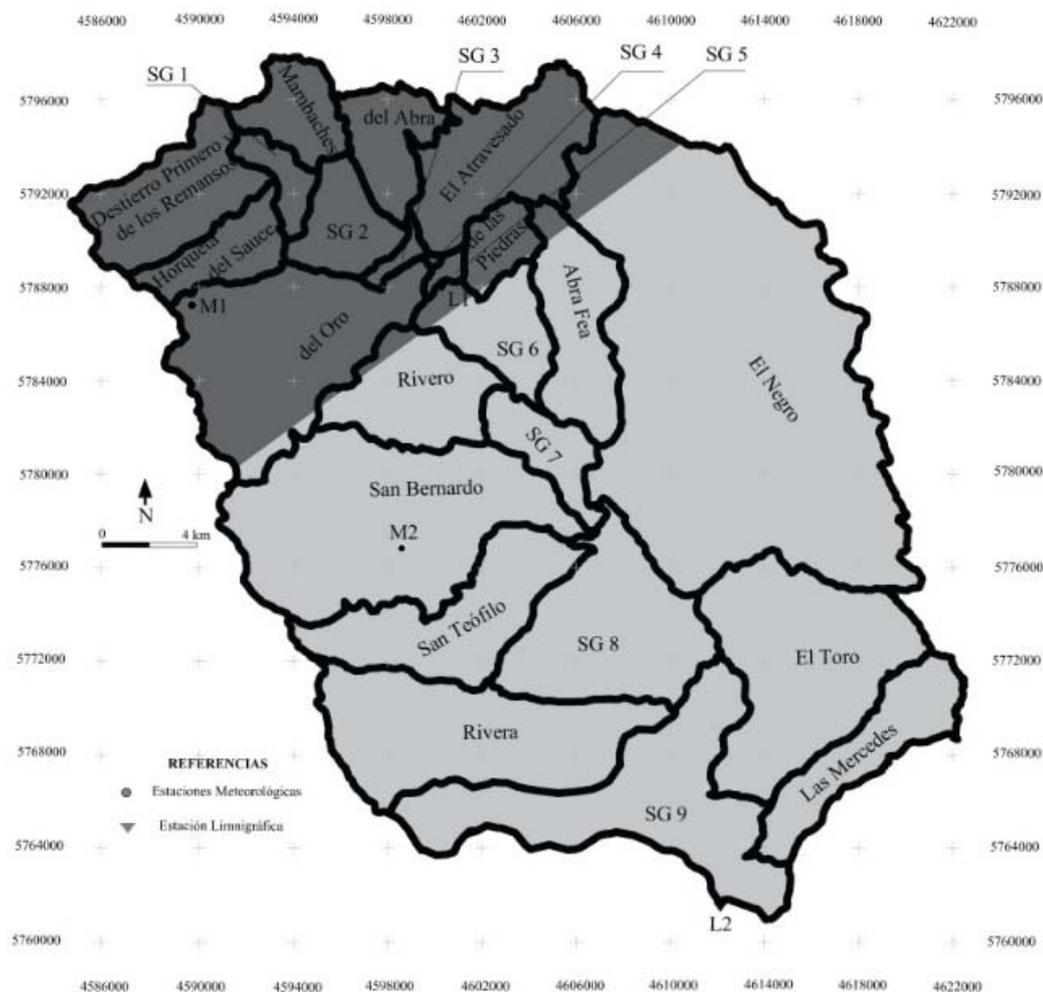


Figura 7: Área de influencia de los pluviógrafos de las estaciones M1 y M2 para las subcuencas de la CASG. Fuente: elaborado por Fernández y Pérez sobre la base de cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional

Estas tareas se llevaron a cabo en el marco de los proyectos de investigación “Cuencas del sur de la región pampeana-predictibilidad climática, hidrología, calidad y modelización de los recursos hídricos. Fase II” y “Cuencas del sur de la región pampeana. Hidrología, calidad y modelización de los recursos hídricos. Fase III”, dirigidos por los docentes Ing. Mario Sequeira y Dra. Ing. Sandra Fernández del Departamento de Ingeniería de la UNS, y financiadas por la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNS.

La simulación requiere la escorrentía superficial, la cual se obtiene de restar el flujo base, del observado, obteniéndose así el Hidrograma de Flujo Superficial Observado (HFSO). Se determinó el flujo base por medio de un algoritmo estocástico, o filtro numérico, aplicado a las series de datos de caudales asociadas a los registros de las Estaciones Limnigráficas.

El algoritmo numérico adoptado es el de un parámetro Ecuación (1) (Gómez-Isidroy Gómez-Ríos, 2016).

$$Q_{b(i)} = \frac{K}{2-K} Q_{b(i-1)} + \frac{1-K}{2-K} Q_{(i)} \quad (1)$$

Donde $Q_{b(i)}$ es el caudal base en cada tiempo i , K es el factor de agotamiento de la curva, $Q_{(i)}$ es el caudal observado en cada instante i . El factor de agotamiento de la curva se obtiene por medio de la Ecuación 2.

$$Q_t = Q_0 e^{-kt} \quad (2)$$

Donde k (horas^{-1}), la constante de recesión, la cual se obtiene por medio de una regresión lineal de los valores logarítmicos del caudal en el tiempo, a partir de que se inicia la recesión. El algoritmo numérico requiere de un solo parámetro: K que responde a la

Ecuación (3) y representa las condiciones físicas de la cuenca y propiedades del hidrograma (Gómez-Isidroy Gómez-Ríos, 2016).

$$K = e^{-k} \quad (3)$$

Datos de los eventos usados para la calibración

En la Tabla 2 se muestran las fechas de 7 eventos de tormenta observados en el año 2015. Se presentan los valores de precipitación acumulada en mm para cada pluviógrafo de las dos estaciones meteorológicas y el caudal en el pico en m^3/s del hidrograma observado obtenido de la curva de h - Q en cada estación limnigráfica.

Las Figuras 10 a 23 detallan los hietogramas e hidrogramas totales observados que se produjeron en las correspondientes fechas.

Aplicación del Modelo hidrológico HEC-HMS

Se usó el programa HEC-HMS, en su versión 4.2.1, creado por el Hydrologic Engineering Center del U. S. Army Corps of Engineers. Este software permite simular la transformación de lluvia histórica o hipotética en escorrentía mediante un sistema que integra diferentes métodos hidrológicos y se basa en estructurar la cuenca origen en subcuencas asociadas a los cauces de la red fluvial (Figura 24).

Se adoptó el método de Muskingum para el tránsito de avenidas en la cuenca, el cual exige fijar dos parámetros, K y X , en cada tramo para considerar el efecto de almacenamiento del cauce en la crecida. En el caso de los tramos ubicados en el sector superior de la CASG, se propusieron como valores iniciales aproximados los obtenidos en Fernández et al. (2019).

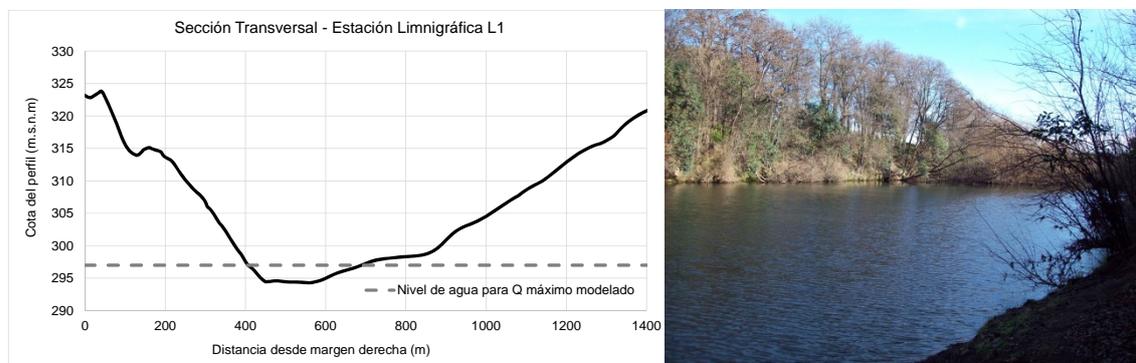


Figura 8: De izquierda a derecha, sección transversal del cauce en la Estación Limnigráfica L1 con indicación del nivel de la superficie libre del agua para el caudal máximo modelado ($7.67 \text{ m}^3/\text{s}$) y Paisaje del lugar. Fuente: Fotografía tomada por Fernández.

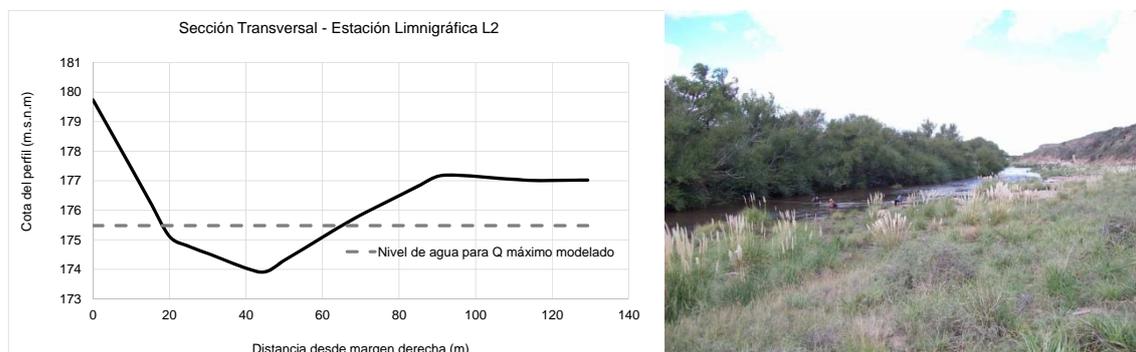
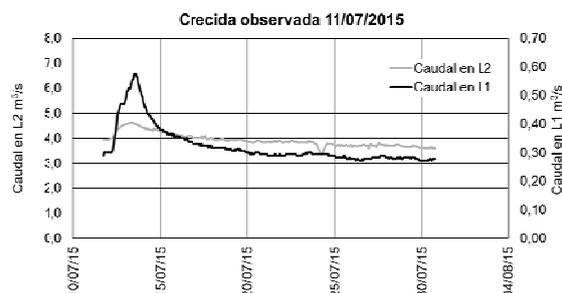
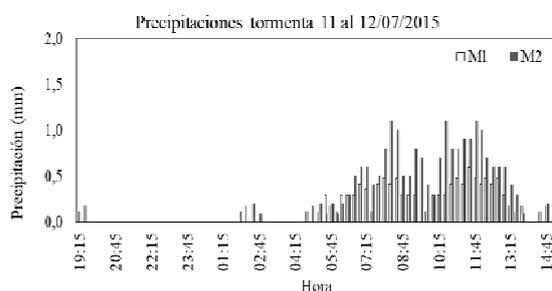


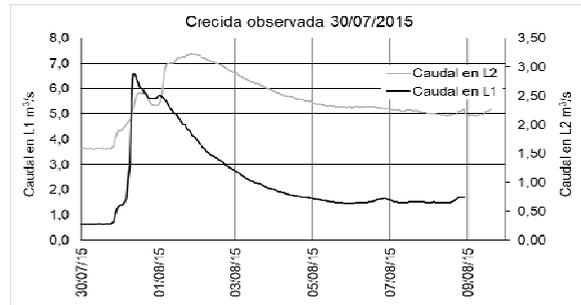
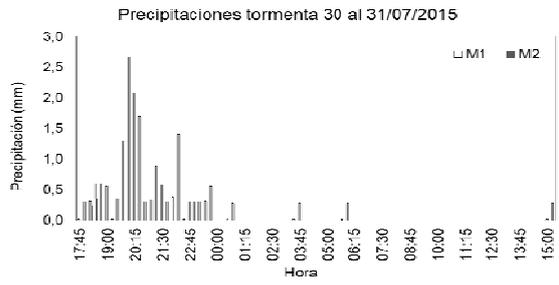
Figura 9: De izquierda a derecha, sección transversal del cauce en la Estación Limnigráfica L2 con indicación del nivel de la superficie libre del agua para el caudal máximo modelado ($16.92 \text{ m}^3/\text{s}$) y Paisajedel lugar. Fuente: Fotografía tomada por Fernández.

Tabla 2. Eventos de tormenta observados: fecha, precipitación acumulada y caudal en el pico del hidrograma total observado. Fuente: elaborado por Fernández sobre la base de los datos de las estaciones hidrometeorológicas.

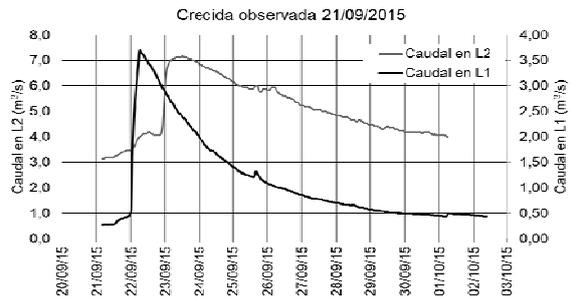
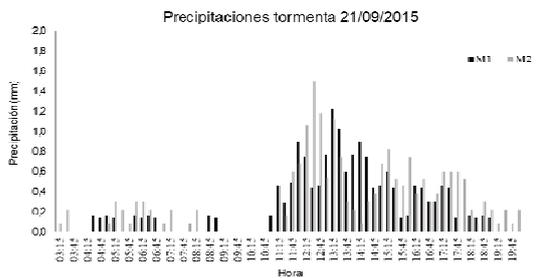
Fecha del Evento	Precipitación acumulada M1 (mm)	Precipitación acumulada M2 (mm)	Caudal en el pico Hidrograma Observado L1 (m^3/s)	Fecha del pico Hidrograma observado L1 (m^3/s)	Caudal en el pico Hidrograma observado L2 (m^3/s)	Fecha del pico Hidrograma observado L2 (m^3/s)
11/07/15	12.6	21	0.58	13/07/2015 14:00	4.64	13/07/2015 08:00
30/07/15	17.7	29.4	2.87	31/07/2015 08:00	7.38	01/08/2015 20:00
21/09/15	16.8	19.8	3.69	22/09/2015 06:00	7.17	23/09/2015 12:00
01/10/15	21.9	40.8	6.85	02/10/2015 10:00	16.45	03/10/2015 00:00
14/10/15	24.6	33	7.67	15/10/2015 15:00	16.92	16/10/2015 03:00
19/10/15	13.8	10.5	5.65	20/10/2015 14:00	10.93	21/10/2015 05:00
16/12/15	31.5	46.5	5.65	17/12/2015 07:00	11.69	17/12/2015 20:00



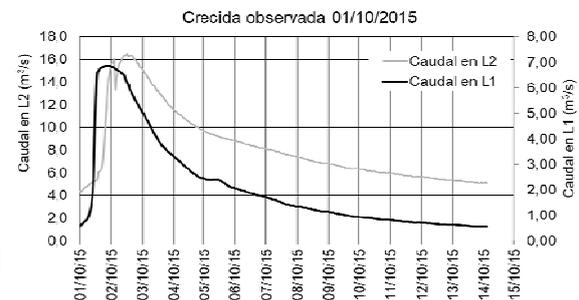
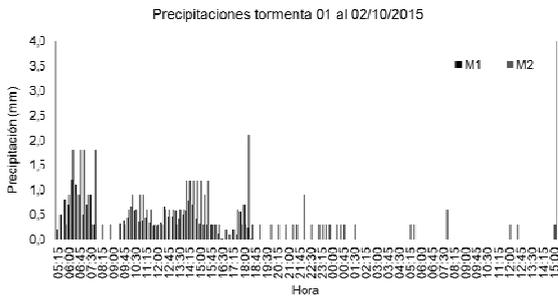
Figuras 10 y 11: De izquierda a derecha, precipitaciones observadas en las estaciones meteorológicas M1 y M2 y Crecidas registradas en las estaciones limnigráficas L1 y L2 para el 11/07/2015.



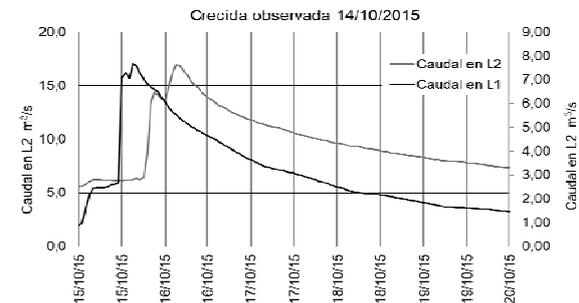
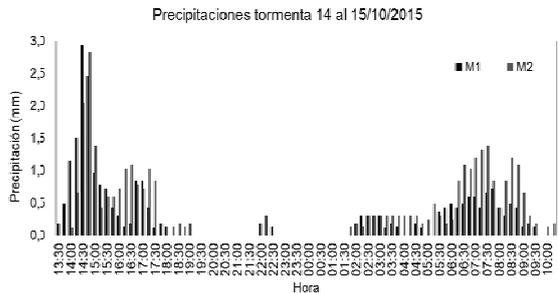
Figuras 12 y 13: De izquierda a derecha, precipitaciones observadas en las estaciones meteorológicas M1 y M2 y Crecidas registradas en las estaciones limnigráficas L1 y L2 para el 30/07/2015.



Figuras 14 y 15: De izquierda a derecha, precipitaciones observadas en las estaciones meteorológicas M1 y M2 y Crecidas registradas en las estaciones limnigráficas L1 y L2 para el 21/09/2015.



Figuras 16 y 17: De izquierda a derecha, precipitaciones observadas en las estaciones meteorológicas M1 y M2 y Crecidas registradas en las estaciones limnigráficas L1 y L2 para el 01/10/2015.



Figuras 18 y 19: De izquierda a derecha, precipitaciones observadas en las estaciones meteorológicas M1 y M2 y Crecidas registrados en las estaciones limnigráficas L1 y L2 para el 14/10/2015.

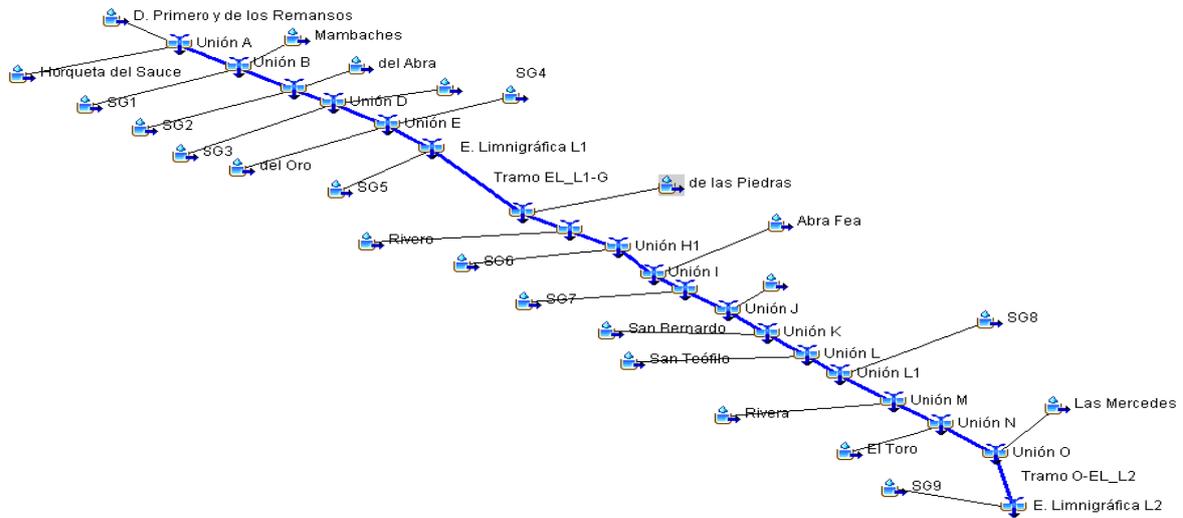
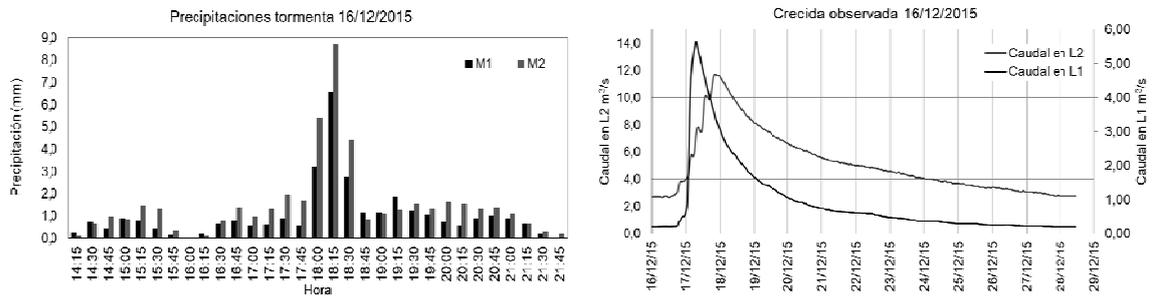
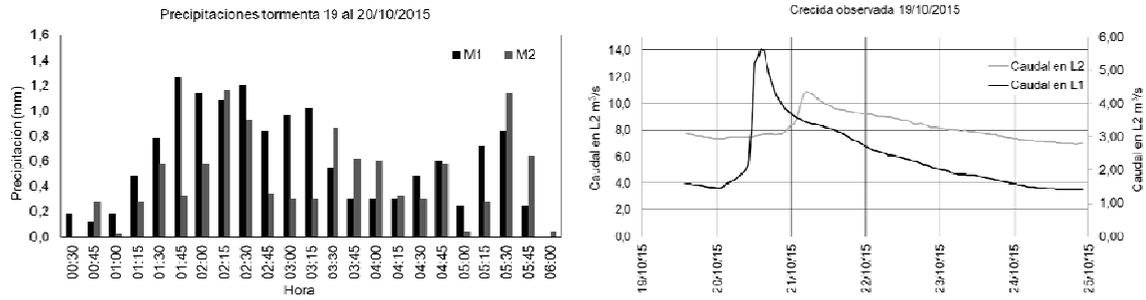


Figura 24: Modelo de la cuenca de estudio estructurada por el programa HEC-HMS. Fuente: elaborado por Fernández y Pérez sobre la base del programa HEC-HMS.

Para los valores iniciales de K y X a aplicar en la restante área de la CASG, se estimaron en función de las características hidráulicas en los tramos adyacentes a las estaciones limnigráficas L1 y L2 (Cunge, 1969) a través de las Ecuaciones (4) y (5).

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (4)$$

$$X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{BS_0 c \Delta x} \right) \quad (5)$$

Donde Δx es la longitud del cauce considerado, C es la celeridad de la onda (estimada en 5/3 velocidad media) (USACE, 1994), S_0 es la pendiente media del cauce, Q es el caudal y B es el ancho superficial del canal.

Una vez estimados los valores iniciales se procedió a aplicar la optimización de los mismos por ensayo y error. El programa HEC-HMS permite establecer una función objetivo la cual calcula nuevos valores que ajustan mejor los hidrogramas observados. El método de ajuste de la función objetivo se llevó a cabo aplicando el mínimo de la suma de residuales cuadrados (HydrologicEngineering Center, 2016). Esta operación se realiza las veces necesarias para lograr el mejor ajuste posible, en todas las tormentas. Los valores de K y X ajustados para la cuenca figuran en la Tabla 3.

Asimismo, los valores de los tiempos de concentración fueron adoptados en base a Kirpich (Chow et al., 1994), y sus valores permanecieron constantes en todas las tormentas, así como los de K y X de Muskingum.

Tabla N° 3. Valores de K y X del método Muskingum para evaluación de la avenida de las crecidas en la cuenca alta del Sauce Grande, optimizados en base al método de la suma de los residuales cuadrados.

Tramos	K (horas)	X
Tramo A-B	24	0.1
Tramo B-C	13	0.1
Tramo C-D	10.5	0.1
Tramo D-E	13	0.1
Tramo E-E. Limnigráfica L1	12	0.1
Tramo E. Limnigráfica L1-G	25	0.1
Tramo G-H	22	0.1
Tramo H-H1	12	0.1
Tramo H1-I	12	0.1
Tramo I-I1	28	0.1
Tramo I1-J	18	0.1
Tramo J-K	29	0.1
Tramo K-L	20	0.1
Tramo L-L1	0.5	0.1
Tramo L1-M	3.4	0.1
Tramo M-N	6.5	0.1
Tramo N-O	12	0.1
Tramo O-E. Limnigráfica L2	10.13	0.1

La calibración se llevó a cabo a partir de los siguientes parámetros de ajuste:

- CN (Número de Curva del Soil Conservation Service del United States Department of Agriculture (U.S.D.A.) que contempla el tipo de suelo de la cuenca y su humedad inicial y permite calcular la precipitación efectiva de una tormenta y el

escurrimiento superficial (Hydrologic Engineering Center, 2000; Hydrologic Engineering Center, 2016).

- Abstracción inicial. Evalúa la capacidad de la cuenca de retener y percolar la precipitación. El agua escurre solo una vez que la lluvia alcanza el valor de la Abstracción Inicial.
- Almacenamiento máximo e inicial. Toma en cuenta la retención de agua por el efecto de árboles, arbustos, pastos y cultivos. Una vez colmada esta capacidad de retención, el agua comienza a caer al suelo. Este volumen es evaporado en su totalidad si las condiciones meteorológicas lo permiten.

Medidas de bondad de ajuste

La cuantificación de la bondad de ajuste del modelo se efectuó por medio del índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe mostrado en la Ecuación (6) (Nash y Sutcliffe, 1970).

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{SIM} - Q_i^{OBS})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{OBS} - \bar{Q}_i^{OBS})^2} \quad (6)$$

En donde Q_i indica el caudal, n es el número de datos simulados, los superíndices SIM y OBS indican valores simulados y observados respectivamente y la barra superior indica el valor medio en el período de estudio. Este indicador mide cuanto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación y produce resultados menores o iguales a 1. Si el resultado es 1 el ajuste es perfecto, si es cero el error es del mismo orden de magnitud que la varianza de los datos observados por lo que la media de los datos observados tendrá una capacidad predictora similar al modelo. En este trabajo se adopta la propuesta de Molnar (2011) para clasificar los valores de E, de acuerdo con la Tabla 4.

Tabla 4. Valores referenciales de Criterio de Nash-Sutcliffe.

Eficiencia Nash-Sutcliffe	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio
0.4-0.6	Bueno
0.6-0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se determinaron las pendientes del decaimiento de los hidrogramas de las tormentas usadas, según las Ecuaciones 2 y 3 presentadas anteriormente. Los

valores del factor de agotamiento K y la constante de recesión k para ambas estaciones limnigráficas L1 y L2, se muestran en la Tabla 5.

En la Tabla 6 se presentan los valores de Volumen de escorrentía, Hora del pico y caudal en el pico para cada tormenta en cada estación limnigráfica tanto para valores simulados como observados. Se incluyen los coeficientes de eficiencia de ajuste de Nash-Sutcliffe en cada caso.

Los valores presentados en la Tabla 6, indican que el promedio de los errores calculados como la diferencia entre valor observado menos el valor simulado dividido el valor observado en porcentaje, para el caudal en el pico y Volumen de escorrentías de 10% y 13% respectivamente, para la estación limnigráfica L1, mientras que para la L2 los valores son de 9% y 1% respectivamente. El horario donde se produce el pico simulado varía entre los 312 minutos de atraso y 595 minutos de adelanto para la estación L1, y 660 de adelanto y 360 de atraso para la estación L2. Se puede observar que los valores del coeficiente de eficiencia de ajuste de Nash-Sutcliffe son siempre mayores a 0.72, lo cual indica ajustes entre muy buenos y excelentes (Tabla 4).

La Tabla 7 indica los valores promedio y desvío estándar de los parámetros de ajuste hallados: CN, Abstracción inicial, almacenamiento Inicial y Máximo Almacenamiento de las distintas

Subcuencas de las tormentas simuladas, que produjeron los ajustes anteriormente mostrados en Figuras 10 a 23.

Los resultados de las simulaciones realizadas sobre las tormentas en base a los parámetros antes descriptos se muestran en las Figuras 25 a 38.

El esquema de monitoreo de las tormentas producidas en la CASG que consistió en dos estaciones pluviométricas (M1 y M2) y dos estaciones limnigráficas apropiadamente aforadas permitió simular satisfactoriamente el comportamiento hidrológico de la cuenca. HEC-HMS representó exitosamente siete tormentas reales sobre la cuenca alta del Río Sauce Grande. Los coeficientes de eficiencia de ajuste de Nash-Sutcliffe corresponden a ajustes muy buenos a excelentes. Por primera vez, se presenta una herramienta hidrológica calibrada para la estratégica zona de estudio.

La diferencia entre los volúmenes de escorrentía observados y simulados es menor al 13% (Tabla 6). Por lo tanto los volúmenes de escorrentía simulados son una muy buena estimación del volumen que efectivamente ingresa al Embalse Paso de las Piedras, y de esta manera el HEC-HMS, adecuadamente calibrado, se convierte en una herramienta útil para la gestión del recurso hídrico, en especial para el citado embalse que recibe prácticamente la totalidad de la escorrentía de la zona de estudio.

Tabla 5. Valores de la constante de recesión y el factor de agotamientos obtenidos de los hidrogramas asociados a las tormentas usadas para calibración en las dos estaciones limnigráficas L1 y L2.

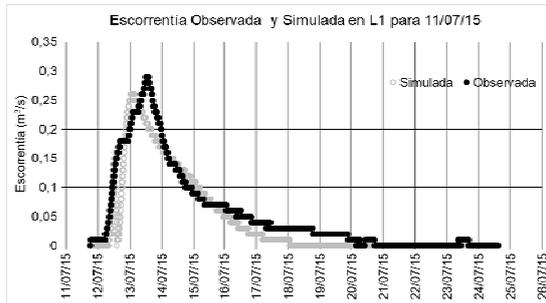
Fecha de la tormenta	Estación Limnigráfica L1		Estación Limnigráfica L2	
	Constante de recesión (hora ⁻¹)	Factor de agotamiento	Constante de recesión (hora ⁻¹)	Factor de agotamiento
11/07/2015	0.0086	0.98	0.0149	0.966
30/07/2015	0.0251	0.975	0.035	0.922
21/09/2015	0.0318	0.969	0.003	0.997
01/10/2015	0.008	0.992	0.010	0.990
14/10/2015	0.0955	0.909	0.154	0.857
19/10/2015	0.0124	0.972	0.146	0.710
16/12/2015	0.0007	1.002	0.00001	1.000

Tabla 6. Valores simulados y observados de hora de pico, caudal del pico y volumen de escorrentía para las tormentas utilizadas en la calibración en las estaciones L1 y L2, con el correspondiente coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe.

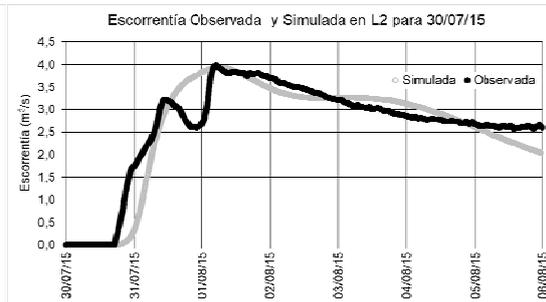
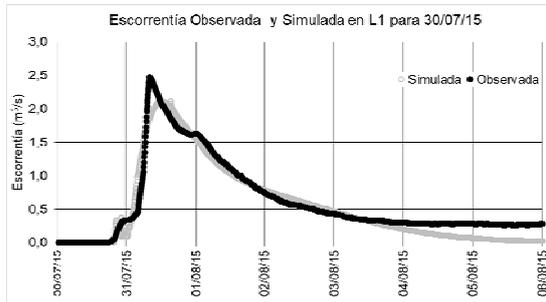
Tormentas seleccionadas	Estación Limnigráfica L1						
	Valores Escorrentía Superficial Observados			Valores Escorrentía Superficial Simulados			Eficiencia Nash-Sutcliffe
	Hora del pico	Caudal en el pico (m ³ /s)	Volumen escorrentía (*1000 m ³)	Hora del pico	Caudal en el pico (m ³ /s)	Volumen escorrentía (*1000 m ³)	
11/07/2015	13/07/2015 12:00	0.29	60.05	13/07/2015 02:05	0.26	47.91	0.875
30/07/2015	31/07/2015 08:00	2.47	364.43	31/07/2015 15:20	2.11	329.17	0.926
21/09/2015	22/09/2015 06:00	3.09	526.5	22/09/2015 04:55	3.18	445.97	0.775
01/10/2015	02/10/2015 03:00	6.16	1204.7	02/10/2015 05:22	6.44	1106.66	0.950
14/10/2015	15/10/2015 12:00	5.53	708.73	15/10/2015 17:15	4.52	633.17	0.823
19/10/2015	20/10/2015 14:00	4.33	501.43	20/10/2015 14:20	3.60	438.01	0.731
16/12/2015	17/12/2015 07:00	5.48	520.25	17/12/2015 06:00	4.38	459.5	0.906
Estación Limnigráfica L2							
11/07/2015	13/07/2015 08:00	0.69	150.52	13/07/2015 08:20	0.67	169.29	0.743
30/07/2015	01/08/2015 05:00	3.98	1618.87	01/08/2015 08:55	3.93	1574.82	0.785
21/09/2015	23/09/2015 12:00	4.28	1902.56	23/09/2015 06:00	4.24	1920.02	0.766
01/10/2015	02/10/2015 14:00	12.05	4521.74	03/10/2015 01:06	11.5	4425.14	0.938
14/10/2015	16/10/2015 03:00	9.67	2103.03	16/10/2015 02:55	8.08	2025.60	0.875
19/10/2015	21/10/2015 05:00	6.36	1631.47	21/10/2015 12:05	5.19	1537.57	0.734
16/12/2015	17/12/2015 20:00	9.04	2725.49	17/12/2015 16:50	7.33	2478.29	0.895

Tabla 7. Valores promedio de CN, Abstracción inicial, Almacenamiento Inicial y Máximo Almacenamiento promedio de las distintas subcuencas. Fuente: elaborado por Fernández y Pérez sobre la base de los resultados del programa HEC-HMS.

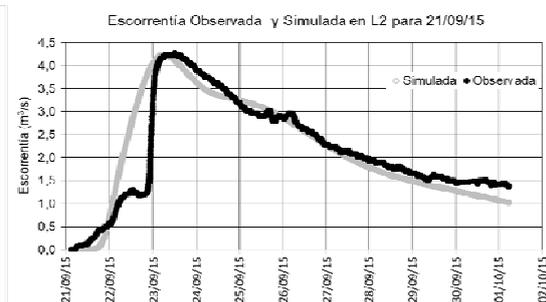
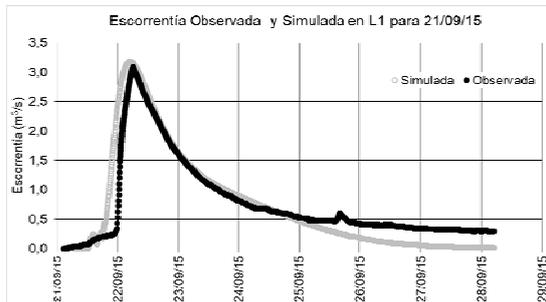
Subcuenca	Promedio				Desvío Estándar			
	Abstracción inicial (mm)	CN	Almacenamiento inicial (%)	Máximo almacenamiento (mm)	Abstracción inicial (mm)	CN	Almacenamiento inicial (%)	Máximo almacenamiento (mm)
Destierro Primero y de los Remansos	1.8	71.6	1.1	2.3	0.6	17.2	0.4	2.3
Horqueta del Sauce	1.6	73.4	1.1	2.1	0.5	16.6	0.4	2.1
Mambaches	1.8	67.7	1.1	2.1	0.6	13.6	0.4	2.1
del Abra	1.8	67.5	1.3	2.3	0.8	17.1	0.5	2.3
El Atravesado	2.1	65.7	1.1	2.7	0.8	18.8	0.4	2.7
del Oro	2.1	69.7	1.1	2.0	0.9	14.8	0.4	2.0
de las Piedras	1.2	73.6	1.4	2.6	0.6	22.5	0.8	2.6
Abra Fea	1.4	65.9	1.4	3.4	0.5	21.3	0.8	3.4
Rivero	1.7	60.8	1.3	3.2	0.8	25.2	0.8	3.2
San Bernardo	1.6	59.5	1.4	2.8	0.4	22.0	0.8	2.8
El Negro	1.6	59.5	1.4	3.6	0.7	22.8	0.8	3.6
San Teófilo	2.0	56.5	1.6	3.1	0.6	23.1	0.8	3.1
Rivera	2.2	56.5	1.4	3.2	0.7	22.1	0.8	3.2
El Toro	2.0	52.3	1.6	3.1	0.6	12.7	0.5	3.1
Las Mercedes	1.9	57.6	1.4	3.8	1.0	19.5	0.8	3.8
SG1	1.5	69.5	1.3	2.1	0.6	15.4	0.5	2.1
SG2	1.8	63.4	1.3	2.3	0.6	18.3	0.5	2.3
SG3	1.6	69.4	1.3	2.3	0.6	17.5	0.5	2.3
SG4	1.4	82.9	1.3	2.1	0.6	13.8	0.5	2.1
SG5	1.5	70.8	1.3	2.4	0.6	15.3	0.5	2.4
SG6	2.4	62.1	1.6	3.9	0.9	18.4	0.8	3.9
SG7	2.2	62.3	1.4	3.0	1.1	20.0	0.8	3.0
SG8	2.3	58.4	1.4	3.6	0.8	19.7	0.8	3.6
SG9	1.7	53.8	1.4	3.4	0.8	19.6	0.8	3.4



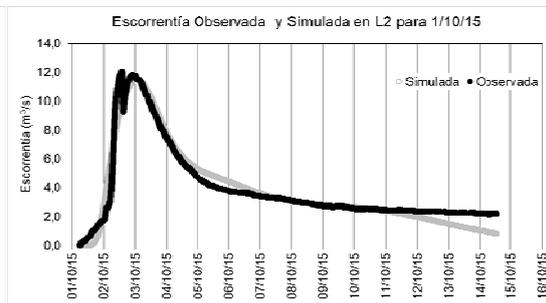
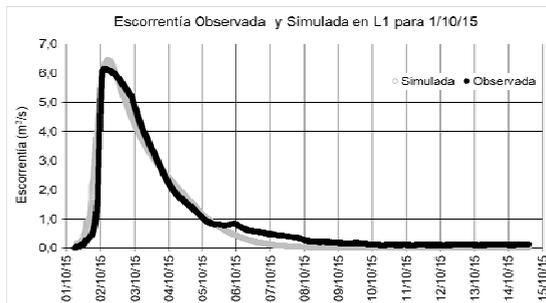
Figuras 25 y 26: De izquierda a derecha, comparación de la escorrentía observada y simulada para las estaciones limnigráfica L1 y L2 para la tormenta del 11/07/15.



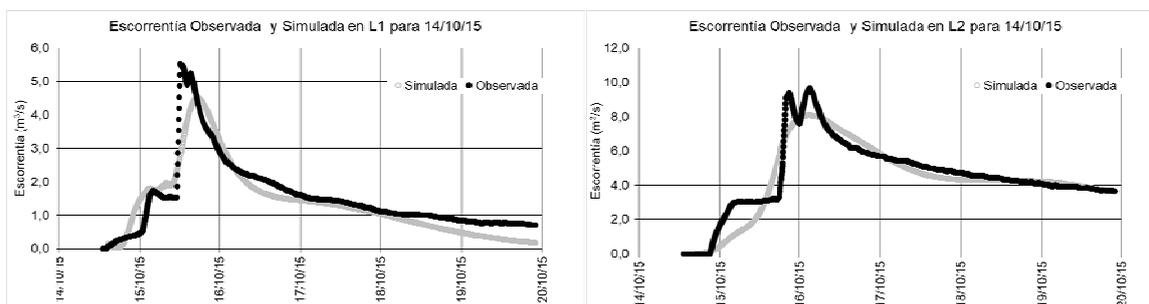
Figuras 27 y 28: De izquierda a derecha, comparación de la escorrentía observada y simulada para las estaciones limnigráfica L1 y L2 para la tormenta del 30/07/15.



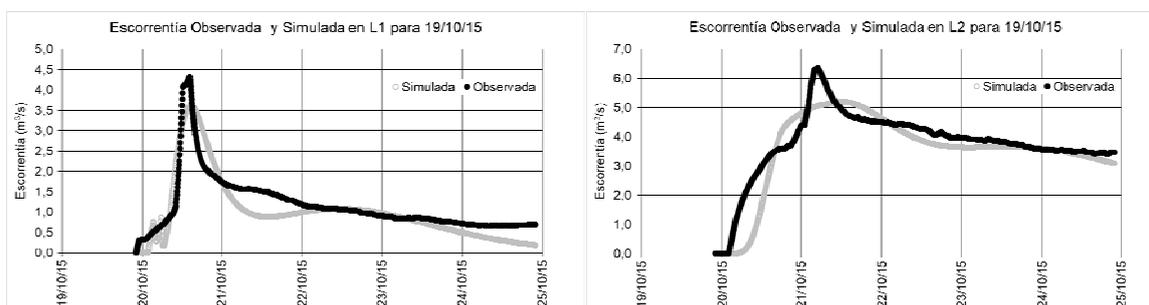
Figuras 29 y 30: De izquierda a derecha, comparación de la escorrentía observada y simulada para las estaciones limnigráfica L1 y L2 para la tormenta del 21/09/15.



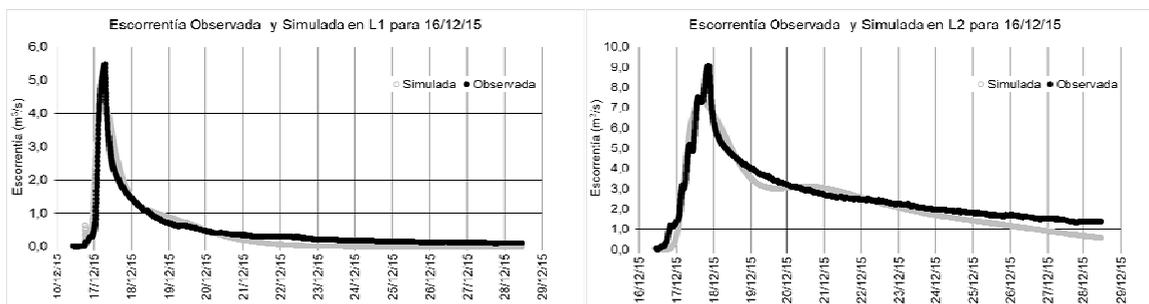
Figuras 31 y 32: De izquierda a derecha, comparación de la escorrentía observada y simulada para las estaciones limnigráfica L1 y L2 para la tormenta del 1/10/15.



Figuras 33 y 34: De izquierda a derecha, comparación de la escorrentía observada y simulada para las estaciones limnigráfica L1 y L2 para la tormenta del 14/10/15.



Figuras 35 y 36: De izquierda a derecha, comparación de la escorrentía observada y simulada para las estaciones limnigráfica L1 y L2 para la tormenta del 19/10/15.



Figuras 37 y 38: De izquierda a derecha, comparación de la escorrentía observada y simulada para las estaciones limnigráfica L1 y L2 para la tormenta del 16/12/15.

Se verifica una gran variación del volumen de escorrentía en función del estado inicial de humedad de la cuenca. Por ejemplo, en la tormenta del 30/07/15 se produjo una cantidad de agua caída mayor que la del 19/10/15 (Tabla 2). Sin embargo, el volumen de escorrentía es menor en la tormenta del 30/07/15 que en la del 19/10/15. La explicación se encuentra en el efecto residual de lluvias producidas con anterioridad a cada evento y el intervalo entre los eventos en consideración. Precisamente la tormenta del 19/10/15 viene precedida de otras dos tormentas con un intervalo menor a 20 días, y la curva de recesión aún no había llegado a su valor mínimo cuando se produjo una nueva precipitación.

Los valores de ajuste correspondientes a CN varían entre 32 y 98. Los promedios y desvíos son

mostrados en Tabla 7. La variabilidad está ligada a las características naturales de la humedad inicial de la cuenca, pero también a los usos del suelo. En la zona más llana, la actividad agropecuaria ejerce una importante influencia en la escorrentía, ya que se siembra siguiendo curvas de nivel, lo que aumenta la retención del agua en el suelo.

La gran variabilidad presentada debe ser contemplada por medio de escenarios diferentes. Por ejemplo, sequía o cuenca casi saturada. De esta manera se toma en cuenta las precipitaciones anteriores y el intervalo entre tormentas, ya que esta circunstancia lleva a obtener valores de volúmenes de escorrentía muy diferentes que ingresan en su totalidad al embalse Paso de las Piedras. Para la definición de estos escenarios es necesario continuar

con las mediciones y lograr establecer con mayor certeza la variación de los parámetros influidos por el estado inicial de la cuenca.

Fernández et al. (2021) obtuvieron dispersiones en la hora en que se produce el pico de la crecida, para la cuenca correspondiente a la estación limnigráfica L1 (Sector superior de la CASG), de 240 minutos de atraso y 140 minutos de adelanto, lo cual establece la llegada del pico con mayor precisión que en el presente trabajo. Esto se debe fundamentalmente a que los autores contaban con 3 pluviógrafos para los registros de la precipitación en 5 tormentas para una cuenca más pequeña. La mejor descripción de la distribución areal de la precipitación produce un ajuste más preciso del parámetro analizado. Sin embargo, contando con dos estaciones pluviométricas, los resultados se consideran satisfactorios.

CONCLUSIONES

Se demuestra que el programa HEC-HMS, correctamente calibrado, es una herramienta adecuada para la simulación de la escorrentía superficial en la CASG a pesar de la variabilidad en la respuesta hidrológica de la misma. Asimismo, se puede ver que con solo dos estaciones pluviográficas se puede simular satisfactoriamente el caudal del pico y el volumen de escorrentía superficial de lluvias caídas en la zona de estudio. Es necesario aclarar que las crecidas aforadas y modeladas ocuparon solo la sección principal del cauce sin desbordar más allá de la planicie de inundación próxima. Por lo tanto, las tormentas simuladas corresponden a frecuencias ordinarias.

La simulación produjo ajustes entre muy buenos y excelentes de los hidrogramas de escorrentías reales en cada estación limnigráfica. Se presentan valores de los parámetros de ajuste que simulan el hidrograma de escorrentía superficial satisfactoriamente. Sumado a esto, la simulación provee además hidrogramas para todas y cada una de las subcuencas de la zona estudiada, lo cual redundará en beneficio de diversos proyectos en el área como ser azudes para contención de crecidas, o reservorios para recreación, consumo humano y/o disponibilidad de agua para enfrentar los frecuentes incendios forestales, alcantarillas, puentes, manejo del agua para el embalse Paso de las Piedras etc.

Se presentan valores de Constantes de Recesión y

Factores de Agotamiento correspondientes a los hidrogramas de crecidas registradas en las estaciones limnigráficas utilizadas. No se ha encontrado referencias de estos valores en la bibliografía consultada, convirtiéndolos en un aporte genuino y único hasta el momento de las características hidrológicas de la CASG.

A pesar de la importancia que la CASG posee, excepto Fernández et al, (2019) y Fernández et al. (2021), no se han encontrado antecedentes de simulaciones en la bibliografía. Por lo tanto, lo expuesto en este trabajo resulta novedoso para el conocimiento de la hidrología de la zona sudoeste de la Provincia de Buenos Aires.

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio fue financiado por la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur (UNS) con fondos correspondientes al proyecto de investigación "Cuencas del sur de la región pampeana. Hidrología, calidad y modelización de los recursos hídricos. Fase III". Los autores desean agradecer al Ingeniero Civil Mario Sequeira y al Dr. Walter Melo por su colaboración para la concreción de este trabajo y al Laboratorio de Hidráulica (UNS) y el Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS) como fuente de datos.

REFERENCIAS

- Aduriz, M. A., Gargano, A. O., Chimeno, P., Saldungaray, M. C. y Conti, V. P. (2003). Caracterización de los agrosistemas predominantes de la cuenca alta del Río Sauce Grande. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 32 (3), 3-26.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá, Colombia: McGraw Hill Interamericana.
- Cunge, J. A. (1969). On the Subject of a Flood Propagation Computation Method (Muskingum Method). *Journal of Hydraulic Research*, 7(2), 205-230.
- Espósito, M. 2014. *Hidrología e hidroquímica de la cuenca del arroyo El Divisorio, provincia de Buenos Aires*. Tesis Doctoral <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/3635>.
- Fernández, S., Pérez, D., Brandizi, L. Serralunga, M., Weis, C. y Abalo, P. (2019). Avances en la

- modelación del escurrimiento superficial de una cuenca del sudoeste bonaerense. Caso de estudio: Sector Superior Cuenca Alta del Río Sauce Grande (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 28 (2), 11-32.
- Fernández, S., Pérez, D., Weis, C., Flores, M. A. y Abalo, P. (2021). Validación de simulaciones de tormentas en el Sector Superior de la Cuenca Alta del Río Sauce Grande (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 30(1), 43-76.
- Gil, V. (2009). *Hidrogeomorfología de la cuenca alta del río Sauce Grande aplicada al peligro de crecidas*. Tesis Doctoral <http://catalogo.uns.edu.ar/vufind/Record/oai:repositorio.bc.uns.edu.ar:123456789-2069>
- Gómez-Isidro, S., Gómez-Ríos, V. (2016). Baseflow analysis using master recession curves and numerical algorithms in mountain basins: Suratá's river and Oro's river (Santander, Colombia). *DYNA*, 83 (196), 213-222.
- Hydrologic Engineering Center (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Reference Manual. Davis, California: U. S. Army Corps of Engineers.
- Hydrologic Engineering Center (2016). Hydrologic Modeling System HEC-HMS. User's Manual, Version 4.2. Davis, California: U. S. Army Corps of Engineers.
- INDEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos) (2001). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas. INDEC <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-134>.
- INDEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos) (2010). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas. INDEC <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-135>.
- López Cazorla, A., Durán, W. y Tejera, L. (2003). Alimentación de la ictiofauna del río Sauce Grande, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Biología Acuática*, 20, 73-79.
- Luque, J. A., Paoloni, J. D. y Bonorino, G. A. (1979). Estudio hidrológico e hidrogeológico de la cuenca del río Sauce Grande. S. Hidrología 3. Departamento de Ciencias Agrarias y de Ciencias Naturales. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Molnar, P. (2011). Calibration. Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental Engineering. ETH Zürich, Zürich, Switzerland.
- Nash, J. E. y Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3), 282-290.
- Rabassa, J. (1982). Variación regional y significado geomorfológico de la densidad de drenaje en la cuenca del Río Sauce Grande, Provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 37(3), 268-284.
- Schefer, J. C. (2004). Los recursos hídricos y el abastecimiento de agua. Región de Bahía Blanca. Bahía Blanca, Argentina: CEPADE (Centro de Estudios y Participación para el Desarrollo Local y Regional).
- USACE(1994). EM 1110-2-1417 Flood-Runoff Analysis. Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers Washington, DC 20314-1000
- Vouilloud, A. A., Sala, S. E. y Sabbatini, M. R. (2005). Diatomeas perifíticas de la cuenca del Río Sauce Grande (Buenos Aires, Argentina). *Iheringia. Série Botânica*, 60(1), 77-89.

Tipo de Publicación: ARTICULO.

Trabajo recibido el 17/11/2021 y aprobado para su publicación el 20/04/2022.

COMO CITAR

Fernández, S. N.; Pérez, D. E.; Weis, C. F.; y Flores, M.A. (2022). Calibración de simulaciones de crecidas de la cuenca alta del río Sauce Grande, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Cuadernos del CURIHAM*, 28, 25-42. doi: <https://doi.org/10.35305/curiham.v28i.179>

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>)



CARACTERÍSTICAS DE LAS PRECIPITACIONES EN ZONAS ÁRIDAS DE LA PATAGONIA NORTE, ARGENTINA

PRECIPITATION CHARACTERISTICS IN ARID ZONES OF NORTH PATAGONIA, ARGENTINA

Valeria Aramayo^{(1)(*)}, M. Victoria Cremona⁽¹⁾, Roberto J. Fernández⁽²⁾ y Marcelo D. Nosetto⁽³⁾⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Bariloche, San Carlos de Bariloche, Argentina.

⁽²⁾ Instituto de Investigaciones Fisiológicas y Ecológicas Vinculadas a la Agricultura, Facultad de Agronomía, Univ. Buenos Aires & Comisión Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

⁽³⁾ Grupo de Estudios Ambientales, Instituto de Matemática Aplicada San Luis, Universidad Nacional de San Luis & Comisión Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

⁽⁴⁾ Cátedra de Climatología, Agrícola Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos.

(*) e_mail: aramayo.valeria@inta.gob.ar

RESUMEN

La precipitación es determinante de múltiples procesos en zonas áridas. Abordar su variabilidad es difícil en áreas extensas y de baja densidad de registros como la Patagonia norte. El objetivo de este trabajo es caracterizar la variación temporal y espacial de las precipitaciones, y evaluar productos satelitales de lluvia para esta región. Con los registros diarios de seis estaciones pluviométricas del período 1956-2019, calculamos la acumulada mensual, estacional y anual, sus promedios y tendencias. Además, evaluamos la relación de esos registros con los productos satelitales GPM y TRMM. La precipitación anual varió entre 100 y 640 mm.año⁻¹, con una media entre 100 y 300 mm.año⁻¹ en los últimos cinco años, y tendencia decreciente en las últimas dos décadas. Detectamos una tendencia decreciente en el número de días con precipitación por año y de las precipitaciones inferiores a 10 mm.día⁻¹. La precipitación media diaria mostró una leve tendencia al aumento igual que los registros mayores a 10 mm.día⁻¹. GPM representó mejor la variabilidad pero ninguno de los dos productos captó la magnitud de las precipitaciones. Es necesario continuar con actualizaciones, datos de mayor detalle y seguimiento de la variabilidad de las precipitaciones.

Palabras clave: Precipitación, Patagonia árida, variabilidad de precipitación, tendencias de precipitación.

ABSTRACT

Precipitation is the start-up factor of multiple process in arid zones. To address the temporal and spatial variability of precipitation at north Patagonia is difficult given the large area of the region and the low measurement density. The objective of this work is to characterize temporal and spatial variability of precipitation, and to evaluate satellite derived rainfall products for this region. Based on six measurement stations' daily records we calculated monthly, seasonal and annual precipitation, their averages and trends. In addition, we evaluated the relationship between these records with GPM and TRMM satellite products. Annual precipitation varied from 100 to 640 mm.year⁻¹, with a 100 to 300 mm average in the last five years, and a downward trend in the last decades. We detected a downward trend in the average number of days with precipitation below 10 mm.day⁻¹. The average daily precipitation showed a slight tendency to increase, as well as the frequencies of records greater than 10 mm.day⁻¹. GPM was an acceptable estimator of the variability but none of the magnitude of rainfall. Precipitation variability updates, more detailed data and monitoring are needed.

Keywords: Precipitation, arid Patagonia, precipitation variability, precipitation trend.

INTRODUCCIÓN

La precipitación es el factor climático determinante de la erosión hídrica (Rostagno et al. 1999; Cisneros et al. 2012) y punto de partida para la modelación hidrológica (Li y Fang 2016), al tiempo que ejerce un fuerte control sobre la productividad en zonas áridas (Le Houèrou et al. 1988; Jobbagy et al. 2002; Castillo et al. 2021). La variabilidad de la precipitación, tanto espacial como temporal, es de relevancia en estudios climáticos aplicados a diferentes áreas como agronomía, hidrología y meteorología. Los eventos extremos, con intensidades de precipitación altas y baja frecuencia, pueden generar colapsos en la infraestructura,

inundaciones, deslizamientos de laderas y destrucción de caminos (Colombani et al. 2017). En los últimos años, eventos extremos de precipitación en la región de estudio generaron severos daños económicos y perjuicios al bienestar social, registrándose entre otros: evacuaciones, interrupciones del transporte y daños en la infraestructura pública (Figura 1).

El poder erosivo de las precipitaciones depende principalmente de su magnitud, intensidad y frecuencia, pero la interacción con otros factores como la topografía, el tipo y uso del suelo, la permeabilidad y la cobertura definen la generación de escurrimientos y erosión del suelo (Lal 2001).



Figura 1. Titulares de diarios de la región de estudio que reflejan el efecto de precipitaciones extremas en los últimos 20 años.

En el noroeste de la Patagonia argentina las precipitaciones se concentran en invierno y otoño (Paruelo et al. 1998). La interacción entre la topografía, la circulación atmosférica y la distancia a los océanos genera patrones de precipitación complejos tanto espaciales como temporales. La cordillera de Los Andes actúa como barrera a la circulación atmosférica en toda Sudamérica y da lugar no sólo a gradientes climáticos sinópticos sino también a perturbaciones de mesoescala (Bianchi et al. 2016). La humedad que fluye desde el océano Pacífico produce una precipitación anual máxima cercana a 4000 mm en la pendiente oeste de los Andes, mientras al este hay una disminución exponencial que llega a un mínimo por debajo de los 200 mm anuales en el centro

de la Patagonia árida (Jobbagy et al. 1995; Viale et al. 2019). Más hacia el Atlántico, los vientos desde este océano, de dirección predominante noreste, contribuyen con precipitaciones convectivas esporádicas y para alcanzar 400 mm de precipitación media anual en el extremo oriental (Bianchi et al. 2016). En la cordillera de las provincias de Río Negro y Neuquén, se ha investigado la acción combinada de más de un forzante atmosférico sobre la anomalía de eventos de precipitación (González et al. 2015) en línea con otras descripciones de la variación del clima a escala regional (Aravena y Luckman 2009; Peñalba y Rivera 2016). Sin embargo, el clima de las localidades más áridas de la región aún no se ha estudiado con igual énfasis.

Los registros de precipitación proveen información esencial para el cómputo del balance de agua a distintas escalas espaciales. En Patagonia, la capacidad de capturar patrones espaciales y variabilidad climática de mayor detalle está reducida por la escasa densidad de estaciones meteorológicas y la carencia de continuidad de registros en el tiempo (Masiokas et al. 2008; Bianchi et al. 2016). Trabajos anteriores respaldan con información de sensores remotos el abordaje de problemas como la sequía (Easdale et al. 2012) y de controles climáticos sobre el crecimiento de la vegetación (Paruelo et al. 1993; Bianchi et al. 2020). A escala local, basados en registros de 22 años en el noroeste de Chubut, Golluscio et al. (1998) encontraron que la mayor parte de los eventos de precipitación son menores a 5 mm y que la cantidad total de agua aportada por estos eventos es aproximadamente constante a través de los años. De esta manera atribuyen la diferencia entre años húmedos y secos a la ocurrencia de eventos de mayor magnitud, lo cual podría ocurrir en otras zonas áridas similares (Paruelo et al. 1998).

La variabilidad espacial de las precipitaciones es difícil de caracterizar dada la gran extensión de la región árida patagónica y la ya mencionada baja densidad de registros de precipitaciones. En este aspecto, las estimaciones satelitales de precipitación pueden constituir una herramienta valiosa (Brizuela et al. 2015; Pessagc et al. 2015; Colombani et al. 2017; Ovando et al. 2018). Sin embargo, dada la influencia de ciertos factores como por ejemplo la orografía y la intensidad de eventos en la precipitación acumulada, existen desajustes en los productos satelitales respecto de los datos de terreno (Zhang et al. 2018; Wang et al. 2021). Por esto es necesario evaluar el error asociado a las distintas resoluciones temporales actualmente disponibles y de acuerdo al detalle espacial en el área de interés.

El cambio climático y en particular las tendencias de mediano plazo en las precipitaciones son un factor fundamental a tener en cuenta para predecir el comportamiento futuro de los ecosistemas (Knapp et al. 2008), más aún en regiones áridas y semiáridas donde el agua es el principal recurso limitante para la productividad primaria (Noy Meir 1973). De acuerdo a la Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, el noroeste de la Patagonia comparte con el resto del país la tendencia al aumento en la intensidad de las precipitaciones, a pesar de la proyección de una disminución generalizada de la precipitación anual,

que aquí representa pocos milímetros (Barros et al. 2015). La conjunción de tendencias hacia mayores temperaturas y menores precipitaciones anuales, aun en el caso de reducciones pequeñas, configura un escenario de tendencia hacia una mayor aridez (Gaitán 2016; Pessagc et al. 2020).

OBJETIVOS

Dada la importancia crucial de las precipitaciones en los sistemas productivos de zonas áridas, no solo como un recurso ecológico fundamental sino también como un factor nocivo asociado a procesos erosivos, resulta fundamental contar con una caracterización actualizada de las mismas, de su variación temporal y espacial, y de la posibilidad de utilizar información satelital para estimarla. El objetivo de este artículo es caracterizar la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones y evaluar la relación entre los registros de estaciones en terreno y los productos satelitales de precipitación para la norpatagonia árida Argentina. En particular buscamos brindar una descripción de las precipitaciones medias anuales, estacionales, mensuales y diarias, describir la magnitud y frecuencia de las precipitaciones anuales y diarias, y reconocer si existen cambios en ellas a lo largo del tiempo. Asimismo, evaluamos la asociación entre dichos registros de terreno y su relación con la ubicación geográfica. Por último, analizamos la relación de esos registros de terreno con los productos satelitales GPM y TRMM (de la NASA) a distintas escalas temporales.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en el oeste de la provincia de Río Negro, que contiene a la cuenca alta del arroyo Comallo. Está comprendida entre las latitudes 41° y 41.5° sur y longitudes 70.5° y 70° oeste. La cuenca constituye el límite oeste del Sitio Piloto Jacobacci perteneciente al *Observatorio Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación* (<http://www.desertificacion.gob.ar>) y es territorio de intervención de múltiples proyectos del INTA (<https://www.argentina.gob.ar/inta>) como la actual “Plataforma de Innovación Territorial Semiárido sur de la provincia de Río Negro (Secano)”, entre otros. La topografía es quebrada, con altitudes entre 700 y 1990 msnm. El clima de la región es templado-frío, con vientos dominantes del oeste.

Las precipitaciones se concentran en invierno y periódicamente ocurren en forma de nieve; por el contrario, en verano existe un marcado déficit hídrico. Las temperaturas medias son de 16.4° para el mes de enero y de 2.3° para julio (Massaferró et al. 2012; Gaitán et al. 2004). La forma de uso de la tierra más extendida en la región es el pastoreo por herbívoros domésticos (Gaitán 2016) y existen zonas urbanas, entre ellas, las localidades de Comallo y Pilcanieyu que concentran la mayor población y demanda de agua de la zona.

METODOLOGÍA

Datos pluviométricos y su análisis

Los registros de precipitación recopilados pertenecen a bases de datos de organismos estatales y establecimientos privados de localidades cercanas al área de estudio (Figura 2), seleccionados por presentar frecuencia diaria durante más de veinte años y con baja proporción de datos faltantes (Tabla 1).



Figura 2. Ubicación de la cuenca alta del arroyo Comallo y de las estaciones pluviométricas cercanas utilizadas en este estudio. La tabla de la derecha indica la distancia de cada estación de registro a la localidad de Comallo.

Tabla 1. Características de las bases de datos pluviométricas.

Estación de medición	Lat. , Long.	Altitud (m.s.n.m.)	Serie	Fuente	% datos faltantes	Precipitación media anual (mm)
Comallo	-41.11, -70.38	820	jun-1973 a dic-2019	DPA ^[1]	4%	212
Corralito	-40.72, -70.71	657	abr-1999 a dic-2019	AIC ^[2]	0%	298
Pilcanieyu	-41.15, -70.68	980	ene-1966 a nov-2018	Ea. Pilcanieyu ^[3]	14%	280
Las Bayas	-41.46, -70.67	993	mar-1986 a ago-2019	BDHI ^[4]	5%	233
Maquinchao	-41.25, -68.70	888	abr-1956 a dic-2019	SMN ^[5]	2%	195
Río Chico	-41.71, -70.48	961	ago-1962 a dic-2019	BDHI	16%	185

^[1]Departamento Provincial de Aguas de Río Negro, ^[2]Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro, ^[3]Estancia Pilcanieyu, ^[4]Base de Datos Hidrológica Integrada, Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica, ^[5]Servicio Meteorológico Nacional.

Los registros correspondientes a Río Chico sólo se usaron para la caracterización de valores diarios y de la asociación con datos satelitales recientes dado que para los períodos anteriores tiene datos faltantes demasiado

frecuentes. En la serie de Pilcanieyu los datos faltantes están concentrados en el período de 1974 a 1984.

A partir de los registros diarios de las estaciones de

Comallo, Corralito, Pilcanieú, Las Bayas y Maquinchao se calculó la precipitación acumulada mensual y anual. Para esto, solo se tuvieron en cuenta aquellos meses y años sin datos faltantes. Una vez obtenida la precipitación anual, calculamos la frecuencia absoluta y acumulada por tamaño en clases crecientes de a 50 mm.año^{-1} , entre 0 y 600 mm.año^{-1} , para las cinco estaciones de medición. Con los datos de precipitación mensual analizamos la distribución estacional (verano, otoño, invierno, primavera) a lo largo de las series. Para eso asignamos como meses de verano a diciembre, enero y febrero, de otoño a marzo, abril y mayo, de invierno a junio, julio y agosto, y de primavera a septiembre, octubre y noviembre, y calculamos el porcentaje del total anual que se registra en cada estación. Además, revisamos la participación de la precipitación mensual a lo largo del año como porcentaje promedio que precipita en cada mes para cada serie de registros.

De la combinación de las series de precipitación anual obtuvimos un promedio regional y evaluamos su tendencia temporal. Este primer análisis sugirió la existencia de cambios de la precipitación anual en ciertos períodos, por eso evaluamos las tendencias de cada una de las series para tres ventanas de tiempo: primero para el período completo (1956-2019), segundo para el período anterior a 1995, que abarca la primera mitad de la serie de Comallo, y tercero para el período más reciente que incluye los últimos 23 años (1996 al 2019). Paralelamente ilustramos el comportamiento del mediano plazo de la precipitación anual de cada serie mediante la media móvil de 10 años.

A escala diaria, para cada estación de medición y para el promedio construido con las seis estaciones de medición, analizamos año por año el número de días con precipitación y la lámina media de precipitación diaria (en mm). También estudiamos la distribución de las precipitaciones diarias clasificadas en cuatro clases de acuerdo a su magnitud en: $0-10 \text{ mm.día}^{-1}$, $10-20 \text{ mm.día}^{-1}$, $20-40 \text{ mm.día}^{-1}$ y 40 a más de 100 mm.día^{-1} , con especial atención a los días con más de 40 mm por su asociación a posibles eventos extremos que generan erosión hídrica. Para cada clase calculamos año por año para cada estación y para el promedio de las seis: la frecuencia total (f) como la cantidad de registros diarios correspondientes a cada una de las clases y la frecuencia porcentual ($f\%$) como el porcentaje de f sobre el número total de días con precipitación. Luego evaluamos la tendencia del

número de días con precipitación, la lámina media de precipitación diaria (mm) y los $f\%$ de las clases definidas anteriormente, con un análisis de regresión lineal tomando el p-valor como criterio de significancia. En estos análisis de tendencias consideramos las mismas tres ventanas de tiempo que en la escala anual: primero el período completo 1956-2019, segundo el período 1956-1995 y por último el período 1996-2019. Los análisis estadísticos para todas las tendencias se realizaron en el software Prisma.

Desde el punto de vista espacial, estudiamos la correlación de la precipitación anual entre las distintas estaciones de medición y la relación de dicha correlación con la distancia longitudinal (de oeste a este), latitudinal (de norte a sur), euclidiana (en línea recta) y altitudinal entre todos los pares de estaciones.

Datos satelitales y su relación con datos de terreno

Los productos satelitales de precipitación se obtuvieron de la plataforma web Giovanni (NASA, <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>) que toma datos de las bases de libre acceso TRMM (por sus siglas en inglés Tropical Rainfall Measuring Mission; Adler et al. 2003; Huffman et al. 2007) y GPM (por sus siglas en inglés Global Precipitation Measurement; Huffman et al. 2019). Ambos productos, generados a partir de mediciones satelitales de las agencias NASA y en cooperación con JAXA en el caso de GPM, brindan estimaciones de precipitación multi-satélite. El producto TRMM 3B42 contiene datos de precipitación acumulada diaria con resolución espacial de 0.25° de latitud y longitud. El producto GPM 3IMERGEM V0.6 se genera con datos acumulados de precipitación cada 3 horas con una resolución espacial de 0.1° por pixel.

Los valores diarios, mensuales y anuales de TRMM y GPM se relacionaron con las precipitaciones de las seis estaciones de medición (Comallo, Corralito, Pilcanieú, Las Bayas, Maquinchao y Rio Chico) registrados en el período más reciente sin datos faltantes en los registros de terreno: del 1/1/2014 al 31/12/2016. Se evaluó la correlación entre los productos satelitales y los datos de terreno, calculándose el coeficiente de determinación (R^2) y el error medio de estimación (RMSE) por dos vías. La primera con el dato puntual de cada estación contra el valor del correspondiente al pixel que la contiene en cada uno de los productos satelitales. En el caso de TRMM, dado el mayor tamaño de pixel, calculamos la proporción aportada por cada pixel a

un área circular de 10 km de radio alrededor de cada estación de registro. La segunda vía de análisis consistió en la relación entre los valores promedio de TRMM y GPM para el área completa de la cuenca alta del Comallo contra el valor de precipitación promedio para el área obtenido por el método de los polígonos de Thiessen con los datos de terreno.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Datos de estaciones pluviométricas

Para brindar una caracterización actualizada de las precipitaciones en zonas áridas del norte de Patagonia, sistematizamos los registros disponibles de seis localidades con datos de precipitación diaria en el sudoeste de Río Negro. Nuestros resultados demostraron que estas precipitaciones presentan cualidades reconocidas para zonas áridas: tienen un carácter variable en el tiempo, son escasas y de baja frecuencia (Noy Meir 1973; Magliano et al. 2015).

El carácter variable de las precipitaciones se evidencia en las diferentes escalas de tiempo analizadas. Por ejemplo, el espectro de registros anuales tuvo mínimos por debajo de 100 mm.año⁻¹ y un máximo de 640 mm.año⁻¹ (Figura 3). Particularmente la serie de Comallo fluctuó entre 84 y 437 mm.año⁻¹, con diferencias entre años sucesivos de 20 a 304 mm. En cuanto a la frecuencia por magnitud de precipitación anual, tres cuartas partes de los registros son inferiores a 300 mm.año⁻¹ (Tabla 2). En Comallo, Las Bayas y Maquinchao el 50% de los registros anuales fue inferior a 200 mm.año⁻¹. En Corralito y Pilcanieú el 50% de los registros se ubican entre 250 y 300 mm.año⁻¹. Asimismo, la probabilidad de que llueva menos de 150 mm.año⁻¹ varía de un mínimo de 2% en Pilcanieú a un máximo de 37% en Las Bayas. Las diferencias de precipitación entre periodos y áreas conllevan consecuencias en el funcionamiento de los sistemas áridos a diferentes escalas (Reynolds et al. 2004; Yadhjian y Sala 2008) y en las oportunidades de aprovechamiento del agua de lluvia (Epele et al. 2018; Magliano et al. 2019).

Dentro del año, si bien las precipitaciones se concentraron en fines de otoño e invierno, tal como se había descrito por investigaciones anteriores (Paruelo et al. 1998), el aporte porcentual de cada estación (verano, otoño, invierno, primavera)

no es constante a lo largo de los años (Figura 4). Además encontramos una diferencia entre localidades de oeste a este en la distribución intra-anual de las precipitaciones. En invierno sucede el mayor aporte hacia el oeste, en Comallo, Corralito, Pilcanieú y Las Bayas, con un promedio de 44% de la precipitación anual, y en verano las precipitaciones aportan en promedio menos del 12%. En esas cuatro estaciones de medición la contribución del invierno fue superada por el otoño entre 40 y 19% de los años de cada serie, y por la primavera entre 19 y 11% de los años. En Maquinchao, en cambio las cuatro estaciones aportan al total anual una magnitud similar (verano 23%, otoño 32%, invierno 24%, primavera 21%) y dos tercios de los años tienen mayores precipitaciones en otoño-invierno que durante el resto del año. El aporte de precipitaciones otoñales promedia el 30%, con un mínimo de 26% para Corralito y un máximo de 32% para Pilcanieú y Maquinchao.

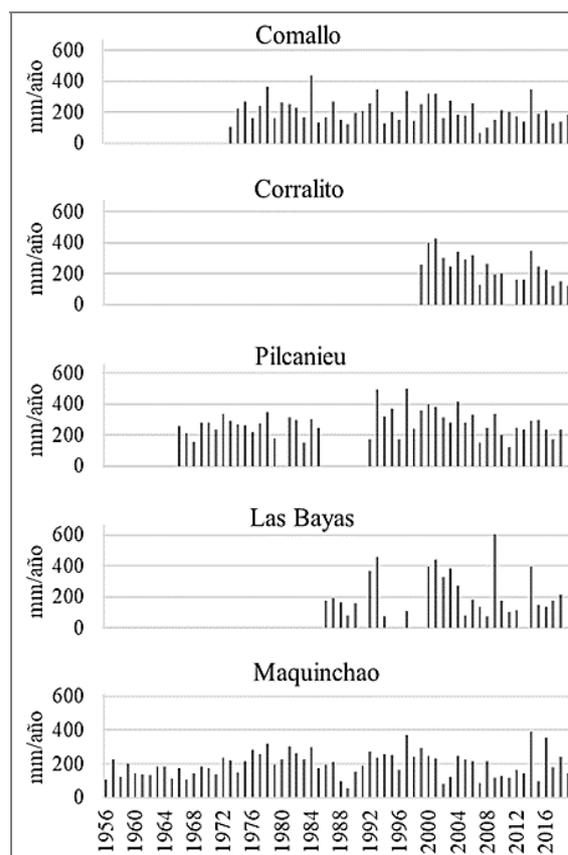


Figura 3. Precipitación anual (mm.año⁻¹) para las estaciones de medición del SO de Río Negro: Comallo (1973-2019), Corralito (1999-2019), Pilcanieú (1966-2019), Las Bayas (1986-2019) y Maquinchao (1956-2019).

Tabla 2. Frecuencia (f) absoluta (abs.) y acumulada (acu%) por clase de precipitación anual en mm.año⁻¹, para cinco estaciones de medición en el SO de Río Negro.

	f*	Clase de precipitación (mm.año ⁻¹)										
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	>
Comallo	abs.	0	1	10	13	9	6	5	1	1	0	0
	acu.%	0	2	24	52	72	85	96	98	100		
Corralito	abs.	0	0	3	4	4	3	4	0	2	0	0
	acu.%	0	0	15	35	55	70	90	90	100		
Pilcanieú	abs.	0	0	1	7	11	12	8	4	1	2	0
	acu.%	0	0	2	17	41	67	85	93	96	100	
Las Bayas	abs.	0	4	6	7	1	1	1	4	1	1	1
	acu.%	0	15	37	63	67	70	74	89	93	96	100
Maquinchao	abs.	0	5	16	13	17	8	2	3	0	0	0
	acu.%	0	8	33	53	80	92	95	100			

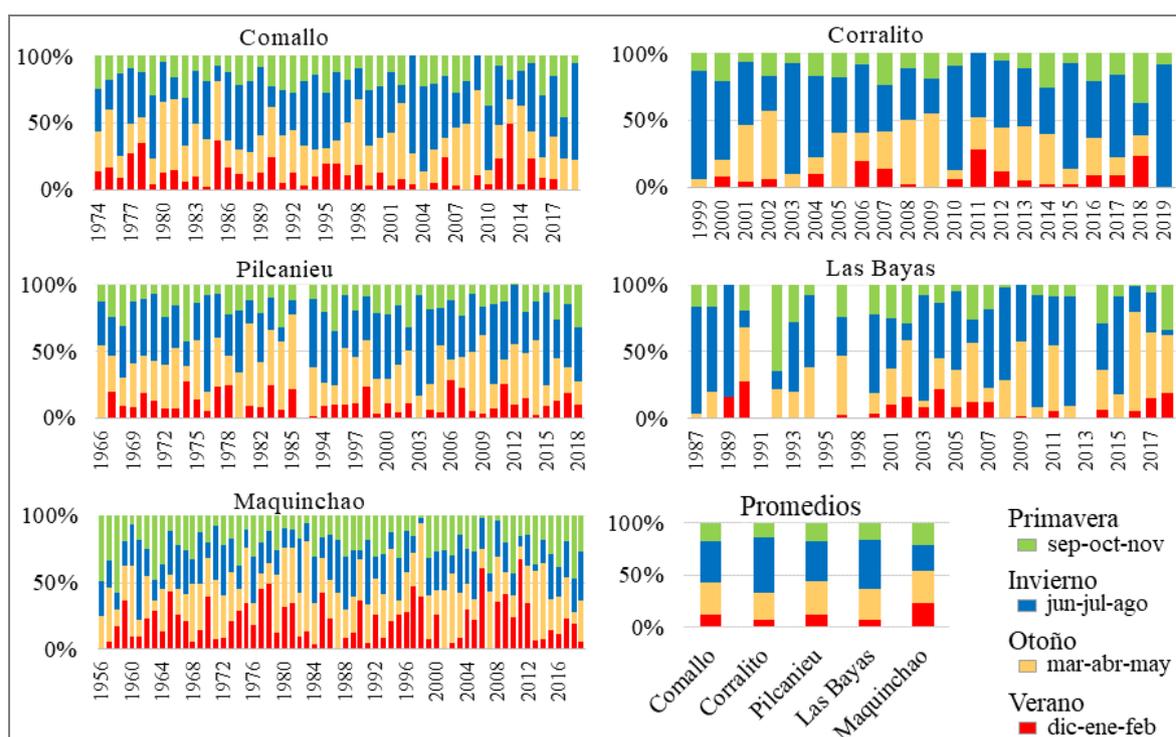


Figura 4. Participación porcentual de las precipitaciones de primavera (barra verde), invierno (barra azul), otoño (barra amarilla) y verano (barra roja) en el total anual a lo largo de los años en cada una de las estaciones de medición.

El aporte mensual a la precipitación anual, expresada como el porcentaje del total anual que precipita en cada mes, es mayor entre mayo y agosto para las cinco localidades (Figura 5). Las mayores diferencias de aporte promedio entre meses se dan en Corralito, con 20% más de precipitaciones en

junio que en diciembre, y las menores en Maquinchao, con menos de 5% de diferencia entre los mismos meses. A esta escala se repite la semejanza de distribución temporal de las precipitaciones entre las estaciones de medición Comallo, Corralito, Pilcanieú y Las Bayas. En

Maquinchao, en cambio, la diferencia entre las precipitaciones mensuales es menor (Figura 5). Esto podría deberse a un aumento paulatino hacia el este de la influencia moderadora del régimen de precipitaciones que ejerce el ingreso de humedad desde el océano Atlántico (Bianchi et al. 2016).

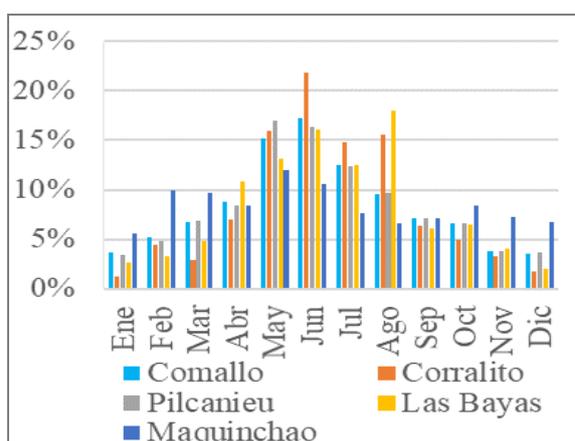


Figura 5. Participación porcentual de las precipitaciones mensuales en el total anual en promedio para cada una de las cinco estaciones de medición.

La escasez de precipitaciones se reflejó claramente en la elevada ocurrencia de días sin precipitación (Tabla 3) y años con menos de 300 mm (Tabla 2).

Ambas variables decaen fuertemente en frecuencia al aumentar la magnitud de la lámina de precipitación. A escala diaria la gran mayoría de los ingresos son de magnitud menor a 10 mm.día^{-1} , con más de 75% de los registros en este rango para todas las estaciones de medición. La frecuencia porcentual del aporte de esta clase de precipitación diaria varió entre 90% (en Maquinchao) y 75% (en Las Bayas y Río Chico). Le siguen los eventos de 10 a 20 mm.día^{-1} con una frecuencia mínima de 7% en Maquinchao y máxima de 19% en Las Bayas. Al aumentar la magnitud de la precipitación diaria, la frecuencia disminuye drásticamente en todas las series (Tabla 3).

Todas las estaciones de medición han aportado al menos siete registros mayores a 40 mm.día^{-1} en el período de 1956 a 2019. Esa magnitud diaria puede asociarse a eventos extremos, en que la intensidad de la precipitación supere la capacidad de infiltración de los suelos (Cisneros et al 2012). En todas hubo ingresos diarios superiores a 80 mm.día^{-1} pero sólo en Maquinchao y Las Bayas hubo registros por encima de 100 mm.día^{-1} . Se identificaron 6 días con precipitación extrema registrados simultáneamente en al menos tres estaciones ocurridos en: marzo de 1975, marzo del 1984, junio de 1993 y de 2004, febrero de 2006 y abril de 2014.

Tabla 3. Frecuencias (f) por clase de precipitación diaria en mm.día^{-1} para cada estación de medición. *abs*: indica la frecuencia absoluta de registros de la clase, $f\%$: el porcentaje de f_{abs} de cada clase sobre el total de días con precipitación

	f^*	Clase de precipitación (mm.día^{-1})				
		0	(0-10]	(10-20]	(20-40]	(40- >100)
Comallo	<i>abs</i>	15687	1037	220	52	19
	$f\%$	-	78	16	4	1
Corralito	<i>abs</i>	6204	1212	117	37	10
	$f\%$	-	88	8	3	0
Pilcanieú	<i>abs</i>	14807	1375	254	86	18
	$f\%$	-	79	15	5	1
Las Bayas	<i>abs</i>	10398	716	182	44	14
	$f\%$	-	75	19	5	1
Maquinchao	<i>abs</i>	20062	2575	215	66	13
	$f\%$	-	90	7	2	0
Río Chico	<i>abs</i>	16965	783	188	73	7
	$f\%$	-	75	18	7	1
Promedio	$f\%$	-	81	14	4	1

Al considerar todo el período de análisis (1956-2019) no se observaron tendencias temporales en la precipitación anual en la región de estudio. Sin embargo, en el análisis de períodos más cortos se identificaron tendencias significativas tanto de ascenso como de descenso. En los últimos 23 años se detectó una tendencia general decreciente significativa que promedió -4.7 mm.año^{-1} ($p\text{-valor} = 0.03$ y $R^2 = 0.22$) (Figura 6). Luego de un período relativamente húmedo entre 1999 y 2002, todas las estaciones registraron tendencia negativa con tasas que variaron entre -9 mm.año^{-1} (Estación Corralito) y -3 mm.año^{-1} (Estación Río Chico). Por otro lado, en el período previo a 1995 el promedio de todas las estaciones no registró una tendencia significativa y solo Maquinchao mostró un aumento de las precipitaciones anuales, con una tasa de 2 mm.año^{-1} ($p\text{-valor}=0.016$ y $R^2=0.14$).

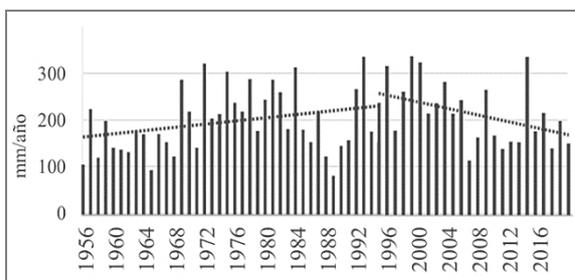


Figura 6. Precipitación anual promedio de cinco estaciones de medición en el SO de Río Negro (en barras) y su tendencia en los períodos 1956-1995 y 1996-2019 (en trazas punteadas).

Las fluctuaciones del ingreso de agua por precipitaciones en el mediano plazo, representado por la media móvil, fue diferente de acuerdo al lugar pero cabe notar que en los últimos 5 años todas las series convergieron en un rango de 100 mm alrededor de los 200 mm.año^{-1} (Figura 7). Dado que el estudio de tendencias y promedios está sesgado por la ventana de tiempo considerada, nuestra incorporación de registros más actuales difiere de los resultados de descripciones anteriores. Los promedios del presente trabajo son inferiores a los históricos, como por ejemplo la precipitación media anual era de 232 mm para Comallo según Godagnone y Bran (2009) y actualmente se redujo a 212 mm en la serie 1973-2019. Los valores por debajo de los promedios históricos en todas las estaciones de medición para las últimas décadas coinciden con sequías reportadas en áreas cercanas a la región de este estudio (Solano-Hernández et al. 2020).

Para el periodo completo de 1956 a 2019 detectamos una tendencia a la reducción en los promedios del

número de días con precipitación por año y de la participación de las precipitaciones inferiores a 10 mm.día^{-1} , al tiempo que la precipitación media diaria presentó una leve tendencia al aumento igual que las frecuencias de registros mayores a 10 mm.día^{-1} para el promedio de las estaciones estudiadas. En el mismo periodo encontramos iguales tendencias en la estación de medición de Comallo y sólo tendencia al aumento de la lámina media diaria en Maquinchao. En Río Chico mostraron tendencia negativa las frecuencias de precipitación diaria entre 10 y 40 mm, y tendencia al aumento la de precipitación de hasta 10 mm.día^{-1} , pero todos con menores niveles de ajuste (Tabla 4).

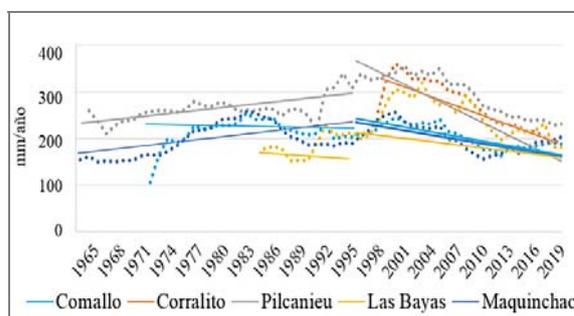


Figura 7. Tendencias hasta 1995 y 1996-2019 (en líneas llenas) y media móvil de 10 años (en trazas punteadas) de la precipitación anual para cinco estaciones de medición en el SO de Río Negro.

En el periodo anterior a 1995 también hubo tendencia a la disminución del promedio de días con precipitación y al aumento en la precipitación media diaria promedio. Esa tendencia al aumento se repitió en Pilcanieú y Maquinchao. Las frecuencias de cada clase de precipitación diaria también presentaron tendencias para el promedio, con decrecimiento de las precipitaciones menores a 10 mm.día^{-1} y crecimiento de las clases superiores. Entre todas las estaciones de medición, Maquinchao presentó tendencia a una menor frecuencia de registros por debajo de 10 mm.día^{-1} y al incremento de los registros entre 10 y 20 mm.día^{-1} . Pilcanieú sólo presentó tendencia positiva en la frecuencia de días con lámina mayor a 40 mm (Tabla 5).

El período 1996-2019 mostró la mayor tasa de reducción en la cantidad de días con precipitación promedio por año (Tabla 6). Particularmente en Corralito, esa caída estuvo acompañada por decrecimiento de la lámina de precipitación media diaria y de la frecuencia porcentual de precipitaciones diarias mayores a 40 mm, y, al mismo tiempo, tendencia al aumento en la

frecuencia porcentual de precipitaciones diarias inferiores a 10 mm. En Comallo y Las Bayas se repite la disminución en el número anual de días con precipitación. La misma variable tiene tendencia positiva en Maquinchao con variaciones anuales menores a 1.5 días con precipitación.año⁻¹. Por otro lado, Maquinchao y Río Chico compartieron una tendencia negativa en el tamaño promedio de las precipitaciones diarias. En Río Chico ese comportamiento se correspondió con decrecimiento en los registros de 10-20 mm.día⁻¹ y crecimiento de los días con menor lámina diaria.

Los cambios en las frecuencias de eventos menores a 10 mm.día⁻¹ podrían indicar un comportamiento diferente al aporte constante de eventos de baja magnitud que postularon Golluscio et al. (1998) décadas pasadas para el sur del área de estudio. A escala ecosistémica estos eventos pueden adquirir una importancia mayor de lo que podría sugerir su

limitada contribución sobre la precipitación anual (Dunkerley 2021). También hubo registros de precipitación diarios de gran magnitud y baja frecuencia que, dependiendo de su intensidad, podrían disparar procesos erosivos. Para el este de la Patagonia, Rostagno et al. (1999) explicaron la generación de escurrimientos en base a datos de precipitación sub-horarios, y encontraron que los eventos de la estación cálida eran más cortos y de mayor intensidad que en la estación más fría. En nuestra zona se podría brindar mayor precisión sobre la intensidad y erosividad de las precipitaciones si hubiera información de resolución temporal sub-diaria o sub-horaria, como se ha planteado en otras regiones del mundo (Dunkerley 2019). Por ello es importante la generación de información detallada en la región, basada en una red oficial con mayor densidad de mediciones y con un registro seguro que permita continuidad en las actualizaciones.

Tabla 4. Pendiente (b) de la tendencia para el período 1956-2019 con su desvío estándar (ds), coeficiente de ajuste (R²) y valor de significancia para b≠0 (p-valor) del número de días con precipitación (n° días con pp), la precipitación (Pp) media diaria⁽¹⁾ (mm) y la frecuencia porcentual (f %) de las clases de precipitación diaria sobre el total de días con precipitación, para las estaciones de medición con tendencia significativa.

		Período 1956-2019					
		n° días con pp	Pp media diaria (mm)	f% 0-10mm	f% 10-20mm	f% 20-40mm	f% 40->100mm
Comallo	b ± ds	-0.78 ± 0.08	0.21 ± 0.03	-0.94 ± 0.16	0.61 ± 0.11	0.22 ± 0.08	0.11 ± 0.05
	R ²	0.66	0.49	0.45	0.43	0.15	0.12
	p-valor	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.0084	0.0223
Maquinchao	b ± ds		0.02 ± 0.01				
	R ²		0.09				
	p-valor	ns	0.02	ns	ns	ns	ns
Río Chico	b ± ds		-0.10 ± 0.03	0.75 ± 0.21	-0.48 ± 0.12	-0.26 ± 0.11	
	R ²		0.2	0.23	0.28	0.12	
	p-valor	ns	0.0026	0.0008	0.0002	0.0208	ns
Promedio regional	b ± ds	-0.22 ± 0.05	0.04 ± 0.01	-0.28 ± 0.04	0.20 ± 0.03	0.05 ± 0.02	0.03 ± 0.01
	R ²	0.23	0.19	0.39	0.41	0.08	0.24
	p-valor	< 0.0001	0.0004	< 0.0001	< 0.0001	0.0283	< 0.0001

⁽¹⁾Lámina media de precipitación diaria considerando sólo los días con registros > 0 mm.día⁻¹.

Tabla 5. Pendiente (b) de la tendencia para el período 1956-1995 con su desvío estándar (ds), coeficiente de ajuste (R^2) y valor de significancia para $b \neq 0$ (p-valor) del número de días con precipitación (n° días con pp), la precipitación (Pp) media diaria (mm) y la frecuencia porcentual (f %) de las clases de precipitación diaria sobre el total de días con precipitación, para las estaciones de medición con tendencia significativa.

		Periodo 1956-1995					
		n° días con pp	Pp media diaria (mm)	f% 0-10mm	f% 10-20mm	f% 20-40mm	f% 40->100mm
Pilcaniehu	b ± ds		0.11 ± 0.04				0.08 ± 0.04
	R^2		0.26				0.19
	p-valor	ns	0.012	ns	ns	ns	0.04
Maquinchao	b ± ds		0.06 ± 0.01	-0.28 ± 0.05	0.21 ± 0.04		
	R^2		0.38	0.43	0.38		
	p-valor	ns	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	ns	ns
Promedio regional	b ± ds	-0.27 ± 0.11	0.08 ± 0.02	-0.52 ± 0.09	0.37 ± 0.06	0.11 ± 0.04	0.04 ± 0.009
	R^2	0.13	0.29	0.49	0.51	0.13	0.39
	p-valor	0.023	0.0003	< 0.0001	< 0.0001	0.021	< 0.0001

Tabla 6. Pendiente (b) de la tendencia para el período 1996-2019 con su desvío estándar (ds), coeficiente de ajuste (R^2) y valor de significancia para $b \neq 0$ (p-valor) del número de días con precipitación (n° días con pp), la precipitación (Pp) media diaria (mm) y la frecuencia porcentual (f %) de las clases de precipitación diaria sobre el total de días con precipitación, para las estaciones de medición con tendencia significativa.

		Periodo 1996-2019					
		n° días con pp	Pp media diaria (mm)	f% 0-10mm	f% 10-20mm	f% 20-40mm	f% 40->100mm
Comallo	b ± ds	-0.60 ± 0.20					
	R^2	0.32					
	p-valor	0.006	ns	ns	ns	ns	ns
Corralito	b ± ds		-0.14 ± 0.04	0.48 ± 0.21			-0.09 ± 0.04
	R^2		0.37	0.23			0.23
	p-valor	ns	0.005	0.033	ns	ns	0.032
Las Bayas	b ± ds	-1.38 ± 0.47					
	R^2	0.3					
	p-valor	0.008	ns	ns	ns	ns	ns
Maquinchao	b ± ds	1.06 ± 0.38	-0.14 ± 0.06				
	R^2	0.27	0.32				
	p-valor	0.011	0.05	ns	ns	ns	ns
Río Chico	b ± ds		-0.15 ± 0.05	1.02 ± 0.27	-0.94 ± 0.22		
	R^2		0.29	0.4	0.47		
	p-valor	ns	0.008	0.001	0.0003	ns	ns
Promedio regional	b ± ds	-0.68 ± 0.15					
	R^2	0.5					
	p-valor	0.0001	ns	ns	ns	ns	ns

Como primera aproximación a la variabilidad espacial de las precipitaciones se analizó la correlación de la precipitación anual entre las distintas estaciones de medición. Las localidades con mayor correlación entre sí son el par Corralito-Pilcanieú y el par Comallo-Corralito. Entre todas las demás series el coeficiente de determinación fue inferior, hasta un mínimo de 0.01 entre Las Bayas, localidad de mayor altitud, y Maquinchao, localidad del extremo este (Tabla 7).

La localización relativa de las estaciones de medición estudiadas no mostró patrones que permitan definir relaciones directas entre ubicación espacial y precipitación anual. No se encontraron asociaciones significativas con las distancias

longitudinal, latitudinal, euclidiana ni altitudinal. La baja densidad de estaciones pluviométricas, dificulta el estudio de gradientes dentro del área. Las particularidades de cada localidad pueden escapar a la representación de patrones del clima basada en datos de sensores remotos apoyadas sobre grillas con baja densidad de puntos de control en terreno. En sentido opuesto, es posible que la información remota capture señales de precipitación llamativas donde no existen datos de terreno para validarlas. Ante la posibilidad de que las condiciones locales tengan influencia en la magnitud y distribución de las precipitaciones revisamos los productos derivados de imágenes satelitales antes de su extrapolación a escala de mayor detalle.

Tabla 7. Coeficientes de determinación (R^2) de la asociación entre precipitaciones anuales de las cinco estaciones de medición para el período 1956-2019.

	Comallo	Corralito	Pilcanieú	Las Bayas
Corralito	0.51			
Pilcanieú	0.3	0.66		
Las Bayas	0.22	0.13	0.14	
Maquinchao	0.31	0.19	0.18	0.01

Productos satelitales y su relación con estaciones pluviométricas

El grado de ajuste entre los datos de precipitación satelitales y de terreno varió según la escala temporal y el producto satelital considerados (Tabla 8). A la escala diaria y la anual se observaron bajos niveles de ajuste entre los productos satelitales y los registros puntuales de terreno, detectándose una performance ligeramente superior del producto GPM por sobre TRMM. A nivel mensual la estimación satelital mejora sensiblemente y es mejor en el caso del producto GPM (Figura 8). Sin embargo, aún en este caso se estima un RMSE elevado (42 mm.mes^{-1}) teniendo en cuenta la pequeña magnitud de la precipitación media mensual (22 mm.mes^{-1}). Integrandolo a nivel de la cuenca alta del Comallo por el método de polígonos de Thiessen, encontramos mejores valores de ajuste para GPM que para TRMM en todas las escalas temporales. Sin embargo, se repite un RMSE elevado en los registros mensuales para GPM (63 mm.mes^{-1}). A escala de cuenca los

coeficientes para las estimaciones anuales carecen de relevancia dado que sólo se estudian 3 años.

Atendiendo las limitaciones antes mencionadas sobre la representatividad de la información remota, la asociación entre los registros de terreno y los productos satelitales permite salvar algunas carencias y contar con información de interés para nuestra región (Pessacg et al. 2020). En nuestro trabajo la performance de GPM fue mejor que para TRMM en cuanto a la captura de la variabilidad, pero no en la representación de la magnitud de las precipitaciones (Tabla 5). Estudios anteriores coinciden en un mejor ajuste de las estimaciones de GPM cuando se aumenta el paso temporal de diario a mensual (Gavilán et al. 2018). Al sur de nuestra área de interés se encontró que las imágenes de satélite subestimaban las precipitaciones extremas registradas en estaciones de terreno en eventos extremos (Colombani et al. 2017). Por el contrario, en el noreste del país las estimaciones de TRMM sobreestiman los registros

de estaciones locales, y los errores de ajuste resultaron inferiores en latitudes menores y con mayor precipitación (Brizuela et al. 2015; Gavilán et al. 2018). Para el producto GPM la captura de

la orografía y la capacidad de representar fuertes intensidades ha mejorado respecto de TRMM, pero es todavía un desafío (Zhang et al. 2018; Wang et al. 2021).

Tabla 8. Coeficientes de ajuste R^2 y RMSE de la relación entre todos los registros de seis estaciones de medición en el SO de Río Negro y las estimaciones de precipitación diaria (mm.día^{-1}), mensual (mm.mes^{-1}) y anual (mm.año^{-1}) de GPM y TRMM, para cada estación puntual y para la ponderación del área de la cuenca por polígonos de Thiessen, en el período 2014-2016.

	Estimaciones	mm.día^{-1}		mm.mes^{-1}		mm.año^{-1}	
		R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Puntual	GPM	0.26	9	0.47	42	0.11	328
	TRMM	0.07	4	0.26	28	0.18	178
Cuenca	GPM	0.14	7	0.76	63	0.98	510
	TRMM	0.03	4	0.35	29	0.65	225

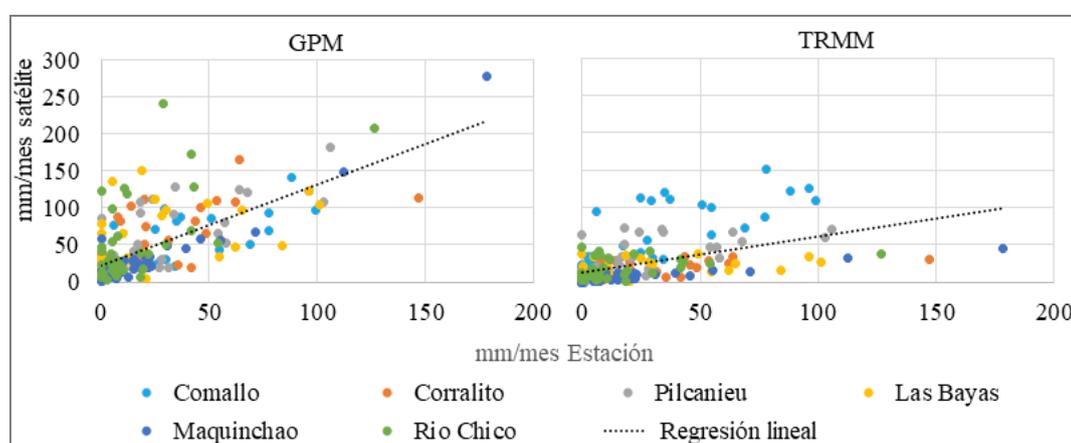


Figura 8. Relación de la estimación de precipitaciones mensuales (mm.mes^{-1}) de GPM y de TRMM con los registros de precipitación en terreno de seis estaciones del árido de Río Negro: Comallo (celeste), Corralito (naranja), Pilcanieú (gris), Las Bayas (amarillo), Maquinchao (azul), Río Chico (verde).

El seguimiento de la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones constituye una de las bases para la comprensión de múltiples cambios en los procesos ecosistémicos (Knapp et al. 2008). En especial es interesante conocer las fluctuaciones en parámetros del clima y su efecto en los ecosistemas áridos en el contexto de cambio climático (Bianchi et al. 2020). La disminución esperada para las precipitaciones en el noroeste y centro de la Patagonia no sólo afectará a los sistemas productivos basados en pastizales naturales sino también a la recarga de las cuencas (Masiokas et al. 2008; Brendel et al. 2020; Pessacg et al. 2020). Dado que la actividad ganadera es la principal forma de uso de la tierra de la región, los registros en cada localidad y, más aún, en cada establecimiento ganadero permitirían contar con una base de información sólida para predecir variables biofísicas como la productividad primaria (Fabricante et al. 2009,

Bandieri et al 2020) y tomar decisiones de manejo a tiempo en pos de mejorar los índices productivos (Castillo et al. 2021) y asegurar la provisión de agua.

CONCLUSIONES

Este trabajo brinda una caracterización actualizada de las precipitaciones en la región árida del sudoeste de Río Negro, con descripciones a escala diaria, mensual y anual. La sistematización de las seis bases de registros y la recopilación de trabajos locales permitieron un panorama regional de la variabilidad de las precipitaciones y posibles tendencias para el corto plazo. Detectamos series de precipitación anual con tendencias negativas, cambios en la cantidad anual de días con precipitación y en el aporte al total anual de acuerdo a la magnitud diaria. Además, presentamos la primera evaluación para

esta región del desempeño de productos satelitales de precipitación lo cual permitirá seleccionar productos útiles para otras aplicaciones en sitios carentes de registros puntuales.

Esta información permite avanzar en el conocimiento de fenómenos a distintas escalas, pero continúa pendiente la descripción de eventos subsidiarios. El contexto de cambio climático y la ocurrencia de extremos resalta la necesidad de contar con estudios actualizados y de mayor detalle para el seguimiento de la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones. Sumado a que los pastizales áridos del noroeste de la Patagonia argentina cobijan actividades productivas fuertemente condicionadas por los parámetros del clima y su variabilidad, por lo cual el conocimiento acerca del ingreso de agua por precipitaciones constituye una de las bases para la comprensión de múltiples procesos en los sistemas de la región.

AGRADECIMIENTOS

Especialmente a los organismos que proveyeron las bases de datos para este trabajo y a los establecimientos Estancia Pilcañeu y Neneo Ruca. Este trabajo fue posible gracias al financiamiento INTA de Becas Profesionales RES76/2014, DN1006/2015. A los colegas del INTA EEA Bariloche que revisaron e hicieron aportes valiosos al trabajo.

REFERENCIAS

- Adler, R. F., Kummerow, C., Bolvin, D., Curtis, S., y Kidd, C. (2003). Status of TRMM monthly estimates of tropical precipitation. In *Cloud Systems, Hurricanes, and the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)* (pp. 223-234). American Meteorological Society, Boston, MA.
- Aravena, J. C., y Luckman, B. H. (2009). Spatio-temporal rainfall patterns in southern South America. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(14), 2106-2120.
- Bandieri, L. M., Fernández, R. J., y Bisigato, A. J. (2020). Risks of neglecting phenology when assessing climatic controls of primary production. *Ecosystems*, 23(1), 164-174.
- Barros, V., Vera, C., Agosta, E., Araneo, D., Camilloni, I., Carril, A. y Solman, S. (2015). Cambio climático en Argentina; tendencias y proyecciones. 3 Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera. Anexo II.
- Bianchi, E., Villalba, R., Viale, M., Couvreur, F., y Marticorena, R. (2016). New precipitation and temperature grids for northern Patagonia: Advances in relation to global climate grids. *Journal of Meteorological Research*, 30(1), 38-52.
- Bianchi, E., Villalba, R., y Solarte, A. (2020). NDVI Spatio-temporal patterns and climatic controls over northern Patagonia. *Ecosystems*, 23(1), 84-97.
- Brendel, A.S., del Barrio, R.A., Mora, F., León, E.A., Flores, J.R., Campoy, J.A. (2020). Current agro-climatic potential of Patagonia shaped by thermal and hydric patterns. *Theoretical and Applied Climatology*, 142 (3-4), 855-868.
- Bruzuela, A. B., Nasetto, M. D., Aguirre, C. A., y Bressán, M. P. (2015). Comparación de datos de precipitación estimada por TRMM con mediciones en estaciones meteorológicas de Entre Ríos, Argentina. *UD y la geomática*, (10), 18-26.
- Castillo, D. A., Gaitán, J. J., y Villagra, E. S. (2021). Direct and indirect effects of climate and vegetation on sheep production across Patagonian rangelands (Argentina). *Ecological Indicators*, 124, 107417.
- Cisneros, J. M. (2012). *Erosión hídrica. Principios y técnicas de manejo*. Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina.
- Colombani, E., Behr, S., y Brandizi, L. (2017). Estimación de precipitaciones extremas a través de GSMAP y aplicación hidrológica a la crecida del arroyo Telsen, Chubut, Patagonia Argentina. *Meteorológica*, 42(1), 53-66.
- Dunkerley, D. L. (2019). Rainfall intensity bursts and the erosion of soils: an analysis highlighting the need for high temporal resolution rainfall data for research under current and future climates. *Earth Surface Dynamics*, 7, 345-360.
- Dunkerley, D. L. (2021). Light and low-intensity rainfalls: A review of their classification, occurrence, and importance in landsurface, ecological and environmental processes. *Earth-Science Reviews*, 103529.
- Easdale, M. H., Lopez, D. R., Bianchi, E., Bruzone, O., Villagra, S. E., Siffredi, G. L., y Oricchio, P. (2012). Una herramienta para monitorear sequías en regiones áridas y semiáridas de Patagonia Norte. *RIA. Revista de investigaciones agropecuarias*, 38(2), 158-164.
- Epele, L. B., Manzo, L. M., Grech, M. G., Macchi, P., Claverie, A. Ñ., Lagomarsino, L., y

- Miserendino, M. L. (2018). Disentangling natural and anthropogenic influences on Patagonian pond water quality. *Science of the Total Environment*, 613, 866-876.
- Fabricante, I., Oesterheld, M., Paruelo, J.M. (2009). Annual and seasonal variation of NDVI explained by current and previous precipitation across Northern Patagonia. *Journal of Arid Environments*, 73 (8), 745-753.
- Gaitán, J.J., López, C., Ayesa, J., Bran, D., y Umaña, F. (2004). Características y distribución espacial de los paisajes y los suelos del área Bariloche-Comallo. *Área de Investigación en Recursos Naturales*. INTA EEA Bariloche.
- Gaitán, J. J. (2016). *Atributos estructurales y funcionales de los ecosistemas áridos y semiáridos de la Patagonia y su relación con factores abióticos y el uso antrópico*. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires.
- Gavilán, S., Pastore, J. I., Lighezzolo, A., Ferral, A., Uranga, J., y Aceñolaza, P. (2018). Metodología operativa para la generación de datos históricos de precipitación a partir de la misión satelital Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) y validación de los resultados. In *X Congreso de AgroInformática (CAI)-JAIIO 47* (CABA, 2018).
- Godagnone, R.E. y Bran, D.E. (Eds.) (2009). *Inventario integrado de los recursos naturales de la provincia de Río Negro: geología, hidrología, geomorfología, suelos, clima, vegetación y fauna*. Ediciones INTA, 89-350 pp.
- Golluscio, R. A., Sala, O. E., y Lauenroth, W. K. (1998). Differential use of large summer rainfall events by shrubs and grasses: a manipulative experiment in the Patagonian steppe. *Oecologia*, 115(1-2), 17-25.
- González, M.H., Garbarini, E.M. and Romero, P.E. (2015). Rainfall patterns and the relation to atmospheric circulation in northern Patagonia (Argentina). In Justin A. Daniels ed., *Advances in Environmental Research*. 6 (41), NY, US A, NOVA Science Publications, 85-100.
- Huffman, G.J., Stocker, E.F., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J., Jackson, T. (2019). GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V06, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [feb/2021].
- Huffman, G.J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., Gu, G., Nelkin, E.J., Bowman, K.P., Hong, Y., Stocker, E.F., Wolff, D.B. (2007). The TRMM multi-satellite precipitation analysis: quasi-global, multi-year, combined-sensor precipitation estimates at fine scale. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1), 38-55.
- Jobbágy, E. G., Paruelo, J. M., y León, R. J. (1995). Estimación del régimen de precipitación a partir de la distancia a la cordillera en el noroeste de la Patagonia. *Ecología Austral*, 5(01), 047-053.
- Jobbágy, E. G., Sala, O. E., y Paruelo, J. M. (2002). Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: a remote sensing approach. *Ecology*, 83(2), 307-319.
- Knapp, A. K., Beier, C., Briske, D. D., Classen, A. T., Luo, Y., Reichstein, M., y Weng, E. (2008). Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems. *Bioscience*, 58(9), 811-821.
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land degradation and development*, 12(6), 519-539.
- Le Houérou, H. N., Bingham, R. L., y Skerbek, W. (1988). Relationship between the variability of primary production and the variability of annual precipitation in world arid lands. *Journal of arid Environments*, 15(1), 1-18.
- Li, Z., y Fang, H. (2016). Impacts of climate change on water erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 163, 94-117.
- Magliano, P. N., Fernández, R. J., Mercu, J. L., & Jobbágy, E. G. (2015). Precipitation event distribution in Central Argentina: spatial and temporal patterns. *Ecohydrology*, 8(1), 94-104.
- Magliano, P. N., Mindham, D., Tych, W., Murray, F., Noretto, M. D., Jobbágy, E. G., Niborski, M. J., Rufino, M. C., y Chappell, N. A. (2019). Hydrological functioning of cattle ranching impoundments in the Dry Chaco rangelands of Argentina. *Hydrology Research*, 50(6), 1596-1608.
- Masiokas, M. H., Villalba, R., Luckman, B. H., Lascano, M. E., Delgado, S., y Stepanek, P. (2008). 20th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern Patagonia. *Global and Planetary Change*, 60(1-2), 85-100.
- Massaferro, G. I., Arrigoni, G. I., Boschín, M. T., Fernández, M. M., Crivelli, E. A., y Cordero, J. A. (2012). Indicadores de tecnología y etnodinamia: el análisis de pigmentos en el paraje arqueológico Comallo Arriba, provincia de Río Negro, Argentina. *Boletín del Museo Chileno de Arte Precolombino*, 17(1), 117-127.
- Noy Meir, I. (1973). Desert ecosystems: environment and producers. *Annual review of ecology and systematics*, 4(1), 25-51.
- Ovando, G., Sayago, S., Bellini Saibene, Y., y Bocco, M. (2018). Evaluación del desempeño de productos satelitales para estimar precipitación en

- Córdoba (Argentina). En *X Congreso de AgroInformática (CAI)-JAIIO 47* (CABA, 2018).
- Paruelo, J. M., Aguiar, M. R., Golluscio, R. A., León, R. J., y Pujol, G. (1993). Environmental controls of NDVI dynamics in Patagonia based on NOAA-AVHRR satellite data. *Journal of Vegetation Science*, 4(3), 425-428.
- Paruelo J.M., Beltrán A., Jobbágy E.G., Sala O.E., Golluscio R.A. (1998). The climate of Patagonia: general patterns and controls on biotic process. *Ecología Austral*, 8, 85–101.
- Peñalba, O. C., y Rivera, J. A. (2016). Precipitation response to El Niño/La Niña events in Southern South America—emphasis in regional drought occurrences. *Advances in Geosciences*, 42, 1-14.
- Pessacg, N., Flaherty, S., Brandizi, L., Solman, S., y Pascual, M. (2015). Getting water right: A case study in water yield modelling based on precipitation data. *Science of the Total Environment*, 537, 225-234.
- Pessacg, 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.
- Reynolds, J. F., Kemp, P. R., Ogle, K., y Fernández, R. J. (2004). Modifying the ‘pulse–reserve’ paradigm for deserts of North America: precipitation pulses, soil water, and plant responses. *Oecologia*, 141(2), 194-210.
- Rostagno, C.M., Coronado, F., Puebla, D., del Valle, H.F. (1999). Runoff and erosion in five land units of a closed basin of northeastern Patagonia. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 13, 281–292.
- Solano-Hernández, A., Bruzzone, O., Groot, J., Laborda, L., Martínez, A., Tittonell, P. y Easdale, M. H. (2020). Convergence between satellite information and farmers’ perception of drought in rangelands of North-West Patagonia, Argentina. *Land Use Policy*, 97, 104726.
- Viale, M., Bianchi, E., Cara, L., Ruiz, L. E., Villalba, R., Pitte, P. y Zalazar, L. (2019). Contrasting climates at both sides of the Andes in Argentina and Chile. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 69.
- Wang, J., Petersen, W.A., Wolff, D.B. (2021). Validation of satellite-based precipitation products from TRMM to GPM. *Remote Sensing*, 13, 1745.
- Yahdjian, L. y Sala, O. E. (2008). Do litter decomposition and nitrogen mineralization show the same trend in the response to dry and wet years in the Patagonian steppe? *Journal of Arid Environments*, 72(5), 687-695.
- Zhang, S., Wang, D., Qin, Z., Zheng, Y. y Guo, J. (2018). Assessment of the GPM and TRMM precipitation products using the rain gauge network over the Tibetan Plateau. *Journal of Meteorological Research*, 32(2), 324-336.

Tipo de Publicación: NOTA TECNICA.

Trabajo recibido el 28/03/2022 y aprobado para su publicación el 25/04/2022.

COMO CITAR

Aramayo, V.; Cremona, M. V.; Fernández, R. J.; Nosetto, M. D. (2022). Características de las precipitaciones en zonas áridas de la Patagonia norte, Argentina. *Cuadernos del CURIHAM*, 28, 43-58. DOI: <https://doi.org/10.35305/curiham.v28i.180>

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>)



ADAPTACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO POR FAO PARA EVALUAR LA EVAPOTRANSPIRACION REAL EN EL MODELO DE SIMULACION HIDROLOGICA SHALL.

ADAPTATION OF THE FAO'S METHOD TO ASSESS REAL EVAPOTRANSPIRATION IN THE SHALL HYDROLOGICAL SIMULATION MODEL.

Erik Zimmermann⁽¹⁾⁽²⁾

⁽¹⁾Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario. Rosario, Santa Fe, Argentina.

⁽²⁾Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Argentina.

email: erikz@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Considerando la predominancia del sentido vertical en los flujos de intercambio entre componentes hidrológicos de los sistemas de llanura y, consecuentemente, la preponderancia de la evapotranspiración como proceso, se presenta una adaptación de la metodología propuesta por FAO a las variables empleadas por el modelo hidrológico SHALL, apto para simulación continua en áreas de llanura. El modelo es hidrodinámico cuasi-3D, que contempla las componentes subterránea y superficial de flujos de agua, conjuntamente con los flujos verticales hacia el acuífero y la atmósfera. El modelo ha sido aplicado en sistemas abiertos del sur santafesino y en sistemas cerrados pampeanos y actualmente se está implementando en áreas deprimidas bonaerenses. Para la adaptación se propone una estimación de saturaciones efectivas extremas conforme a las curvas de retención de humedad ajustadas con la fórmula de Brooks-Corey. Siguiendo los lineamientos de la publicación FAO N° 56, se presenta una estimación de la saturación efectiva límite para la cual por debajo de la misma las coberturas vegetales comienzan a restringir el abastecimiento de la evapotranspiración potencial, y del coeficiente de estrés hídrico en función de las saturaciones límites calculadas, para estimar, finalmente, la evapotranspiración real en función de variables que contempla el modelo SHALL.

Palabras clave: adaptación método FAO, evapotranspiración, llanura, modelo SHALL.

ABSTRACT

Considering the predominance of the vertical direction in the exchange flows between hydrological components of the plain systems and, consequently, the preponderance of evapotranspiration as a process, an adaptation of the methodology proposed by FAO to the variables used by the SHALL hydrological model is presented. This model is suitable for continuous simulation in plain areas. The model is quasi-3D hydrodynamic, which considers the underground and surface components of water flows, together with the vertical flows towards the aquifer and the atmosphere. The model has been applied in open systems in the south of Santa Fe province and closed systems in the La Pampa province and is currently being implemented in depressed areas of Buenos Aires province. For the adaptation, an estimate of extreme effective saturation is proposed according to the moisture retention curves adjusted with Brooks-Corey formula. Following the guidelines of the publication FAO No. 56, an estimate of the effective limit saturation is presented for which, below it, the vegetal covers begin to restrict the supply of potential evapotranspiration, and the coefficient of hydric stress based on the calculated limit saturations, to estimate, finally, the real evapotranspiration based on variables contemplated by the SHALL model components.

Keywords: FAO method adaptation, evapotranspiration, flatland, SHALL model.

INTRODUCCIÓN

La morfología de los sistemas hidrológicos emplazados en áreas de llanura condiciona los procesos que se desarrollan allí y el modelo conceptual requerido para describirlos (Kovacs, 1983; Tricart, 1983). Hay un aspecto clave en el funcionamiento hidrológico de esos sistemas que es la marcada interacción de la hidrología superficial con la subterránea. En función de los niveles freáticos, los excedentes hídricos pueden incorporarse al perfil del suelo o generar derrames y acumulación superficial de consideración. La zona no saturada (ZNS) representa la interfaz entre los procesos superficiales y subterráneos, y la estimación correcta de los flujos de intercambio entre ambos ambientes a través de ella es crucial a la hora de realizar simulaciones mediante modelos hidrológicos en áreas de llanura (Kruse y Zimmermann, 2002).

Otro aspecto dominante es el sentido vertical de los flujos de intercambio entre sus componentes, entre los que se encuentran procesos preponderantes tales como infiltración, evaporación y evapotranspiración (Fertonani y Prendes, 1983; Caamaño Nelli y Zimmermann, 1990).

Como una alternativa aplicable a estos sistemas se han desarrollado esquemas de modelación, basados en celdas interconectadas representativas de los ambientes que intercambian materia, energía e información. Un ejemplo de esto es el modelo de Simulación Hidrológica de Áreas de Llanura, SHALL (Zimmermann y Riccardi, 2000). El modelo es hidrodinámico cuasi-3D, que contempla las componentes subterránea y superficial de flujos de agua, conjuntamente con los flujos verticales hacia el acuífero y la atmósfera. En cada celda o unidad de discretización espacial, el modelo SHALL puede cuantificar dinámicamente variables de estado (almacenamientos por intercepción, superficial, en el perfil del suelo y subterráneo) y flujos de intercambio (evapotranspiración, ascenso capilar, escurrimiento superficial, mantiforme y encauzado, a superficie libre y a través de constricciones -puentes, alcantarillas, sobrepaso de terraplenes, etc.-, infiltración, percolación profunda y escurrimiento subterráneo). La aptitud de conectar la hidrología de superficie con la subterránea, lo habilita para realizar predicciones acerca de evoluciones en los procesos hidrológicos provocados por acciones antrópicas a escala de cuenca y en el largo plazo.

El modelo ha sido aplicado en sistemas abiertos del sur santafesino (Zimmermann y Riccardi, 2003; Méndez Zacarías y Zimmermann, 2011) y sistemas cerrados pampeanos (Zimmermann y Mecca, 2010).

Actualmente se está constituyendo el modelo en un sector deprimido de la cuenca del arroyo del Azul, que conforma la vertiente sur del río Salado (provincia de Bs. As.). Es aquí donde los procesos de evaporación y transpiración de la cobertura vegetal se manifiestan fuertemente, convirtiéndose en una de las principales salidas del sistema.

Con el fin de obtener resultados más representativos de estos procesos hidrológicos e incorporar nuevas fórmulas ya probadas y recomendadas se presenta aquí una adaptación de la metodología propuesta por la *Food Agriculture Organization* (FAO, Naciones Unidas) para la estimación de la evapotranspiración real utilizando los parámetros del modelo SHALL.

La metodología comprende la estimación del factor de estrés hídrico, K_d , considerando diferentes tipos de coberturas, contenido de humedad de la zona no saturada activa en términos de saturación de humedad efectiva del suelo, pudiendo incorporarse otras variables que puedan condicionar el proceso de evapotranspiración (p.ej. contenido salino del suelo).

METODOLOGÍA PROPUESTA POR FAO

El procedimiento, fue presentado por primera vez en la publicación de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO N° 24 «Las Necesidades de Agua de los Cultivos», denominado como el enfoque de « $K_c E_{To}$ », donde los efectos del clima sobre los requerimientos de agua del cultivo vienen reflejados en la evapotranspiración del cultivo de referencia E_{To} y el efecto del cultivo se incorpora en el coeficiente del cultivo K_c . Recientemente se han actualizado los contenidos con una nueva publicación, denominada FAO N° 56 (Allen et al., 2006) donde se vuelve a sugerir el uso del método de Penman-Monteith para la estimación de la evapotranspiración, dando pautas para situaciones con escasa información meteorológica.

Para el método de Penman-Monteith se define el cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia de la superficie de 70 s m^{-1} y un albedo de 0,23, lo que asemeja a la evaporación que ocurre en una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo

activamente y bien regada, la que se toma como referencia. Se han desarrollado procedimientos y recomendaciones para la utilización del método con datos climáticos limitados, eliminando por lo tanto la necesidad de utilizar otros métodos para la estimación de la evapotranspiración y creando una base consistente y transparente para una estandarización universal de los cálculos de los requerimientos de agua de los cultivos (Allen et al., 2006).

En el enfoque del «Kc ETo», las diferencias en la vegetación del cultivo y en la resistencia aerodinámica, con respecto al cultivo de referencia, resultan consideradas en el coeficiente del cultivo, Kc, el cual sirve como una integración de todas las diferencias físicas y fisiológicas entre los cultivos.

En la publicación de referencia se presentan varios procedimientos de ajustes al coeficiente del cultivo que toman en cuenta las desviaciones de las condiciones de desarrollo del cultivo con respecto a las condiciones estándar, tales como la presencia de estrés hídrico y salino, baja densidad de plantas, factores ambientales y las prácticas de manejo del cultivo.

Restricciones por estrés hídrico

Las fuerzas que actúan sobre el agua presente en el suelo disminuyen su energía potencial y la hacen menos disponible para su extracción por parte de las raíces de las plantas. Cuando el suelo se encuentra húmedo, el agua presente tiene una energía potencial alta, teniendo libertad de movimiento y pudiendo ser extraída fácilmente por las raíces de las plantas. En suelos secos el agua tiene una energía potencial baja, siendo retenida fuertemente por fuerzas capilares y de adsorción a la matriz del suelo, lo que la hace menos extraíble por el cultivo. Cuando la energía potencial del agua del suelo cae por debajo de cierto valor umbral, se dice que el cultivo se encuentra estresado (Allen et al., 2006). Los efectos del estrés hídrico son incorporados al multiplicar el coeficiente basal del cultivo por el coeficiente de estrés hídrico, Kd (se ha modificado la nomenclatura original del trabajo de referencia para evitar confusiones.)

$$ETc_{aj} = Kd Kc ETo \quad (1)$$

El total de agua disponible, ADT, en la zona radicular es la diferencia entre los contenidos de humedad a capacidad de campo y el punto de marchitez permanente:

$$ADT = 1000(\theta_{CC} - \theta_{PMP}) Z_r \quad (2)$$

donde ADT está dado en (mm), θ_{CC} contenido de humedad a capacidad de campo ($m^3 m^{-3}$), θ_{PMP} contenido de humedad en el punto de marchitez permanente ($m^3 m^{-3}$), Z_r profundidad de las raíces (m).

A medida que disminuya la cantidad de humedad en el suelo, el agua será retenida más fuertemente a la matriz del suelo y será más difícil de extraer. Cuando el contenido de humedad del suelo esté por debajo de cierto valor umbral, el agua del suelo no podrá ser transportada hacia las raíces con la velocidad suficiente para satisfacer la demanda de transpiración y el cultivo comenzará a sufrir de estrés. La fracción de ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico es denominada agua fácilmente aprovechable en el suelo, AFA:

$$AFA = p ADT \quad (3)$$

donde AFA (mm), p fracción promedio del total de agua disponible en el suelo (ADT) que puede ser agotada de la zona radicular antes de presentarse estrés hídrico.

El factor p varía de un cultivo a otro, normalmente entre 0,30 para plantas de raíces poco profundas, a tasas altas de ETc ($> 8 mm d^{-1}$), hasta 0,70 para plantas de raíces profundas y tasas bajas de ETc ($< 3 mm d^{-1}$). Un valor de 0,50 para p es utilizado comúnmente para una gran variedad de cultivos (Allen et al., 2006).

Coefficiente de estrés hídrico, Kd

Los efectos del estrés hídrico sobre el valor de la ET del cultivo se reflejan mediante la reducción del valor del coeficiente del cultivo. Esto se logra al multiplicar el valor del coeficiente del cultivo por el coeficiente de estrés hídrico Kd (ecuación 1). El contenido de humedad en la zona radicular puede ser expresado en función del agotamiento de humedad en la zona radicular, Dr, es decir la cantidad de agua faltante con respecto a la capacidad de campo. En capacidad de campo, el agotamiento en la zona radicular es igual a cero ($Dr = 0$). Cuando se produce la extracción del agua a través de la evapotranspiración, aumentará el agotamiento de humedad y se iniciarán las situaciones de estrés cuando el valor de Dr sea igual a AFA. Después de que el agotamiento en la

zona radicular exceda a AFA (o sea, el contenido de agua es menor al valor umbral, θ_p), el agotamiento será lo suficientemente alto como para limitar la evapotranspiración a valores menores que su potencial, por lo que la evapotranspiración del cultivo comenzará a disminuir en proporción (lineal) a la cantidad de agua remanente en la zona radicular. Si $Dr > AFA$, se propone que:

$$K_d = \frac{ADT - Dr}{ADT - AFA} = \frac{ADT - Dr}{(1-p)ADT} \quad (4)$$

EL MODELO SHALL

En el modelo SHALL se simula el movimiento y redistribución del agua en la zona no saturada (ZNS) mediante un esquema numérico basado en la ecuación de Richards. Bajo este esquema numérico también se determinan los montos de agua intercambiados con la atmósfera, mediante evapotranspiración, y el acuífero. El esquema se ha adaptado y validado para condiciones freáticas someras, típicas de las llanuras pampeanas (Zimmermann, 2021).

Vale decir que el proceso de evapotranspiración llevado a cabo por la cobertura vegetal es considerado como una condición de contorno en el extremo superior de la ZNS. La desecación como condición de borde superior contempla a la lámina interceptada como primer almacenamiento que satisface la demanda de evaporación potencial y en segundo término la lámina almacenada en superficie (si existen). Se establece una interacción entre procesos superficiales y subsuperficiales, para los períodos sin lluvia. Si los montos almacenados en superficie no alcanzan para cubrir la demanda se extrae agua del suelo por transpiración vegetal.

Para analizar el movimiento del agua en la ZNS deben conocerse parámetros del suelo tales como las curvas de conductividad hidráulica $K(\theta)$, y de retención de humedad $\psi(\theta)$. En el modelo se han adoptado las relaciones de Brooks-Corey (1964), representadas por las siguientes ecuaciones:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} \left(\frac{\psi_c}{\psi}\right)^\lambda & \text{si } \rightarrow |\psi| \geq |\psi_c| \\ 1 & \text{si } \rightarrow |\psi| < |\psi_c| \end{cases} \quad (5)$$

donde θ_r y θ_s son los contenidos de humedad

correspondientes a humedades residual y de saturación, respectivamente, λ es un parámetro que depende de la distribución de los tamaños de poros del suelo, ψ_c es la succión crítica (presión de entrada de aire) y S_e es la saturación efectiva. Para la estimación de la conductividad hidráulica relativa, $K_r = K(\theta)/K_s$, siendo K_s la conductividad hidráulica saturada, se utiliza la ecuación siguiente:

$$K_r = \frac{K}{K_s} = S_e^{(2+\lambda)} \quad (6)$$

Estimación de la evapotranspiración en la formulación original del SHALL

El modelo adoptado para estimar la evapotranspiración real es el de Feddes (1982). Allí se asume que la tasa real de evapotranspiración es limitada por un factor β función del potencial mátrico del suelo ψ ($0 < \beta(\psi) < 1$). La función β es nula por debajo de un potencial $\psi_1 = 0$ debido a la deficiencia de oxígeno donde el suelo se encuentra en estado de saturación y por debajo de un valor ψ_4 equivalente a una humedad de punto de marchitez permanente. Es máxima ($\beta(\psi) = 1$) entre los valores de potencial equivalente a la capacidad de campo ψ_2 y un potencial ψ_3 el cual depende de la tasa máxima de evapotranspiración. Entre $\psi_1 - \psi_2$ y $\psi_3 - \psi_4$ se proponen relaciones lineales.

Adaptación del método propuesto por FAO al modelo SHALL

Durante las simulaciones, la evolución de los almacenamientos de agua en la ZNS se evalúa en términos de saturación efectiva o contenidos de humedad, no en láminas almacenadas como se presentan en la metodología de FAO.

Dado que las humedades se expresan en términos de la saturación efectiva, S_e , deben expresarse los límites de humedades, θ_{CC} y θ_{PMP} , y almacenamientos, ADT y AFA, en función de la misma. Conocida la curva de retención $\psi(\theta)$, o bien, $\psi(S_e)$ la cual es parametrizada en cada celda del dominio, las saturaciones efectivas respectivas a los límites de humedades que definen ADT se obtienen a partir de las mismas:

$$h_{dt} = ADT / 1000 Z_r \quad (7)$$

$$h_{fa} = AFA / 1000 Z_r = p h_{dt} \quad (8)$$

$$\theta_p = (1-p)(\theta_{CC} - \theta_{PMP}) + \theta_{PMP} \quad (9)$$

Siendo h_{dt} y h_{fa} los rangos de humedad definidos por FAO para el total de agua disponible y extraíble con facilidad, respectivamente, y θ_p el contenido de humedad por debajo del cual comienza el estrés de la cobertura (Figura 1).

Sabiendo por definición que un tenor de humedad en condiciones de capacidad de campo representa una succión de 33 cm y en condiciones de marchitez permanente 15 bares o aproximadamente 150 m de succión, se tiene que:

$$S_{eCC} = \frac{\theta_{CC} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{\psi_c}{0,33} \right)^\lambda \quad (10)$$

$$S_{ePMP} = \frac{\theta_{PMP} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{\psi_c}{150} \right)^\lambda \quad (11)$$

$$S_{ep} = \frac{\theta_p - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1-p)S_{eCC} + pS_{ePMP} \quad (12)$$

Con estos parámetros transformados, siguiendo el método de FAO, el coeficiente de estrés K_d puede esquematizarse en función del contenido de humedad o la saturación efectiva como (Figura 1):

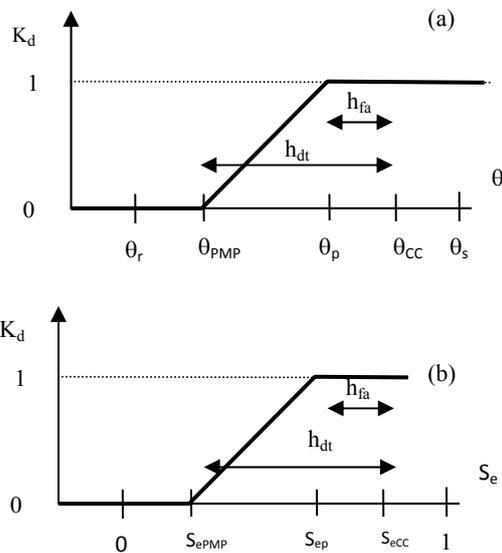


Figura 1. Coeficiente de estrés hídrico, K_d , en función de los contenidos de humedad (a) y de las saturaciones efectivas (b)

En síntesis y adaptando el método ofrecido por FAO a los términos del modelo, el coeficiente de estrés hídrico, K_d , puede expresarse como:

$$K_d = \begin{cases} 0 & S_e < S_{ePMP} \\ \frac{S_e - S_{ePMP}}{S_{ep} - S_{ePMP}} & S_{ePMP} < S_e < S_{ep} \\ 1 & S_{ep} < S_e \end{cases} \quad (13)$$

Esta ecuación se ha incorporado en el módulo que determina la evapotranspiración real del modelo SHALL.

Respecto a la metodología originaria empleada en el modelo, si bien ambas formulaciones son de carácter empírico, se considera que esta propuesta presenta dos importantes ventajas, a saber:

- conjuga un mayor número de experiencias de campo acumuladas en más de 20 años respecto a la primigenia, publicadas por un organismo reconocido como la FAO,
- los parámetros están estudiados y publicados para numerosos tipos de cultivos desarrollados en todo el mundo. Particularmente, respecto a la formulación original, elimina la incertidumbre del parámetro ψ_3 propuesto en el modelo de Feddes sobre el cual no hay definiciones precisas.

CONCLUSIONES

Se presenta como objetivo adaptar la metodología para estimar la evapotranspiración real propuesta FAO a las variables empleadas por el modelo hidráulico-hidrológico SHALL, apto para simulación continua en áreas de llanura.

Se propone una estimación de saturaciones efectivas extremas, desde un punto de vista agrológico, capacidad de campo y punto de marchitez permanente, conforme a las curvas de retención ajustadas con la fórmula de Brooks-Corey.

Siguiendo los lineamientos del método propuesto por FAO, se presenta una estimación de la saturación efectiva límite para la cual por debajo de la misma las coberturas vegetales comienzan a restringir el abastecimiento de la evapotranspiración potencial, y del coeficiente de estrés hídrico en función de las saturaciones límites calculadas, para estimar, finalmente, la evapotranspiración real en función de variables que contempla el modelo SHALL.

Respecto a la formulación originaria empleada en el modelo se considera que esta propuesta presenta ventajas comparativas respecto a los parámetros involucrados y la experiencia recogida y publicada por un organismo reconocido como la FAO.

BIBLIOGRAFIA

- Allen R., Pereira, L., Raes D., Smith, M. (2006). FAO. Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO. Riego y Drenaje N° 56. ISSN 0254-5293. © FAO 2006.
- Brooks, R.H. and Corey, A.T. (1964) Hydraulic Properties of Porous Media and Their Relation to Drainage Design. *Transactions of the ASAE*, 7, 26-28. <https://doi.org/10.13031/2013.40684>
- Caamaño Nelli, G. y Zimmermann, E. (1990). Tipología de los Sistemas Hidrológicos Superficiales. *XVI Congreso Nacional Asociación Argentina Geofis. y Geod.*. Bahía Blanca. Argentina.
- Feddes, R.A. (1982). *Simulation of plant growth and crop production*. Ed.: Penning de Vries, F.W.T., van Laar, H.H. Wageningen. ISBN 9789022008096 - p. 194 - 209.
- Fertonani, M., y Prendes, H. (1983) Hidrología en áreas de llanura. Aspectos Conceptuales Teóricos y Metodológicos. *Coloquio de Hidrología de Grandes Llanuras*. Olavarría. Argentina.,1, p 119-156.
- Kovacs, G. (1983). General Principles of Flatlands Hydrology. *Coloquio de Hidrología de Grandes Llanuras*. Olavarría. Argentina, p 297-357.
- Kruse, E. y Zimmermann, E. (2002). Hidrogeología de grandes llanuras. Particularidades en la llanura pampeana (Argentina). In: *Workshop publication on Groundwater and Human development* (pp. 2025-2038).
- Méndez Zacarías J. y Zimmermann E. (2011). Uso de Sistemas de Información Geográfica para Parametrización de Modelos de Simulación Hidrológica en Llanuras. *XXIII Congreso Nacional del Agua y VI Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*. Resistencia. Argentina.
- Tricart, J. (1983) L'Hydrologie des Grans Plains, Quelques Reflexions Methodologiques. *Coloquio de Hidrología de las grandes Llanuras*. Olavarría, Argentina, 2, p 1191-1193.

Zimmermann E. y Riccardi, G. (2000) Modelo de simulación hidrológica superficial para áreas de llanura. *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Córdoba. Argentina.

Zimmermann, E. y Riccardi, G. (2003). Modelo hidrológico superficial y subterráneo desarrollado para la simulación de sistemas de llanura. 1. Aplicación en el sistema Ludueña (Santa Fe, Argentina). *Boletín Geológico y Minero*, 114(2), 147-158.

Zimmermann E. y J. Mecca (2010). Aplicación del modelo SHALL en los sistemas hidrológicos de las lagunas don Tomás y bajo Giuliani (La Pampa, Argentina) para la evaluación de impactos provocados por efluentes y escurrimientos. *I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*. Azul, Buenos Aires, Argentina.

Zimmerman, E. (2021). Esquema explícito para la solución numérica del flujo no saturado en medios heterogéneos bajo condición de niveles freáticos someros. *Cuadernos del CURIHAM*. Vol. 27, p 47-58. doi: <https://doi.org/10.35305/curiham.v27i.169>

Tipo de Publicación: ARTICULO.

Trabajo recibido el 18/06/2022 y aprobado para su publicación el 21/11/2022.

COMO CITAR

Zimmermann, E. (2022). Adaptación del Método Propuesto por FAO para Evaluar la Evapotranspiración Real en el Modelo de Simulación Hidrológica SHALL. *Cuadernos del CURIHAM*, 28, 59-64. DOI: <https://doi.org/10.35305/curiham.v28i.185>

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>)



ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA RELACIÓN ENTRE LOS ISÓTOPOS DEL OXÍGENO EN UN SISTEMA HIDROLÓGICO Y EN MOLUSCOS, EN EL ÁMBITO DE LA LLANURA PAMPEANA (BUENOS AIRES, ARGENTINA)

A PRELIMINARY ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN OXYGEN ISOTOPES IN A HYDROLOGICAL SYSTEM AND MOLLUSKS IN THE PAMPEAN PLAIN (BUENOS AIRES, ARGENTINA)

María Soledad Gualde^{(1)(2)(*)}, Sebastián Dietrich⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾, María Emilia Zabala⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁵⁾ y Sabrina Dubny⁽¹⁾⁽³⁾

⁽¹⁾ Instituto de Hidrología de Llanuras, Azul, Buenos Aires, Argentina.

⁽²⁾ Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

⁽³⁾ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina.

⁽⁴⁾ Facultad de Agronomía, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Azul, Buenos Aires, Argentina

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

(*)email: msgualde@ihlla.org.ar

RESUMEN

Los isótopos estables son utilizados ampliamente como trazadores y marcadores para evaluar los ecosistemas dado que se encuentran circulando integradamente en ellos reflejando los procesos que allí ocurren. En este trabajo, se recopiló información antecedente química e isotópica de un sistema hidrológico ubicado en las cuencas de los arroyos del Azul y Tapalqué, (ámbito de la llanura pampeana) y de conchas de moluscos fósiles y modernos del mismo sistema. El objetivo fue analizar e integrar los datos mediante diagramas hidroquímicos e isotópicos. A través del análisis del $\delta^{18}\text{O}$ se encontró que en el sistema hidrológico actual los valores isotópicos responden a un acoplamiento de procesos hidrológicos. En este sentido, se ha podido establecer que las conchas de los moluscos modernos presentan similitudes respecto a los valores isotópicos medios de sus aguas madres, las cuales reflejan los procesos hidrológicos del sistema. En cuanto a las conchas de moluscos fósiles se estableció una relación entre su paleoambiente de depositación y las lagunas del sistema hidrológico actual. De este modo, las interpretaciones ambientales en los ecosistemas, a partir del análisis del $\delta^{18}\text{O}$, se robustecen cuando se tienen en cuenta los procesos hidrológicos que ocurren en el sistema bajo estudio de forma integrada.

Palabras clave: $\delta^{18}\text{O}$, procesos hidrológicos, ecosistemas, interpretaciones ambientales.

ABSTRACT

Stable isotopes are widely used as tracers and markers, since they are circulating in ecosystems and reflect the integration of processes occurring within them. In this study, background chemical and isotopic information was collected from a hydrological system and from fossil and modern mollusk shells from del Azul and Tapalqué basins, in the Pampean plain. The objective was to analyze and integrate data using hydrochemical and isotopic diagrams. Based on the analysis of $\delta^{18}\text{O}$ it was found that in the present hydrological system the isotopic values respond to a coupling of hydrological processes. It was demonstrated that modern mollusk shells exhibit similarities with the mean isotopic values of their mother waters, which reflect the hydrological processes of the system. As regards the fossil mollusks shells, a relationship was established between their paleoenvironment of deposition and the shallow lakes of the present hydrological system. Therefore, environmental interpretations in ecosystems, based on $\delta^{18}\text{O}$ analysis, are improved when the whole set of hydrological processes occurring in the system under study are taken into account in an integrated manner.

Keywords: $\delta^{18}\text{O}$, hydrological processes, ecosystems, environmental interpretations.

INTRODUCCIÓN

Los isótopos constituyen una herramienta ampliamente utilizada en diversos campos de las ciencias y presentan una extensa gama de aplicaciones. Brindan información sobre el funcionamiento y la dinámica de los componentes que integran un mismo sistema. En el caso de los sistemas hidrológicos, el uso de herramientas isotópicas permite conocer el origen del agua, la edad y su dinámica, identificar zonas de recarga y descarga y calcular la temperatura a la que se recargan los acuíferos. Su aplicación contribuye al entendimiento del funcionamiento hidrológico actual y posibilita efectuar inferencias sobre su funcionamiento en el pasado. Es abundante la literatura científica que aborda el estudio de los procesos hidrológicos a partir de la utilización de herramientas isotópicas. A escala mundial se cuenta con los trabajos pioneros de Urey (1947), Epstein y Mayeda (1953), Dansgaard (1954) y Craig (1961). En las últimas décadas Gat (1998; 1996), Leng y Marshall (2004), Darling (2004), Sprenger et al. (2016), Passey y Levin (2021), entre otros, han utilizado además, a los isótopos estables, como indicadores paleoclimáticos. A escala local se cuenta con los trabajos de Dapeña y Panarello (2004), Dapeña et al. (2010), Martínez et al. (2011, 2013, 2016), Zabala et al. (2021; 2015, 2016; 2011), Glock Galli et al. (2018), Quiroz Londoño et al. (2015), Calvi et al. (2022), entre muchos otros, que han aplicado técnicas isotópicas para identificar y explicar diferentes procesos.

Los isótopos estables constituyen marcadores y trazadores que están presentes en los sistemas naturales, su distribución refleja una historia integrada de los procesos metabólicos y físicos ocurridos en los ecosistemas (Peterson y Fry, 1987). Pueden ser aplicados ya sea para describir un sistema hidrológico como también para monitorear perturbaciones, tales como cambios en el clima o la ocurrencia de inundaciones/sequías e incendios, entre otros. Por otro lado, contribuyen a la identificación de cuál o cuáles componentes del ecosistema son más sensibles a cierta perturbación. Por ejemplo, Kelemen et al. (2017), han evaluado el $\delta^{18}\text{O}$ del agua de los ríos y el $\delta^{18}\text{O}$ de las conchas de moluscos de agua dulce que habitan en ellos, concluyendo que ambos indicadores isotópicos empleados en conjunto, robustecen los balances de precipitación- evaporación y registran mejor los cambios ocurridos en los sistemas fluviales. Por su parte, Zanchetta et al. (2017), han demostrado que el

análisis del $\delta^{18}\text{O}$ del carbonato pedogénico junto con el $\delta^{18}\text{O}$ del carbonato de caracoles terrestres son buenos indicadores y refuerzan la estimación de las precipitaciones y variaciones de la temperatura atmosférica durante el Cuaternario. Estos trabajos, entre otros, confirman el potencial de las herramientas isotópicas para el estudio de los medios físicos y bióticos con un enfoque integrador, las cuales reflejan la interacción que ocurre en los ecosistemas.

En el ámbito de la llanura pampeana bonaerense, el estudio de los procesos hidrológicos ha sido abordado mediante la utilización de variadas herramientas isotópicas. Se ha caracterizado tanto el agua de lluvia como el agua superficial (arroyos, lagunas) y subterránea y se han identificado los principales procesos que condicionan el movimiento y distribución del agua en zonas de llanura (Dapeña y Panarello, 2004; Glock-Galli et al., 2020; Quiroz Londoño et al., 2020; Romanelli et al., 2014; Zabala et al., 2021). Respecto al análisis de isótopos estables sobre el medio biótico, De Francesco y Hassan (2013), hacen hincapié en realizar dichos estudios sobre las conchas de moluscos, ya que estos juegan un rol fundamental en los ecosistemas continentales, no sólo por su diversidad sino también por su amplia distribución temporal y espacial, convirtiéndolos en buenos indicadores para efectuar interpretaciones ambientales tanto para el tiempo presente (moluscos modernos) como para el pasado (moluscos fósiles). Los estudios isotópicos que se efectúan sobre estos organismos evalúan las relaciones de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ encontrados en el carbonato de sus conchas, las cuales están controladas por ciertos aspectos geoquímicos y ecológicos del cuerpo de agua que los hospeda durante el crecimiento de la concha (Epstein y Mayeda, 1953; Goodfriend et al., 1989; Lemeille et al., 1983; Urey, 1947, entre otros). La composición isotópica del agua ambiental y su temperatura son los factores principales que determinan el contenido de $\delta^{18}\text{O}$ en el carbonato de las conchas de los moluscos de agua dulce (Abell, 1985). Se ha encontrado una fuerte relación entre el $\delta^{18}\text{O}$ de las conchas y el $\delta^{18}\text{O}$ promedio de las precipitaciones locales (Bao et al., 2019). Por otro lado, el enriquecimiento isotópico de $\delta^{18}\text{O}$ en las aguas debido al proceso de evaporación, especialmente en sistemas lacustres de ambientes áridos y/o cálidos, explica en gran medida el $\delta^{18}\text{O}$ encontrado en las conchas de los organismos que habitan dichos ambientes (Wurster y Patterson, 2001). Sin embargo, en el caso de los caracoles terrestres higrófilos, esta

relación es un tanto más compleja. En estos casos, se estima que el contenido de $\delta^{18}\text{O}$ de las conchas está controlado por el vapor atmosférico y el agua que ingiere el organismo, ya sea desde la vegetación o desde cuerpos de agua (Prendergast et al., 2015).

En resumen, la relación entre el $\delta^{18}\text{O}$ de cada componente del sistema hidrológico y el $\delta^{18}\text{O}$ de las conchas de los moluscos que habitan o habitaron esos sistemas constituyen indicadores sumamente útiles para inferir las condiciones ambientales, dado que los isótopos del oxígeno se encuentran circulando integradamente en los ecosistemas.

OBJETIVOS

En este trabajo se analizará la relación entre el $\delta^{18}\text{O}$ de conchas de moluscos fósiles y modernos con el $\delta^{18}\text{O}$ de muestras de agua (precipitaciones, agua superficial y subterránea) de un sistema hidrológico actual, con el objetivo de establecer los procesos hidrológicos que controlan la impronta isotópica de las conchas, a partir de las cuales se realizan interpretaciones paleoambientales. Para evaluar esta relación, se utilizarán datos antecedentes de $\delta^{18}\text{O}$ de moluscos fósiles (Pleistoceno Superior, ~35-34 ka A.P.) y modernos colectados en el arroyo Tapalqué y muestras de agua procedentes de las precipitaciones, los arroyos del Azul y Tapalqué, lagunas de la región y el acuífero Pampeano en el ámbito de las cuencas homónimas.

ÁREA DE ESTUDIO

Características generales

El área de estudio se ubica en el ámbito de la llanura pampeana, en el centro de la provincia de Buenos Aires, entre los arroyos del Azul y Tapalqué. Ambos cursos de agua integran la red hidrográfica de la margen sur de la cuenca del río Salado y son afluentes del mismo (Figura 1). Las cuencas de los dos arroyos, colindantes entre sí, están caracterizadas por un típico paisaje de llanura y comparten características geológicas, geomorfológicas, hidrológicas, ecológicas y productivas, ya que se encuentran ubicadas en los complejos ecosistémicos Sierras Bonaerenses hacia las nacientes de los arroyos (sur de la región) y Pampa Deprimida hacia el norte (Morello et al., 2012). Estructuralmente, se emplazan entre las unidades de las Sierras de Tandilia hacia el sur y la cuenca tectónica del Salado hacia el norte (Dalla Salda et al., 2006).

Climáticamente, en el ámbito de las Sierras de Tandilia, se despliega un clima templado serrano, dónde son frecuentes los vientos desde el noroeste, excepto en invierno, cuando la región es atravesada por los frentes fríos del suroeste. Las sequías son eventos poco probables, mientras que las lluvias son más frecuentes pero con baja intensidad y corta duración. El sector extraserrano de ambas cuencas se ubica dentro de una zona con clima templado, caracterizada como muy lluviosa debido al ingreso de masas húmedas desde el Océano Atlántico Sur. Los eventos de sequía son frecuentes pero de baja duración e intensidad, mientras que los ciclos húmedos presentan menor frecuencia, con una intensidad intermedia y una mayor duración (Aliaga et al., 2017). El promedio anual de precipitaciones obtenido de la estación meteorológica de Azul (Servicio Meteorológico Nacional, periodo 1901-2019), es de 911 mm, siendo junio el mes con menos precipitaciones registradas (31 mm) y marzo el mes más lluvioso (118 mm). En cuanto a la temperatura, el promedio anual es de 14.4 °C, con una temperatura promedio mínima de 6.7 °C para el mes de julio y una temperatura promedio máxima para el mes de enero de 21.6 °C (periodo 1966-2019).

Geología, geomorfología e hidrología

La zona bajo análisis está conformada por una sucesión sedimentaria que se apoya en discordancia sobre rocas proterozoicas del basamento ígneo-metamórfico del Sistema de Tandilia y en sectores, sobre pelitas, areniscas y calizas del Neoproterozoico. De dicha sucesión, sólo afloran los primeros metros, generalmente en las barrancas de los arroyos o en cortes de rutas y caminos rurales. A rasgos generales, estos sedimentos representan antiguas divisorias de valles y cursos fluviales con algunas depresiones de pendiente muy suave que correspondieron a sistemas de lagunas. Textualmente estas unidades se describen como limos, limos arcillosos y arenas finas con intercalaciones de clastos tamaño grava fina a media, con niveles de carbonato de calcio. Fidalgo et al. (1986) describieron estas unidades en las barrancas del arroyo Tapalqué y las nombraron como Formación Luján, la cual se compone del Miembro Guerrero (base) y el Miembro Río Salado (techo). En la base del Miembro Guerrero, Dillon y Rabassa (1985), describen una sucesión limo arcillosa y areno limosa con colores amarrados que nombraron como Miembro La Chumbiada. Fidalgo et al. (1986) distinguieron importantes niveles de paleosuelos representativos del límite

Pleistoceno-Holoceno, que separan el Miembro Guerrero del Miembro Río Salado. El Miembro Guerrero, muestra un origen subacuático y está compuesto por arena fina y arena limosa. En la base presenta coloración marrón a marrón amarillento (Miembro La Chumbiada) que transicionalmente pasa a arena limosa y limo arenoso, verde amarillento a verde grisáceo. Por su parte, los sedimentos del Miembro Río Salado (Fidalgo, 1983) se apoyan en discordancia, y por sectores en forma transicional, sobre los depósitos del Miembro Guerrero. Están conformados por limos arenosos a arcillosos, de coloración grisácea a blanquecina. Según estudios paleontológicos efectuados sobre mamíferos de Buenos Aires, la Formación Luján presenta edades que van desde el Pleistoceno

Superior al Holoceno Inferior (Soibelzon, et al., 2019). Para los depósitos de las barrancas del arroyo del Azul, si bien no se cuenta con una sección tipo en la bibliografía, los estudios de afloramiento (Zárate et al., 2010) y las correspondientes correlaciones de los primeros metros de perforaciones en campo, coinciden con las descripciones litológicas y estratigráficas correspondientes a la Formación Luján. Cabe mencionar que a estos depósitos de la Formación Luján de origen fluvial y palustre, se los correlaciona espacio-temporalmente con la Formación La Postrema (Fidalgo, et al., 1986), de génesis típicamente eólica y asociada a mantos de loess depositados fundamentalmente en las divisorias de valle (Zárate, 2005).

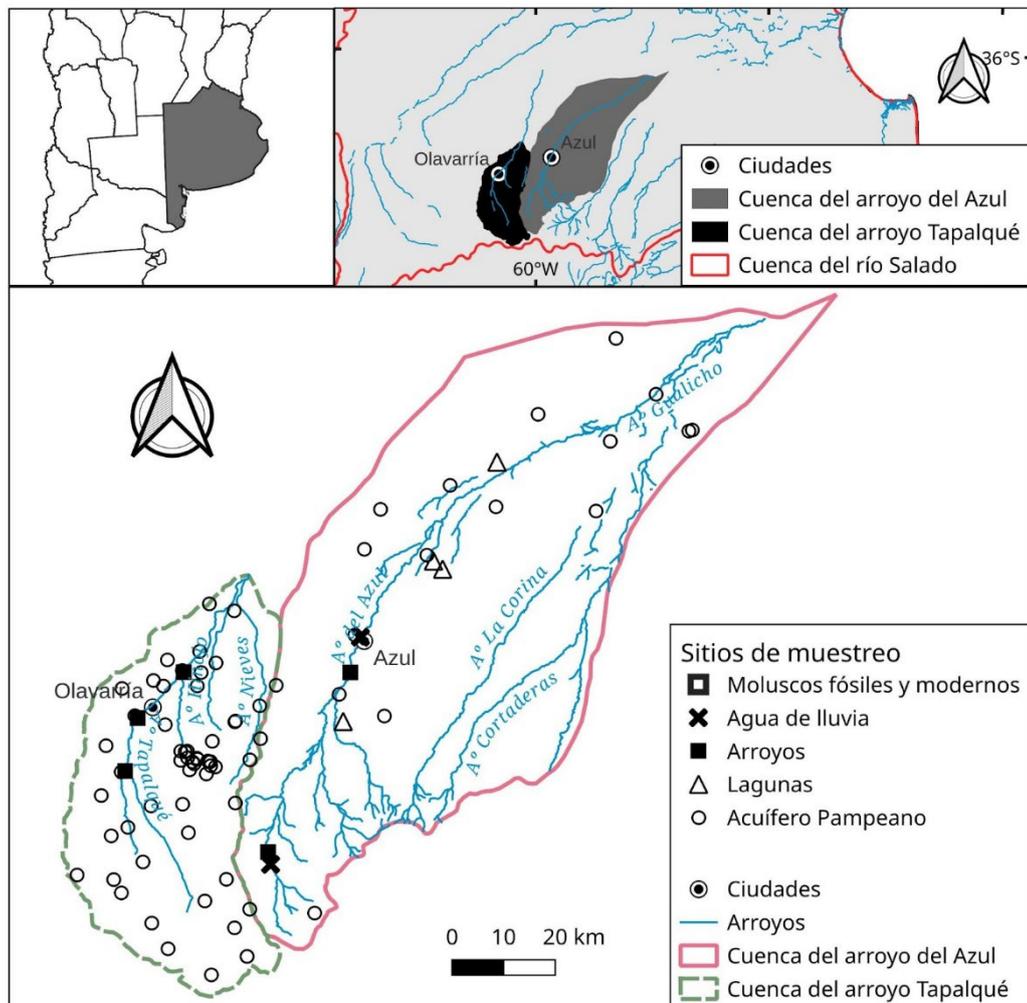


Figura 1: Mapa de ubicación de la zona de estudio y sitios de muestreo de conchas y aguas.

Por su parte, el acuífero de la región, se conforma en su sección superior por las formaciones Luján y La Postrera, mientras que en su sección inferior por los Sedimentos Pampeanos (Fidalgo, 1983). Estos últimos, de edad Plio-Pleistoceno, están compuestos por limos arcillo arenosos y arcillas limo arenosas, con tramos edafizados y sectores con acumulaciones calcáreas. Para los Sedimentos Pampeanos se infiere una génesis eólica y sedimentación en medios ácueros, lacustres y/o fluviales (Zárate, 2005). Estas unidades conforman un único acuífero sedimentario multicapa denominado acuífero Pampeano.

Geomorfológicamente, el área serrana conformada por las Sierras de Tandilia, corresponde a una superficie de planación regional muy antigua, ascendida y posteriormente disectada. En esta zona son comunes los cerros aislados en cuyas cúspides afloran rocas del basamento ígneo-metamórfico precámbrico, alcanzando una altitud de 450-500 m. Por sectores aflora la roca desnuda, en forma de bochones o subhorizontalmente, generando un relieve suavemente ondulado. Los pedemontes serranos están formados por mantos de loess de pocos metros de espesor, depositados sobre una costra calcárea (tosca), que suele aflorar en las lomas. La red de drenaje es bien definida y está formada por arroyos encajonados que bajan de las sierras y luego se vuelven temporarios o se insumen en la llanura (Morello et al., 2012; Zárate et al., 2010). Este sector constituye la cabecera de los arroyos del Azul y Tapalqué. Respecto al área extraserrana, se presenta como una extensa planicie de relieve muy suave. El paisaje está caracterizado por geoformas eólicas, fluviales y palustres, que se superponen entre sí generando un complejo mosaico de unidades sedimentarias. Entre las geoformas eólicas de acumulación se destacan los mantos de loess, las dunas parabólicas y las dunas longitudinales, cuya orientación permite inferir una acción dominante de los vientos desde el cuadrante oeste-sudoeste. Las geoformas eólicas de erosión comprenden las cubetas de deflación. Las mismas exhiben dimensiones variables y se distribuyen en casi todo el ámbito del dominio extraserrano. (Zárate et al., 2010). Fidalgo (1983) estableció que la zona está conformada por amplios abanicos aluviales de bajo gradiente topográfico. Según Zárate et al. (2010), esta interpretación estaría vinculada con el diseño de la red de drenaje de tipo distributivo que se desarrolló para ambas cuencas. Este patrón de drenaje conforma líneas sin encauzamiento o con encauzamiento moderado. En ambas cuencas, el gradiente y orientación general que presenta el diseño distributivo está controlado

por una planicie de agradación, que exhibe una costra calcárea estratiforme (tosca) bastante regular en el espacio con pendientes muy bajas (Zárate et al., 2010; Morello et al., 2012).

Los arroyos, tanto del Azul como Tapalqué, son los típicos cursos de agua de la llanura pampeana con un cauce principal bien establecido y de baja sinuosidad en cuenca alta, la cual aumenta hacia cuenca baja, donde se desarrollan algunos meandros. Hacia la cuenca baja, estos cauces van perdiendo su expresión hasta el punto de desarrollar un diseño de drenaje tipo anárquico. Ambos arroyos exhiben barrancas que pueden superar los 3-4 m (especialmente en cuenca media y alta), mientras que, en otros sectores ubicados en cuenca baja, las barrancas son menores a 1 m. Las lagunas se desarrollan en las cubetas de deflación, siendo algunas temporarias en periodos secos, mientras que en los periodos húmedos se conectan entre sí a través de líneas de drenaje. Estos cuerpos de agua en general presentan forma circular a semicircular, con escasa profundidad y extensión areal (Zárate et al., 2010).

En esta zona el nivel freático fluctúa muy próximo a la superficie del terreno. En el caso de la cuenca del arroyo del Azul, varía entre 6 m aproximadamente en cuenca alta y menos de 1 m en cuenca baja, lo que favorece la evaporación y evapotranspiración directamente desde el acuífero (Marcovecchio y Varni, 2020). El acuífero Pampeano se recarga por precipitaciones, principalmente en otoño y primavera, con tasas de recarga anual que oscilan entre el 20% de la precipitación en cuenca alta, entre 10 y 20% en cuenca media y menos de 10% en cuenca baja (Varni et al., 2013). El acuífero en esta región es sumamente relevante ya que tanto los arroyos como las lagunas, son alimentados a través de flujos locales de agua subterránea. Estos aportes son variables de acuerdo a la profundidad del nivel freático. En el sector de cuenca alta, Guevara Ochoa et al. (2019) determinaron una descarga media anual de agua subterránea al arroyo del Azul de 34 mm, mientras que la recarga media anual del arroyo hacia el acuífero es de 1.4 mm. Estos autores determinaron además, que desde invierno a primavera, las descargas medias mensuales del acuífero al arroyo son mayores (un promedio de 3.3 mm) mientras que hacia las estaciones de verano a otoño disminuyen (un promedio de 2.8 mm). El caudal para el arroyo del Azul en la estación de verano es de 0.18 m³/s mientras que en primavera es de 1.02 m³/s (Zabala et al., 2021). Por su parte, el caudal básico para el arroyo Tapalqué es de 1.0 m³/s (Kruse et al., 1993).

MATERIALES Y MÉTODOS

Datos antecedentes de la cuenca del arroyo del Azul

Para la caracterización hidroquímica de las muestras de agua de lluvia, agua superficial (arroyo del Azul y lagunas) y agua subterránea (acuífero Pampeano), se utilizaron los datos publicados por Zabala et al. (2020). Esta información es de libre acceso y la misma puede descargarse desde <https://data.mendeley.com/datasets/b34kg4jx7r/1>. Se cuenta con 40 análisis físico-químicos y 34 análisis isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) de agua de lluvia que cubren el periodo 2010-2019, procedentes de dos colectores localizados en los sectores alto y medio de la cuenca; 4 análisis físico-químicos e isotópicos (febrero y noviembre de 2018) procedentes de 2 sitios de muestreo localizados sobre el arroyo del Azul (cuenca alta y media); 3 análisis físico-químicos e isotópicos (noviembre de 2019) procedentes de cuatro lagunas localizadas en los sectores alto y medio de la cuenca; 67 análisis físico-químicos y 17 análisis isotópicos (febrero y septiembre de 2018 y 2019) procedentes de 17 piezómetros (profundidad <10 m) distribuidos homogéneamente dentro de la cuenca (Figura 1). Las relaciones isotópicas tanto para el oxígeno como el hidrógeno, se reportan relativas a la media estándar del agua oceánica de Viena (Vienna Standard Mean Ocean Water - V-SMOW), empleando la notación delta en partes por mil (‰).

Las rectas meteóricas locales (RML) utilizadas en este trabajo son las publicadas por Zabala et al. (2021). Dichas rectas se calcularon a partir de los análisis isotópicos efectuados sobre las muestras de agua de lluvia de los dos colectores mencionados anteriormente: Establecimiento La Germania (LG) en cuenca alta e Instituto de Hidrología de Llanuras (ciudad de Azul, IHLLA), en cuenca media. Las ecuaciones resultantes fueron las siguientes: $\delta^2\text{H} = 8.3(\pm 0.5)\delta^{18}\text{O} + 16.2(\pm 3.0)$ para el colector de La Germania (RML LG) y $\delta^2\text{H} = 9.4(\pm 0.4)\delta^{18}\text{O} + 21.2(\pm 2.3)$ para el colector del IHLLA (RML IHLLA). Se considerará, a los fines de este trabajo, dado que no hay publicados datos isotópicos del agua de lluvia de la cuenca del arroyo Tapalqué, que las características isotópicas de las lluvias de la cuenca del arroyo del Azul son representativas de las lluvias de la región.

Datos antecedentes de la cuenca del arroyo Tapalqué

Los datos antecedentes utilizados para la caracterización hidroquímica e isotópica ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) de esta cuenca proceden de Glok Galli et al. (2020). Los datos son de libre acceso y han sido descargados desde:

<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.13027341.v2>.

De esta base de datos, se han seleccionado 14 muestras de agua superficial procedentes de 3 sitios localizados sobre el arroyo Tapalqué, los cuales se encuentran aguas arriba de la ciudad de Olavarría, en la ciudad y aguas abajo de la misma. Estos sitios fueron muestreados en invierno del año 2015 (muestra aguas arriba), y los dos restantes se muestrearon desde el año 2015 a 2019 (excepto 2016) cubriendo los meses de primavera, verano, invierno y otoño. La razón de la selección de los datos de estos 3 sitios de muestreo se debe a que las muestras de las conchas de moluscos recolectadas por Bonadonna et al. (1999), fueron tomadas en las barrancas de dicho arroyo en el área urbana (Ver detalle más abajo). Por su parte, los datos hidroquímicos e isotópicos que describen el acuífero Pampeano en la cuenca del arroyo Tapalqué provienen de 57 perforaciones someras distribuidas en toda la cuenca, que en total cuentan con 95 análisis químicos y 50 isotópicos. Los análisis químicos corresponden a muestras tomadas en el año 2002 y luego en el periodo 2010-2019, mientras que los análisis isotópicos cubren el periodo 2015-2019 (Figura 1). Las relaciones isotópicas tanto para el oxígeno como el hidrógeno, se reportan relativas a la media estándar del agua oceánica de Viena (Vienna Standard Mean Ocean Water - V-SMOW), utilizando la notación delta en partes por mil (‰).

Los datos antecedentes de $\delta^{18}\text{O}$ medidos en las conchas de los moluscos, utilizados en este trabajo, proceden del trabajo de Bonadonna et al. (1999). Estos autores midieron el $\delta^{18}\text{O}$ de las conchas de moluscos fósiles y modernos provenientes del arroyo Tapalqué. Las conchas fósiles fueron recolectadas en las barrancas del arroyo, en un perfil que exhibe el Miembro Guerrero (parte del Pleistoceno Superior) en las inmediaciones de la ciudad de Olavarría. Bonadonna et al. (1999) agruparon estos ejemplares en una asociación fósil que denominaron Serie Olavarría, la cual reúne a: *Littoridina parchappei* (Actualmente *Heleobia parchappii*, nombrada de este modo a partir de aquí) y *Biomphalaria* sp., ambos moluscos de agua dulce, y *Succinea meridionalis*, un caracol terrestre. Paralelamente, estos mismos autores

midieron el $\delta^{18}\text{O}$ en conchas de moluscos modernos que habitan en el arroyo Tapalqué, en un sector de la ciudad de Olavarría. Los organismos analizados fueron *Chilina* sp. y *Biomphalaria* sp., ambos moluscos de agua dulce.

Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ del carbonato de las conchas fueron reportados de acuerdo al estándar Belemnita PeeDee (PeeDee Belemnite-PDB) establecido para

ese momento (año 1999), en por mil (‰) empleando la notación delta. Por último, estos mismos autores dataron las conchas fósiles de *Heleobia parchappii* de la Serie Olavarría, empleando el método de ^{14}C , cuyas edades resultantes fueron expresadas en años convencionales A.P. (anterior a 1950; Kromer et al., 1996). En la Tabla 1, se presentan los datos de $\delta^{18}\text{O}$ medidos en los moluscos fósiles y modernos y las dataciones realizadas sobre *Heleobia parchappii*.

Tabla 1: Valores de $\delta^{18}\text{O}$ del carbonato de conchas modernas y fósiles.
(S/D: sin datos; extraído y modificado de Bonadonna et al., 1999).

Conchas de moluscos modernos					
Muestra	<i>Biomphalaria</i> sp. (n=2)	<i>Chilina</i> sp. (n=1)	Distancia al lecho (m)		
$\delta^{18}\text{O}$ (‰PDB)	-4.3 -3.6	-4.5	-		
Conchas de moluscos fósiles Serie Olavarría					
Muestra	<i>Biomphalaria</i> sp. (n=6)	<i>Heleobia parchappii</i> (n=10)	<i>Succinea meridionalis</i> (n=12)	Distancia al lecho (m)	Edad ^{14}C
$\delta^{18}\text{O}$ (‰ PDB)	S/D	-1.3	1.8	0.85 (Base Mb. Guerrero)	35300 + 1300, -1100
	S/D	S/D	-0.4	1.3	
	S/D	S/D	0.1	1.4	
	0.2	-1.3	1.2	1.5	
	-1.9	0.3	3.7	1.9	
	-2.6	-2.6	2.8	2.3	
	-2.2	-2.1	0.6	2.7	
	S/D	-0.4	0.1	2.9	
	S/D	-0.9	0.2	3.2	
	S/D	-0.5	-0.1	3.5	34500 ± 100
	-1.0	-1.0	-0.7	3.9	
-2.9	1.1	-0.5	4.6 (Techo Mb. Guerrero)		

*La edad con ^{14}C se efectuó sobre conchas de *Heleobia parchappii*.

Metodología aplicada

La metodología de trabajo consistió en la recopilación, análisis e integración de la información antecedente tanto química como isotópica correspondiente a muestras de agua (precipitaciones, superficial y subterránea) y a conchas de moluscos fósiles y modernos. Los datos químicos fueron interpretados a través de diagramas de distribución espacial y de diagramas de Piper. Estos últimos se

efectuaron agrupando los datos según dos periodos de muestreo: invierno y primavera-verano. Por su parte, los datos isotópicos medidos en aguas superficiales y subterráneas fueron interpretados en función de las rectas meteóricas locales y recta de evaporación, a través de gráficos de tipo $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$. La integración de los datos isotópicos del agua y de las conchas de los moluscos fueron analizados mediante la utilización de gráficos de caja. Se ha incluido en cada caja el valor medio de $\delta^{18}\text{O}$ de cada

conjunto de datos. La incorporación de este último estadístico, viene ligado principalmente a los valores del $\delta^{18}\text{O}$ de las conchas de moluscos fósiles. Los valores individuales de $\delta^{18}\text{O}$ de conchas fósiles de gastrópodos de agua dulce que, generalmente, crecen en un año, no son representativos de la composición isotópica promedio de la especie durante el tiempo de depositación de los sedimentos (Apolinarska et al., 2015), por lo que los valores medios arrojan resultados más robustos a la hora de hacer interpretaciones ambientales.

RESULTADOS

Descripción de la información antecedente

Cuenca del arroyo del Azul

Caracterización química e isotópica del agua de lluvia, agua superficial y agua subterránea

Las muestras de agua menos mineralizadas del sistema hidrológico son las de lluvia. Los valores de conductividad eléctrica (CE) varían entre 14 y 125 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un valor medio de 55 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que el pH varía entre 5.1 y 7.8, con un valor medio de 6.7 (Figura 2). Con respecto a las muestras de agua superficial, la CE del arroyo del Azul varía entre 758 y 809 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con un valor medio de 778 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que el pH varía entre 7.9 y 8.4, con un valor medio de 8.2 (Figura 2). En el caso de las lagunas, la CE varía entre 901 y 1126 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un valor medio de 1013 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 2), mientras que el pH varía entre 7.8 y 8.7, con un valor medio de 8.4 (Figura 2). La CE del acuífero freático varía entre 608 y 3840 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un valor medio de 1433 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 2), y el pH oscila entre 7.2 y 8.1 con un valor medio de 7.7.

La composición isotópica del agua de lluvia en los sectores alto y medio de la cuenca varía entre -9.0 y -4.1 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y entre -62.0 y -19 ‰ para $\delta^2\text{H}$. Los valores medios ponderados de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ son -7.0 ‰ y -41.6 ‰, respectivamente, para las estaciones de otoño e invierno. En cuanto a las estaciones de primavera y verano, los valores medios ponderados de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ son -5.3 ‰ y -27.8 ‰, respectivamente. Para efectuar este cálculo se utilizaron los valores de precipitaciones acumuladas (mm) del colector de agua de lluvia ubicado en el IHLLA. Respecto a los valores de exceso de deuterio, varían entre +4 y +18 ‰, con un promedio de +14.2 ‰. Por otro lado, la composición isotópica del agua del arroyo del Azul varía entre -5.5 ‰ y -4.7 ‰ para el $\delta^{18}\text{O}$ y entre -

30.0 ‰ y -28.0 ‰ para el $\delta^2\text{H}$, con un promedio de -5.1 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -29.0 ‰ de $\delta^2\text{H}$. El valor isotópico mínimo y máximo de $\delta^{18}\text{O}$ en las lagunas oscila entre -0.6 y +10.0 ‰, mientras que en el caso del $\delta^2\text{H}$ varía entre -6.0 y +53.0 ‰ en tanto que el contenido isotópico promedio para el $\delta^{18}\text{O}$ y el $\delta^2\text{H}$ es de +3.3 ‰ y +16.0 ‰, respectivamente. Finalmente, la composición isotópica del acuífero freático varía entre -6.4 ‰ y -3.9 ‰ en cuanto al $\delta^{18}\text{O}$ y entre -41.0 ‰ y -25.0 ‰ con respecto al $\delta^2\text{H}$. Los valores medios de $\delta^{18}\text{O}$ y de $\delta^2\text{H}$ son -5.3 ‰ y -31.2 ‰, respectivamente.

Cuenca del arroyo Tapalqué

Caracterización química e isotópica del agua superficial y agua subterránea

Los valores de CE del agua del arroyo Tapalqué varían entre 811 y 1233 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un valor medio de 964 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 2), mientras que el pH varía entre 7.3 y 9.1, con un valor medio de 8.2. Los valores de CE del agua subterránea del acuífero Pampeano varían entre 585 y 1932 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un valor medio de 850 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 2), con un pH que oscila entre 7.0 y 8.5 y una media de 7.4. Para el arroyo Tapalqué, los contenidos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ varían entre -5.5 ‰ y -2.8 ‰ y entre -29.2 ‰ y -17.3 ‰, respectivamente, siendo los valores medios de $\delta^{18}\text{O}$ -4.3 ‰ y de $\delta^2\text{H}$ -25.1 ‰. En lo que concierne al acuífero Pampeano, el contenido de $\delta^{18}\text{O}$ exhibe un valor mínimo de -6.7 ‰ y un máximo de -3.6 ‰, mientras que el $\delta^2\text{H}$ presenta un mínimo de -32.2 ‰ y máximo de -23.2 ‰. Los valores isotópicos medios para el $\delta^{18}\text{O}$ y el $\delta^2\text{H}$ son -5.4 ‰ y -29.7 ‰, respectivamente.

Composición isotópica de las conchas de los moluscos modernos y fósiles

Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de las conchas fósiles de *Biomphalaria* sp., de la Serie Olavarría, van desde -2.9 ‰ a +0.2 ‰, con un promedio de -1.7 ‰ (Tabla 1). Respecto a *Heleobia parchappii*, también integrante de la Serie Olavarría, presenta un rango que se extiende desde -2.6 ‰ a +1.1 ‰, siendo su valor medio de -0.9 ‰. Por su parte *Succinea meridionalis*, el ejemplar terrestre de esta asociación fósil, presenta un mínimo de -0.7 ‰ y un máximo de +3.7 ‰, siendo el promedio de +0.7 ‰. En cuanto a los moluscos de agua dulce modernos, los valores isotópicos de las conchas de *Biomphalaria* sp. exhiben valores de $\delta^{18}\text{O}$ -4.3 y -3.6 ‰, mientras que *Chilina* sp. presenta un valor único de -4.5 ‰.

La datación con ^{14}C a partir de las conchas fósiles

de *Heleobia parchappii* (Serie Olavarría), data de 35-34 ka A.P., representando un intervalo muy corto de tiempo de no más de 2-3 mil años. Este

rango de edades se encuentra en una ventana temporal ubicada hacia el tramo final del Pleistoceno Superior.

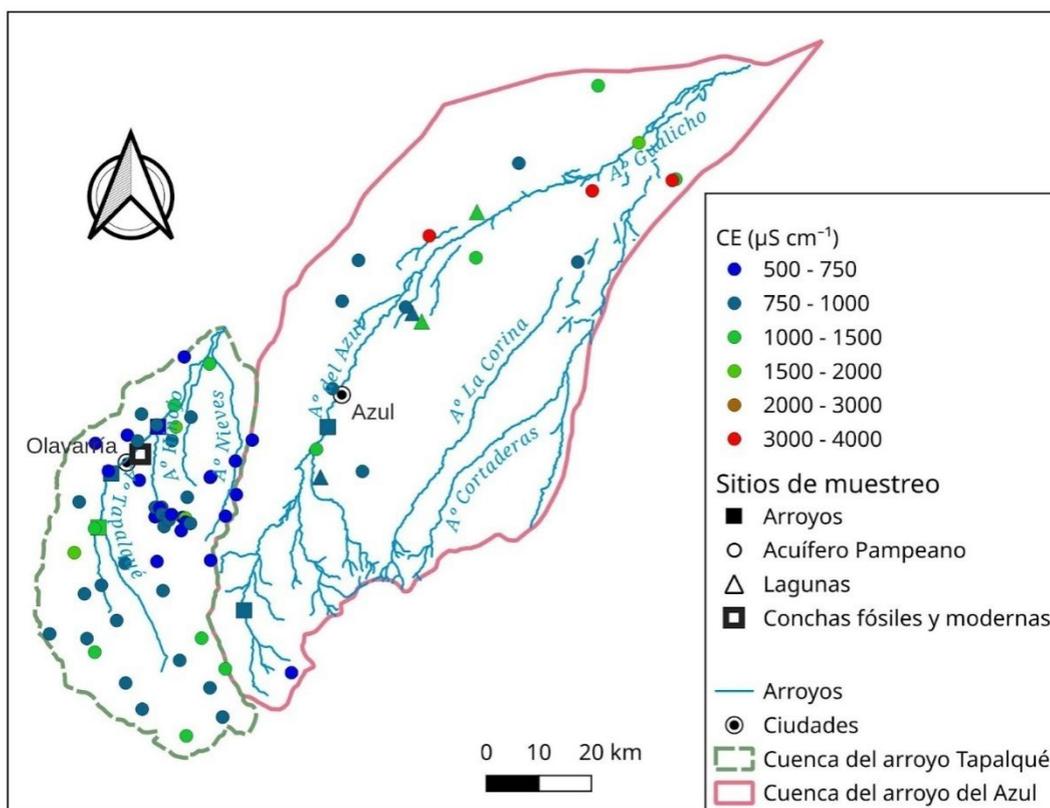


Figura 2. Distribución espacial de la conductividad eléctrica (CE) promedio del agua en las cuencas de los arroyos del Azul y Tapalqué. Las muestras corresponden a aguas superficiales (arroyos y lagunas) y al acuífero Pampeano. Se muestra el sitio de recolección de las conchas fósiles y modernas (Bonnadona et al., 1999).

Análisis de la información química e isotópica antecedente procedente de muestras de agua de ambas cuencas hidrológicas

Análisis de los datos químicos

Al analizar la CE (Figura 2), a grandes rasgos se observa que las aguas del arroyo del Azul son menos salinas que las aguas del arroyo Tapalqué. En el caso del arroyo del Azul se observa que existe, en promedio, un pequeño aumento de la mineralización de las aguas desde la cuenca alta (769 $\mu\text{S}/\text{cm}$) hacia la cuenca media (785 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Por su parte el arroyo Tapalqué, muestra una mayor CE (1201 $\mu\text{S}/\text{cm}$) en el sector de cuenca media, la cual va disminuyendo (950 $\mu\text{S}/\text{cm}$) hacia aguas abajo de Olavarría, donde se reportan las muestras menos salinas (Figura 2). En lo que respecta a las lagunas, se observa que todas presentan conductividades que van en

aumento, aquellas menos salinas están ubicadas en cuenca alta mientras que las de mayor salinidad en cuenca media, en promedio constituyen los cuerpos de agua superficial más salinos del sistema con una CE promedio de 1013 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 2). Considerando el agua subterránea, para el caso de la cuenca del arroyo del Azul los valores de CE más bajos se encuentran en cuenca alta y van aumentando progresivamente hacia cuenca media y baja, en donde se reportan las aguas subterráneas de mayor salinidad (Figura 2). Para la cuenca del arroyo Tapalqué, la CE es un tanto más variable, dado que los valores más altos se observan tanto en cuenca alta como en cuenca baja, existiendo una zona en cuenca media con los valores más bajos de CE de la cuenca (Figura 2).

Por otro lado, con el objetivo de evaluar la evolución

química de las aguas del sistema hidrológico, se han agrupado las muestras en dos épocas del año contrastantes, por un lado periodo húmedo (Figura 3), que comprende los meses de diciembre a marzo, y por otro, periodo seco (Figura 4), abarcando los meses desde abril a noviembre. En lo que concierne

al carácter geoquímico de las aguas para el periodo húmedo, se observa que el arroyo del Azul presenta un tipo de agua que evoluciona de bicarbonatada sódica con alta proporción los cationes calcio y magnesio en cuenca alta, a bicarbonatada sódica en cuenca media (Figura 3).

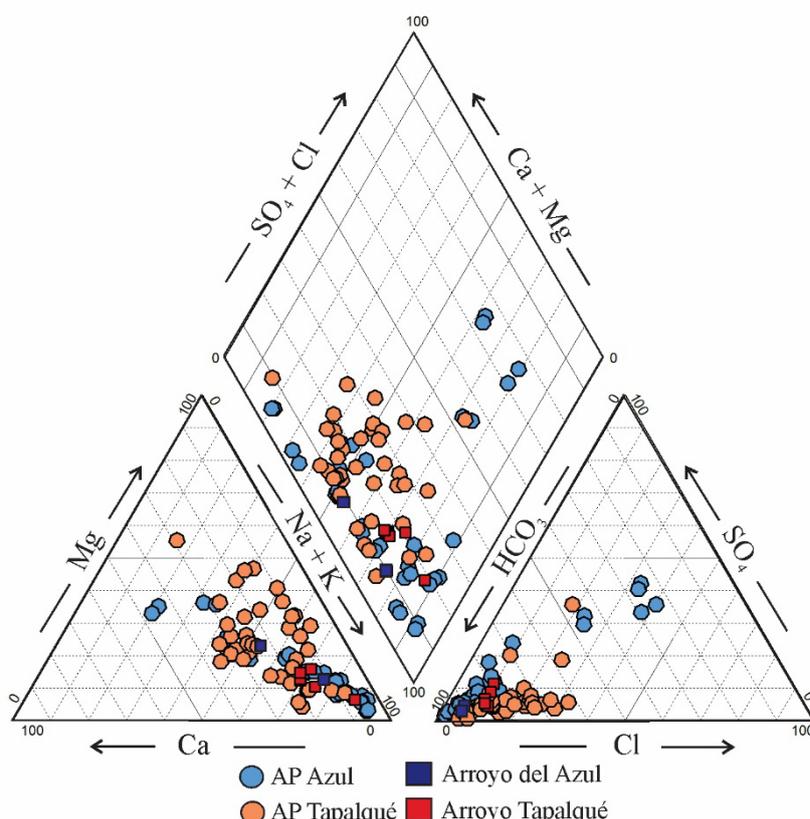


Figura 3: Diagrama de Piper representando las muestras de agua subterránea y los arroyos para ambas cuencas hidrológicas durante el periodo húmedo (diciembre a marzo). AP: Acuífero Pampeano.

En cuanto al arroyo Tapalqué el agua presenta carácter geoquímico bicarbonatado sódico en la totalidad de las muestras (Figura 3). El agua del acuífero Pampeano en el ámbito de la cuenca del arroyo del Azul para este periodo, evoluciona de bicarbonatada calcíco-magnésica en cuenca alta, pasando por bicarbonatada sódica en cuenca media, a clorurada sódica y sulfatada sódica en cuenca baja (Figura 3). El acuífero Pampeano en la cuenca del arroyo Tapalqué muestra un tipo geoquímico de agua que evoluciona de bicarbonatado calcíco y magnésico a bicarbonatado sódico, una sola muestra durante este periodo, exhibe alta proporción de cloruros y sulfatos (Figura 3).

Para el periodo seco en lo que respecta a los arroyos, la composición química de las muestras del arroyo del

Azul, se presentan de tipo geoquímico bicarbonatadas calcíco-magnésicas con alta proporción de sodio tanto en cuenca alta como media, mientras que las aguas del arroyo Tapalqué se muestran mayormente bicarbonatadas sódicas, exceptuando algunas muestras de tipo bicarbonatadas magnésicas (Figura 4). En cuanto al carácter geoquímico del agua de las lagunas de la cuenca del arroyo del Azul, las muestras correspondientes a cada una de ellas se presentan geoquímicamente diferenciadas. Si bien todas son de tipo bicarbonatado sódico, se observa un aumento del catión sodio a medida que se pasa de las lagunas ubicadas en cuenca alta a aquellas emplazadas en cuenca media. Respecto a los aniones, domina el bicarbonato con baja proporción de cloruros, este último mayormente asociado a las lagunas de cuenca media (Figura 4).

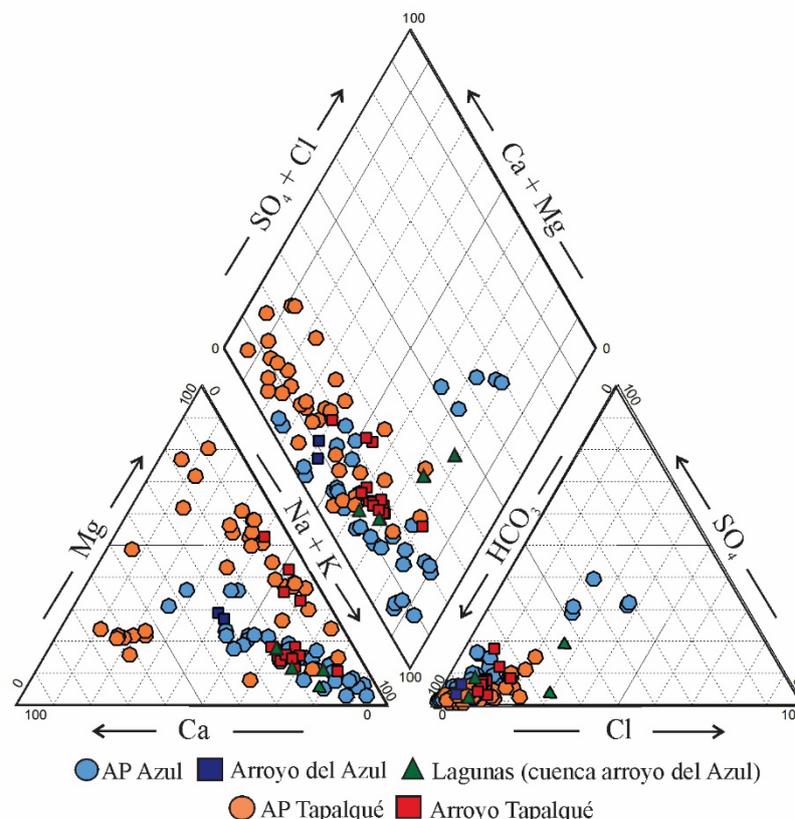


Figura 4: Diagrama de Piper representando las muestras de agua subterránea, los arroyos y lagunas para ambas cuencas durante el periodo seco (abril a noviembre). AP: acuífero Pampeano.

Respecto a la composición química mayoritaria del agua subterránea del acuífero Pampeano en la cuenca del arroyo del Azul evoluciona de bicarbonatada cálcica-magnésica en cuenca alta a bicarbonatada sódica en la parte media de la cuenca, en tanto que en la zona de cuenca baja, exhibe aguas de tipo sulfatadas-cloruradas sódicas y cloruradas sódicas (Figura 4). El agua subterránea de la cuenca del arroyo Tapalqué por su parte evoluciona de bicarbonatada cálcica y magnésica a bicarbonatada sódica, en cuenca media-baja en donde se mantiene este tipo químico de agua (Figura 4). En general en lo que respecta a la proporción de cationes, las aguas del acuífero Pampeano en la cuenca del arroyo del Azul, exhiben mayormente sodio y en menor medida calcio y magnesio, mientras que en la cuenca del arroyo Tapalqué, las aguas subterráneas contienen una mayor proporción de calcio por un lado y magnesio por el otro y en menor medida sodio. Posiblemente, las aguas subterráneas de la cuenca del arroyo Tapalqué, estén asociadas a dos fuentes diferentes, una más magnésica y otra más cálcica. Respecto a los aniones, en la cuenca del arroyo del

Azul, domina el bicarbonato y en menor proporción el sulfato y el cloruro (cuenca baja), en tanto que para la cuenca del arroyo Tapalqué, es dominante el bicarbonato.

A rasgos generales, durante el periodo húmedo el agua del sistema hidrológico, evoluciona desde una clara línea de tendencia que va de aguas bicarbonatadas cálcicas-magnésicas o magnésicas-cálcicas hacia bicarbonatadas sódicas, finalizando en cloruradas y sulfatadas sódicas (algunas muestras). Durante el periodo seco, el sistema muestra un comportamiento con mayores variaciones, se observan dos líneas de tendencias y una mayor dispersión en cuanto a los cationes, participando no sólo el sodio en altas proporciones, sino el calcio y magnesio. Esta característica, se observa claramente en la cuenca del arroyo Tapalqué, en tanto que en la cuenca del arroyo del Azul, se mantiene similar respecto al periodo húmedo. En cuanto a los aniones, domina el bicarbonato en todo el sistema, excepto para pocas muestras de cuenca baja (cuenca del arroyo del Azul) en las que dominan los cloruros y sulfatos.

Análisis de los datos isotópicos

En la Figura 5 se ha graficado la composición isotópica de los cursos y cuerpos de agua superficial y agua subterránea de las cuencas de los arroyos del

Azul y Tapalqué (Zabala et al., 2021; Glok Galli et al., 2020), junto a la recta meteórica global (Craig, 1960) y las rectas meteóricas locales calculadas para la cuenca del arroyo del Azul (Zabala et al., 2021).

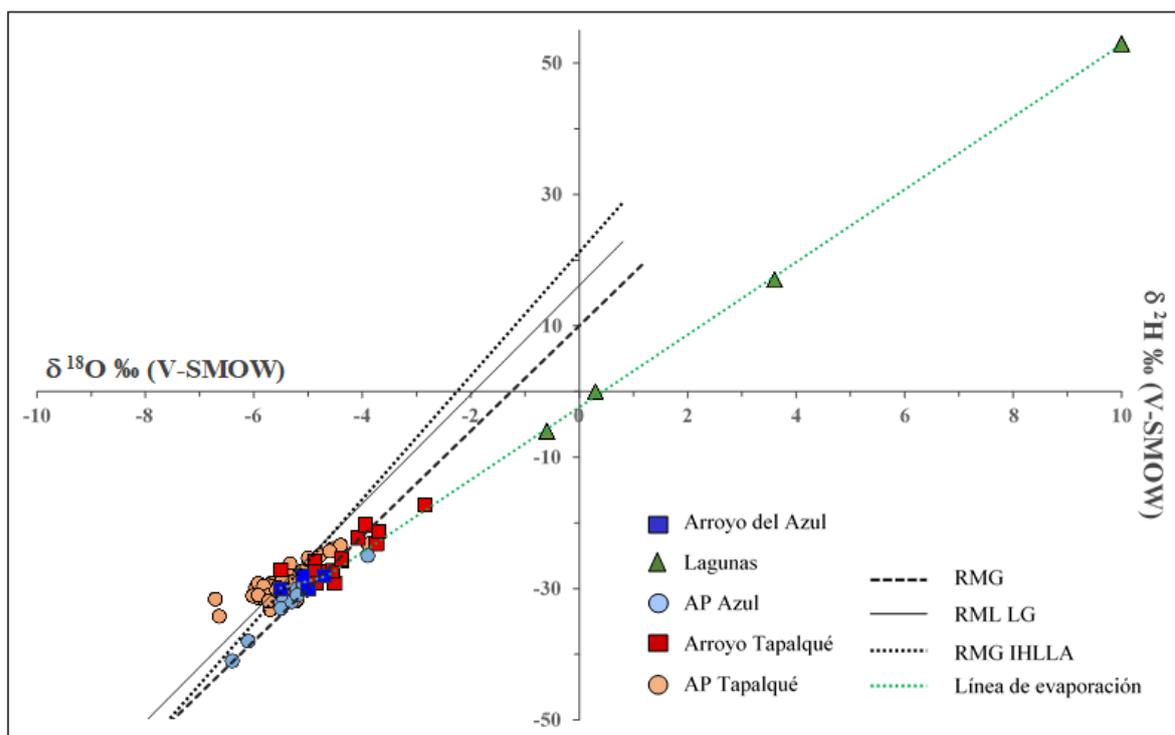


Figura 5: Gráfico de $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ de las muestras del sistema hidrológico. AP: acuífero Pampeano; RMG: recta meteórica global ($\delta^2\text{H}=8\delta^{18}\text{O} + 10$, Craig, 1961); RML LG: recta meteórica local colector Establecimiento La Germania - cuenca alta ($\delta^2\text{H} = 8.3\delta^{18}\text{O} + 16.2$, Zabala et al., 2021); RML IHLLA: recta meteórica local colector IHLLA - cuenca media ($\delta^2\text{H} = 9.4\delta^{18}\text{O} + 21.2$, Zabala et al., 2021).

Se observa que las aguas del acuífero Pampeano presentan un origen meteórico y son el resultado de la recarga por lluvias locales, lo cual es válido para ambas cuencas. En ambos casos se advierte cierta dispersión en los datos, la cual se relaciona principalmente a la variación isotópica estacional de las precipitaciones. Por otro lado, pocas muestras del acuífero evidencian signos incipientes de evaporación, dado que se ubican debajo de las rectas meteóricas. Para el caso de la cuenca del arroyo del Azul, las muestras más enriquecidas proceden de los piezómetros ubicados en cuenca baja. Sin embargo, sucede lo contrario para el caso del arroyo Tapalqué, donde las muestras más enriquecidas se encuentran, en general, en cuenca alta. A su vez, existe una estrecha relación entre aquellos piezómetros ubicados en cuenca alta y las precipitaciones de esa región, evidenciando una recarga por precipitaciones. Sin embargo, los pozos situados hacia cuenca media y baja muestran un mayor efecto de la evaporación sobre los valores medidos, en los

que es posible deducir procesos de mezclas de agua. Por su parte, tanto el arroyo del Azul como el arroyo Tapalqué son alimentados permanentemente por agua subterránea de origen meteórico, razón por la cual muchas de las muestras se encuentran sobre las rectas meteóricas. No obstante, es posible observar que algunas muestras presentan signos de evaporación al quedar ubicadas por debajo de la RML. Con respecto a las muestras procedentes de lagunas, se aprecia que estas son las aguas isotópicamente más pesadas, las más evaporadas del sistema hidrológico, ubicándose todas ellas sobre una recta de evaporación. Si la línea de evaporación es extendida hasta las rectas meteóricas, se observa que la composición isotópica de estas lagunas antes de ser evaporadas, sería similar a la de las precipitaciones de la región y a la del agua subterránea no evaporada.

A partir de la integración y análisis conjunto de los datos isotópicos procedentes de ambas cuencas

hidrológicas se observa que estas tienen la misma impronta isotópica, la evaporación es un proceso clave en estos ambientes de llanura y que la recta de evaporación calculada para las lagunas de la cuenca del arroyo del Azul, es también representativa de la cuenca del arroyo Tapalqué.

Integración y análisis de datos antecedentes procedentes de muestras de agua y de conchas de moluscos

En la Figura 6 se presentan los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de las conchas de moluscos, tanto fósiles como modernos, de las precipitaciones, de los cursos y cuerpos de agua superficial y del acuífero.

En el extremo izquierdo del diagrama se agrupan las especies *Biomphalaria* sp., *Heleobia parchappii* y *Succinea meridionalis*, integrantes de la asociación de moluscos fósiles de la Serie Olavarría, que junto con las lagunas del sistema hidrológico actual, presentan los valores isotópicos medios más elevados.

Las conchas de los moluscos dulceacuícolas modernos *Chilina* sp. y *Biomphalaria* sp, evidencian una similitud en cuanto a los valores isotópicos medios del agua del arroyo Tapalqué, dado que constituye el agua madre en la cual depositan las conchas.

Respecto a las precipitaciones, si se considera el valor de $\delta^{18}\text{O}$ medio, se observa que son las aguas más empobrecidas de todo el sistema hidrológico. Por su parte, el arroyo del Azul, muestra un mayor enriquecimiento promedio respecto al valor isotópico de las precipitaciones, con baja dispersión de datos y sin valores atípicos.

El acuífero Pampeano en la cuenca del arroyo del Azul, exhibe valores isotópicos algo más pesados que el agua de lluvia, pero más ligera que el agua de los arroyos. Sin embargo, muestra valores atípicos de enriquecimiento, que podrían corresponderse con aquellas muestras levemente evaporadas observadas en la Figura 5.

En cuanto al arroyo Tapalqué, se observa un mayor enriquecimiento isotópico promedio respecto a las precipitaciones y al arroyo del Azul. También se registran variaciones entre ellos, en cuanto a la simetría de la distribución, evidenciando enriquecimiento/empobrecimiento de $\delta^{18}\text{O}$, dado por épocas en donde la evaporación juega un papel

importante en el fraccionamiento isotópico (Figura 5).

El acuífero Pampeano en la cuenca del arroyo Tapalqué, presenta valores isotópicos un tanto más enriquecidos que las precipitaciones así como también valores promedios similares al acuífero Pampeano en la cuenca del Azul.

DISCUSIÓN

Es importante destacar que los diferentes cuerpos de agua superficial responden de manera diferencial a los procesos evaporativos. Los ambientes palustres, en donde el agua está estancada por periodos relativamente prolongados, son más sensibles a los efectos de la evaporación, mientras que los arroyos, al presentar un flujo de agua constante, exhiben menor sensibilidad a dicho proceso.

Con respecto a las muestras de agua, en términos generales, se observa una progresión del fraccionamiento isotópico, que comienza con las precipitaciones, continúa con las aguas del acuífero freático y finaliza con las aguas de los arroyos y lagunas, aguas más evaporadas del sistema hidrológico. En relación a las muestras de las conchas de moluscos fósiles, se observa esta misma progresión. Esta característica probablemente esté dada por el hábitat de cada especie, ya que *Biomphalaria* sp. y *Heleobia parchappii*, eran organismos que vivían sumergidos en el cuerpo de agua, mientras que *Succinea meridionalis*, vivía en finas películas de agua o en tierra. Los organismos han captado el oxígeno disponible para depositar sus conchas según las características del cuerpo de agua en ese momento en particular, por lo tanto *Biomphalaria* sp. y *Heleobia parchappii*, aparecen más empobrecidas que *Succinea meridionalis*, cuyos requerimientos biológicos son diferentes.

Existe una relación directa entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de las conchas de los moluscos dulceacuícolas modernos y sus aguas madres. Esto se ejemplifica con el $\delta^{18}\text{O}$ medido en las conchas modernas de *Chilina* sp. y *Biomphalaria* sp. con el valor isotópico del $\delta^{18}\text{O}$ del arroyo Tapalqué. Incluso es posible observar que los valores isotópicos de las conchas presentan un rango similar al del arroyo, especialmente aquellas relacionadas a los valores más enriquecidos. Las variaciones del $\delta^{18}\text{O}$ del arroyo estarían ligadas principalmente a la descarga de aguas subterráneas en el cuerpo de agua y a los efectos de la evaporación sobre la lámina de agua.

Pero a su vez, cierta proporción de las muestras de agua del arroyo Tapalqué también presentan enriquecimiento por la incorporación de agua proveniente de la escorrentía superficial durante la estación de primavera (Glok Galli et al., 2020). Según Bonadonna et al. (1999), las diferencias en los valores isotópicos de las conchas de los individuos modernos dentro del mismo curso de

agua, estarían relacionadas con la estación del año en la que se depositan, su ciclo de vida y las variaciones en el contenido de $\delta^{18}\text{O}$ del arroyo Tapalqué. En este sentido, el $\delta^{18}\text{O}$ de las conchas estaría reflejando un acoplamiento de procesos hidrológicos, como ser, la descarga de agua subterránea, la evaporación y el escurrimiento superficial.

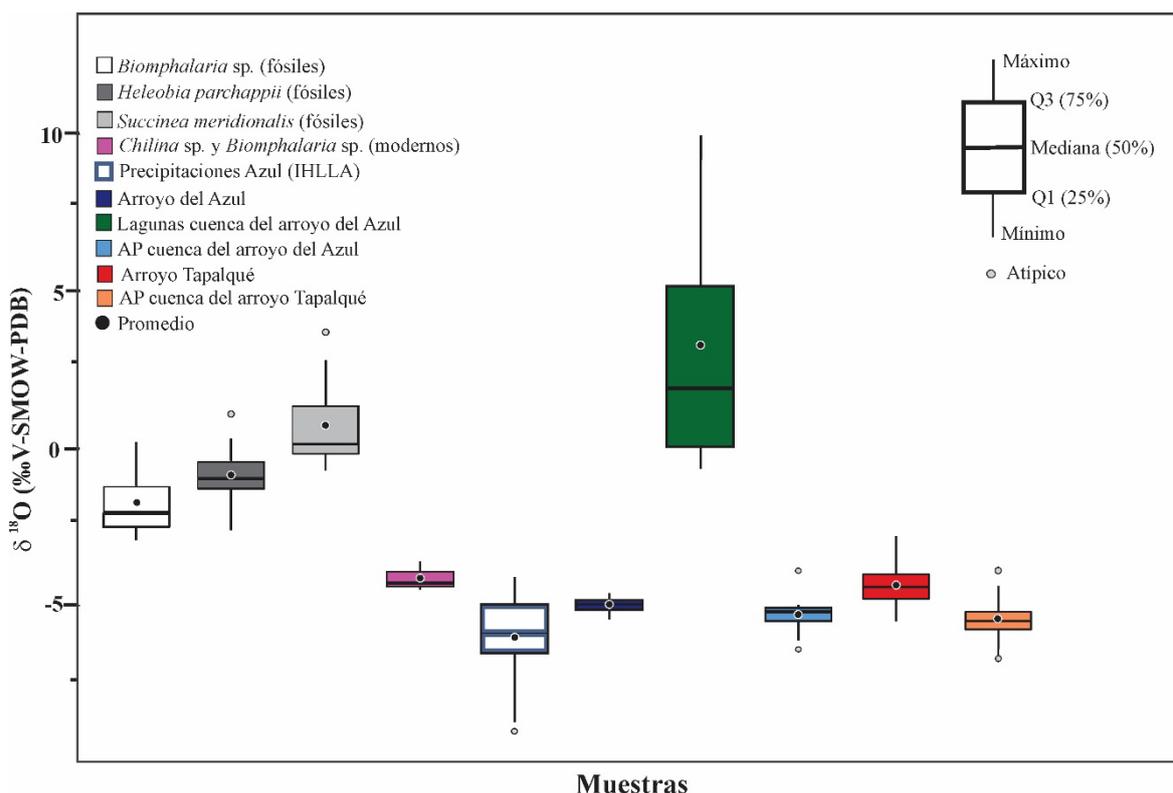


Figura 6: Diagrama de cajas mostrando los valores de $\delta^{18}\text{O}$ medidos en conchas de moluscos fósiles y modernos recolectados en el arroyo Tapalqué y en muestras de aguas de lluvia, superficial y subterránea pertenecientes a las cuencas de los arroyos del Azul y Tapalqué.

En cuanto a los moluscos fósiles, *Biomphalaria* sp., *Heleobia parchappii* y *Succinea meridionalis* de la Serie Olavarría, muestran variaciones isotópicas dentro de la misma especie, así como también variaciones entre especies fósiles. Pero, en general, la asociación fósil muestra un mayor enriquecimiento isotópico respecto a sus contrapartes modernas. Es importante mencionar que el ambiente en el que vivieron estos organismos fósiles era de tipo léntico con características palustres (Miembro Guerrero), y poca o nula influencia fluvial, mientras que el sistema desarrollado en la actualidad, donde habitan *Chilina* sp. y *Biomphalaria* sp. es típicamente fluvial, con sistemas de lagunas temporarias. La Serie Olavarría

fue datada con una edad de aproximadamente 35-34 ka AP (calculada sobre *Heleobia parchappii*), lo que ubica a estos organismos en el último tercio del Pleistoceno Superior. Como este registro fósil es acotado temporalmente, la evidencia ambiental que se puede extraer de su análisis también representaría un corto lapso (Bonadonna et al., 1999). No obstante, se ha establecido, de acuerdo a la evidencia de fauna de mamíferos fósiles, que durante la depositación del Miembro Guerrero de la Formación Luján, se desarrolló un evento cálido dentro de un evento mayor de características glaciales, el cual abarca todo el Pleistoceno Superior (Rabassa y Clapperton, 1990; Soibelzon et al., 2019). Sin embargo, Bonadonna et al. (1999) afirman que el

enriquecimiento de la Serie Olavarría no se debería al aumento de temperaturas, dado que se estaba transitando un período glacial, en el cual el enriquecimiento isotópico del agua meteórica no sería probable. En contraposición, plantean que tal enriquecimiento podría deberse a un proceso evaporativo estacional en los cuerpos de agua tipo lénticos, favorecido por la aridez del clima, dando como resultado un enriquecimiento de $\delta^{18}\text{O}$ durante la precipitación del carbonato biogénico de las conchas. El molusco fósil *Succinea meridionalis* es el que muestra el mayor enriquecimiento de la asociación fósil y la mejor relación con las lagunas del sistema hidrológico actual. Estos organismos, si bien están asociados con ambientes acuáticos, están presentes también en un amplio rango de ambientes terrestres. Según De Francesco et al. (2007), la aparición de este caracol terrestre (*Succinea meridionalis*) para la misma época (~30 mil años A.P.) y en un hábitat de tipo léntico, sugiere un descenso del nivel en los cuerpos de agua. Posiblemente, la similitud isotópica entre las muestras de *Succinea meridionalis* y las lagunas actuales, está dada por el carácter temporario de estas últimas. La dinámica hidrológica de estos cuerpos de agua, debido a su morfología y al clima de la región, favorece la ocurrencia del proceso de evaporación, con el consecuente enriquecimiento isotópico del agua. El contexto ambiental en el cual se deposita la Formación Luján, particularmente el Miembro Guerrero, tuvo su génesis en un ambiente subácueo con características mayormente palustres, con algunos episodios fluviales. Es por ello, que el ambiente actual que probablemente mejor represente el hábitat de dicha asociación de moluscos sean los sistemas de lagunas actuales, las que presentaron los valores isotópicos más enriquecidos y más similares a los valores isotópicos de los moluscos de esta serie en general.

Cómo se ha visto, estos tipos de hábitats lénticos, están sujetos a una dinámica hidrológica que es inherente a su morfología y características particulares, por lo que generan una impronta isotópica, generalmente enriquecida, sobre los organismos que habitan en ellos, que no está necesariamente ligada a climas fríos o cálidos.

Otro ejemplo de la relevancia de la dinámica hidrológica y las características propias de un cuerpo de agua en este tipo de análisis, fue abordado por Zabala et al. (2021), que demostraron que en primavera, los cuerpos de agua superficial se alimentan tanto de aguas subterráneas como de agua

de lluvia y escorrentía superficial, sugiriendo que el proceso de mezcla en los cuerpos palustres es muy relevante, al menos en dicha estación. Si bien las evidencias indican que hoy en día el proceso de evaporación, especialmente en las lagunas pampeanas, es relevante e imprimiría una marca isotópica en el $\delta^{18}\text{O}$ de las conchas de los organismos que las habitan, hay que tener en cuenta otros procesos, como la descarga de agua subterránea hacia estos cuerpos. Estas consideraciones deben tenerse presentes a la hora de efectuar interpretaciones paleoambientales y ambientales a partir de las firmas isotópicas en las conchas de los moluscos de agua dulce, ya que podrían exhibir cierto empobrecimiento debido a la descarga del agua subterránea en los cuerpos de agua superficial que habitaban.

CONCLUSIONES

Los cuerpos de agua superficial, hábitat de los moluscos, son sensibles al efecto de la evaporación pero también a la influencia del agua subterránea y la escorrentía superficial que descarga en ciertas épocas del año, principalmente en primavera. Por lo que, el $\delta^{18}\text{O}$ del carbonato de las conchas de los moluscos modernos, especialmente aquellos que crecen en el seno del cuerpo de agua, estaría reflejando la ocurrencia de los procesos hidrológicos, descarga y evaporación.

La estrecha relación que existe entre el $\delta^{18}\text{O}$ de las conchas de moluscos fósiles de la Serie Olavarría (*Biomphalaria* sp., *Heleobia parchappii* y *Succinea meridionalis*) y las lagunas actuales, se puede explicar a partir de similitudes en cuanto al hábitat, ya que dichos organismos fueron colectados desde el Miembro Guerrero, interpretado como un ambiente palustre. Es decir, podría existir una analogía en las características morfológicas de las lagunas pampeanas actuales con los cuerpos palustres desarrollados para cierto lapso del Pleistoceno Superior. Probablemente, *Succinea meridionalis*, refleja las variaciones climáticas de este hábitat de una mejor forma que los demás integrantes de la serie Olavarría debido a que es un caracol terrestre que se adapta a los momentos en que la laguna se seca, tal como sucede con las lagunas actuales.

Para finalizar, es importante resaltar que las interpretaciones ambientales a partir del análisis de datos de $\delta^{18}\text{O}$ procedentes de cuerpos de agua y de moluscos dulceacuícolas y terrestres, debe realizarse

teniendo en cuenta los procesos hidrológicos de forma integrada en el sistema bajo estudio. Las herramientas isotópicas favorecen el abordaje a nivel ecosistema y brindan un panorama más acabado sobre los procesos metabólicos e hidrológicos que ocurren dentro de los sistemas.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias a las facilidades aportadas por el Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Jorge Usunoff" y al financiamiento otorgado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica a través del proyecto PICT 2016 N° 3688. Los autores agradecen los constructivos comentarios del revisor los cuales ayudaron a mejorar sustancialmente el manuscrito.

REFERENCIAS

- Abell, P. I. (1985). Oxygen isotope ratios in modern African gastropod shells: A data base for paleoclimatology. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 58(1), 183-193. doi: 10.1016/0168-9622(85)90037-5
- Aliaga, V. S., Ferrelli, F., y Piccolo, M. C. (2017). Regionalization of climate over the Argentine Pampas. *International Journal of Climatology*, 37(S1), 1237-1247. doi: 10.1002/joc.5079
- Apolinarska, K., Pelechaty, M., y Noskowiak, D. (2015). Differences in stable isotope compositions of freshwater snails from surface sediments of two Polish shallow lakes. *Limnologia*, 53, 95-105. doi: 10.1016/j.limno.2015.06.003
- Bao, R., Sheng, X., Lu, H., Li, C., Luo, L., Shen, H., ... Chen, J. (2019). Stable carbon and oxygen isotopic composition of modern land snails along a precipitation gradient in the mid-latitude East Asian monsoon region of China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 533, 109236. doi: 10.1016/j.palaeo.2019.109236
- Bonadonna, F. P., Leone, G., y Zanchetta, G. (1999). Stable isotope analyses on the last 30 ka molluscan fauna from Pampa grassland, Bonaerense region, Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 153(1-4), 289-308. doi: 10.1016/S0031-0182(99)00063-2
- Calvi, C., Dapeña, C., Quiroz Londoño, O. M., y Martínez, D. E. (2022). Assessing recharge process in plain catchments using isotopic and hydrochemical techniques. *Groundwater for Sustainable Development*, 19, 100828. doi: 10.1016/j.gsd.2022.100828
- Craig, H. (1961). Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, 133(3465), 1702-1703. doi: 10.1126/science.133.3465.1702
- Dalla Salda, L., Spalletti, L., Poiré, D., De Barrio, R., Echeveste, H., y Benialgo, A. (2006). Tandilia. Serie correlación geológica, 21(1), 17-46.
- Dansgaard, W. (1954). The O18-abundance in fresh water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 6(5), 241-260. doi: 10.1016/0016-7037(54)90003-4
- Dapeña, C., Varni, M., Panarello, H. O., Ducos, E., Weinzettel, P., Usunoff, E. Composición isotópica de la precipitación de la Estación Azul, provincia de Buenos Aires. Red Nacional de Colectores Argentina. Varni, M., Entraigas, I., Vives, L. (Eds.). (2010). *Hacia la Gestión Integral de los Recursos Hídricos en Zonas de Llanura*. Mar del Plata, Argentina. Editorial Martín.
- Dapeña, C., y Panarello, H. O. (2004). Composición isotópica de la lluvia de Buenos Aires. Su importancia para el estudio de los sistemas hidrológicos pampeanos. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 4(17-25).
- Darling, W. G. (2004). Hydrological factors in the interpretation of stable isotopic proxy data present and past: A European perspective. *Quaternary Science Reviews*, 23(7), 743-770. doi: 10.1016/j.quascirev.2003.06.016
- De Francesco, C. G., y Hassan, G. S. (2013). Stable isotope composition of freshwater mollusk shells from Central-Western Argentina. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 16(2), 213-224. doi: 10.4072/rbp.2013.2.04
- De Francesco, C. G., Zárate, M. A., y Miquel, S. E. (2007). Late Pleistocene mollusc assemblages and inferred paleoenvironments from the Andean piedmont of Mendoza, Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 251(3-4), 461-469. doi: 10.1016/j.palaeo.2007.04.011
- Dillon, A. y Rabassa, J. 1985. Miembro La Chumbiada, Formación Luján (Pleistoceno, provincia de Buenos Aires): Una nueva unidad estratigráfica del valle del río Salado. I Jornadas Geológicas Bonaerenses. Resúmenes, 27. Tandil, Buenos Aires, Argentina.
- Epstein, S., y Mayeda, T. (1953). Variation of O18 content of waters from natural sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 4(5), 213-224. doi: 10.1016/0016-7037(53)90051-9
- Fidalgo F. (1983). Algunas características de los sedimentos superficiales de la Cuenca del Río Salado y Pampa Ondulada. Coloquio sobre Hidrología de Grandes Llanuras, 2, 1044-1067.

- PHI – UNESCO. Olavarría, Argentina.
- Fidalgo, F., Gentile, R. O. y Correa, H. A., (1986). Geología y Geomorfología en la Cuenca del Arroyo Tapalqué. Provincia de Buenos Aires, Comisión de Investigaciones Científicas. Informe 30, 1-73. La Plata, Argentina.
- Gat, J. R. (1996). Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 24, 225-262.
- Gat, J. R. (1998). Stable isotopes, the hydrological cycle and the terrestrial biosphere. En *Stable Isotopes*. Garland Science.
- Glok Galli, M., Colasurdo, V., Martínez, D. E., Grosman, F., Quiroz Londoño, O. M., Salzano, P. (2018). Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de La Laguna la Barrancosa (Provincia De Buenos Aires) y su interacción con el acuífero Pampeano. *Actas X Congreso Argentino y XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología. Química, Calidad y Contaminación del Agua*, 131–138. Salta, Argentina.
- Glok-Galli, M., Martínez, D. E., Vadillo-Pérez, I., Busso, A. A. S., Barredo, S. P., Londoño, O. M. Q., y Trezza, M. A. (2020). Multi-isotope ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ -TDIC, $\delta^{18}\text{O}$ -TDIC, $87\text{Sr}/86\text{Sr}$) and hydrochemical study on fractured-karstic and detritic shallow aquifers in the Pampean region, Argentina. doi: 10.6084/m9.figshare.13027341.v2
- Glok-Galli, M., Martínez, D. E., Vadillo-Pérez, I., Silva Busso, A. A., Barredo, S. P., Quiroz Londoño, O. M., y Trezza, M. A. (2020). Multi-isotope ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ -TDIC, $\delta^{18}\text{O}$ -TDIC, $87\text{Sr}/86\text{Sr}$) and hydrochemical study on fractured-karstic and detritic shallow aquifers in the Pampean region, Argentina. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 56(5-6), 513-532. doi: 10.1080/10256016.2020.1825412
- Goodfriend, G. A., Magaritz, M., y Gat, J. R. (1989). Stable isotope composition of land snail body water and its relation to environmental waters and shell carbonate. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(12), 3215-3221. doi: 10.1016/0016-7037(89)90102-6
- Guevara Ochoa, C., Medina Sierra, A., Vives, L., Zimmermann, E., y Bailey, R. (2019). Spatio-temporal patterns of the interaction between groundwater and surface water in plains. *Hydrological Processes*, 34(6), 1371-1392. doi: 10.1002/hyp.13615
- Kelemen, Z., Gillikin, D. P., Graniero, L. E., Havel, H., Darchambeau, F., Borges, A. V., ... Bouillon, S. (2017). Calibration of hydroclimate proxies in freshwater bivalve shells from Central and West Africa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 208, 41-62. doi: 10.1016/j.gca.2017.03.025
- Kruse, E., Rojo, A. y Varela, L. (1993). Características Hidroquímicas Subterráneas de la Cuenca del Arroyo Tapalqué (Buenos Aires). *Relatorio del XII Congreso Geológico Argentino, II Congreso de Exploración de Hidrocarburos*. Tomo VI, 208-215. Mendoza, Argentina.
- Lemeille, E., Letolle, R., Meliere, F., y Olive, P. (1983). Isotope and other physico-chemical parameters of palaeolake carbonates Tools for climatic reconstruction. En *Paleoclimates and Paleowaters. A collection of environmental studies*. IAEA, 135-150.
- Leng, M. J., y Marshall, J. D. (2004). Palaeoclimate interpretation of stable isotope data from lake sediment archives. *Quaternary Science Reviews*, 23(7), 811-831. doi: 10.1016/j.quascirev.2003.06.012
- Marcovecchio, R., y Varni, M. (2020). Una aproximación a las descargas por evapotranspiración del acuífero freático pampeano en la cuenca del Arroyo del Azul (llanura pampeana). Recuperado de <http://rephip.unr.edu.ar/xmlui/handle/2133/19920>
- Martínez, D. E., Quiroz Londoño, O. M., Bocanegra, E., Massone, H. E., Dapeña, C. (2013). Isotopes tracing the water cycle in the Pampeano Aquifer at the southeast of Buenos Aires province, Argentina. *Proceedings Isotopes in Hydrology, Marine Ecosystems and Climate Change Studies*, 177–183. Viena, Austria.
- Martínez, D. E., Quiroz Londoño, O. M., Dapeña, C., Glok Galli, M., Massone, H. E., Ferrante, A. (2011). Caracterización isotópica e hidroquímica de las precipitaciones en el sector sur de Tandilia. *Actas VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Calidad y Contaminación de Agua Subterránea*, 369–376. Salta, Argentina.
- Martínez, D. E., Quiroz Londoño, O. M., Solomon, D. K., Dapeña, C., Massone, H. E., Benavente, M. A., y Panarello, H. O. (2016). Hydrogeochemistry, Isotopic Composition and Water Age in the Hydrologic System of a Large Catchment within a Plain Humid Environment (Argentine Pampas): Quequén Grande River, Argentina. *River Research and Applications*, 33(3), 438-449. doi: 10.1002/rra.3072
- Morello, J., Matteucci, S., Rodriguez, A., y Silva, M. (2012). Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos. Buenos Aires, Argentina. Editorial: Orientación Gráfica Editora.
- Passey, B. H., y Levin, N. E. (2021). Triple Oxygen

- Isotopes in Meteoric Waters, Carbonates, and Biological Apatites: Implications for Continental Paleoclimate Reconstruction. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 86(1), 429-462. doi: 10.2138/rmg.2021.86.13
- Peterson, B. J., y Fry, B. (1987). Stable Isotopes in Ecosystem Studies. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 18, 293-320.
- Prendergast, A. L., Stevens, R. E., Barker, G., y O'Connell, T. C. (2015). Oxygen isotope signatures from land snail (*Helix melanostoma*) shells and body fluid: Proxies for reconstructing Mediterranean and North African rainfall. *Chemical Geology*, 409, 87-98. doi: 10.1016/j.chemgeo.2015.05.014
- Quiroz Londoño, O. M., Martínez, D. E., Massone, H. E., Londoño Ciro, L. A., y Dapeña, C. (2015). Spatial distribution of electrical conductivity and stable isotopes in groundwater in large catchments: A geostatistical approach in the Quequén Grande River catchment, Argentina. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 51(3), 411-425. doi: 10.1080/10256016.2015.1056740
- Quiroz Londoño, O. M., Romanelli, A., Martínez, D. E., y Massone, H. E. (2020). Water exchange processes estimation in a temperate shallow lake based on water stable isotope analysis. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 56(5-6), 465-479. doi: 10.1080/10256016.2020.1803857
- Rabassa, J., y Clapperton, C.M. (1990). Quaternary glaciations of the southern Andes. *Quaternary Science Reviews*, 9(2), 153-174. doi: 10.1016/0277-3791(90)90016-4
- Romanelli, A., Quiroz Londoño, O. M., Martínez, D. E., Massone, H. E., y Escalante, A. H. (2014). Hydrogeochemistry and isotope techniques to determine water interactions in groundwater-dependent shallow lakes, Wet Pampa Plain, Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 71(4), 1953-1966. doi: 10.1007/s12665-013-2601-y
- Soibelzon, E., Soibelzon, L. H., Gasparini, G. M., y Tonni, E. P. (2019). El Pleistoceno de la provincia de Buenos Aires y sus mamíferos. Recuperado de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/118077>
- Sprenger, M., Leistert, H., Gimbel, K., y Weiler, M. (2016). Illuminating hydrological processes at the soil-vegetation-atmosphere interface with water stable isotopes. *Reviews of Geophysics*, 54(3), 674-704. doi: 10.1002/2015RG000515
- Urey, H. C. (1947). The thermodynamic properties of isotopic substances. *Journal of the Chemical Society*, (0), 562-581. doi: 10.1039/JR9470000562
- Varni, M., Comas, R., Weinzettel, P., y Dietrich, S. (2013). Application of the water table fluctuation method to characterize groundwater recharge in the Pampa plain, Argentina. *Hydrological Sciences Journal*, 58(7), 1445-1455. doi: 10.1080/02626667.2013.833663
- Wurster, C. M., y Patterson, W. P. (2001). Seasonal variation in stable oxygen and carbon isotope values recovered from modern lacustrine freshwater mollusks: Paleoclimatological implications for sub-weekly temperature records. *Journal of Paleolimnology*, 26(2), 205-218. doi: 10.1023/A:1011194011250
- Zabala, M. E., Gorocito, M., Dietrich, S., Varni, M., Murillo, R. S., Manzano, M., y Ceballos, E. (2021). Key hydrological processes in the Del Azul Creek basin, sub-humid Pampean Plain. *Science of The Total Environment*, 754, 142258. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142258
- Zabala, M. E., Manzano, M., y Vives, L. (2015). The origin of groundwater composition in the Pampeano Aquifer underlying the Del Azul Creek basin, Argentina. *Science of The Total Environment*, 518-519, 168-188. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.02.065
- Zabala, M. E., Manzano, M., y Vives, L. (2016). Assessment of processes controlling the regional distribution of fluoride and arsenic in groundwater of the Pampeano Aquifer in the Del Azul Creek basin (Argentina). *Journal of Hydrology*, 541, 1067-1087. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.08.023
- Zabala, M., Sánchez-Murillo, R., Dietrich, S., Gorocito, M., Vives, L., Manzano, M., y Varni, M. (2020). Hydrological dataset of a sub-humid continental plain basin (Buenos Aires, Argentina). *Data in Brief*, 33. doi: 10.1016/j.dib.2020.106400
- Zabala, M.E., Manzano, M., Varni, M., Weinzettel, P. (2011). On the sources of salinity in groundwater under plain areas. Insights from ^{18}O , 2H and hydrochemistry in the Azul River basin, Argentina. *Actas International Symposium on Isotopes in Hydrology, Marine Ecosystems, and Climate Change Studies*, 287-294. Mónaco.
- Zanchetta, G., Bini, M., Giaccio, B., Manganelli, G., Benocci, A., Regattieri, E., ... Biagioni, C. (2017). Middle Pleistocene (MIS 14) environmental conditions in the central Mediterranean derived from terrestrial molluscs and carbonate stable isotopes from Sulmona Basin (Italy). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 485, 236-246. doi: 10.1016/j.palaeo.2017.06.016
- Zárate, M.A. (2005). El Cenozoico tardío continental de la provincia de Buenos Aires. *Relatorio XVI Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Minerales de la provincia de*

Buenos Aires. Relatorio XVI Congreso Geológico Argentino, 139-159. La Plata, Argentina.

Zárate, M.A., Mehl, A., y Castro, M. (2010). Geomorfología de la cuenca del arroyo Del Azul. Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Jorge Usunoff", Azul, Buenos Aires, Argentina. Informe inédito.

Tipo de Publicación: ARTICULO.

Trabajo recibido el 05/05/2022 y aprobado para su publicación el 21/12/2022.

COMO CITAR

Gualde, M. S., Dietrich, S., Zabala, M. E., Dubny, S. (2022) Análisis Preliminar de la Relación entre los Isótopos del Oxígeno en un Sistema Hidrológico y en Moluscos, en el Ámbito de la Llanura Pampeana (Buenos Aires, Argentina). *Cuadernos del CURIHAM*, 28, 65-83. doi: <https://doi.org/10.35305/curiham.v28i.187>

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>)



INSTRUCCIONES PARA AUTORES

INTRODUCCION

La Revista CUADERNOS DEL CURIHAM 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; 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 en CUADERNOS DEL CURIHAM 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.

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

Ante cualquier consulta comuníquese a revistac@fceia.unr.edu.ar o curiham@fceia.unr.edu.ar.

CLASIFICACION DEL TRABAJO

•**Artículo:** documento científico inédito que trata y comunica por primera vez los resultados de una investigación o innovación exitosa, cuyas contribuciones aportan e incrementan el conocimiento actual en materia hidroambiental. Máximo 25 páginas (incluido tablas, gráficos y figuras).

•**Nota Técnica:** documento inédito en donde se realiza una revisión de un tópico específico o una aplicación de una técnica estándar o trabajos derivados de la práctica profesional en el campo hidroambiental. Máximo 10 páginas (incluido tablas, gráficos y figuras).

GENERAL

Los artículos y notas técnicas serán sometidos a arbitraje por un Consejo Revisor.

El artículo deberá ser escrito preferentemente en su forma definitiva en español, portugués o inglés.

Los trabajos y toda correspondencia deberán ser remitidos mediante correo electrónico a revistac@fceia.unr.edu.ar con copia a curiham@fceia.unr.edu.ar

El archivo debe tener formato de página A4 (210 mm x 297 mm) con márgenes. Superior: 4 cm; Inferior: 3.7 cm ; Izquierdo: 3 cm; Derecho: 2.5 cm; Encabezado 3 cm; Pie de Página: 2.3 cm.

La fuente será Times New Roman 10 con interlineado simple.

Primera página: una columna. Páginas siguientes: 2 Columnas de ancho: 7.5 cm con espacio de 0.5 cm.

El autor cuenta con una plantilla para el formato del trabajo.

ESTRUCTURA DEL TEXTO

Utilizar Microsoft Word del paquete de Office 2007 o superior, a espacio simple, y doble cuando intervengan fórmulas.

Se recomienda utilizar como separador decimal el punto en el cuerpo del texto, tablas, figuras, ecuaciones, etc. Se marcará la división entre millares con un espacio en blanco.

Los párrafos del texto deberán contar con alineación justificada y comenzarán sin tabulado o sangrado.

No utilizar el encabezado y/o el pie de página para indicar referencias o notas.

Títulos

Título primario: deberá escribirse en mayúsculas y negrita dejando dos líneas en blanco por arriba, una por debajo y alineado a la izquierda.

Título Secundario: deberá escribirse en minúsculas y negrita dejando una línea en blanco por arriba, una por debajo y alineado a la izquierda.

Título Terciario y sucesivos: deberán escribirse en minúsculas y negrita dejando una línea en blanco por arriba, ninguna por debajo y alineado a la izquierda.

Primera Página

Título del trabajo (en inglés y en español). Máximo 2 renglones. Mayúsculas y negrita con alineación centrada.

Datos del/los autor(es). Nombre y Apellido completos, filiación institucional, Ciudad, Nacionalidad, correo electrónico.

Resumen no mayor a 200 palabras, en su forma definitiva y en inglés (si el trabajo está en inglés el resumen debe realizarse en inglés y en español).

Palabras claves en ambos idiomas (máximo 5).

Se recomienda también agregar el número de ORCID. En caso de no tenerlo, el número de ORCID es posible crearlo registrándose en la página <https://info.orcid.org/researchers/>. El número de ORCID es un identificador persistente, único y gratuito para que las personas lo utilicen mientras participan en actividades de investigación, becas e innovación

Páginas siguientes

El trabajo tendrá, en lo posible, la siguiente estructura: Introducción; Objetivos; Materiales y Métodos, Resultados, Conclusiones y Referencias bibliográficas. No se admiten anexos.

Formato de Figuras, Tablas, Fotos, Mapas

Las tablas, imágenes, fotos, gráficas, figuras y mapas deberán adaptarse al espacio disponible respetando 1 ó 2 columnas en su ancho.

Enumerar los objetos (figuras, tablas, fotos, mapas, etc.) en el orden en cual se hacen referencias en el texto, ej. Figura 1, Figura 2, etc. No está permitido el uso de enumeración como Figura 1a; o Tabla 2a.

Las tablas deben presentarse con tipografía Times New Roman 9 PT. Deben estar en blanco y negro o escala de grises con contrastes bien definidos. Deben estar con bordes delimitados con línea continua.

Los enunciados, nombres y numeración de las tablas, gráficos, fotos, mapas, figuras, etc., deberán estar en Times New Roman 8 PT, en negrita y centrado. Para las imágenes, fotos, gráficas, figuras y mapas deberá ubicarse abajo del objeto. Para las Tablas deberá ubicarse arriba de la misma.

Las tablas no deben ser imágenes, sino texto editable.

En la versión enviada para papel, las imágenes, fotos, gráficas, mapas y figuras deben estar pegadas en el texto como imagen de metarchivo mejorado; en blanco y negro o escala de grises con contrastes bien definidos.

Para la versión en línea, las imágenes, fotos, gráficas, figuras y mapas deberán tener una resolución de 300 dpi en color (tamaño no menor a 13X18 cm) y debe ser un solo elemento por figura. Las imágenes, fotos, gráficas, figuras y mapas deben ser remitidas en archivo aparte (formatos JPG o TIFF).

En ambos casos (figuras en versión impresa y en versión digital), los textos dentro de las figuras deben estar en Times New Roman equivalente a un tamaño 8 o 9 PT en su tamaño definitivo.

Formato de las ecuaciones

Las ecuaciones deben numerarse consecutivamente tal como sean citadas en el texto, con números arábigos y deben ser referenciadas de la siguiente forma: ecuación (3). Deben dejarse espacios arriba y debajo de cada ecuación. Las ecuaciones deberán estar formadas con el editor de ecuaciones de word, otros formatos de ecuaciones serán rechazados.

Agradecimientos

Se incluirán después del texto y antes de las referencias.

Citas y Referencias bibliográficas

Para las citas y las referencias se usarán las Normas APA (American Psychological Association) 6^o edición.

Citas:

Dentro del texto se usará el sistema de citación Autor-Fecha. Todas las citas deben corresponderse con una referencia bibliográfica. Por otro lado, no debe incluirse en la lista bibliográfica ninguna fuente que no aparezca referenciada en el texto.

Referencias bibliográficas

La lista bibliográfica se hace por orden alfabético de los apellidos de los autores y se le coloca sangría francesa.

En caso de que el mismo autor o mismos autores tengan más de un trabajo en la lista de referencias, se procederá a ordenar por el año de la publicación comenzando por los más antiguos.

En caso de que el mismo autor o mismos autores tengan más de un trabajo en la lista de referencias con el mismo año de publicación, se procederá a ordenar por el título del trabajo. Se usarán las letras a, b, c,... después del año dentro del paréntesis, para su diferenciación (2010a, 2010b, etc.).

Libro: Apellido, A. A. (Año). Título. Ciudad, País: Editorial
Libro con editor: Apellido, A. A. (Ed.). (Año). Título. Ciudad, País: Editorial.

Libro electrónico: Apellido, A. A. (Año). Título. Recuperado de <http://www...>

Libro electrónico con DOI: Apellido, A. A. (Año). Título. doi: xx
Capítulo de libro: únicamente en los casos de libros compilatorios y antologías donde cada capítulo tenga un autor diferente y un compilador o editor: Apellido, A. A., y Apellido, B. B. (Año). Título del capítulo o la entrada. En A. A. Apellido. (Ed.), Título del libro (pp. xx-xx). Ciudad, País: Editorial.

Publicaciones periódicas formato impreso: Apellido, A. A., Apellido, B. B., y Apellido, C. C. (Fecha). Título del artículo. Nombre de la revista, volumen(número), pp-pp.

Publicaciones periódicas con DOI: Apellido, A. A., Apellido, B. B. y Apellido, C. C. (Fecha). Título del artículo. Nombre de la revista, volumen(número), pp-pp. doi: xx

Publicaciones periódicas online: Apellido, A. A. (Año). Título del artículo. Nombre de la revista, volumen(número), pp-pp. Recuperado de <http://www...>

Artículo de periódico impreso: Apellido A. A. (Fecha). Título del artículo. Nombre del periódico, pp-pp. O la versión sin autor: Título del artículo. (Fecha). Nombre del periódico, pp-pp.

Artículo de periódico online: Apellido, A. A. (Fecha). Título del artículo. Nombre del periódico. Recuperado de <http://www...>

Tesis de grado: Autor, A. (Año). Título de la tesis (Tesis de pregrado, maestría o doctoral). Nombre de la institución, Lugar.

Tesis de grado online: Autor, A. y Autor, A. (Año). Título de la tesis (Tesis de pregrado, maestría o doctoral). Recuperado de <http://www...>

Referencia a páginas webs: Apellido, A. A. (Fecha). Título de la página. Lugar de publicación: Casa publicadora. Recuperado de <http://www...>

Fuentes en CDs: Apellido, A. (Año de publicación). Título de la obra (edición) [CD-ROM]. Lugar de publicación: Casa publicadora.

Foros en internet, lista de direcciones electrónicas y otras comunidades en línea: Autor, (Día, Mes, Año) Título del mensaje [Descripción de la forma] Recuperado de <http://www...>

CARTA DE ORIGINALIDAD

Es indispensable remitir la Carta de originalidad firmada por todos los autores del trabajo. Enviar a: revistac@fceia.unr.edu.ar y a curiham@fceia.unr.edu.ar.

DATOS DE LOS AUTORES

Los autores del trabajo deben enviar los datos de filiación completa, dirección postal, dirección de e-mail, especialidad o área de conocimiento, cargos actuales y títulos (Ingeniero, Magister, Doctor. Mención completa y entidad de otorgamiento). Enviar a: revistac@fceia.unr.edu.ar y a curiham@fceia.unr.edu.ar.

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD DEL TRABAJO ESCRITO.

Lugar y Fecha:.....

Sra. Editora Responsable
Adelma Mancinelli
Revista CUADERNOS DEL CURIHAM
Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario

Por medio de la presente CERTIFICO que el artículo/nota técnica titulado:

que presento a la Revista CUADERNOS DEL CURIHAM, editada por el Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario no ha sido publicado previamente y me comprometo a no someterlo a consideración de otra publicación mientras este en proceso de evaluación en la Revista CUADERNOS DEL CURIHAM ni posteriormente en caso de ser aceptado para su publicación.

Declaro que el artículo es original y sus contenidos son producto de mi directa contribución intelectual.

Declaro que todos los materiales están libres de derechos de autor y me hago responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de responsabilidad a la Universidad Nacional de Rosario.

En el caso de que sea aprobado el artículo, autorizo de manera ilimitada en el tiempo a la Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales para que incluya el texto en la Revista CUADERNOS DEL CURIHAM y pueda reproducirlo, editarlo, distribuirlo, exhibirlo y comunicarlo tanto en el país como en el extranjero por medios impresos, electrónicos, CD, internet, o cualquier otro medio conocido o por conocer.

Nombre y Apellido

Firma

