

CUADERNOS DEL CURIHAM

REVISTA DE ESTUDIOS SOBRE LA CUESTIÓN HIDROAMBIENTAL

TEMARIO

ARTÍCULOS

- Composición algal y bioindicadores de calidad de agua. Caso de estudio: Embalse San Roque, Córdoba. Argentina
- Una Aproximación a las descargas por evapotranspiración del acuífero freático Pampeano en la cuenca del Arroyo del Azul (Llanura Pampeana)
- Modelación preliminar del flujo subterráneo en un sector de la cuenca inferior del Arroyo del Azul (Buenos Aires, Argentina)

NOTAS TÉCNICAS

- Implementación de un software modular en la cuenca del arroyo Las Turbias. Provincia de Santa Fe, Argentina.
- Efecto de los cultivos de cobertura sobre las pérdidas de agua y suelo por erosión hídrica.
- Irrigation dimensioning of reel machines whit water diestribution systems: gum and boom whit emitters.
- Completamiento de series temporales de niveles freáticos en un área de la llanura bonaerense.

xanto
CONCEPTOSGRAFICOS

Mattos 3373 [Crespo 2300]
Rosario - Pcia. de Santa Fe. ARG
info@xanto.com.ar www.xanto.com.ar

CUADERNOS DEL CURIHAM / Volumen 26 / Año 2020

Volumen 26
Año 2020

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



CURIHAM
Centro Universitario Rosario de
Investigaciones Hidroambientales

UNR

Universidad
Nacional
de Rosario

ISSN 1514 - 2906 (Impreso)
ISSN 2683 - 8168 (en línea)

CENTRO UNIVERSITARIO ROSARIO DE INVESTIGACIONES HIDROAMBIENTALES

CUADERNOS DEL CURIHAM

REVISTA DE ESTUDIOS SOBRE LA CUESTIÓN HIDROAMBIENTAL

ISSN 1514-2906 (Impresa)

ISSN 2683-8168 (En línea)

CUADERNOS DEL CURIHAM

REVISTA DE ESTUDIOS SOBRE LA CUESTION HIDROAMBIENTAL

Volumen 26

Año 2020

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 26, Año 2020.

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



Impreso en Xanto Conceptos Gráficos
Rosario, Santa Fe, Argentina.

CUADERNOS DEL CURIHAM
(Revista de Estudios sobre la Cuestión Hidroambiental)
Volumen Nro. 26 – Año 2020

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.
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.

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.
Victor 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 Rodríguez, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Argentina.
Mónica Blarasin, Facultad de Ciencias Exactas, Físico - Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.
Nora Pouey, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
Eduardo Zamanillo, Universidad Tecnológica Nacional y Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina.
Mariano Re, Instituto Nacional del Agua, Buenos Aires, Argentina.
Sandra 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.
Tomas Rodríguez, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones, Oberá, Argentina.
Steven Sandi Rojas, University of Newcastle, Australia.

ACERCA DE LA REVISTA

La Revista CUADERNOS DEL CURIHAM, ISSN 2683-8168 (En línea) | ISSN 1514-2906 (Impresa), es una publicación de periodicidad anual (publica cada diciembre) 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 (versión papel) se encuentra indizada a partir de los criterios de calidad editorial establecidos por el sistema Latindex. Referencia: Catálogo LATINDEX N° 7515 (a partir del año 2004).

La Revista CUADERNOS DEL CURIHAM (versión en línea) 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 Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional(CC BY-NC-SA 4.0)

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

INDICE

ARTICULOS

Composición algal y bioindicadores de calidad de agua. Caso de estudio: Embalse San Roque, Córdoba, Argentina

Inés Claudia Daga, María Cecilia Fernández Belmonte, Santiago María Reyna.....01

Una aproximación a las descargas por evapotranspiración del acuífero freático Pampeano en la cuenca del arroyo del Azul (Llanura Pampeana)

Romina Marcovecchio y Marcelo Varni..... 13

Modelación preliminar del flujo subterráneo en un sector de la cuenca inferior del Arroyo del Azul (Buenos Aires, Argentina).

Erik Zimmermann, Luisa Fajardo e Ilda Entraigas..... 21

NOTAS TECNICAS

Implementación de un software modular en la cuenca del arroyo Las Turbias. Provincia de Santa Fe, Argentina.

Javier Vergara, María del Valle Morresi y Mario Gardiol.....31

Efecto de los cultivos de cobertura sobre las pérdidas de agua y suelo por erosión hídrica

Julia Capurro y Sergio Montico..... 41

Irrigation dimensioning of reel machines with water distribution systems: gun and boom with emitters

Esequiel Rolando Jiménez Espinosa..... 49

Completamiento de series temporales de niveles freáticos en un área deprimida de la llanura bonaerense.

Erik Zimmermann..... 55

**COMPOSICION ALGAL Y BIOINDICADORES DE CALIDAD DE AGUA. CASO DE ESTUDIO:
EMBALSE SAN ROQUE, CÓRDOBA. ARGENTINA**

**ALGAL COMPOSITION AND WATER QUALITY BIOINDICATORS. CASE STUDY:
SAN ROQUE RESERVOIR, CÓRDOBA. ARGENTINA**

Inés Claudia Daga^{(1)(*)}, María Cecilia Fernández Belmonte⁽²⁾, Santiago María Reyna⁽³⁾

⁽¹⁾Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Córdoba, Argentina.

⁽²⁾Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de San Luis. Villa Mercedes, San Luis, Argentina.

⁽³⁾Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Córdoba, Argentina.

^(*)e-mail: inesclaudiadaga@gmail.com

RESUMEN

El embalse San Roque se encuentra a 11 km de la ciudad de Carlos Paz y a 40 de la ciudad de Córdoba y una de las funciones es brindar agua a gran parte de la ciudad y sus alrededores. Debido a que recibe un alto aporte de nutrientes provenientes principalmente de la actividad antrópica constituye un ecosistema favorable para el desarrollo de comunidades algales. El objetivo general del trabajo fue evaluar el estado trófico del embalse a través de índices de eutrofización e indicadores biológicos. Se llevaron a cabo muestreos estacionales desde febrero de 2014 hasta febrero de 2016, en el muro de cierre de embalse y la desembocadura de los tributarios. Se midieron parámetros físicos y químicos y determinaron nutrientes. Se realizó la identificación taxonómica de las especies, se calculó la biomasa fitoplanctónica mediante el biovolumen y clorofila *a* y se estimó el índice de estado trófico. Se determinaron un total de 204 Taxa. El componente dominante del fitoplancton fue el dinoflagelado *Ceratium furcoides* y como subdominante la diatomea *Aulacoseira granulata*. De acuerdo al índice de estado trófico ubicamos al embalse San Roque en estado eutrófico, condiciones indeseables en un ambiente utilizado para provisión de agua potable.

Palabras clave: Fitoplancton, embalses, eutrofización, bioindicadores, calidad de agua

ABSTRACT

The San Roque reservoir is 11 km from the city of Carlos Paz and 40 km from the city of Córdoba and one of the functions is to provide water to much of the city and its surroundings. Because it receives a high contribution of nutrients mainly from anthropic activity, it constitutes a favorable ecosystem for the development of algal communities. The general objective of the work was to evaluate the trophic status of the reservoir through eutrophication indices and biological indicators. Seasonal samplings were carried out from February 2014 to February 2016, at the closure wall of the reservoir and the mouth of the tributaries. Physical and chemical parameters were measured and nutrients were determined. The taxonomic identification of the species was carried out, the phytoplankton biomass was calculated using the biovolume and chlorophyll *a*, and the trophic status index was estimated. A total of 204 Taxa were determined. The dominant component of phytoplankton was the dinoflagellate *Ceratium furcoides* and as a subdominant the *Aulacoseira granulata* diatom. According to the trophic status index, we located the San Roque reservoir in a eutrophic state, undesirable conditions in an environment used to provide drinking water.

Key words: Phytoplankton, reservoirs, eutrophication, bioindicators, water quality

INTRODUCCIÓN

El embalse San Roque se encuentra ubicado en el centro oeste de la provincia de Córdoba en el valle de Punilla a 40 km aguas arriba de la ciudad capital de la provincia. Fue construido entre 1888 y 1944, principalmente para abastecimiento de agua, generación de energía eléctrica, riego y control de crecidas. En la actualidad es uno de los ambientes acuáticos continentales más problemáticos del país debido a su avanzado grado de eutrofización. El aporte de líquidos residuales provenientes de los asentamientos poblacionales e infraestructura turística en la proximidad del lago y en la cuenca, sin adecuado tratamiento, así como de las embarcaciones, contribuyen al deterioro de la calidad de las aguas del embalse, comprometiendo los usos del recurso. Además, el uso del suelo con destino agrícola, forestal, ganadero y el empleo de agroquímicos en el perilago y cuenca de aporte, se relacionan directamente con el aporte de nutrientes favoreciendo el crecimiento desmedido de algas, aumentando de este modo el nivel trófico y trayendo como consecuencia el deterioro de la calidad del agua (Reyna et al., 2005; Degano et al., 2016; Amé et al., 2017).

El primer trabajo en el área fue el de Guarrera (1948) es un estudio de la ficoflora y los parámetros físico químicos del embalse. A partir de la década del 70 comienzan las floraciones de cianobacterias que aumentaron en intensidad y frecuencia con los años (Cachi, 1975; García de Emiliani, 1977; Gavilán, 1981; Pizzolón et al., 1999; Amé et al., 2017). Durante el período 1999-2000 se observaron por primera vez dinoflagelado del género *Ceratium* (Ruibal Conti et al., 1999; Girbal et al., 2000) y desde su aparición se han detectado episodios de floraciones en numerosas ocasiones y las mismas están relacionadas con altos niveles de la cota y con un marcado grado de estratificación (Rodríguez et al., 2005, 2013).

OBJETIVOS

El objetivo del trabajo fue evaluar el estado trófico del embalse a través de las variables fisicoquímicas y biológicas y analizar la composición y estructura de la comunidad algal en base a los análisis de abundancia, biomasa, clorofila, diversidad y riqueza específica.

METODOLOGÍA

Se realizaron 8 muestreos estacionales, durante el período comprendido entre febrero 2014 a febrero 2016. Se aclara que no fue posible tomar muestras durante el verano de 2015, debido al exceso de precipitaciones, cuando ambos embalses superaron la cota de vertedero, incluso hasta comienzos del otoño. Se consideraron cinco estaciones de monitoreo y fueron ubicadas en el paredón del embalse y en la desembocadura de los tributarios. Estación E₁: paredón de embalse San Roque; estación E₂: desembocadura río Cosquín; estación E₃: desembocadura arroyo Las Mojaras; estación E₄: desembocadura arroyo Los Chorrillos y estación E₅: desembocadura río San Antonio (Figura 1).



Figura 1. Fotografía satelital ubicando las estaciones de muestreo.

En el cierre del embalse (E₁) las muestras se tomaron con un muestreador tipo Van Dorn. Se realizó un perfil de tres profundidades en la columna de agua. La primera muestra se tomó a los 0.30 metros, la segunda a 1.5 metros de la superficie y la tercera a los 3 metros. En la desembocadura de los tributarios se utilizó una red de plancton de 20 μ m de diámetro de poro. Se obtuvieron muestras para identificación y análisis cualitativo y cuantitativo de fitoplancton, para clorofila y nutrientes. Para la medición de la transparencia se utilizó el Disco de Secchi y las variables fisicoquímicas (temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto) se midieron *in situ* con instrumentos portátiles.

El análisis taxonómico se realizó mediante el empleo de microscopio óptico, las muestras fueron observadas *in vivo* y para la ubicación taxonómica

de las especies se utilizaron las claves, manuales de identificación específica para cada grupo.

Para el recuento de organismos se utilizó la cámara de Sedgwick-Rafter. Se estimó la biomasa fitoplanctónica a partir de la clorofila *a* (APHA, 1992) y el biovolumen utilizando formas geométricas seleccionadas de modelos propuestos por Hillebrand et al., 1999; Sun & Liu, 2003. Se estimó la frecuencia relativa a partir de la construcción de tablas de presencia-ausencia con todas las especies observadas durante los períodos muestreados se calcularon rangos de frecuencia de acuerdo al número de especies y porcentaje de frecuencia para cada lugar:

$$FR = \frac{S_i}{N} \times 100 \quad (1)$$

donde S_i es el número de presencia de la especie i en las muestras y N es el número total de muestras.

Para el cálculo de la diversidad se utilizó el índice de Shannon Weaver (1949). La evaluación del estado trófico se realizó mediante el Índice de Carlson (1977). Para el análisis estadístico de los datos se usó el programa InfoStat Software (Di Rienzo et al., 2017).

ÁREA DE ESTUDIO

El embalse San Roque se halla ubicado en las Sierras Chicas entre los meridianos 64° 20' y 64° 27' de longitud Oeste y los paralelos 31° 14' y 31° 22' de latitud Sur. Recibe el aporte de cuatro tributarios; ríos Cosquín, San Antonio y Los Chorrillos y el arroyo Las Mojarras y forma parte de la cuenca del río Suquia (Primero) que pertenece al gran sistema endorreico, que tiene como nivel de base la Laguna de Mar Chiquita. La precipitación media anual es de 780 mm y en la actualidad se observa una alternancia de años muy húmedos y otros secos. El embalse tiene un comportamiento que acompaña el régimen de lluvias, presentando niveles mínimos al final del invierno y valores máximos en época estival.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante los últimos 100 años, la región central de Argentina se caracterizó por presentar escenarios

hidrológicos contrastantes. La variabilidad hidroclimática asociada a la actividad del Sistema Monzónico Sudamericano y a los eventos de El Niño, entre otros, afecta profundamente la disponibilidad del recurso hídrico, tanto en cantidad como en calidad del agua, y controla la frecuencia e intensidad de fenómenos como sequías e inundaciones extremas (Pasquini et al., 2006; Piovano et al., 2009). Cuando se comenzó este estudio el nivel de la cota del embalse se encontraba 4 metros por debajo del nivel del vertedero, producto de una sequía prolongada en toda la provincia de Córdoba. Las abundantes precipitaciones registradas en el mes de febrero de 2014 llevaron al embalse a su cota máxima. Dicho nivel se conservó durante todo el periodo de estudio y las abundantes lluvias del verano de 2015 causaron inundaciones en las sierras chicas imposibilitando el muestreo durante ese verano.

De acuerdo al régimen térmico local, el embalse estudiado es de tipo monomítico, presenta un solo periodo de mezcla que ocurre durante el invierno y se estratifica en verano (Rodríguez et al., 2013; Degano et al., 2016). En el presente trabajo los muestreos se realizaron hasta los 3 m de profundidad debido a ello solo se pudo observar una diferencia de temperatura de 1°C entre la muestra superficial y la muestra obtenida a los 3 m. En la Tabla 1 se muestran los valores promedios de las determinaciones físicas y químicas de la E_1 y en la Tabla 2 los valores promedios de las variables físicas y químicas en desembocadura de los tributarios.

Tabla 1. Valores promedios estacionales de los parámetros físicos químicos en la estación de muestreo paredón embalse San Roque (E_1).

Variables	Estaciones Año			
	V	O	I	P
Disco de Secchi (m)	0.9	1.1	1.2	1.2
Temperatura (°C)	27	16	16	24
pH	8.8	8.5	8.7	9.0
Conductividad (μ S/cm)	297	302	385	250
O.D. (mg/L)	4.0	8.2	8.2	5.4
Nitrógeno (mg/L)	0.89	1.43	1.43	1.07
Nitrato (mg/L)	0.69	2.63	1.75	0.79
Nitrito (mg/L)	0.04	0.01	0.02	0.02
Fósforo (mg/L)	0.28	0.20	0.98	1.96

En este trabajo las concentraciones de nitratos disminuyeron con las precipitaciones posiblemente

por dilución. Refuerza esta posible explicación las correlaciones negativas entre nitratos y precipitaciones el análisis de la varianza fue significativo ($r=-0.79$; $p=0.03$).

Los valores de nitritos fueron bajos lo que puede estar relacionado con los niveles de oxígeno disuelto

que generalmente fueron elevados, lo cual pudo favorecer la oxidación de los nitritos, que de esta manera pasan a nitratos por la presencia de bacterias nitrificantes, muy comunes en estos cuerpos de agua. En aguas superficiales, bien oxigenadas, los niveles de nitrito no suelen superar 1 mg/L (Stumm & Morgan, 1981).

Tabla 2. Valores promedios estacionales de parámetros físicos y químicos, en la desembocadura de los tributarios (E₂, E₃, E₄ y E₅).

Estaciones de muestreo	E ₂				E ₃				E ₄				E ₅			
Estaciones del año	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I	P
Variables	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I	P
Temperatura (°C)	28	17	19	27	29	17	19	27	29	17	22	27	28	16	22	28
pH	8.9	8.5	8.5	8.6	8.4	8.5	8.8	8.7	9.0	8.8	9.0	9.4	8.7	8.5	8.7	8.8
Conductividad (µS/cm)	551	455	605	309	243	250	370	211	215	232	227	236	253	356	430	218
O.D. (mg/L)	3.9	8.2	7.8	5.3	3.8	8.3	8.4	5.3	3.8	8.0	8.2	5.2	4.4	8.2	7.8	5.4

La transparencia del agua (Tabla 1) fue menor durante los muestreos de verano y se observó una correlación positiva entre el número de células y biovolumen de diatomeas y el disco de Secchi ($r= 0.80$; $p= 0.017$) lo que nos podría indicar que la transparencia del agua no se ve influenciada por la presencia de las diatomeas. En un estudio en el embalse Paso de Las Piedras encontró una correlación positiva entre transparencia y biovolumen donde las especies dominantes eran diatomeas (Fernández, 2010). Con *C. furcoides* si bien se observó una correlación negativa entre la abundancia y el disco de Secchi esta no fue significativa ($r=-0.28$; $p=0.50$). Por lo que se infiere que el tamaño de las células que conforman el fitoplancton podría influir en la transparencia.

El pH fue elevado (Tablas 1 y 2) el embalse y sus tributarios se caracterizaron por presentar aguas alcalinas con un rango de variación de pH menor que en otros trabajos realizados en la misma área de estudio (García de Emiliani, 1977; Rodríguez et al., 2000, Daga y Pierotto, 2011). Las mayores tasas de fotosíntesis fitoplanctónica podrían ser responsables de los altos valores de pH observados (Rodríguez et al., 2013).

La conductividad presentó valores mayores en la desembocadura del río Cosquín, E₂ (Tabla 2). Este tributario presenta altos contenidos de carbonatos que provienen principalmente de la disolución de minerales carbonáticos (calcita, dolomita, etc.) y silicatos presentes en rocas y suelos de la subcuenca (Gaiero, 1998). En este tributario se observó la

presencia de especies que no prosperan en aguas con bajo contenido de carbonato de calcio como la diatomea *Gomphonema olivaceum* var. *calcareum* y el alga verde *Phacotus lenticularis* (Winsborough y Golubic, 1987, Schlegel et al., 1998, Gruenert y Raeder, 2014).

Las concentraciones de oxígeno disuelto en todas las estaciones de muestreo presentaron un patrón de variación temporal que se explica en relación a la solubilidad de este gas con la temperatura, aumentando considerablemente al disminuir la misma (Tablas 1 y 2). Se observa que los valores son mayores en otoño-invierno y más bajos en primavera-verano. Idéntica situación fue registrada en otros trabajos realizados en la misma área (García de Emiliani, 1977, Daga y Pierotto 2011).

En el embalse y sus tributarios se registraron 204 taxones distribuidos en nueve grupos, las Diatomea presentaron el mayor número de especies (85), en segundo lugar las Chloroplastida (66), continúan luego las Cyanobacteria (27), Euglenozoa (17), Chrysophyceae (4), Cryptophyceae (2), Rhodophyceae (1), Xanthophyceae (1) y Dinophyceae (1).

La estación de muestreo con mayor número de especies fue E₅, con un promedio de 31 especies y el menor número de especies ocurrió en E₁ y E₄, con un promedio de 8 especies. Un análisis de la varianza no paramétrica (prueba Kruskal Wallis) para la riqueza de especies, permitió agrupar las estaciones de muestreo E₁ y E₄ por un lado y E₂, E₃ y

E₅ por el otro presentando diferencias significativas entre los dos grupos ($H= 26.91$; $p= 0.0001$).

Dentro de los resultados obtenidos las diatomeas presentaron la mayor riqueza de especies. Los taxones más frecuentes para E₁ fueron las diatomeas centrales como *Aulacoseira granulata* con una frecuencia del 100%. Esta especie está citada como abundante para numerosos embalses como el de Salto Grande (De León y Chalar, 2003), el embalse de Río Hondo (Subsecretaría de Recursos Hídricos, 2008) y Yacyretá (Meichtry de Zamburlin et al., 2013) y para tributarios del río Paraná (O'Farrell & Tell, 2001; García de Emiliani & Devercelli, 2004).

Otra diatomea representativa para E₁ fue *Cyclotella meneghiniana* presentó una frecuencia del 40%. Especie que tolera un alto rango de conductividad y es común en ambientes acuáticos con abundante materia orgánica (Isra de Alcántara et al., 2002, Ortega Murillo et al., 2010).

En la desembocadura de los tributarios las especies que presentaron mayor frecuencia fueron *Ulnaria ulna* con el 80%, *Navicula gregaria* con el 60% y *Melosira varians* con una frecuencia del 50%. Las tres especies mencionadas junto a *Gomphonema parvulum*, *Fragilaria construens*, *Navicula cryptocephala* y *Nitzschia palea* son consideradas tolerantes a la polución y buenas indicadoras de eutrofización (Sabater et al., 1988; Morales, 2016).

Las Chloroplastida presentaron una mayor riqueza de especies en las desembocaduras de los tributarios con un máximo desarrollo en primavera y verano, donde las condiciones ambientales como la poca profundidad, largos periodos de luz solar y temperaturas relativamente altas favorecieron su desarrollo (Luque y Martínez de Fabricius, 2003). Se identificaron numerosas especies unicelulares y coloniales citadas para cuerpos de agua con altos niveles de eutrofia como *Monoraphidium griffithii*, *Pediastrum boryanum* (Temponeras et al., 2000); *Actinastrum hantzschii*, *Monactinus simplex* y *Coelastrum reticulatum* (González et al., 2003; Becerra, 2009) y *Nephrocitium agardhianum*, *Staurastrum leptocladum* y *Closterium aciculare* (Canosa y Pinilla, 1998; Pinilla, 2000).

Las algas verdes filamentosas representadas por *Cladophora glomerata*, *Chaetomorpha herbipolensis*, *Ulothrix* sp., *Chaetophora* sp. y *Oedogonium* sp., generalmente se desarrollan adheridas a algún tipo de sustrato y su presencia en el plancton se debe al efecto

de la deriva procedente del bento como consecuencia de la acción de la velocidad de corriente (Biasotti et al., 2014; Galea et al., 2014).

Las Cyanobacteria ocuparon el tercer lugar en número de especies, la mayoría de los taxones son filamentosos, De León y Chalar (2003) afirman que la dominancia de formas filamentosas sobre las coloniales, indican condiciones turbulentas del sistema, situación acorde al período de estudio.

Se identificaron 24 géneros de cianobacterias de los cuales 13 son reportados en la literatura como productores de cianotoxinas: *Dolichospermum*, *Gomphosphaeria*, *Limnothrix*, *Lyngbya*, *Merismopedia*, *Microcystis*, *Oscillatoria*, *Phormidium*, *Planktothrix*, *Pseudoanabaena*, *Synechocystis*, *Synechococcus* y *Woronichinia* (De León, 2002; Bonilla, 2009; Gianuzzi, 2011; Aguilera et al., 2018).

Dentro de Euglenozoa *Trachelomonas volvocina* presentó la mayor frecuencia (15%), se la puede encontrar en todo tipo de ambiente, sin embargo es más representativa en aguas mesotróficas a eutróficas, por lo que se considera bioindicadora de altos niveles de trofia (Pinilla, 2000; Rodríguez-Zambrano y Aranguren-Riaño, 2014).

Se identificó una especie de Rhodophyceae, *Compsopogon coeruleus* su presencia en la parte baja de los tributarios es por arrastre después de las crecidas (Carmona, 2012). En Córdoba dicha especie ha sido citada en dos hábitats bien diferentes, en arroyos serranos de aguas transparentes y baja conductividad y para un lago urbano con tendencia a eutrofizarse en el verano y altos valores de conductividad (Leyes et al., 2018).

Las Chrysophyceae fueron de aparición esporádica a excepción de *Anthophysa vegetans* que estuvo presente en todas las estaciones del año a excepción del verano. Las Cryptophyceae, flageladas adaptadas a las bajas temperaturas y a la escasez de luz se identificaron solo en E₁.

El grupo de Dinophyceae estuvo representado por un solo taxón: *Ceratium furcoides*. Para ambientes de agua dulce se reportan 6 especies de *Ceratium* donde las habituales son *C. hirundinella* y *C. furcoides* (Popovsky y Pfister, 1990). Ambas especies a partir de la década del 90 comenzaron a expandirse por Sudamérica (Guerrero y Echenique, 1997; Boltovskoy et al., 2013; Silva et al., 2012).

En los últimos años *C. furcoides* desplazó a *C. hirundinella*, probablemente un aumento de nutrientes y el cambio climático fueron los principales factores que contribuyen al establecimiento de *C. furcoides* (Meichtry de Zaburlin et al., 2014; Cavalcante et al., 2016). Almanza et al., (2016) sugieren que la plasticidad fenotípica de *C. furcoides* podría favorecer la capacidad invasora de este organismo, proporcionando una ventaja adicional para generar floraciones, así como para establecerse y dominar en el nuevo hábitat. *Ceratium* no produce toxinas pero genera numerosos impactos en el recurso hídrico, como modificar las propiedades organolépticas del agua, dificultar y/o encarecer los procesos de potabilización debido a la gran movilidad y tamaño, los organismos decantados permanecen activos, nadan arrastrando parte del floc (decantador), lo que produce un aumento en la turbiedad del agua disminuyendo la eficacia del decantador. Pueden llegar hasta la superficie siendo arrastrado hacia los filtros provocando el taponamiento prematuro de los mismos (Girbal et al., 2000).

El número de células de fitoplancton no presentó diferencias significativas al analizar las muestras tomadas en distinta profundidad en la estación E₁

(Prueba de *Kruskal-Wallis*, $H=4.64$; $p=0.098$). Si se observaron diferencias significativas para el número de células entre E₁ y las desembocaduras de los tributarios, E₂, E₃, E₄ y E₅ ($H=15.54$; $p=0.0037$) como también el biovolumen presentó diferencias significativas entre E₁ y el resto de los tributarios ($H=22.1$; $p=0.0002$). La mayor abundancia celular en E₁ ocurrió durante el invierno de 2014 y fue de 10850 cél/mL con un biovolumen de 55 mm³/L (Figura 2). La diatomea *Aulacoserira granulata* fue dominante con 7000 cél/mL, las células restantes corresponden a otras diatomeas y a *C. furcoides*.

En los muestreos restantes se observaron entre 500 a 5600 cél/mL, con biovolúmenes entre 12 y 146 mm³/L. Los mayores valores de biovolumen se corresponden con mayores abundancias de *Ceratium*. Al estudiar la dinámica de las poblaciones fitoplanctónicas se considera que es de gran importancia tener en cuenta el número de células y el biovolumen, ya que un análisis basado sólo en el número de células podría exagerar la importancia de las formas pequeñas, mientras que un análisis basado sólo en el biovolumen puede aumentar la importancia de las formas de gran tamaño (Fernández, 2010).

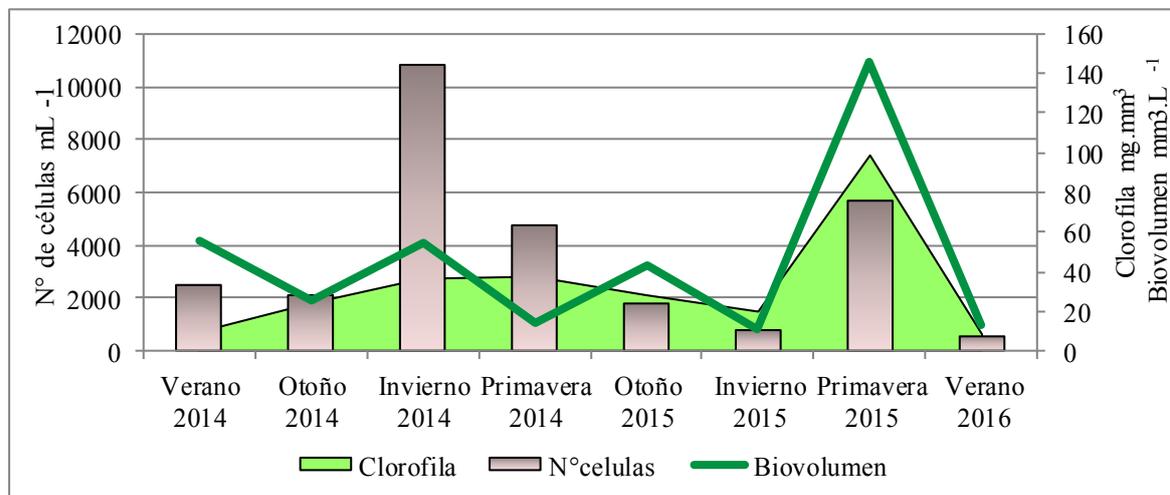


Figura 2. Variación del número de células, biovolumen y clorofila a en la estación paredón embalse San Roque (E₁, 0.30m) durante el período muestreado.

En la desembocadura de los tributarios el número de células estuvo comprendido entre 50 a 1700 cél/mL y biovolumen entre 0.07 y 12 mm³/L. A excepción del muestreo del verano de 2016 en la desembocadura del arroyo Los Chorrillos (E₄), donde se registraron 15000 cél/mL, de *C. furcoides*. Esta distribución irregular puede deberse a la acción del viento que llevó todos los

organismos hacia E₄, donde el agua adquirió un color marrón rojizo y un fuerte olor a pescado. Situación semejante fue observada en el embalse Escaba de Tucumán donde el mayor número de *Ceratium hirundinella* se registró en el río Singuil, tributario del embalse Escaba y atribuyen este aumento a una influencia del viento (Martínez de Marco et al., 2018).

El biovolumen de los tributarios (a excepción del valor extraordinario del verano de 2016 para E₄) se encuentra entre los valores mencionados para una revisión de unos 50 ríos del mundo (81 % templados y 19 % tropicales) con valores promedios entre 0.06 y 25 mm³ (Rojo et al., 1994, tomado de Zalocar, 1999).

Se observaron cianobacterias productoras de toxinas de los géneros *Planktothrix* y *Limnotrix* en las desembocaduras de los tributarios E₄ y E₅ con biovolúmenes de 0.006 mm³/L y de 0.03 mm³/L. La Organización Mundial de la Salud establece Niveles Guía de biovolúmenes para cianobacterias potencialmente productoras de toxinas (Chorus y Bartram, 1999) donde valores entre 0.02 a 0.2 mm³/L indicarían un nivel de vigilancia aconsejando aumentar la frecuencia de muestreos.

La clorofila *a* en la estación E₁ presentó el mínimo valor en el verano de 2016 coincidiendo con el menor número de células y el menor valor de biovolumen. El máximo valor de clorofila se registró en la primavera de 2015 donde también se registró el máximo valor de biovolumen.

Los mayores valores de clorofila *a* se corresponden con altas densidades de *Ceratium*, si bien no hay una relación lineal entre el tamaño celular y el contenido de clorofila *a*, los organismos de mayor volumen celular tienen un contenido de clorofila *a* mayor que los organismos pequeños y contribuyen en mayor proporción a la productividad neta del ecosistema (Felip y Catalán, 2000). La clorofila *a* presentó una correlación positiva con el número de células ($r=0.76$; $p=0.043$).

Las dimensiones de *C. furcoides* no fue la misma a lo largo de todo el estudio. Al realizar las mediciones de varios organismos se pudo observar que cuando la abundancia de *C. furcoides* fue mayor las células tenían menor tamaño (Media del largo celular = 185 μ m; Media del ancho = 30 μ m). Por el contrario, cuando la abundancia fue menor, el tamaño de *C. furcoides* se incrementó (Media del largo celular = 190 μ m; Media del ancho = 41 μ m). La diversidad se calculó a través del índice de Shannon & Weaver y presentó valores bajos (< 1) en el embalse propiamente dicho (E₁) debido a la desproporcionada representación numérica de una especie dominante y subdominancia de otras pocas especies, así como una reducida abundancia para la mayoría de los taxones. Resultados semejantes fueron observados para el San Roque hace poco más

de una década (Prósperi et al., 2007), mientras que en un estudio realizado hace más de cuarenta años para el mismo embalse la diversidad oscilaba entre 1.5 y 3 bits (García de Emiliani, 1977). Una reducción de la diversidad es un excelente indicador de contaminación (Patrick et al., 1949) ya que la polución rompe un equilibrio preexistente y la comunidad se simplifica. Disminuye la riqueza de especies, pero algunas de ellas pueden estar representadas por un número elevado de individuos. En tal sentido, Sournia (1978) señaló que la diversidad disminuye cuando los individuos de especies raras son sustituidos por individuos de especies que ya eran comunes.

El análisis del estado trófico se efectuó a través del TSI (Trophic Status Index), el cual tiene en cuenta la concentración de clorofila *a*, la concentración de fósforo total y la transparencia del agua medida con el disco de Secchi. Los valores del TSI para el disco de Secchi oscilaron entre 59 a 68, para el fósforo, estuvieron comprendidos entre 69 a 115 y para la clorofila entre 48 a 75 (Tabla 3).

Tabla 3. Variación del estado trófico del embalse San Roque.

ESTADO TROFICO	TSI	ESTACIONES DEL AÑO	TSI DISCO SECCHI (m)	TSI P (mg m ⁻³)	TSI Clorofila (mg m ⁻³)
Oligotrófico	0 - 30				
Mesotrófico	30 - 60				
Eutrófico	60 - 90	Verano 2014	68	69	49
		Otoño 2014	64	69	60
		Invierno 2014	59	100	66
		Primavera 2014	61	69	65
		Otoño 2015	64	83	61
		Invierno 2015	59	94	57
		Primavera 2015	67	115	75
		Verano 2016	68	88	48
Hipereutrófico	> 90				

De acuerdo a los valores del disco de Secchi en el 75% de los muestreos clasificamos al embalse como eutrófico y el 25% restante como mesotrófico. De acuerdo al fósforo en el 62 % de los muestreos el embalse se encuentra eutrófico con tendencia a hipertrofico. Teniendo en cuenta la clorofila en el 50% de los muestreos el embalse se encuentra en estado mesotrofico y el 50% restante eutrófico.

Altos valores del índice de estado trófico calculados a partir de la concentración de fósforo total en relación a las otras variables también apoyarían el hecho que el fitoplancton probablemente esté

limitado por otros factores más que por la concentración de fósforo (Fernández, 2010). Carlson (1977) sugiere que, para los fines de clasificación del estado trófico, se le dé prioridad a parámetros biológicos tales como la clorofila.

En coincidencia con Fernández-Cirelli (1999) la eutrofización debe analizarse desde el punto de vista de sus causas y de sus consecuencias, ya que termina siendo un problema para la salud de la población.

CONCLUSIONES

Se determinaron un total de 204 Taxa donde el componente dominante fue el dinoflagelado *Ceratium furcoides* y como subdominante la diatomea *Aulacoseira granulata*.

La elevada biomasa fitoplanctónica la baja diversidad, los cambios de coloración y el estado de eutrofia son características que indican un significativo deterioro de la calidad del recurso hídrico.

Dado que el uso principal es la provisión de agua para consumo se considera que es importante planificar actividades concretas de control de eutrofización y para ello se hará necesario diseñar un plan de manejo adecuado.

REFERENCIAS

- Aguilera, A., Haakonsson, S., Martina, M. V., Salerno, G. L. y Echenique, R. (2018). Bloom-forming cyanobacteria and cyanotoxins in Argentina: A growing health and environmental concern. *Limnologia*, 69:103-114.
- Almanza, V., Bicudo, C. M., Parra, O. y Urrutia, R. (2016). Características morfológicas y limnológicas de las floraciones de *Ceratium furcoides* (Dinophyta) en un lago somero de Chile Central. *Limnetica*, 35 (1): 253-268.
- Amé, V., Ferral, A. y Solís, V. (2017). Eutrofización en el embalse San Roque y floraciones masivas de cianobacterias. Seguimiento por técnicas geoespaciales. UNCIENCIA. <http://unciencia.unc.edu.ar/2017>.
- APHA. (1992). *Standard Methods for the Examination of Waters and Wastewaters*, 19th edn. APHA/AWWA/WPCF, Washington, DC. P. 1193.
- Becerra, C. L. E. (2009). Catálogo fitoplanctónico de los lagos del Dique, municipio de Xalapa, Veracruz, México (Tesis de licenciatura). Universidad Veracruzana: Veracruz, México.
- Biasotti, A. E., Álvarez, S. B., Bazán, G. I. y Martínez de Fabricius, A. L. (2014). Variación estacional de la comunidad microfitoplanctónica del curso medio del Río Colorado (La Pampa-Argentina). *Biología Acuática*, 30: 249-258.
- Boltovskoy, A., Echenique, R. y Guerrero, J. M. (2013). Colonización de limnotopos de Argentina por *Ceratium hirundinella* (Dinophyceae). *Memorias XXIX Jornadas Argentinas de Botánica y XV Reunión Anual de la Sociedad Botánica de Chile. Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 38 (Supl.).
- Bonilla, S. (2009). Cianobacterias planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión (No. 582.232 UNE). UNESCO. Administración de las Obras Sanitarias del Estado (Uruguay). Montevideo. Universidad de la República.
- Cachi, J. (1975). Variaciones Planctónicas del Embalse San Roque y su relación con los procesos de potabilización. O.S.N., 26 pp.
- Canosa, A. y Pinilla, G. (1998). Evaluación de la población bacteriana total en tres cuerpos de agua lénticos mediante la técnica de epifluorescencia. Informe final de proyecto. Colciencias, Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogotá. 60 pp.
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology Oceanography*, 22: 361-369.
- Carmona Jiménez, J. (2012). Las algas rojas (Rhodophyta) de agua dulce en la región central de México. Taxonomía y distribución. *Monografías ficológicas V. 4*.
- Cavalcante, K. P., Cardoso, L. S., Sussella, R. y Becker, V. (2016). Towards a comprehension of *Ceratium* (Dinophyceae) invasion in Brazilian freshwaters: autecology of *C. furcoides* in subtropical reservoirs. *Hydrobiologia*, 771(1):265-280.
- Chorus, I. y Bartram, J. (1999). Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management / edited by Ingrid Chorus and Jamie Bertram. WorldHealth Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/42827>
- Daga, C. y Pierotto, M. (2011). Cianobacterias de la cuenca del Embalse San Roque. *Boletín Sociedad Argentina de Botánica*, 46 (3-4): 227-234.
- Degano M., Rodríguez, M. I. y Dasso C. (2016). Dinámica térmica de cuerpos de agua eutróficos:

- caso Embalse San Roque. *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. V 3(1): 93-100.
- De León, L. (2002). Floraciones de cianobacterias en aguas continentales del Uruguay: causas y consecuencias. En: Domínguez, A. & Prieto, R. G. (eds.). *Perfil ambiental del Uruguay 2002*. Nordan Comunidad, Montevideo: 28-37.
- De León, L. y Chalar, G. (2003). Abundancia y diversidad del fitoplancton en el embalse de Salto Grande (Argentina – Uruguay). *Ciclo estacional y distribución espacial*. *Limnetica*, 22 (1-2): 103-113.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M. y Robledo, C. W. (2017). Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Felip, M. y Catalan, J. (2000). The Relationship Between Phytoplankton Biovolume and Chlorophyll in a Deep Oligotrophic Lake: Decoupling in Their Spatial and Temporal Maxima. *Journal of Plankton Research*, 22(1):91-105.
- Fernández Cirelli, A. (1999). Aprovechamiento y Gestión de Recursos Hídricos. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.
- Fernández, C. (2010). Caracterización limnológica de un ambiente eutrófico: el embalse Paso de las Piedras, Argentina. *Bioecología del fitoplancton*. (Tesis de Doctorado en Biología). Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca.
- Gaiero, D. (1998). Hidrogeoquímica de un sistema de la región semiárida: el Río Suquía, Córdoba, 2. Transporte de sólidos disueltos, meteorización y consumo de CO₂. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 53(3): 337-347.
- Galea, M. J., Bazán, G. I., Álvarez, S. B. y Martínez De Fabricius, A. L. (2014). Estudio del fitoplancton aguas arriba y aguas abajo del Dique Embalse Casa de Piedra, río Colorado (La Pampa, Argentina). *Biología Acuática*, 30: 287-300.
- García de Emiliani, M. O. (1977). Ciclo Anual del Fitoplancton en el Embalse San Roque (Córdoba, Argentina). *Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral*, 8:1-12.
- García de Emiliani, M. O. y Devercelli, M. (2004). Estructura y dinámica del fitoplancton de un río tributario (Salado) y cauces secundarios del río Paraná (Santa Fé, Coronda y El Vado) en el área de confluencia (Santa Fé, Argentina). *Revista FABICIB*, 8: 23-42.
- Gavilán, J. G. (1981). Study of Water Quality in the San Roque Reservoir. *Water Quality Bulletin, Environment Canada*, 6(4): 136-158.
- Gianuzzi, L. (2011). *Cianobacterias como Determinantes Ambientales en la Salud*, 1a ed., Buenos Aires, Ministerio de Salud de la Nación.
- Girbal, A., Lammel, E. y Busso, F. (2000). Utilización de permanganato de potasio para mitigar un bloom de *Ceratium hirundinella*. *Resúmenes del Seminario Internacional: Identificación y Control de Algas en la Producción de Agua Potable*.
- González, E. J., Ortaz, M., Peñaherrera, C., Montes, E., Matos, M. L. y Mendoza, J. (2003). Fitoplancton de cinco embalses de Venezuela con diferentes estados tróficos. *Limnetica*, 22 (1-2): 15-35.
- Gruenert, U. y Raeder, U. (2014). Growth responses of the calcite-loricated freshwater phytoflagellate *Phacotus lenticularis* (Chlorophyta) to the CaCO₃ saturation state and meteorological changes. *Journal of Plankton Research*, 36(3): 630-640.
- Guarrera, S. (1948). El fitoplancton del embalse San Roque. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales "Bernardino Rivadavia"*, 1 (2): 29-55.
- Guerrero, J. M. y Echenique, R. O. (1997). *Ceratium hirundinella* blooms in Argentine reservoirs. *Harmful Algae News* 16: 3.
- Hillebrand, H., Durselen, C. D., Kirschtel, U., Pollinger, T. y Zohary, T. (1999). Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology*, 35: 403-424.
- Isra de Alcántara, I., Garduño-Monroy, V. H. y Ortega-Murillo, R. (2002). Paleoambiente lacustre del Cuaternario tardío en el centro del lago de Cuitzeo. *Hidrobiológica*, 2: 61-78.
- Leyes, C., Bustamante, A., Giovanola, C. y Daga, C. (2018). Primer registro de *Compsopogon caeruleus* (Rhodophyta, Compsopogonales) en Córdoba (Argentina). *Lilloa*, 55(2): 67-74.
- Luque, M. E. y Martínez de Fabricius, A. L. (2003). Distribución temporal del fitoplancton y epilíton en el río Piedra Blanca (Córdoba, Argentina). *Limnetica*, 22(3-4): 19-34.
- Martínez de Marco, S. N., Tracanna, B. C., Isasmendi, S. C., Alderete, M del C., Taboada, M. de los A. y Mirande, V. (2018). Evaluación del fitoplancton en el embalse Escaba (Tucumán – Argentina) para caracterizar la calidad de sus aguas. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 53 (4): 521-542.
- Meichtry de Zaburlin, N., Vogler, R. E., Llano, V. M. y Martens, I. S. M. (2013). Fitoplancton del embalse Yacyretá (Argentina Paraguay) a una década de su llenado. *Revista Mexicana de*

- Biodiversidad, 84(1): 225-239
- Meichtry de Zaburlin, N., Boltovskoy, A., Costigliolo Rojas, C. y Rodríguez, R. (2014). Primer registro del dinoflagelado invasor *Ceratium furcoides* (Levander) -Langhans 1925 en la Argentina y su distribución en el área de influencia del Embalse Yacuyretá (río Paraná, Argentina-Paraguay). *Limnetica*, 33 (1): 153-160.
- Morales, E. A. (2016). Floración de *Ceratium furcoides* (Levander) Langhans (Dinoflagellata, Dinophyceae) en la represa de La Angostura, Cochabamba, Bolivia. *Acta Nova*, 7(4):389-398.
- O'Farrell, I. y Tell, G. (2001). Morphological variability of *Aulacoseira granulata* (Ehr.) Simonsen (Bacillariophyceae) in the Lower Paraná River (Argentina). *Limnology*, 2(2):65-71.
- Ortega-Murillo, M. R., Alvarado-Villanueva, R., Hernández Morales, R. y Sánchez-Heredia, J. D. (2010). Evolución trófica de un lago tropical hiposalino en México con base al fitoplancton. *Revista Biológicas*, 12: 75-81.
- Pasquini A. I., Lecomte, K. L., Piovano E. y Depetris P. J. (2006). Recent rainfall and runoff variability in central Argentina. *Quaternary International*, 158: 127-139.
- Patrick, R. (1949). A proposed biological measure of stream conditions, based on a survey of the Conestoga Basin, Lancaster Country, Pennsylvania. *Proc. Acad. Nat. Sc. Philadelphia*. 101: 227- 341.
- Pinilla, G. A. (2000). Indicadores biológicos en ecosistemas acuáticos continentales de Colombia. Bogotá. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Piovano, E., Ariztegui, D., Córdoba, F., Cioccale, M. y Sylvestre, F. (2009). Hydrological variability in South America below the Tropic of Capricorn (Pampas and eastern Patagonia, Argentina) during the last 13.0 ka. En: Vimeux, F., Sylvestre, F., Khodri, M. (Eds.) *Past climate variability from the Last Glacial Maximum to the Holocene in South America and Surrounding regions: From the Last Glacial Maximum to the Holocene*. Springer - Developments in Paleoenvironmental Research Series (DPER), 323-351.
- Pizzolón, L., Tracanna, B., Prósperi, C. y Guerrero, J. (1999). Cyanobacterial blooms in argentinean inland water. *Lakes and Reservoirs: Research & Management*, 4: 101-105.
- Popovsky, J. y Pfister, L. A. (1990). Dinophyceae (Dinoflagellida). In: Ettl, H., Gerloff, J., Heynig, H. and Mollenhauer, D., *Süßwasserflora von Mitteleuropa. Begründet von A. Pascher. Band 6*. Jena, Gustav Fischer Verlag.
- Prósperi, C., Pierotto, M., Daga, C. y Rincón, A. (2007). Monitoreo de cianobacterias tóxicas en embalses de Córdoba (Programa Conapris). Memorias V Taller Internacional sobre enfoques regionales para el desarrollo y gestión de embalses en la cuenca del Plata. Itaipú. Brasil- Paraguay.
- Reyna, S., Orso, M., Reyna, E., Lábaque, M. y Gómez, C. (2005). Plan de gestión de los recursos hídricos de la provincia de Córdoba. Subsecretaría de Recursos Hídricos.
- Rodríguez, M. I., Cossavella, A., Oroná, C., Larrossa, N., Avena, M., Rodríguez, A., Del Olmo, S., Bertucci, C., Muñoz, A., Castelló, E., Bazán, R. y Martínez, M. (2000). Estudios preliminares de la calidad de agua y sedimentos del embalse San Roque relacionados al proceso de eutroficación. Memorias XVIII Congreso Nacional Del Agua, Santiago Del Estero, Argentina.
- Rodríguez, M. I., Busso, F., Bustamante, M. A., Ruibal Conti, A. L., Ruiz, M. y Angelaccio, C. M. (2005). Floraciones de algas en el embalse San Roque (Córdoba). Memorias XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. Mendoza.
- Rodríguez, M. I., Ruiz, M., Nadal, N., Halac, S., Olivera, P., Busso, F. y Bonfanti, E. (2013). Monitoreo y calidad de agua del embalse San Roque (Cba., Argentina). Memorias XXIV Congreso Nacional del Agua (CONAGUA). San Juan. Argentina.
- Rodríguez-Zambrano, A. P. y Aranguren-Riaño, N. J. (2014). Comunidad planctónica de un embalse con alta tensión ambiental: La Playa, cuenca alta del río Chicamocha (Tuta, Boyacá), Colombia. *Biota Colombiana*, 15 (2): 95-110.
- Ruibal Conti, A. L., Bustamante, A., Granero, M., López, F., Girbal, A., Lammel, E., Simonin, M. y Busso, F. (1999). Estudio de la evolución de la calidad de agua del embalse San Roque (Córdoba) asociado al desarrollo de floraciones de *Ceratium*. Memorias Congreso Argentino de Gran Presas y Aprovechamiento Hidroeléctricos. San Martín de Los Andes. Argentina.
- Sabater, S., Sabater, F. y Armengol, J. (1988). Relationships between diatom assemblages and physico-chemical variables in the River Ter (N.E. Spain). *Internationale Revue gesamten Hydrobiologie*, 73: 171-179.
- Schlegel, I., Koschel, R. y Krienitz, L. (1998). On the occurrence of *Phacotus lenticularis* (Chlorophyta) in lakes of different trophic state. *Hydrobiologia*, 69: 353- 361.
- Shannon, C. E. y Weaver, W. (1949). *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana.

- Chicago, III. Univ. Illinois Press, London.
- Silva, L. C., Leone, I. C., Santos-Wisniewski, M. J., Peret, A. C. y Rocha, O. (2012). Invasion of the dinoflagellate *Ceratium furcoides* (Levander) Langhans 1925 at tropical reservoir and its relation to environmental variables. *Biota Neotropica*, 12(2): 93–100.
- Sournia, A. E. (1978). *Phytoplankton manual*. Monographs on Oceanographic Methodology. 6. UNESCO. Paris.
- Stumm, W. y Morgan, J.J. (1981). *Aquatic Chemistry: An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters*. Wiley-Interscience, New York.
- Subsecretaría de Recursos Hídricos. (2008). *Plan Nacional Federal de los Recursos Hídricos*. Coordinado por Andrés Rodríguez 1º ed. Buenos Aires. Ministerio de Planificación Federal.
- Sun, J. y Liu, D. (2003). Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, V 25: 1331-1346.
- Temponeras, M., Kristiansen, J. y Moustaka-Gouni, M. (2000). Seasonal variation in phytoplankton composition and physicalchemical features of the shallow Lake Doirani, Macedonia, Greece. *Hydrobiologia*, 424: 109-122.
- Winsborough, B. y Golubić, S. (1987). The role of diatoms in stromatolite growth: two examples from modern freshwater settings. *Journal of Phycology*. 23: 195-201.
- Zalocar de Domitrovic, Y. (1999). *Estructura y dinámica del fitoplancton en la cuenca del eje potámico Paraguay-Paraná (Argentina)*. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Córdoba.

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

- Daga, I. C., Fernández Belmonte, M. C. y Reyna, S. M. (2020). Composición algal y bioindicadores de calidad de agua. Caso de estudio: Embalse San Roque, Córdoba, Argentina. *Cuadernos del CURIHAM*. 26: 1-11. doi: 10.35305/curiham.v26i0.143

Tipo de Publicación: ARTICULO.

Trabajo recibido el 05/06/2020 y aprobado para su publicación el 27/07/2020.

UNA APROXIMACIÓN A LAS DESCARGAS POR EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL ACUÍFERO FREÁTICO PAMPEANO EN LA CUENCA DEL ARROYO DEL AZUL (LLANURA PAMPEANA)

AN APPROACH TO THE EVAPOTRANSPIRATION DISCHARGES OF THE PAMPEANO AQUIFER IN THE DEL AZUL BASIN (PAMPEAN PLAIN)

Romina Marcovecchio⁽¹⁾⁽²⁾ y Marcelo Varni^{(1)(3)(*)}

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

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

⁽³⁾ Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Rectorado y Facultad de Ciencias Humanas, Buenos Aires, Argentina.

^(*) e_mail: marcelovarni@gmail.com

RESUMEN

Se estudian las recargas mensuales totales, las descargas por flujo subterráneo a zonas de descarga y las pérdidas por evapotranspiración directa desde el nivel freático a partir de la variación diaria del nivel freático en una perforación somera en la zona llana de la cuenca del arroyo del Azul, ubicada en la llanura pampeana. Los niveles freáticos se registraron mediante un sensor de presión piezorresistivo. El acuífero freático analizado es el acuífero Pampeano. Los niveles freáticos variaron en el período analizado (2007-2018) entre 0.5 y 4 m de profundidad. Se ha encontrado que las descargas por evapotranspiración directa desde el nivel freático son una fracción relevante de la recarga total (42%). Las descargas por evapotranspiración directa son mayores en los meses cálidos, aunque la menor variabilidad interanual se da en los meses fríos y en los meses cálidos. La mayor variabilidad se da en otoño y primavera. En el período 2007-2018 la recarga total anual promedio fue de 252 mm, la pérdida anual promedio de la recarga a la atmósfera fue de 105mm, con una desviación estándar de 25 mm y un coeficiente de variación de 0.24. Este porcentaje importante de la recarga total que se pierde por evapotranspiración directa hace que se deban considerar con especial atención los balances de agua en el suelo para estimar la recarga al acuífero (que no consideran esta pérdida) y explica ciertas incongruencias con los modelos de flujo de aguas subterráneas que exigían una disminución de la recarga en la zona más llana para posibilitar el ajuste de los niveles freáticos.

Palabras clave: recarga total al acuífero freático, descarga por flujo subterráneo, descarga directa por evapotranspiración

ABSTRACT

Total monthly recharges, discharges by groundwater flow to discharge zones and losses by direct evapotranspiration from the water table are studied from the daily variation of the water table level in a shallow well in the flat area of the Azul stream basin., located at the Pampean plain. The phreatic levels were recorded using a piezoresistive pressure sensor. The analyzed phreatic aquifer is the Pampeano aquifer. The phreatic levels varied in the period analyzed (2007-2018) between 0.5 and 4 m deep. Direct evapotranspiration discharges from the water table have been found to be a relevant fraction of the total recharge (42%). Direct evapotranspiration discharges are higher in warm months, although the least inter-annual variability occurs in cold and warm months. The greatest variability occurs in autumn and spring. In the period 2007-2018, the average annual total recharge was 252 mm, the average annual loss of recharge to the atmosphere was 105 mm, with a standard deviation of 25 mm and a coefficient of variation of 0.24. This important percentage of the total recharge that is lost by direct evapotranspiration means that the soil water balances must be considered with special attention to estimate the recharge to the aquifer (which does not consider this loss) and explains certain inconsistencies with the groundwater flow models. that required a decrease in recharge in the flattest area to enable the adjustment of the water table levels.

Keywords: groundwater total recharge, groundwater flow discharge, direct discharge by evapotranspiration

INTRODUCCIÓN

El área de estudio se ubica en la Pampa Húmeda argentina, con altitudes entre 240 y 70 msnm. Se trata de una zona de gran importancia desde el punto de vista económico debido a las características de su clima y sus suelos, con una excelente aptitud para el desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas. La actividad agrícola se basa en los cultivos de trigo, maíz, soja, cebada, centeno, lino y girasol, así como la papa. También se desarrollan en la región actividades pecuarias de cría de ganado (bovino y ovino), y también la lechería.

El área concreta es la cuenca del arroyo de Azul (Figura 1). El curso nace en cercanías de la localidad de Chillar y transporta sus aguas hacia el norte, hasta perderse en la llanura antes de alcanzar el río Salado. En la zona llana más baja, a unos 80 km al norte de la ciudad de Azul, el curso es interceptado y drenado parcialmente por un canal artificial, el cual se adopta en este trabajo como límite norte del área de estudio. La cuenca está integrada por una gran planicie al norte y un área más pequeña de suaves serranías al sur, y ambas están conectadas a través del piedemonte. Estos tres sectores podrían considerarse esquemáticamente como subcuencas: alta (serranías), intermedia (piedemonte) y baja (llanura). La pendiente media del terreno es del 5% en la zona alta, entre 0.5 y 0.8% en la intermedia y 0.2% en la baja. El comportamiento global de la región es el de una llanura (Sala et al., 1987).

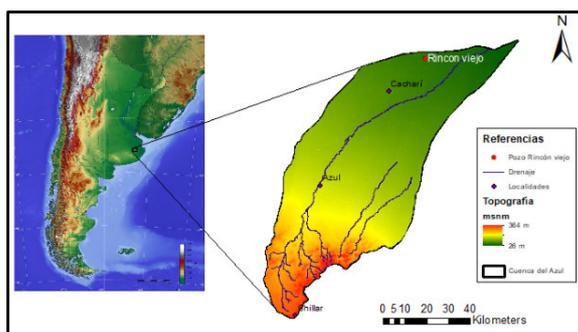


Figura 1. Ubicación del área de estudio y del pozo analizado.

En las serranías ubicadas al sur existen afloramientos rocosos compuestos por rocas metamórficas, tonalitas, migmatitas y cuarcitas (González Bonorino et al., 1956). Dichas rocas se profundizan hacia el norte, constituyendo la base del sistema hidrológico, y alcanzan una profundidad cercana a los 800 m al noreste del área de estudio. En la ciudad de Azul (altitud de 140 msnm) dicho basamento se ha

detectado a unos 120 m de profundidad. Encima del basamento cristalino yacen sedimentos loésicos que contienen el acuífero freático Pampeano (Sala et al., 1983), que está constituido por arenas limosas y limos arcillosos con mayor o menor presencia de arcillas. Estos sedimentos muestran cierta heterogeneidad vertical y poca continuidad espacial. La Formación Post-Pampeano (Fidalgo et al., 1975) se ubica por encima del Pampeano, y a efectos prácticos se pueden reunir en una sola unidad hidrogeológica.

En las cuencas alta e intermedia la conductividad eléctrica de las aguas subterráneas presenta valores menores a 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$, aunque pueden observarse leves incrementos en algunos sectores aledaños a los cursos de agua, donde se produce la descarga parcial de aguas subterráneas más profundas, asociadas a un mayor recorrido y tiempo de renovación. En la cuenca baja existe un aumento gradual de salinidades hasta valores de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Desde el punto de vista químico las aguas son preponderantemente bicarbonatadas, con predominio cálcico en cabeceras, pasando a dominar las sódicas en el sentido del flujo, para terminar con incremento de los contenidos de sulfatos y cloruros al final de la cuenca.

La estación con registros climáticos más prolongados en la cuenca es la estación Azul Aero, perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional. En ella la precipitación (P) media anual es de 911 mm (1901-2019) y la temperatura media anual es 14.4°C (1966-2019). Los meses menos lluviosos son Junio, Julio y Agosto (45, 45 y 46 mm, respectivamente) mientras que los más lluviosos son Enero, Febrero y Marzo (93, 90 y 118 mm, respectivamente). De acuerdo con la clasificación de Thornthwaite, el clima de la región es subhúmedo-húmedo, mesotermal, con pequeño a nulo déficit de agua.

El objetivo del presente trabajo es lograr una aproximación de la evapotranspiración desde el acuífero freático en la cuenca baja, debido a que se considera que la evapotranspiración llega a tener magnitudes importantes en zonas de llanura como las que aborda el presente estudio. La evaporación desde un nivel freático somero es un proceso importante para los balances de agua y sales. En este proceso son relevantes dos mecanismos: evaporación desde la superficie del terreno sostenida por un flujo líquido continuo sostenido desde el nivel freático, y evaporación subsuperficial mantenida por la remoción de vapor difusivo a través del medio poroso (Assouline et al., 2013). Miao et al. (2017) analizan cómo procesos de

congelamiento y descongelamiento afectan la evaporación desde niveles freáticos someros. van Dam y Feddes (2000) analizan tanto la infiltración como la evaporación y los niveles freáticos resultantes a través de simulación numérica. Menking et al. (2000) estudiaron la evaporación desde niveles freáticos someros, pero en clima árido. Zhang et al. (2001) analizaron este proceso derivando ecuaciones a partir de mediciones en lisímetros. En nuestro caso, se ha aproximado este valor a partir de registros de niveles freáticos obtenidos en un pozo de observación somero localizado en la zona llana de la cuenca.

METODOLOGÍA

El Instituto de Hidrología de Llanuras posee una red de pozos someros de monitoreo instalados a lo largo y ancho de la cuenca del arroyo del Azul. Los mismos poseen limnigrafos digitales con sensor piezoresistivo para el registro del nivel freático. Este trabajo analiza los datos diarios de la perforación Rincón Viejo, ubicada en la parte baja de la cuenca, entre los años 2007 y 2018.

La recarga es el agua que infiltra a través de la zona no saturada hasta el nivel freático y, por lo tanto, aumenta el volumen de agua almacenada en la zona saturada (Lerner et al., 1990; Healy y Cook, 2002; Scanlon et al., 2002). Se utilizó en este estudio el método de fluctuación del nivel freático (WTF) para el cálculo de la recarga mensual, a partir de datos diarios. Este método principalmente es aplicable a acuíferos freáticos (Risser et al., 2005).

Las mediciones frecuentes y precisas del nivel del agua disponibles se encuentran en un área no afectada por actividades humanas. El método es muy útil para detectar variaciones de recarga con una discriminación temporal detallada (Varni et al., 2013). Se basa en la premisa de que el aumento de los niveles de agua subterránea se debe a la recarga de agua que llega a la capa freática. Suponiendo que la cantidad de agua disponible en una columna de agua, es igual al rendimiento específico (S_y) multiplicado por la altura de la columna de agua, siendo entonces posible el cálculo de la recarga a partir de (Healy y Cook 2002; Varni et al., 2013):

$$R = S_y \cdot \frac{\Delta h}{t} \quad (1)$$

Un desafío del método WTF implica la estimación del rendimiento específico (S_y) del acuífero a la profundidad donde se produce la fluctuación del nivel freático. Para estimar S_y , se propuso un procedimiento gráfico, para el cual, se traza un gráfico de dispersión de los valores de precipitación (abcisas) frente a las elevaciones del nivel freático (ordenadas) evento a evento precipitación-recarga. La inversa de la pendiente de una línea dibujada a través del origen hasta justo por encima de todos los puntos medidos proporciona el valor máximo del rendimiento específico (Varni et al., 2013).

Se puede hacer una distinción entre recarga total, obtenida mediante la ecuación (1), y neta (Crosbie et al., 2005). La cantidad total de agua que llega a la capa freática es la recarga total, mientras que la recarga neta explica la posterior pérdida de agua de la zona saturada por evapotranspiración, o sea la recarga de agua que efectivamente queda finalmente en el acuífero freático. En áreas con nivel freático poco profundo, vegetación de raíces relativamente profundas, y/o suelos con materiales finos que produzcan una franja capilar muy desarrollada, esta pérdida de agua posterior puede ser considerable (Barua et al., 2020).

El cálculo de la recarga total mensual R_t se calcula a partir de la sumatoria de ascensos diarios individuales de cada mes $\sum \Delta h_i$. La recarga neta mensual menos la descarga por flujo subterráneo se obtiene de la diferencia de altura del nivel freático (Δh) entre los primeros días de meses consecutivos, considerando que esta diferencia de nivel incluye las recargas totales de eventos y las descargas por flujo subterráneo, evaporación y evapotranspiración ocurridas en el mes. Para el cálculo de la recarga total se utiliza la ecuación (1):

$$R_t = \sum \Delta h_i \cdot S_y \quad (2)$$

mientras que la recarga neta R_n menos el flujo de descarga q , R_{n-q} se obtiene de:

$$R_{n-q} = \Delta h_m \cdot S_y \quad (3)$$

Finalmente, se obtiene la descarga mensual (D) de la diferencia entre (2) y (3):

$$D = R_t - R_{n-q} \quad (4)$$

La descarga tiene dos componentes: la descarga por flujo subterráneo D_q y la descarga por evapotranspiración, la cual aumenta cuando el nivel freático se encuentra cerca de la superficie y cuando la atmósfera tiene una mayor demanda de agua.

Consideramos que durante los meses de temperaturas más bajas (junio, julio, agosto) la evapotranspiración es mínima. Así es que, simplificando, las descargas totales ocurridas en la estación fría suponemos que son fundamentalmente descargas por flujo.

Dada la vinculación de estas descargas con la altura del nivel freático, se analizó la relación existente entre la altura del nivel freático y las descargas producidas por flujo subterráneo durante los meses más fríos. Se ajustó una función exponencial decreciente de la forma:

$$D_q = A \cdot e^{-Bh} + C \quad (5)$$

debido a que las descargas por flujo disminuyen al aumentar la profundidad del nivel freático, como resultado de un nivel base de descarga que permanece prácticamente constante.

A través de la diferencia mensual entre las descargas totales D obtenidas de la ecuación (4) y las descargas por flujo D_q alcanzadas en la ecuación (5), se logró una aproximación al valor mensual de las descargas por evapotranspiración en la perforación de Rincón Viejo.

$$EVT = D - D_q \quad (6)$$

RESULTADOS

Se aproximó un valor de rendimiento específico S_y mediante el método de Varni et al. (2013) (Figura 2) para la perforación de Rincón Viejo de 0.08, un valor coincidente con los valores teóricos de arcilla arenosa/ limo arenoso (Johnson, 1967).

Las recargas totales y netas obtenidas mensualmente muestran una variación estacional. Las recargas totales (procedentes de la precipitación) son en general mayores los meses de marzo y mayo, así como en agosto y septiembre. Esto coincide con la distribución de lluvias importantes (otoño y primavera). También puede haber lluvias considerables en verano, pero contribuyen principalmente a alimentar la evapotranspiración. A

partir del año 2012 aumentan las recargas totales con respecto a los años anteriores, y se observa como acompaña a este aumento la disminución de la profundidad del nivel freático (Figura 3).

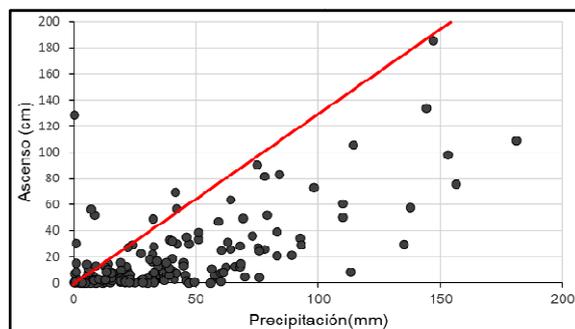


Figura 2. Estimación del rendimiento específico (S_y).

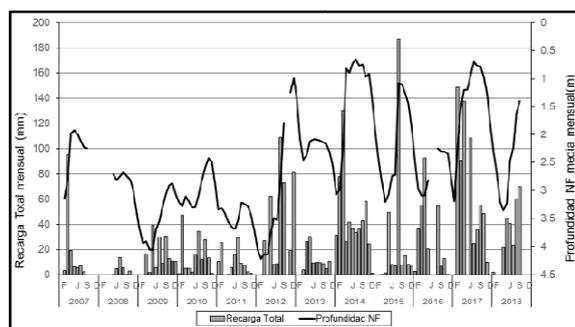


Figura 3. Variaciones mensuales de la recarga total y del nivel freático.

Del ajuste de la Ecuación (5) por mínimos cuadrados se obtuvo $A=82.5$, $b=-0.613$ y $c=-5.06$. El análisis de la ecuación obtenida de la relación entre la profundidad del nivel freático y las descargas ocurridas durante los meses de menores temperaturas anuales nos permite estimar que las descargas por flujo tienden a cero a medida que se acercan a una profundidad de 5 metros en la perforación Rincón Viejo (Figura 4).

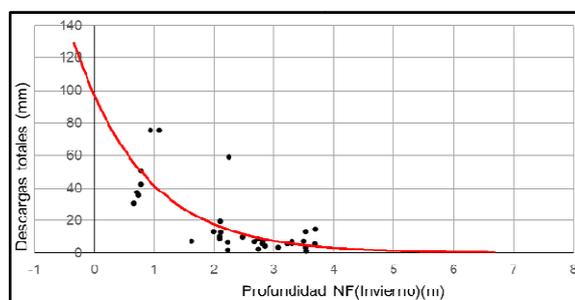


Figura 4. Relación entre la profundidad del nivel freático y las descargas totales en los meses de menores temperaturas entre 2007-2018 en Rincón Viejo.

Con la curva ajustada en la Figura 4 se pueden obtener las descargas por flujo subterráneo para cada mes. Si a las recargas totales mensuales se restan estas descargas por flujo se obtienen las descargas por evapotranspiración.

DISCUSIÓN

La evaporación aumenta los meses cálidos y a medida que el nivel freático se acerca a la superficie. Aumentando de forma importante en los meses de mayores temperaturas cuando el nivel freático se encuentra a profundidades menores de los 2.50 metros.

El análisis de las **descargas medias mensuales por evaporación** entre los años 2007-2018 en Rincón Viejo nos muestra que las mayores magnitudes de evaporación ocurren los meses más cálidos del año; sin embargo, las estaciones de primavera y otoño presentan mayor variabilidad interanual en el período analizado (Figuras 5 y 6).

Los meses con mayores y menores temperaturas del año presentan menor variabilidad interanual de la evaporación, con valores de 24 mm mensuales en los meses de enero y diciembre, y de 0 mm en julio en la cuenca baja del arroyo del Azul (Figura 5).

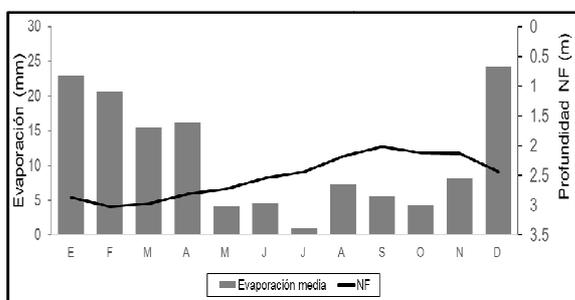


Figura 5. Descargas por evapotranspiración directa desde el nivel freático (2007-2018).

Los meses de marzo a agosto (la estación más fría del año) el nivel freático tiende a ascender y la recarga total media mensual presenta los mayores valores del año (Figura 6).

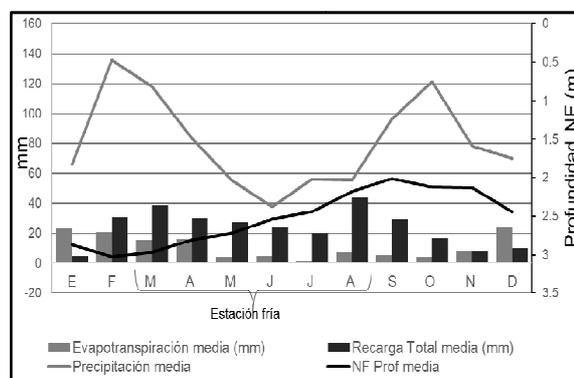


Figura 6. Evapotranspiración media mensual y recarga total media mensual (2007-2018).

Las descargas por evapotranspiración son mayores los meses temperaturas más altas (diciembre, enero, febrero); de modo que parece influir en la profundización del nivel freático (Figura 6). Se observa que los meses de transición entre las estaciones (febrero, marzo, abril, agosto, septiembre) presentan mayor variabilidad interanual tanto en las descargas por evapotranspiración como en las recargas totales (Figura 6).

En la Figura 7 puede verse el resultado de los siete años medidos en su totalidad: la recarga total, la descarga a la atmósfera de una parte de esta recarga y la profundidad de los niveles freáticos medios anuales. La recarga total anual promedio fue de 252 mm, la pérdida anual promedio de la recarga a la atmósfera fue de 105mm (42% de la recarga total), con una desviación estándar de 25 mm y un coeficiente de variación de 0.24.

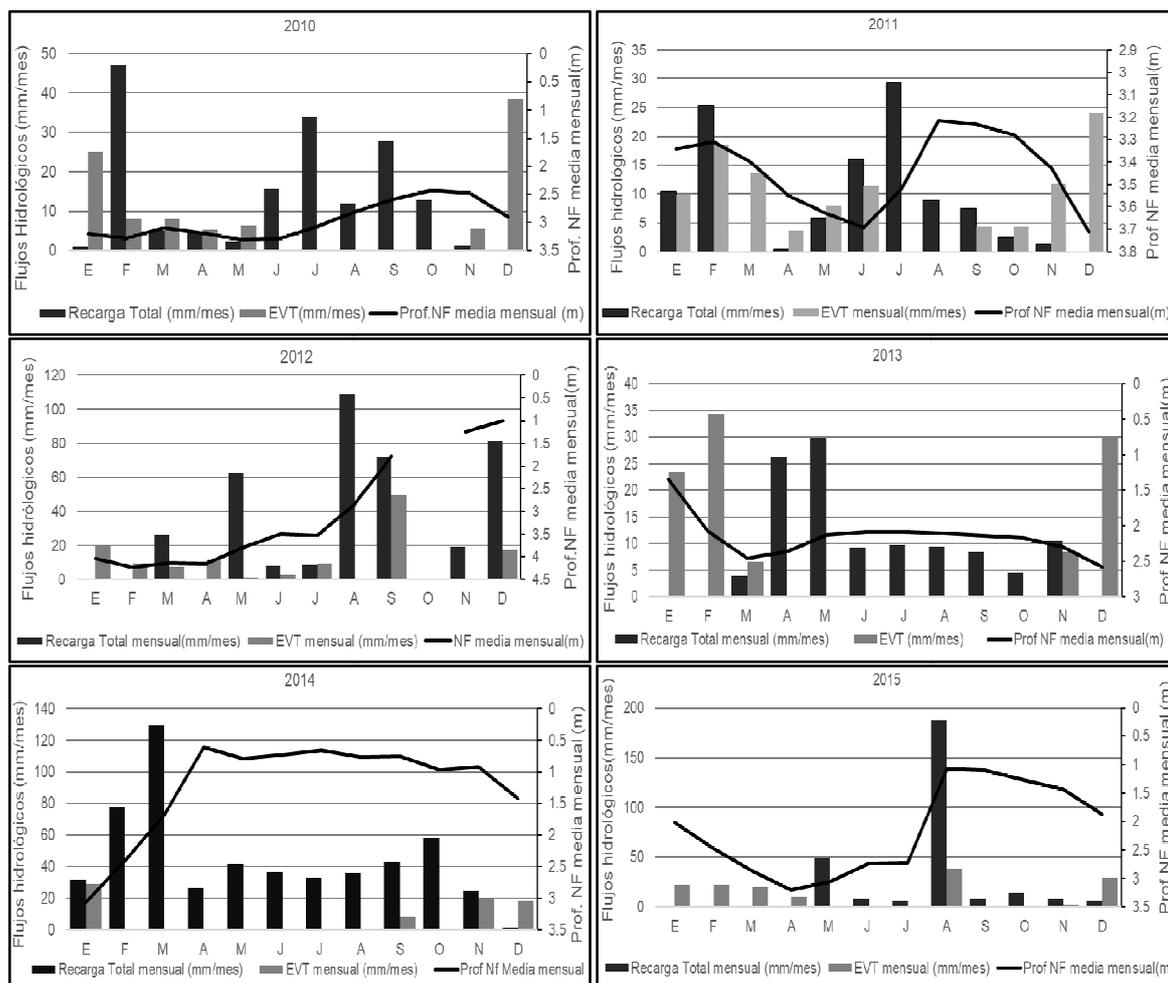


Figura 7. Recarga total y evapotranspiración desde el acuífero freático medias mensuales, en barras, y profundidad del nivel freático medio mensual en línea continua desde 2009 a 2015 inclusive.

CONCLUSIONES

Se analizaron las recargas totales mensuales a partir de datos diarios de nivel del agua subterránea por medio del método de fluctuación del nivel freático. Se estimaron las descargas mensuales por flujo hacia zonas de descarga a través del ajuste de una ecuación que relaciona el nivel en el pozo analizado en los meses invernales, que se suponen con pérdidas evaporativas nulas. Finalmente, se determinaron las descargas por evaporación y evapotranspiración desde el nivel freático, las cuales representan una pérdida importante de la recarga total (42%).

En el período 2007-2018 la recarga total anual promedio fue de 252 mm, la pérdida anual promedio de la recarga a la atmósfera fue de 105mm, con una desviación estándar de 25 mm y un coeficiente de variación de 0.24.

REFERENCIAS

- Assouline, S., Tyler, S.W., Selker, J. S., Lunati, I., Higgins, C. W. y Parlange, M. B. (2013). Evaporation from a shallow water table: diurnal dynamics of water and heat at the surface of drying sand. *Water Resources Research*, 49 (7) 4022-4034.
- Barua, S., Cartwright, I., Dresel, P. E. y Daly, E.(2020). Using multiple methods to understand groundwater recharge in a semi-arid area, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/hess-2020-143>, (in review).
- Crosbie, R. S., Binning, P. y Kalma, J. D. (2005). A time series approach to inferring groundwater recharge using the water table fluctuation method. *Water Resources Research*, 41, W01008, doi:10.1029/2004WR003077.
- Fidalgo, F., Pascual, R. y De Francesco, F. (1975). Geología superficial de la llanura Bonaerense

- (Argentina). Actas del VI Congreso Geológico Argentino, 103-138.
- González Bonorino, R., Zardino, R., Figueroa, M. y Limousin, T. (1956). Estudio geológico de las Sierras de Olavarría y Azul (Bs. As.). LEMIT, Serie II (63), pp 5-22.
- Healy, R. W. y Cook, P. G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal* 10(1): 91-109.
- Johnson, A. I. 1967. Specific yield-compilation of specific yields for various materials. Hydrologic Properties of Earth Materials, U.S Geological Survey Water-supply Paper, 1662- D.
- Lerner, D. N., Issar, A. S. y Simmers, I. (1990). Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge. IAH Int. Contrib. Hydrogeol. 8, Heinz Heise, Hannover, 345 pp.
- Menking, K. M., Anderson, R. Y., Brunsell, N. A., Allen, B. D., Ellwein, A. L., Loveland, T. A. y Hostetler, S.W. (2000). Evaporation from groundwater discharge playas, Estancia Basin, central New Mexico. *Global and Planetary Change* 25:133-147.
- Miao, Ch., Chen, J., Zheng, X., Zhang, Y., Xu, Y. y Du, Q. (2017). Soil water and phreatic evaporation in shallow groundwater during an freeze-thaw period. *Water* 9:396-408. doi: 10.3390/w9060396.
- Risser, D. W., Gburek, W. J. y Folmar, G. J. (2005). Comparison of methods for estimating groundwater recharge and base flow at a small watershed underlain by fractured bedrock in the eastern United States (Vol. 5038). US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Sala, J. (1983). Generalización hidrológica de la Provincia de Buenos Aires. Coloquio Intern. de Grandes Llanuras. Unesco. V III, Olavarría, Prov. de Buenos Aires, Argentina, 1983.
- Sala, J. M., Kruse, E., y Agugliano, R. (1987). Investigación hidrológica de la cuenca del arroyo Azul, Provincia de Buenos Aires. CIC Informe 37.
- Scanlon, B. R., Healy, R. W. y Cook, P. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* 10:18-39.
- van Dam, J. C. y Feddes, R. A. (2000). Numerical simulation of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with the Richards equation. *Journal of Hydrology* 223(1-4):72-85.
- Varni, M., Comas, R., Weinzettel, P. y Dietrich, S. (2013). Application of water table fluctuation method to characterize the groundwater recharge in the Pampa plain, Argentina. *Hydrological Sciences Journal* 58(7): 1445-1455, doi: 10.1080/02626667.2013.833663.
- Zhang, L., Dawes, W.R. y Walker, G.R. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* 37(3):701-708.

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

- 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). *Cuadernos del CURIHAM*. 26: 13-19. doi: 10.35305/curiham.v26i0.149

Tipo de Publicación: ARTICULO.

Trabajo recibido el 09/09/2020 y aprobado para su publicación el 15/10/2020.

MODELACIÓN PRELIMINAR DEL FLUJO SUBTERRÁNEO EN UN SECTOR DE LA CUENCA INFERIOR DEL ARROYO DEL AZUL (BUENOS AIRES, ARGENTINA).

PRELIMINARY GROUNDWATER MODELING OF A LOWER SECTOR OF ARROYO DEL AZUL BASIN (BUENOS AIRES, ARGENTINA)

Erik Zimmermann^{(1)(2)(*)}, Luisa Fajardo⁽³⁾⁽⁴⁾ e Ilda Entraigas⁽³⁾⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Buenos Aires, Argentina.

⁽²⁾ Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Rosario, Santa Fe, Argentina..

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

⁽⁴⁾ Instituto de Hidrología de Llanuras. Azul, Buenos Aires, Argentina.

(*)e-mail: erikz@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Se construyó un modelo de flujo subterráneo, de carácter distribuido, con entradas y parámetros uniformes para todo el dominio de modelación. Este abordaje simplificado se realizó con el fin de caracterizar procesos generales y ajustar el modelo conceptual preliminar en el área de llanura del arroyo del Azul. Se propusieron metodologías a fin de completar las series discontinuas de niveles freáticos que fueron utilizados como condición de borde aguas arriba seleccionando una regresión lineal entre anomalías diarias de diferencias entre precipitación y evapotranspiración potencial con un retardo semanal con resultados de ajuste satisfactorios. Se consideraron como parámetros globales de calibración la transmisividad del acuífero, el coeficiente de almacenamiento, un coeficiente de recarga, una profundidad crítica para la evapotranspiración y un coeficiente de forma para la curva evapotranspiración vs. profundidad freática. Los coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe entre niveles modelados y observados en 6 pozos de control oscilaron entre 0.58 y 0.72. Tras la calibración, se concluyó que los parámetros obtenidos permiten una representación satisfactoria de la evolución de los niveles freáticos en los pozos de observación y de los patrones espaciales de las isofreáticas. Se pone en evidencia el rol prominente del proceso de evapotranspiración, el cual impacta directamente en el acuífero, representando una salida relevante del sistema. En el período de simulación de 43 meses, de características levemente secas, la recarga constituyó el 17 % de la precipitación, el 87 % de la misma retornó a la atmósfera como evapotranspiración, y el acuífero abastecería el 12.7 % de la evapotranspiración potencial del período. Se considera que la modelación simplificada permitió una aceptable representación del comportamiento del acuífero freático.

Palabras clave: modelación flujo subterráneo, área de llanura, evaporación freática

ABSTRACT

A distributed groundwater flow model has been constructed, with aggregated inputs and parameters for the entire modeling domain. This simplified approach was carried out in order to characterize general processes and adjust the preliminary conceptual model of the sector. Methodologies to complete the discontinuous series of water tables, which were used as the upstream condition, have been proposed. A linear regression between daily precipitation minus evapotranspiration anomalies with a weekly delay and water table levels was selected due to its good results. The aquifer transmissivity, the storage coefficient, a recharge coefficient, a critical depth for evapotranspiration and a shape coefficient for the evapotranspiration vs. water table depth curve were considered as global calibration parameters. The Nash-Sutcliffe efficiency coefficients between modeled and observed levels in six wells ranged between 0.58 and 0.72. After the calibration, it can be affirmed that the parameters obtained allow a satisfactory representation of the evolution of observed groundwater levels and of the spatial patterns of the iso-phreatic curves. The prominent role of the evapotranspiration process is evident, which directly impacts in the aquifer, which representing a very relevant output from the system. In the simulation period of 43 months, with dry characteristics, the recharge constituted 17% of the precipitation, 87% of it returned to the atmosphere as evapotranspiration, and the aquifer supplied the 12.7% of the ETo of the period. It was considered that the simplified modeling allowed an acceptable representation of the water table dynamics.

Keywords: groundwater modeling, flatland area, phreatic evaporation.

INTRODUCCIÓN

Los avances de la Hidrología Clásica se han desarrollado bajo el concepto de cuenca hidrográfica convencional, en el cual se define claramente un área de aporte, una organización de la red de drenaje y puede identificarse cada componente de la red con un orden de jerarquía.

El concepto clásico de cuenca, en sentido estricto, refleja sólo una parte de los posibles sistemas superficiales reales. La expansión del conocimiento a nivel mundial enfrenta a los hidrólogos con las grandes llanuras de muy baja pendiente en las cuales no se manifiesta una red de drenaje lineal o una superficie tributaria, manifestándose transferencias en sus divisorias, con pluralidad de puntos de salida en algunos casos, y dada la insuficiente pendiente las respuestas a los estímulos pluviales se dan en términos de acumulación. Son los localmente denominados Sistemas Hidrológicos No Típicos (SHN) (Caamaño Nelli et al., 1979).

La morfología de estos últimos sistemas condiciona los procesos hidrológicos y el modelo conceptual requerido para describirlos (Fertonani y Prendes 1983; Kovacs, 1983; Tricart, 1983; Caamaño Nelli y Zimmermann, 1990). Al respecto, la Hidrología Comparada (Falkenmark y Chapman, 1989) ofrece un encuadre metodológico para el análisis de los sistemas hidrológicos en general contemplando estas particularidades.

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.

Por otro lado, el enfoque *ecohidrológico*, como mirada interdisciplinaria que relaciona la hidrología con la ecología y los complejos procesos en el ciclo del agua, ofrece para estos sistemas un desafío particular debido a las múltiples interacciones hidrológicas entre sus componentes asociadas con las comunidades vegetales que los habitan.

El presente trabajo se plantea en el marco del análisis de la conectividad hidrológica del sector de estudio. En su forma más simple, la conectividad es una descripción del grado de relación o asociación dentro de un sistema, y corresponde a un conjunto estructurado de relaciones espaciales y/o temporales

entre las diferentes entidades que lo conforman (Kool et al., 2013). En principio, se distinguen dos tipos de conectividad. La conectividad estructural hace referencia a la arquitectura y composición de un sistema (Noss y Cooperrider, 1994), esto es, al tamaño, forma, ubicación y arreglo espacial de los elementos que lo componen (Calabrese y Fagan, 2004), y también a las relaciones físicas entre esos elementos (Kadoya, 2009). A su vez, la conectividad funcional está directamente relacionada con el grado y dirección de los desplazamientos a través del paisaje (Kadoya, 2009) que describen los lazos entre los diferentes elementos que lo componen (Calabrese y Fagan, 2004).

Aplicando estos conceptos a la conectividad hidrológica, se la define entonces como la conexión que se establece entre los elementos de una cuenca, siendo la conectividad estructural aquella referida a los patrones espaciales que se establecen en el paisaje (es decir, la distribución de las unidades ambientales que influyen en los patrones de transferencia del agua y en las trayectorias de flujo); y la funcional como aquella concerniente a cómo esos patrones espaciales interactúan con los procesos de la cuenca para producir escorrentía, conexión entre flujos y, por lo tanto, la transferencia de agua en la cuenca (Fajardo y Entraigas, 2017).

Como una primera fase de investigación, se propone un modelo matemático de flujo subterráneo, de estructura no compleja, con el fin de cuantificar los principales procesos hidrológicos que se verifican en la zona de estudio propuesta. Los resultados derivados permitieron deducir elementos conceptuales del funcionamiento hidrológico subterráneo como “sostén” de los procesos que se dan en superficie. En una etapa futura se contemplarán las evoluciones de niveles freáticos y flujos con la atmósfera para la búsqueda de las conectividades con las comunidades vegetales de superficie.

AREA DE ESTUDIO

La cuenca del arroyo del Azul se ubica en la zona central de la provincia de Buenos Aires, entre los 58° 51' y 60° 10' de longitud oeste y 36° 09' y 37° 19' de latitud sur (Figura 1). Abarca una superficie de 6237 km² y como formas destacables se reconocen un sub-ambiente serrano hacia el sur de la cuenca con altitudes por sobre los 200 msnm (pendiente media del terreno del 5 %), y un sub-ambiente de llanura hacia el norte, por debajo de los 130 msnm (con pendientes que varían entre 0.5 y 0.8 m/km), con una zona de transición entre

ambos, caracterizada por suaves ondulaciones.

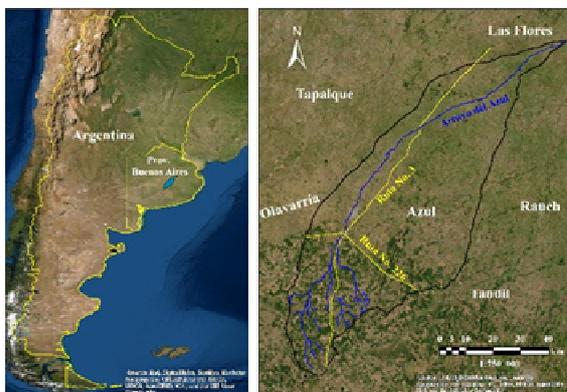


Figura 1. Ubicación relativa de la cuenca del arroyo del Azul, y principales localidades y vías de comunicación.

En el sector más bajo, sumamente llano, con sus suelos nátricos y drenaje deficiente, se desarrolla principalmente la cría ganadera extensiva en una matriz de pastizales naturales interrumpida por las numerosas cubetas y lagunas de carácter mayoritariamente semi-permanente y por dunas parabólicas y longitudinales (Entraigas et al., 2019). Desde el punto de vista hidrológico, lo más notable del comportamiento del agua en cuencas tan deprimidas como la del Azul es la acumulación del agua sobre la superficie, y la interacción que se establece entre las aguas superficiales y las subterráneas, conformando un sistema hidrológico típico de las grandes llanuras. Específicamente se ha concentrado el interés en la modelación de un sector del área más deprimida de la cuenca (Figura 2) en el cual se ha realizado un seguimiento de coberturas vegetales, niveles freáticos, humedades del perfil y parámetros de suelo.

Antecedentes geológicos y geomorfológicos

Las Sierras de Azul están constituidas por afloramientos integrados por gneisses y rocas esquistosas precámbricas. En la cuenca del Azul, estudios de geoelectrónica señalan profundidades del basamento de hasta 120 m en la localidad de Azul y mayores a los 800 m en el área del paraje El Gualicho (desembocadura de la cuenca del Azul).

En lo que respecta a la composición de la cubierta sedimentaria del subsuelo dispuesta por encima del basamento, Méndez Escobar et al. (1995) consignan un acúmulo de los depósitos del Mar Paranense (Mioceno verde) que se extiende hasta el norte de la ciudad de Azul, del Mioceno rojo hacia el sur de la localidad de Shaw (Figura 2), mientras que las arenas

puelches se presentan un poco al norte de Shaw. En el sector superior de la cubierta consignan un espesor de depósitos que agrupan en la denominada sección epiparaniana, integrada por depósitos pampeanos y post pampeanos.

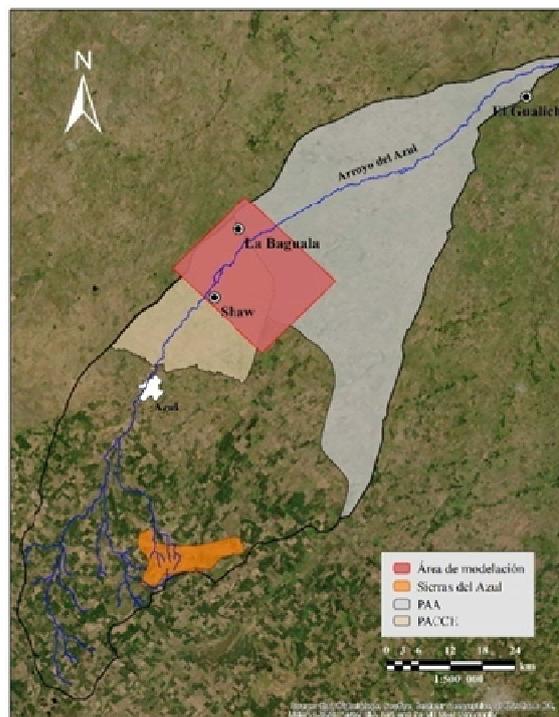


Figura 2. Zona de modelación y sitios referenciados.

Según Zárate y Mehl (2010), el sector bajo estudio se encuentra en el área extraserrana, comprendido entre las subunidades geomorfológicas denominadas planicie de agradación con costra calcárea estratiforme -PACCE- y planicie de agradación aluvial -PAA- (Figura 2). La PACCE está compuesta por limos castaño rojizos, compactos y carbonatados, con clastos de costras calcáreas, inmersos en una matriz limosa. Por encima de la costra calcárea se dispone una cubierta sedimentaria muy somera, de unos 0.50-0.70 m de potencia, muy modificada por pedogénesis. El sustrato suelo-costra calcárea genera encharcamientos superficiales, así como condiciones de drenaje interno deficiente en el perfil. El escaso gradiente generaría condiciones de escurrimiento muy lento. En cuanto a la PAA, está compuesta por una sección inferior de depósitos limos arenosos, castaño-rojizos, compactos, con estructuras de corriente y nódulos calcáreos. Por encima de ésta, se desarrolla una sección superior compuesta por limos finos gris cenicientos, con estratificación horizontal y eventual geometría lenticular correspondiente a facies palustres. La PAA

funciona en la actualidad como un ambiente geomorfológico de abanico distal de muy bajo gradiente y escaso relieve relativo.

Antecedentes hidrogeológicos

El Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) dispone de dos redes de control piezométrico, una freática (6 m) y otra profunda (30 m), que cubren toda la cuenca del arroyo del Azul. La mayoría de los lugares de observación consisten en un par de piezómetros, uno de cada red. La superficie freática se encuentra cerca de la superficie del terreno (2-5 m) en casi toda la zona. La geometría de la superficie piezométrica a 30 m es similar a la freática; tanto es así que en el sector central hay varios emplazamientos donde los niveles piezométricos a 6 y a 30 m no son diferenciables en la práctica (Zabala et al., 2010).

El IHLLA (2003), en base a la interpretación de ensayos de bombeo y mediante una modelación matemática de acuíferos, presentó una estimación de parámetros hidráulicos para la cuenca del Azul (Tabla 1).

Tabla 1. Estimaciones de permeabilidades horizontales (Kh) y verticales (Kv) en la ciudad de Azul (Varni 2005).

Profundidad(m)	Permeabilidad	Kh(m/d)	Kv(m/d)
0-40	Baja	5	0.5
40-60	Media	15	8
60-90	Baja	10	5
90-120	Alta	30	20

Varni (2005) infiere, a partir de la obtención de curvas de isopropundidad mediante sondeos eléctricos verticales, que el basamento cristalino se encontraría entre los 200 m y 450 m en el sector de estudio.

Por otro lado, estima mediante balance de agua, balance de cloruros y modelación matemática de flujo subterráneo un entorno para la recarga freática entre el 8 y 15 % de la precipitación.

El mismo autor ajusta mediante calibración valores de almacenamiento específico entre el 3% y el 5%.

MODELO DE FLUJO SUBTERRÁNEO

El modelo básico de flujo subterráneo consiste en la resolución numérica de las ecuaciones que gobiernan el movimiento no estacionario bidimensional (en planta) mediante una aproximación en diferencias finitas. La

ecuación en derivadas parciales se expresa como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + Q \quad (1)$$

donde: T_x es la transmisividad del acuífero en la dirección x ; T_y es la transmisividad del acuífero en la dirección y ; S es el coeficiente de almacenamiento del acuífero; h es la altura piezométrica; t es el tiempo; x , y son coordenadas espaciales en planta y Q son funciones de fuente o sumidero expresadas como caudales netos por unidad de área.

A través de una aproximación en diferencias finitas, lo que implica reemplazar el continuo del sistema acuífero por un conjunto equivalente de elementos discretos (celdas), es posible obtener una solución numérica de la ecuación anterior.

En cada nodo o celda se plantea la ecuación de continuidad, considerando el almacenamiento de la celda y los flujos de intercambio con las vecinas y el exterior (Figura 3). Se considera el coeficiente de almacenamiento por celda, la ley de Darcy para el intercambio de flujos en el propio acuífero (Q_1 a Q_4) y las recargas desde la zona no saturada (Q_5) y las extracciones por bombeos y evapotranspiración (Q_6). Las ecuaciones planteadas en cada nodo deben resolverse para las principales incógnitas, que son los niveles h_{ij} . Para la resolución numérica de la ecuación diferencial se utiliza una forma modificada del método implícito iterativo de direcciones alternantes proporcionado por Prickett y Lonquist (1968) a fin de resolver el conjunto de ecuaciones simultáneas. Esta técnica es incondicionalmente estable, independientemente del tamaño del incremento de tiempo.

Las recargas, por su lado, se consideran uniformes para el área de modelación, y se las define como un porcentaje de la precipitación mediante un coeficiente ajustable en el período de simulación (β):

$$Q_5 = \beta P \quad (2)$$

Siendo P y Q_5 la precipitación y la recarga diaria, respectivamente.

Para la evapotranspiración (ET) se consideró un coeficiente reductor (α) de la evapotranspiración potencial (ET_0) como una función exponencial decreciente con la profundidad de la freática (pf), desde la superficie hasta una profundidad

denominada crítica (pf_{crit}):

$$\begin{aligned} \text{si } pf > pf_{crit} & \quad \alpha = 0 \\ \text{si } pf < pf_{crit} & \quad \alpha = \exp(-\gamma \text{ pf}) \end{aligned} \quad (3)$$

Donde γ es un parámetro que varía entre 0.4-1.0. Tanto γ como pf_{crit} se consideraron ajustables en las simulaciones y uniformes en el dominio.

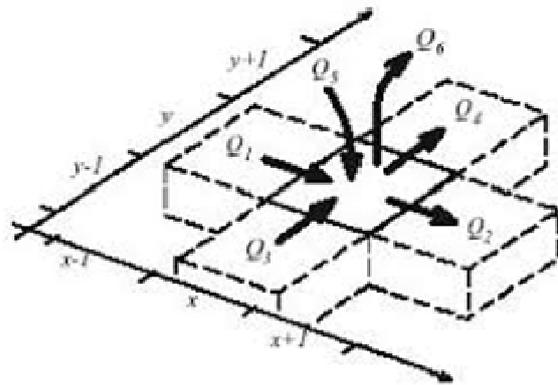


Figura 3. Discretización del dominio de modelación (extraída de Prickett y Lonquist, 1968)

Para este trabajo se contó con el programa fuente original de Prickett y Lonquist, escrito en FORTRAN IV, para acuíferos libres. El código, fue readaptado para adecuarlo a las condiciones de contorno del caso de estudio y las ecuaciones propuestas para la recarga y la evapotranspiración del acuífero.

APLICACIÓN DEL MODELO

Grilla de modelación

El dominio de modelación consistió en un rectángulo de 24 km en sentido SO-NE y 29 km en sentido NO-SE, el que se encuentra casi totalmente incluido en la cuenca superficial del arroyo del Azul (Figura 2). La grilla de discretización fue subdividida en elementos cuadrados de 1 km de lado, totalizando 696 celdas (24 filas, 29 columnas). El período de simulación del modelo se propuso en función de la información disponible, abarcando desde octubre de 2014 hasta abril de 2018 (43 meses), con un paso de cálculo temporal de 1 día.

Condiciones de borde

Las isofreáticas construidas a partir de los registros

obtenidos en 21 pozos de observación ubicados en el área de estudio manifestaron un patrón de flujo repetitivo (Figura 4), cuya morfología permitió establecer hipótesis para las condiciones de borde. Este patrón reflejó un sentido predominante del flujo hacia el noreste, aproximadamente representativo en la totalidad del área de estudio, coincidente con la orientación de las márgenes laterales. Por ello las mismas fueron consideradas como líneas de flujo. El borde oeste del sector está próximo a la divisoria superficial de la cuenca del Azul, lo que justificaría la imposición de un borde impermeable. Para el límite este, las isopiezas del patrón de flujo sugieren la definición de una línea de flujo coincidente con dicho límite.

En los bordes aguas arriba (borde sur) y aguas abajo (borde norte) se propusieron condiciones de niveles y flujos preestablecidos, respectivamente (Figura 5). El borde sur cuenta con registros freáticos históricos en numerosos pozos de ese frente. Complementariamente se consideró la condición de control de flujos regionales hacia el río Salado en el borde norte.

Los registros históricos de niveles freáticos en el borde sur fueron discontinuos temporalmente y abarcaron pocas celdas representativas, por lo que fue necesario diseñar una estrategia de completamiento. Se contó con datos mensuales de seis pozos cuyos registros contemplaban dos períodos observados: 10/2014-03/2016 y 04/2017-04/2018.

En principio, se propuso completar los registros de niveles discontinuos mediante correlaciones con variables ambientales de patrones análogos, de las que, tras una selección previa, se consideraron las anomalías acumuladas de las diferencias entre precipitación y evapotranspiración (P-ET_o) y de gravedad. Las anomalías acumuladas de P-ET_o, denominadas anomalías hidrológicas (AH) se construyeron mediante la siguiente ecuación (Zimmermann, 2020):

$$AH_i = \frac{\sum_{i=1}^i P_i - ET_{o_i}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i - ET_{o_i}} \quad (4)$$

Donde: i representa un día de cálculo, N , el número total de días del período, P_i , la precipitación del día i ; ET_{o_i} , la evapotranspiración potencial para el día i .

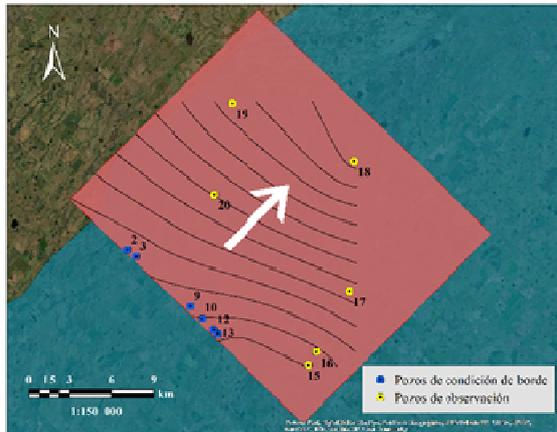


Figura 4. Sentido predominante del escurrimiento subterráneo en el sector modelado.

Las anomalías de gravedad, medidas desde una plataforma satelital, se refieren a cambios de masa en unidades equivalentes de agua líquida y fueron publicadas mensualmente en el marco del proyecto GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment).

En el sector de estudio las profundidades freáticas oscilan alrededor del metro, lo que pone de manifiesto que la evapotranspiración es una componente de suma importancia

Se contó con datos diarios de precipitación de dos sitios, la estación Azul Aero del Servicio Meteorológico Nacional (estación de confianza) y otra perteneciente a un establecimiento agropecuario cercano a la localidad de SHAW.

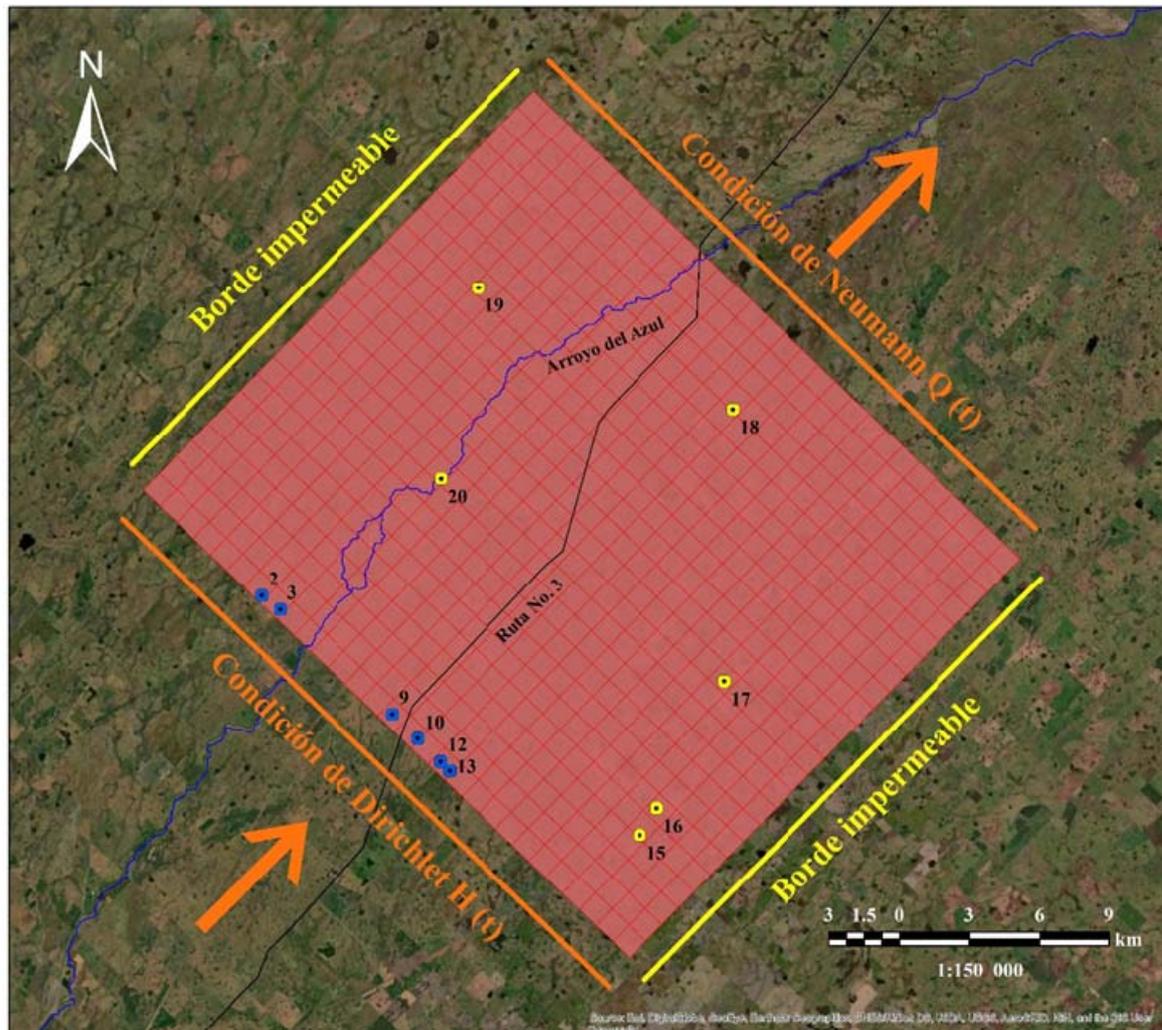


Figura 5. Grilla de modelación propuesta, condiciones de borde seleccionadas y pozos de observación de niveles freáticos utilizados para construir las condiciones del borde sur (amarillo) y para control del modelo (azul).

Se dispuso de información de evapotranspiración potencial estimada mediante el método de Penman-Monteith y con un balance hidrológico calculado para el área de La Baguala (Varni y Custodio, 2013; Vercelli et al., 2019), ubicada en el interior del dominio de modelación (Figura 2).

Las anomalías hidrológicas, que fueron calculadas en forma diaria, se retrasaron entre un día y una semana para contemplar un retardo entre el evento superficial y su efecto en los niveles freáticos. Se obtuvieron las mejores correlaciones con lag de 7 días.

Se optó por considerar las anomalías hidrológicas como metodología de completamiento temporal de registros freáticos por su mejor correlación (Tabla 2), definición temporal y disponibilidad de información (Zimmermann, 2020).

Los valores extrapolados temporalmente de los pozos permitieron completar el período de simulación en los pozos considerados.

Posteriormente, se extrapoló espacialmente esta información para la totalidad de celdas del borde mediante ecuaciones lineales. De esta manera pudo completarse la secuencia de datos freáticos en cada celda del borde sur, que fueron considerados como condición de contorno.

Tabla 2. Coeficientes de correlación entre anomalías y niveles freáticos de los pozos considerados.

Pozos	Anomalías hidrológicas	Anomalías gravimétricas
2	0.893	0.794
3	0.894	0.798
9	0.861	0.624
10	0.846	0.668
12	0.881	0.748
13	0.887	0.702

Para las condiciones de borde norte, se consideró la condición de flujos regionales preestablecidos hacia el río Salado. El mismo se ubica a unos 150 km al NE en cuya dirección el gradiente regional topográfico es de aproximadamente 0.66 m/km (valor estimado a partir de información altimétrica extraída de Google Earth®). Los caudales efluentes de cada celda se estimaron como producto entre el ancho (1 km), el espesor freático considerado, la permeabilidad horizontal de la celda y el gradiente regional estimado hacia el río Salado.

Geometría estimada del acuífero freático

Según registros estratigráficos, aproximadamente los primeros 40 m del acuífero freático están constituidos por sedimentos pampeanos de textura limosa cuyas permeabilidades se muestran en la Tabla 1.

Se consideró, de manera simplificada, un espesor de acuífero freático de 40 m, consecuentemente con la hipótesis de flujo paralelo en ese espesor, de acuerdo con las observaciones piezométricas indiferenciadas entre el acuífero freático y aquellos más profundos (Zabala et al., 2010). Esto conlleva la suposición que la componente vertical hacia la superficie es despreciable lo cual, salvo en la descarga de la freática al arroyo del Azul que sería de carácter local, parece ser una hipótesis razonable.

Condiciones iniciales

Para fijar las condiciones iniciales de la simulación se consideraron los niveles de las celdas del borde sur en el mes de comienzo de la simulación, octubre de 2014. Se midieron los gradientes piezométricos en la dirección del flujo, considerando los niveles de los pozos interiores al dominio de modelado (15, 16, 17, 18, 19 y 20).

Se extrapolaron los niveles freáticos por celdas, teniendo en cuenta las cotas del borde sur y las pendientes mencionadas. Se revisaron las profundidades freáticas considerando cotas de superficie por celda (extraídas del modelo digital de terreno ajustado).

En casos donde el nivel freático superaba la cota del terreno, dichos valores fueron corregidos adjudicándoseles un valor mínimo equivalente a la profundidad radicular de la cobertura vegetal presente en esos sitios.

CALIBRACIÓN DEL MODELO

Teniendo presente las condiciones de borde, las recargas y descargas por celdas, conforme a la descripción previa del modelo, se realizaron las corridas pronosticando la evolución de niveles freáticos por celda en el período de simulación (octubre 2014-abril 2018, totalizando 1308 días).

Se fijó un período de precalentamiento de 7 meses (octubre de 2014 - abril de 2015), para los cuales los resultados pueden estar influenciados por errores en las

condiciones iniciales adoptadas. En consecuencia, el período con resultados confiables se extiende desde mayo de 2015 hasta abril de 2018 (3 años).

Se consideraron como parámetros de calibración la transmisividad del acuífero, T ; el coeficiente de almacenamiento, S ; el coeficiente de recarga, β ; la profundidad crítica, Pf_{crit} y el coeficiente de la curva de evapotranspiración vs. profundidad freática, γ .

Para comparar valores calculados por modelación y valores observados, se contó con los registros freáticos de los seis pozos en el dominio de modelación desde abril de 2017 hasta finalizar el período de simulación.

La Tabla 3 detalla los rangos considerados para los parámetros y los valores de ajuste alcanzados para minimizar las diferencias entre niveles estimados y observados. La metodología empleada para la calibración consistió en subdividir el rango de análisis de los parámetros en sub-intervalos y realizar simulaciones del modelo contemplando todas las combinaciones de parámetros posibles. Como función objetivo se consideró la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) entre los niveles simulados y observados en los

6 pozos internos del dominio para los períodos en los cuales se contaba con registros.

Tabla 3. Rango considerado de variación de parámetros y valores ajustados.

Parámetro	Rango evaluado	Valor calibrado
T (m ² /d)	100-2000	200
S (-)	0.03-0.10	0.03
β (-)	0.05-0.5	0.17
Pf_{crit} (m)	0.3-3.0	3.3
γ (-)	0.4-1.0	1.0

RESULTADOS ALCANZADOS

Como se observa en la Tabla 3, los parámetros calibrados guardan mucha similitud con los hallados previamente por otros autores (IHLLA, 2003; Varni, 2005), lo que otorga una mayor certidumbre a los resultados.

La Figura 6 muestra la comparación de los registros freáticos calculados (líneas continuas) y observados (triángulos invertidos) para los parámetros calibrados en los 6 pozos de observación.

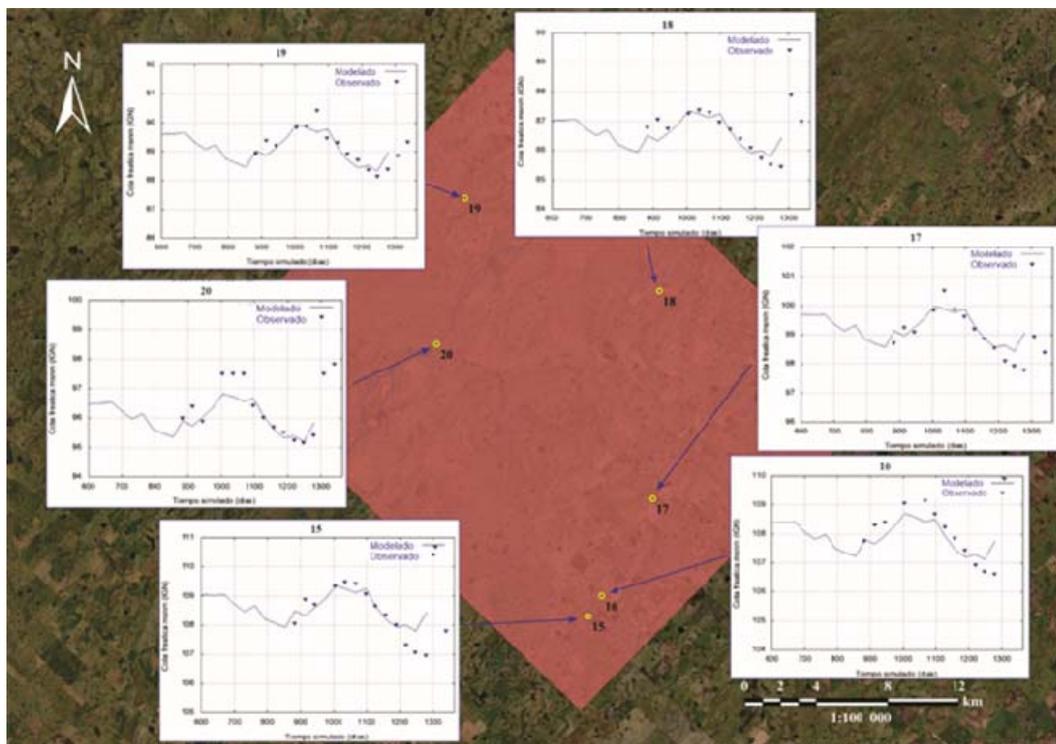


Figura 6. Evolución temporal de los niveles freáticos calculados por modelación (líneas continuas) y observados (triángulos invertidos) en los freáticos seleccionados.

La Tabla 4 muestra los coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) para cada caso, donde se aprecia que el modelo refleja aceptablemente los niveles freáticos observados en la mayor parte de los pozos de control.

Tabla 4. Coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) entre los niveles freáticos modelados y observados.

Pozos de observación	NSE
15	0.5822
16	0.6929
17	0.6319
18	0.6480
19	0.7205
20	0.6876

Otro aspecto considerado fue el análisis del patrón espacial de las curvas isofreáticas, el cual resultó muy similar al observado en el prototipo (Figura 7), y se repite en otros mapas de isofreáticas calculados por el modelo.

El período de simulación descontado el precalentamiento abarcó un total de 1096 días (36 meses, comprendidos entre mayo de 2015 y abril 2018). De acuerdo con los guarismos del balance medio del área (Tabla 5), se deduce que el mismo coincide con un período de características levemente secas, y esto debe tenerse en cuenta en el análisis. En cuanto a la relación entre la ET y la recarga del acuífero, la misma es del 87%, es decir que ese porcentaje de la recarga retorna a la atmósfera como evapotranspiración en el período analizado.

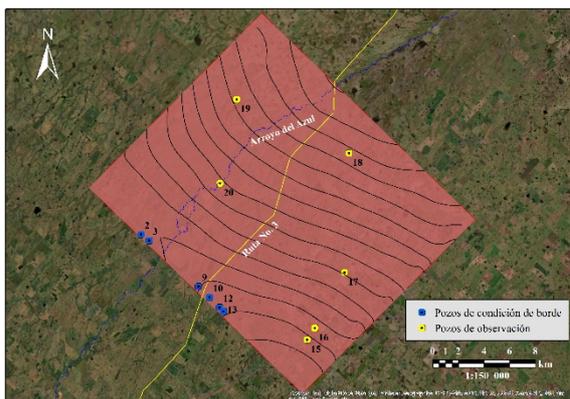


Figura 7. Curvas isofreáticas modeladas (abril de 2018).

Por último, a partir del análisis de la relación entre la evapotranspiración potencial y la estimada en la modelación, se desprende que el acuífero freático aporta el 12.7% de la ETo.

Tabla 5. Balance medio areal.

	Precipitación	Recarga	ETo	ET modelada
	mm	mm	mm	mm
Período 2015/18	2648.7	450.3	3071.5	389.6
Promedio anual	882.9	150.1	1023.8	129.9

Con la información obtenida de la evolución de los niveles freáticos para cada celda de la modelación, se proyecta analizar sus estadísticos, permanencias y frecuencias a lo largo del periodo de simulación. Se cree que esta información, deducida de los resultados del modelo, permitirá inferir conexiones entre la freatimetría y las coberturas vegetales de superficie para un amplio sector de la Pampa Deprimida.

CONCLUSIONES

Se construyó un modelo de flujo subterráneo, de carácter distribuido, con entradas y parámetros uniformes para todo el dominio de modelación. Este abordaje simplificado se realizó con el fin de caracterizar procesos generales y ajustar el modelo conceptual preliminar del sector.

Tras una calibración puede afirmarse que los parámetros obtenidos permiten una representación satisfactoria de la evolución de los niveles freáticos en los pozos de observación, como así también de los patrones espaciales de las isofreáticas.

Se pone en evidencia el rol prominente del proceso de evapotranspiración, el cual impacta directamente en el acuífero, representando una salida significativa del sistema.

Estos argumentos permiten considerar que la modelación simplificada permitió una aceptable representación del acuífero freático.

REFERENCIAS

Caamaño Nelli, G. E. y Zimmermann, E. (1990). Tipología de los Sistemas Hidrológicos Superficiales. XVI Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas. Bahía Blanca. Argentina.
 Caamaño Nelli, G. E., Fertoni, M. E., Prendes, H. H. y Quinodoz, H. A. (1979) Analysis of Non-Typical Hydrological Systems. Theoretical Bases and Methodology Criteria. Departamento de Hidrología

- General y Aplicada. Facultad de Ingeniería en Ciencias Hídricas. UNL. Santa Fe.
- Calabrese, J. M. y Fagan, W. F. (2004). A comparison-shopper's guide to connectivity metrics. *Frontiers Ecology and the Environment*, 2(10):529–536.
- Entraigas, I., Vercelli, N. y Fajardo, L. (2019). Plant communities along preferential superficial water flow paths across a floodplain landscape. *Ecohydrology*, 12(6): e2124. <https://doi.org/10.1002/eco.2124>
- Fajardo, L. y Entraigas, I. (2017). Conectividad hidrológica en un sistema hidrológico no típico. Caso del sector llano de la cuenca del Arroyo del Azul. Informe de avance beca doctoral CIC.
- Falkenmark, M., y Chapman, T. (1989). Comparati-ve hydrology: An ecological approach to land and water resources. Unesco.
- Fertonani, M., y Prendes, H. (1983) Hidrología en áreas de llanura. Aspectos Conceptuales Teóricos y Metodológicos. Hidrología de Grandes Llanuras. Olavarría. Argentina. 1, p 119-156.
- IHLLA. (2003). Sistema de soporte para la gestión eficiente de los recursos hídricos en la llanura bonaerense. Inédito, p 267.
- Kadoya, T. (2009). Assessing functional connectivity using empirical data. *Population Ecology*, 51(1): 5–15.
- Kool, J. T., Moilanen, A. y Treml, E. A. (2013). Population connectivity: recent advances and new perspectives. *Landscape Ecology*, 28(2): 165-185.
- Kovacs, G. (1983). General Principles of Flat-lands hydrology. Hidrología de Grandes Llanuras. Olavarría. Argentina, 297-357.
- Méndez Escobar, R., Usunoff, E. y Weinzettel, P. A. (1995). Aportes al conocimiento del subsuelo de la cuenca del arroyo Azul (provincia de Buenos Aires). V Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales. Santa Rosa, La Pampa. Tomo II, 55-60
- Noss, R. F., y Cooperrider, A. Y. (1994). Saving nature's Legacy: Protecting and restoring biodiversity. Island Press, Washington, DC, p 416.
- Prickett, T. A., y Lonquist, G. G. (1968). Aquifer simulation program listing using alternating direction implicit method. Illinois State Water Survey mimeographed report presented at International Association of Scientific Hydrology Symposium on Use of Computers in Hydrology, Tucson, Arizona.
- Tricart, J. (1983) L'Hydrologie des Grans Plains, Quelques Reflexions Methodologiques. Hidrología de las grandes Llanuras. Olavarría, Argentina, 2, p 1191-1193.
- Varni, M. (2005). Evaluación de la recarga al acuífero del Azul: Valores medios y variaciones temporal y espacial. (Tesis doctoral). Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. UNR.
- Varni, M., y Custodio, E. (2013). Evaluación de la recarga al acuífero del Azul: 1. Análisis de las características climáticas. En VIII Congreso Hidrogeológico Argentino y VI Seminario Hispano Latinoamericano sobre temas actuales de hidrología subterránea, La Plata. Argentina. doi: 10.13140/2.1.4000.2560.
- Vercelli, N., Varni, M., Lara, B., Entraigas, I. y Ares, G. (2019). Linking soil water balance with flood spatial arrangement in an extremely flat landscape. *Hydrological Processes*, 34 (1): 21-32. doi: 10.1002/hyp.13567.
- Zabala, M. E., Manzano, M., y Vives, L. (2010). Estudio preliminar del origen del fondo químico natural de las aguas subterráneas en la cuenca del arroyo del Azul. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanura. Volume IM, Varni, I. Entraigas y L. Vives (Eds), 249-256. Azul, Buenos Aires, Argentina.
- Zárate, M., y Mehl, A. (2010). Geología y geomorfología de la cuenca del arroyo del Azul, provincia de Buenos Aires. Argentina. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanura, 1, 65-78.
- Zimmermann, E. (2020) Completamiento de series temporales de niveles freáticos en un área deprimida de la llanura bonaerense. *Cuadernos del CURIHAM*. 26:55-61. doi: 10.35305/curiham.v26i0.148

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

- Zimmermann, E.; Fajardo, L. y Entraigas, I. (2020). Modelación preliminar del flujo subterráneo en un sector de la cuenca inferior del arroyo del Azul (Buenos Aires, Argentina). *Cuadernos del CURIHAM*. 26: 21-30. doi: 10.35305/curiham.v26i0.154

Tipo de Publicación: ARTICULO.

Trabajo recibido el 03/10/2020 y aprobado para su publicación el 18/11/2020.

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SOFTWARE MODULAR EN LA CUENCA DEL ARROYO LAS
TURBIAS. PROVINCIA DE SANTA FE, ARGENTINA**

**IMPLEMENTATION OF A MODULAR SOFTWARE IN LAS TURBIAS STREAM WATERSHED,
PROVINCE OF SANTA FE, ARGENTINE**

Javier Vergara^{(1)(*)}, Maria del Valle Morresi⁽¹⁾ y Mario Gardiol⁽¹⁾

⁽¹⁾ Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Santa Fe, Argentina

^(*)e-mail: javieravergara94@gmail.com

RESUMEN

En los últimos 10 años, en la cuenca del arroyo Las Turbias del centro sur de la provincia de Santa Fe, se han producido crecidas más frecuentes ante menores montos precipitados. Como consecuencia, se presentan desbordes y anegamientos prolongados y en menor grado procesos erosivos puntuales en márgenes del cauce. Estos efectos de la amenaza natural se agravan por las intervenciones individuales, no planificadas, ejecución de obras viales, canales, bordos y terraplenes de defensa como también cambios tecnológicos en la producción agrícola, que modifican permanentemente la dinámica de escurrimiento. A esta situación se suman las inquietudes e incertidumbres de los productores de la zona en cuanto al trasvase de caudales desde otras cuencas. En este trabajo se implementó el software modular CAPRA GIS para representar áreas de inundación generadas por distintos escenarios de frecuencia probabilística. La simulación se realizó con el módulo ERN- Inundación en el tramo superior de la cuenca del arroyo Las Turbias para hietogramas de diseño de diferentes recurrencias. Los mapas obtenidos sirven de apoyo a los tomadores de decisión para que junto con los organismos de cuenca gestionen de forma adecuada las medidas estructurales y no estructurales correspondientes.

Palabras clave: hidrología, hidráulica, inundación, riesgo, amenaza

ABSTRACT

In the last 10 years, in Las Turbias stream basin placed in the south center of Santa Fe province, more frequent floods have been occurred despite to lower precipitated amounts. As a consequence, there are prolonged overflows and floodings, and to a lesser degree erosive processes on the river banks. These effects of the natural threat are aggravated by individual and unplanned actions, execution of road works, channels and defense embankments as well as technological changes in agricultural production, which permanently modify the runoff dynamics. To this situation are added the concerns and uncertainties of the producers about flows transfer from other basins. In this work, the CAPRA GIS modular software was implemented to represent flood areas generated by different probabilistic frequency scenarios. The simulation was performed with the ERN- Inundación module in the upper section of the Las Turbias stream basin for design hietograms of different recurrences. The maps obtained are support decision-makers so that together with the basin organizations they adequately manage the corresponding structural and non-structural measures.

Keywords: hydrology, hydraulics, flood, risk, threat

INTRODUCCIÓN

El arroyo Las Turbias es un afluente del arroyo Carrizales-Monje, tiene una longitud de 81 km y la cuenca hidrográfica ocupa una superficie aproximada de 1000 km². Abarca los departamentos Belgrano (distritos, Las Rosas y Bouquet), Iriondo (distrito Clason), San Jerónimo (distritos San Genaro y Díaz) y San Martín (distritos María Susana y Los Cardos), entre 61°55'48" y 61°09'54" de longitud oeste y 32°27'18" y 32°16'00" de latitud sur, como muestra la Figura 1. En su extremo aguas arriba, -cuenca alta- el arroyo recibe las aguas de una importante red de canales y bajos naturales (paleocañadas) correspondientes principalmente a los distritos de María Susana, Bouquet y Las Rosas. Esta zona se caracteriza, además, por su escasa pendiente (menor al 1%) y la presencia de una amplia red vial que juegan un rol muy importante en el sistema de drenaje. La zona media de la cuenca, (comprendida entre las rutas provincial N° 13 y

nacional N° 34 aproximadamente), por el contrario, tiene pendientes importantes, que llegan en algunas zonas al 3% y no posee los rasgos fisiográficos mencionados para la alta cuenca, por lo que no presenta problemas de anegamiento. La cuenca inferior, comprendida entre la ruta nacional N°34 y la desembocadura en el arroyo Carrizales-Monje, es también una zona con bajas pendientes, aunque no inferiores a las de la alta cuenca (Morresi y Gardiol, 2017).

OBJETIVO

El objetivo del trabajo, es analizar las amenazas por precipitación e inundación, mediante el módulo ERN-Inundación del Software CAPRA-GIS, (Banco Mundial, 2009) complementado con los softwares HEC-RAS 4.1, HEC-HMS 4.2, (U.S. Army Corps of Engineers Civils. Hydrologic Engineering Center, 2010) y Civil.CAD 2017.

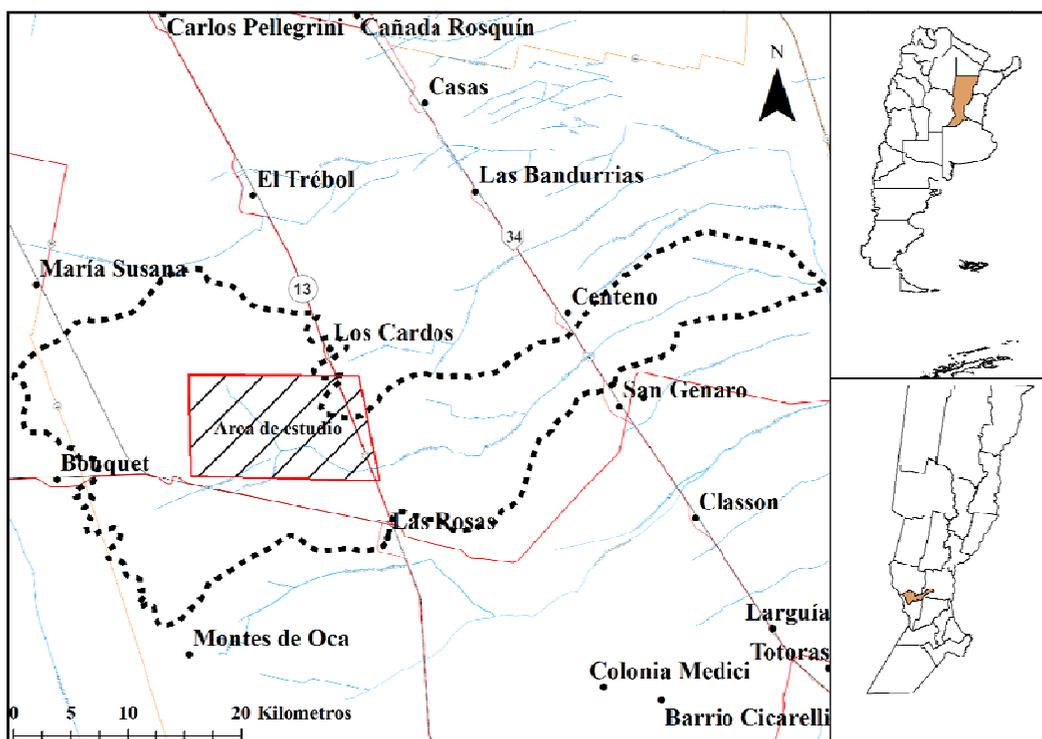


Figura 1. Cuenca arroyo Las Turbias.

METODOLOGÍA

Plataforma CAPRA

La plataforma CAPRA tiene como objetivo fortalecer la capacidad institucional para evaluar,

comprender y comunicar el riesgo de desastres, con el objetivo final de integrar la información en las políticas y programas de desarrollo. Esta iniciativa comenzó en 2008, como una asociación entre el Centro de Coordinación de Prevención de Desastres Naturales en América Central (CEPRENAC), la

Estrategia Internacional de las Naciones Unidas para la Reducción de Desastres (UN ISDR), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y El Banco Mundial como un medio para crear conciencia entre los países de América Central al proporcionarles un conjunto de herramientas que les permitirían comprender mejor el riesgo de eventos naturales adversos (Banco Mundial, 2009). Posee diversos módulos para evaluar las amenazas. Entre ellos el ER-Inundación (o ER-Flood) que permite el análisis de inundaciones de ríos, basado en un conjunto de escenarios estocásticos.

Superficie TIN

El módulo ERN-Inundación utiliza el modelo hidráulico HEC-RAS (Brunner, 2016), con perfiles transversales georreferenciados. Para ello, en el software CAD se ubicaron los perfiles transversales ortogonalmente a la línea de vaguada y se obtuvieron las coordenadas de los extremos en el marco de referencia POSGAR 2007 faja 5, correspondiente al área de estudio. Mediante las ecuaciones (1), (2) y (3) se obtuvieron el ángulo de inclinación con el norte geográfico y las coordenadas de los puntos intermedios, conocidas las de los extremos:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1)$$

$$X_{i+1} = X_i + d \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

$$Y_{i+1} = Y_i + d \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

donde α : es el ángulo de inclinación del perfil transversal (en grados); Δy y Δx , es el incremento de las coordenadas este y norte respectivamente de los extremos del mismo; X_i y X_{i+1} coordenadas norte anterior y siguiente respectivamente; Y_i y Y_{i+1} coordenadas este anterior y siguiente respectivamente. Las coordenadas calculadas se las incorporaron al software Civil CAD, con su altimetría en cota IGN; además se consideraron las curvas de nivel de la zona para poder mejorar la definición en la zona del valle de inundación del arroyo. Luego se construyó la superficie 3D, con el método de interpolación de la red de triangulación irregular (TIN), que permitirá obtener perfiles transversales georreferenciados para poder exportar al modelo hidráulico HEC-RAS. Por último, a estos perfiles se los reproyectó al sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) zona 20

sur, según lo requiere el módulo ERN-INUNDACION, del software CAPRA GIS.

Discretización del sistema

Debido a que las hipótesis que supone el software de flujo se limitan a permanente, gradualmente variado, las secciones pueden ser del tipo irregular y no considera aportes laterales. Para implementar el software CAPRA en el arroyo Las Turbias se seleccionó el tramo correspondiente a la cuenca superior, progresivas 47485 m a 68626 m desde aguas abajo (aa) hacia aguas arriba (AA). El mismo se subdividió en 8 subtramos de propagación coincidentes con los aportes laterales de las subcuencas, según las siguientes progresivas (desde AA hacia aa): 68626 m a 65850 m; 65850 m a 63850 m; 63850 m a 62250 m; 62250 m a 59850 m; 59850 m a 57850 m; 57850 m a 56171,6 m; 56171,6 m a 50250 m y 50250 m a 47485 m. Los perfiles georreferenciados tienen asignada la progresiva propia correspondiente a la progresiva de inicio de cada subtramo considerado.

Modelación hidráulica

El módulo ERN-Inundación está acoplado al software HEC-RAS 4.1, y según las hipótesis previamente mencionadas, se resuelven las siguientes ecuaciones de continuidad (4) y de energía (5) para obtener las áreas de inundación:

$$V_2 \cdot A_2 = V_1 \cdot A_1 \quad (4)$$

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2g} + h_e \quad (5)$$

A su vez la velocidad media del flujo se obtiene mediante la ecuación de resistencia de Manning (6), Chow (1994):

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S_f^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

donde Z_1 , Z_2 representan la elevación del fondo del canal aa y AA, respectivamente (m); Y_1 , Y_2 , la elevación del pelo de agua (m); V_1 , V_2 , la velocidad del escurrimiento en las distintas secciones (m/s); \bar{V} la velocidad media del escurrimiento (m/s); A_1 , A_2 el área mojada de las secciones transversales (m²); α_1 , α_2 coeficiente de ponderación de velocidad, h_e pérdida de carga (m); n coeficiente de resistencia al

escurrimiento de Manning ($s/m^{1/3}$); R radio hidráulico (m); S_f pendiente de energía (m/m).

Las condiciones de borde AA de cada subtramo son los hidrogramas de entrada obtenidos por modelación hidrológica con HEC-HMS a los que se les adiciona los hidrogramas de aporte lateral en las progresivas que corresponda. La condición de borde aa es la pendiente media de cada subtramo. Para tormentas reales fue posible calibrar los parámetros de la modelación hidrológica-hidráulica de la cuenca del arroyo Las Turbias (Morresi et al., 2018).

Modelación hidrológica

La modelación hidrológica se realizó con el HEC-HMS que tuvo en cuenta la subdivisión en

subcuenclas de manera de obtener los hidrogramas de entrada a cada subtramo y los laterales, requeridos para la modelación hidráulica de los subtramos, como se muestra en la Figura 2 (Morresi et al., 2018).

Los datos de entrada al modelo hidrológico son los hietogramas de diseño para cada recurrencia. De esta forma se pueden obtener los hidrogramas condiciones de borde AA del modelo hidráulico de propagación de los subtramos en cada progresiva.

El módulo ERN-Inundación necesita como dato de entrada una curva caudal (Q) – recurrencia (Tr) para calcular el área inundada. Los caudales máximos se obtuvieron de los hidrogramas generados por el modelo hidrológico para cada subtramo con las tormentas de diseño seleccionadas.

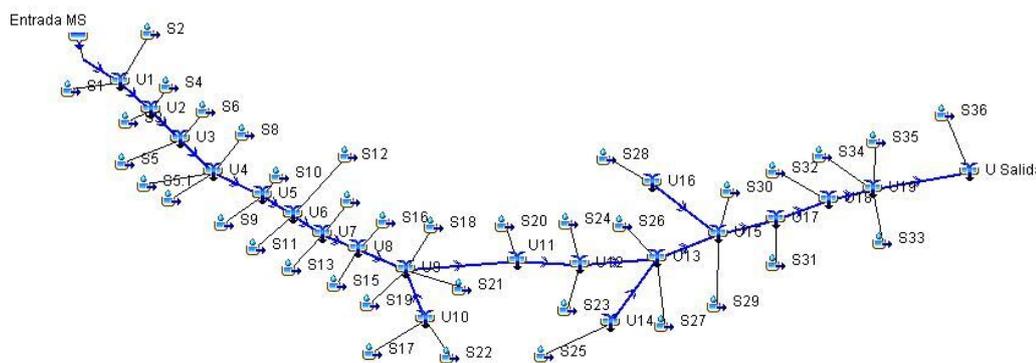


Figura 2. Esquema topológico HEC – HMS.

Tormentas de diseño

De acuerdo al tiempo de concentración de la cuenca se adoptó una duración de 5 días para las tormentas de diseño y para las recurrencias o tiempos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Para construir la tormenta de diseño se utilizaron las curvas IDF de Paraná calculadas con la ecuación (7) y Figura 3.

$$i = \frac{601 \cdot (Tr)^{0.23}}{(d + 6)^{0.69}} \quad (7)$$

donde i es la intensidad (mm/h), Tr es el tiempo de retorno o recurrencia (años) y d la duración (minutos).

Según Zamanillo et al. (2008) en el patrón temporal de la precipitación para largos periodos de tiempo la mayor tasa de precipitación se produce a 1/3 del

tiempo total y además se aplicó un coeficiente de abatimiento areal con la ecuación (8) (Genta y Chabonnier, 2003) para suponer la uniformidad de la precipitación en la cuenca:

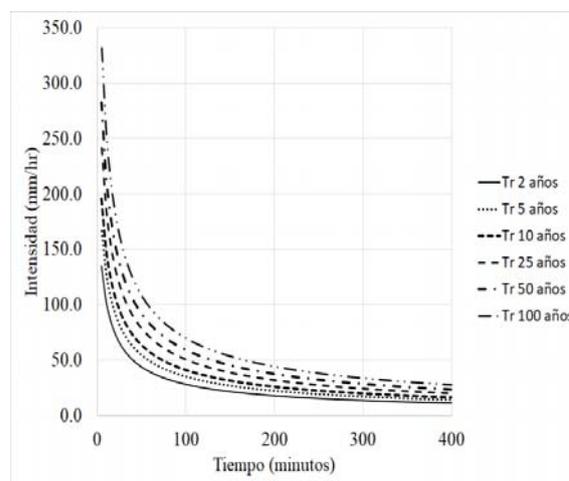


Figura 3. Curva IDF Paraná.

$$CA = 1 - (0.3549 \cdot d^{0.1272})(1 - e^{-0.005792 \cdot A}) \quad (8)$$

donde: d: duración de la lluvia (horas), A área de la cuenca (km²)

La Figura 4 muestra el hietograma de diseño para una recurrencia de 2 años.

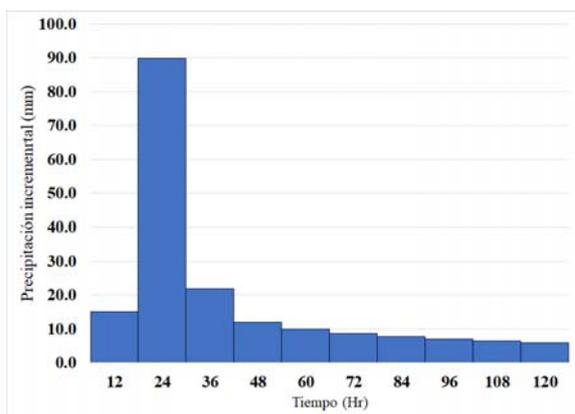


Figura 4. Tormenta de diseño Tr = 2 años.

Una vez construidas las tormentas de diseño para cada recurrencia se ingresaron como dato de entrada al modelo hidrológico de la cuenca del arroyo Las Turbias para obtener los caudales máximos (de los hidrogramas) en las secciones AA y aa de los subtramos, correspondientes a la recurrencia de la tormenta, obteniéndose la curva Q-Tr para cada subtramo.

La Figura 5 muestra la curva Q-Tr para el subtramo comprendido entre las progresivas 68626 m a 65850 m.

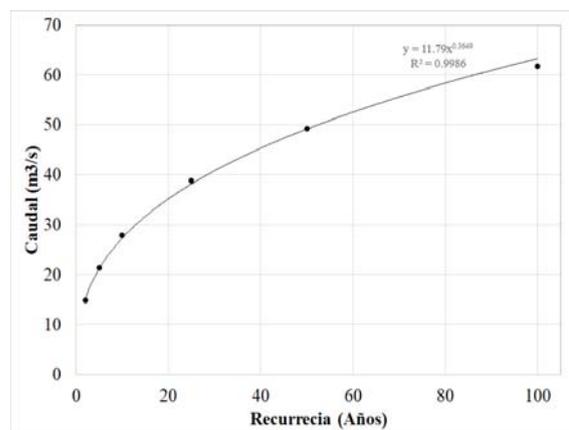


Figura 5. Curva caudal - Tr progresiva 68626 a 65850 m.

A continuación, se presenta la Tabla 1 con los caudales del tramo superior y las recurrencias adoptadas.

Implementación del módulo ERN-Inundación

Para implementar este módulo de inundación se ingresan los perfiles georreferenciados del modelo hidráulico y las curvas caudal-recurrencia. La simulación genera diferentes escenarios en función de la recurrencia.

Las Figuras 6 y 7 muestran a modo de ejemplo los resultados del Módulo ERN-Inundación de profundidades de agua y velocidades medias del escurrimiento en el cauce y la planicie de inundación para el subtramo 68626 m a 65850 m y en la Tabla 2, se presentan las características hidráulicas (Tr = 21 años).

Tabla 1. Caudales - Recurrencia.

Progresiva (m)	68626 a 65850	65850 a 63850	63850 a 62250	62250 a 59850	59850 a 57850	59850 a 56191.6	56191.6 a 50250	50250 a 47485 (RP13)
Tr (años)	Q (m ³ /s)							
2	14.8	34.5	58.1	62.1	65.4	73.7	81.1	96.9
5	21.4	41.2	64.7	68.7	74.2	87.7	98.4	121.4
10	27.9	66.2	110.9	124.3	132.5	153.1	170	204.9
25	38.8	93.2	156.2	178.4	190.4	223.4	248.4	300.4
50	49.3	119.3	199.8	231.5	247.4	292.3	325.3	394.7
100	61.8	150.8	252.9	296.7	317.1	376.6	419.2	509.6

Se combinan los rasters generados de las distintas discretizaciones, en el software ArcGIS (ESRI, 2014) y se obtienen los mapas de afectación hídrica (Figura 8) y mapa de velocidades medias (Figura 9), con resolución de la imagen de 10 m x 10 m, permitiendo tener una visualización espacial de la crecida.

Se puede observar que, las profundidades máximas y las máximas velocidades, se encuentran en las zonas cercanas a las vías del ferrocarril, donde termina la simulación con un rango de profundidades de 2.5 m a 3 m y velocidades medias de 0.46 m/s a 0.68 m/s.

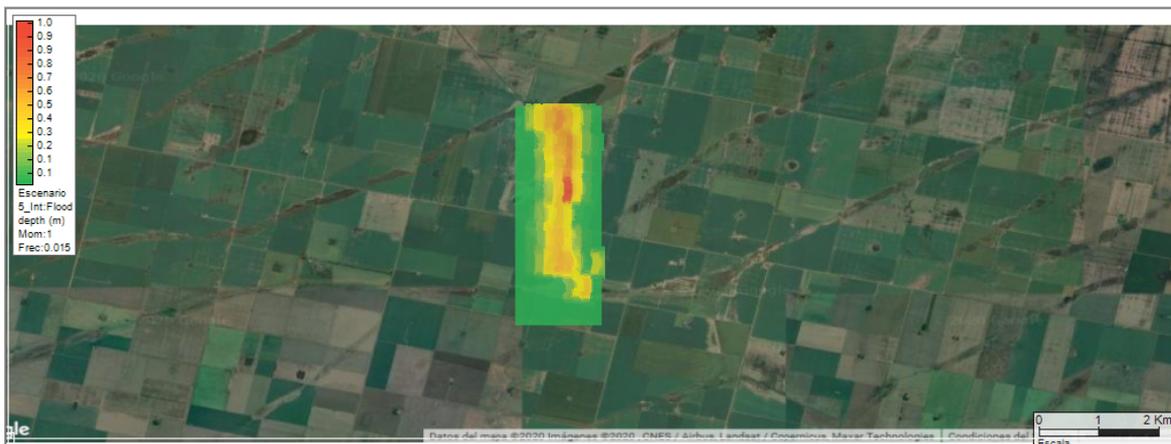


Figura 6. Profundidades(m). Modulo ERN-Inundación Escenario 5(de 68626 m a 65850 m).



Figura 7. Velocidades medias (m/s).Modulo ERN-Inundación Escenario 5 (de 68626 m a 65850 m).

Tabla 2. Características Hidráulicas Subtramo 68626 m a 65850 m. Perfiles georreferenciados. Tr: 21 años.

Perfil	Q Total (m ³ /s)	Elev PA (m)	Vel Canal (m/s)	Ancho Sup. (m)	Prof maxima (m)
3461.69	35.95	102.07	0.16	1000	1.19
3276.36	35.95	102.06	0.24	979.27	1.86
3185.46	35.95	102.05	0.29	979.43	1.9
3090.47	35.95	102.04	0.37	941.97	1.94
3000	35.95	102.03	0.4	902.83	1.97
2904.05	35.95	102.02	0.39	895.27	2.01
2800	35.95	102.01	0.39	829.92	2.05
2716.11	35.95	102	0.4	832.31	2.09
2627.53	35.95	101.99	0.41	781.49	2.12
2527.69	35.95	101.97	0.38	770.95	2.15
2439.36	35.95	101.97	0.39	744.04	2.2
2286.81	35.95	101.95	0.38	721.19	1.57
2180.07	35.95	101.93	0.44	729.51	2.14
2100	35.95	101.92	0.45	674.71	1.66
2041.24	35.95	101.9	0.46	674.84	1.5
1932.44	35.95	101.88	0.55	664.73	2.15
1839.39	35.95	101.85	0.61	628.7	1.62
1744.99	35.95	101.8	0.75	556.47	1.61
1655.51	35.95	101.73	0.93	486.91	2.05
1547.06	35.95	101.63	1.03	419.99	1.32
1465.08	35.95	101.52	1.08	401.86	1.92
1341.78	35.95	101.39	1.06	389.32	1.87
1275.49	35.95	101.33	1.03	396.34	1.84
1149.81	35.95	101.2	1.06	393.06	1.78
1086.31	35.95	101.16	0.81	446.44	1.77
947.73	35.95	101.08	0.72	515.19	1.74
859.62	35.95	101.04	0.71	487.98	1.74
743.98	35.95	100.97	0.76	459.4	1.73
637.68	35.95	100.91	0.8	425.66	1.72
549.77	35.95	100.86	0.77	437.84	1.72
400	35.95	100.79	0.55	419.59	1.04
277.16	35.95	100.77	0.5	456.49	1.81
149.76	35.95	100.73	0.62	377.72	1.7
0	35.95	100.66	0.68	320.39	1.46



Figura 8. Mapa de afectación hídrica Escenario 5 (de prog. 68626 m a 47485 m).



Figura 9. Mapa de velocidades Escenario 5 (de prog. 68626 m a 47485 m).

CONCLUSIONES

El módulo ERN-Inundación del software CAPRA permite una visualización espacial a partir del mapeo de áreas de inundación.

Brinda información cuantitativa técnica de las variables hidráulicas del tramo estudiado.

Además, facilita la interpretación y análisis de los problemas de origen hídrico ocasionados por excesos de agua en la cuenca.

Esta herramienta puede contribuir a la toma de decisiones vinculadas con la planificación rural de la zona y adoptar medidas estructurales y no estructurales relacionadas a la reducción del daño debido a estos fenómenos. Además, permite vincular las amenazas por precipitación y por inundación con la frecuencia de ocurrencia del fenómeno del anegamiento.

REFERENCIAS

- Banco Mundial. (2009). Manual del Usuario CAPRA-GIS. Colombia. Recuperado de <https://ecapra.org/es>
- Brunner, G. (2016). HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic. Davis: US. Army Corps..
- Chow, V. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Bogota: McGraw-Hill.
- ESRI. (2014). Manual del usuario ArcGIS 10.2.2. Estados Unidos.
- Genta, J. L. y Chabonnier, F. (2003). Curso de Hidrología Aplicada. Montevideo: Universidad de la República, Facultad de Ingeniería.

Morresi, M. y Gardiol, M. (2017). Participación de actores sociales en la cuenca del arroyo Las Turbias. XXVI Congreso Nacional Del Agua 2017, 20 al 23 de septiembre de 2017. Córdoba, Argentina.

Morresi, M., Marcus, R., Gardiol, M. y Biancotti, E. (2018). Modelación hidrológica hidráulica con información de actores sociales en la cuenca del arroyo Las Turbias. Santa Fe. Argentina. *Revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe*. AQUA-LAC. Unesco. ISSN 1688-2873. En prensa.

U.S. Army Corps of Engineers Civils. Hydrologic Engineering Center. (2010) Hydrologic Modeling Center HEC-HMS User's Manual. Davis, California.

Zamanillo, E., Larenze, G., Tito, M. J., Perez, M. y Garat, M. E. (2008). Manual de Tormentas de diseño para la Provincia de Entre Ríos. Buenos Aires: Universidad Tecnológica Nacional.

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

Vergara, J.; Morresi, M. y Gardiol, M. (2020). Implementación de un software modular en la cuenca del arroyo Las Turbias. Provincia de Santa Fe, Argentina. Cuadernos del CURIHAM. 26: 31-39. doi: 10.35305/curiham.v26i0.144

Tipo de Publicación: NOTA TÉCNICA.

Trabajo recibido el 27/12/2019 y aprobado para su publicación el 10/07/2020.

EFFECTO DE LOS CULTIVOS DE COBERTURA SOBRE LAS PÉRDIDAS DE AGUA Y SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA

EFFECT OF COVER CROPS ON WATER AND SOIL LOSSES DUE TO HYDRIC EROSION

Julia Capurro^{(1)(*)} y Sergio Montico⁽²⁾

⁽¹⁾ Agencia de Extensión Rural. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Cañada de Gómez, Santa Fe, Argentina.

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

^(*) e-mail: capurro.julia@inta.gob.ar

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la inclusión de un cultivo de cobertura (CC) en una secuencia soja-soja, sobre las pérdidas de agua y suelo producidas por erosión hídrica en distintos ambientes de un suelo erosionado. El experimento se desarrolló sobre un suelo Argiudol típico, con un diseño de parcelas divididas, donde las parcelas mayores fueron los ambientes del sitio experimental, diferenciados por su relieve en: Loma (pendiente media de 0.15%), Media Loma (pendiente media de 0.9%) y Bajo (pendiente media < 0.1%) y las parcelas menores correspondieron al subfactor tratamiento, con dos niveles: CCC (con cultivos de cobertura) y SCC (sin cultivos de cobertura) en base a una mezcla de avena (*Avena sativa* L.) y vicia (*Vicia sativa* L.). Se obtuvo la producción de materia seca (MS) de los CC y se aplicaron lluvias simuladas en cada parcela, a una intensidad constante de 60 mm/h y una duración de 1 h, en prefloración del cultivo de soja sucesor. En cada parcela, después de la lluvia simulada, se registró la pérdida total de agua en mm (l.m²) y se calculó el porcentaje respectivo sobre la lluvia total aplicada. Previamente a la aplicación de las lluvias simuladas, se evaluaron la cobertura vegetal (%) y la rugosidad superficial en mm (RR). Se midió la pérdida total de suelo para cada lluvia en g/m². La cobertura superficial y la RR aumentaron significativamente por la inclusión de los CC. Las pérdidas totales de agua por escurrimiento superficial y de suelo en Loma, Media Loma y Bajo CCC fueron significativamente menores a las pérdidas en SCC. Los procesos de erosión hídrica fueron mitigados por los CC a través del aumento de la cobertura y rugosidad superficiales.

Palabras clave: erosión hídrica, degradación de suelos, cultivos de cobertura, monocultivo de soja

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the effect of the inclusion of a cover crop (CC) in a soybean-soybean sequence, on the losses of water and soil produced by water erosion in different environments of an eroded soil. The experiment was developed on a typical Argiudol soil, with a divided plot design, where the largest plots were the environments of the experimental site, differentiated by their topography in: Hump (average slope 0.15%), Half hump (average slope 0.9%) and Low (mean slope <0.1%) and the smaller plots corresponded to the treatment sub-factor, with two levels: CCC (with cover crops) and SCC (without cover crops) based on a mixture oats (*Avena sativa* L.) and vicia (*Vicia sativa* L.). The dry matter production (DM) of the CC was obtained and simulated rains were applied in each plot, at a constant intensity of 60 mm/h and a duration of 1 h, in pre-flowering of the successor soybean crop. In each plot, after the simulated rain, the total loss of water in mm (l.m²) was recorded and the respective percentage of the total applied rain was calculated. Before applying the simulated rains, the vegetation cover (%) and the surface roughness in mm (RR) were evaluated. Total soil loss was measured for each rain in g.m⁻². Surface coverage and RR increased significantly due to the inclusion of CC. The total water losses due to surface and soil runoff in Hump, Half hump and Low CCC were significantly lower in SCC. The water erosion processes were mitigated by the CC through the increase in surface coverage and roughness.

Keywords: water erosion, soil degradation, cover crops, soybean monoculture

INTRODUCCIÓN

Desde principios de la década del 90 del siglo veinte, la producción agrícola argentina registró un avance sostenido con un crecimiento extraordinario de la superficie destinada al cultivo de soja en las regiones pampeana y extrapampeana. Esta situación se potenció con la rápida incorporación de la soja transgénica asociada al sistema de siembra directa, que permitió su cultivo en áreas marginales y en suelos con limitaciones para la agricultura convencional (Casas, 2007).

No obstante el favorable impacto de la siembra directa sobre los suelos, persisten algunos procesos de degradación como la erosión hídrica. Una de las causas fundamentales de la erosión hídrica en las tierras cultivadas es la acción de las precipitaciones directamente sobre el suelo y la susceptibilidad del mismo a deteriorarse por las lluvias. La pérdida de suelo producida por este proceso, va a depender de la combinación de la erosividad, definida como el potencial de las precipitaciones para erosionar el suelo, con la erodibilidad del mismo, o sea, su capacidad de resistir la acción de las precipitaciones (Wischmeier y Smith, 1978; Hudson, 1995).

Dado que la erosión es un proceso predominantemente de superficie, las condiciones físicas de la capa edáfica superficial -externas e internas- son las que determinarán las pérdidas totales de suelo y agua. Principalmente, esas condiciones dependerán del tipo de uso de la tierra y del manejo del suelo y los cultivos, los cuales producen diferentes grados de cobertura y rugosidad superficiales (Bagatini et al., 2011).

En una agricultura pampeana dominada principalmente por el cultivo de soja, los aportes de los residuos de cosecha de este cultivo son bajos en cantidad y relación C:N, por lo que su participación en las rotaciones agrícolas afectan la conservación de los contenidos de materia orgánica y el mantenimiento de adecuados niveles de cobertura (Ruffo, 2003 citado por Scianca et al., 2008).

Esta problemática se agrava en áreas onduladas, donde gran parte del agua de las lluvias de primavera escurre hacia las zonas bajas de los lotes, arrastrando el escaso residuo de cosecha remanente. Así, la soja sembrada a continuación, emerge en suelos casi descubiertos (Capurro et al., 2010).

La inclusión de un cultivo de cobertura (CC) durante el período entre la cosecha de soja en otoño hasta la

implantación de la soja sucesora, a mediados de la primavera siguiente, permite mantener el suelo cubierto y producir un nuevo ingreso de residuos de cosecha al sistema. La fitomasa aérea producida por el CC permanece entera y anclada al suelo a través de sus raíces y de esta forma no es arrastrada por los escurrimientos superficiales, como sucede con los residuos de los cultivos de renta, los cuales son trozados y esparcidos por la cosechadora.

El uso de simuladores de lluvia para el estudio de las relaciones lluvia-escurrimiento, la medida de la tasa de infiltración y la estimación de las pérdidas de suelo, permiten experimentar estos procesos, controlando la intensidad, el sitio y la oportunidad de las precipitaciones.

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la inclusión de un CC en una secuencia soja-soja, sobre las pérdidas de agua y suelo producidas por erosión hídrica a través de la aplicación de lluvias simuladas, en distintos ambientes de un suelo erosionado perteneciente a un lote agrícola del sur de Santa Fe.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en un suelo Argiudol típico serie Correa, fase moderadamente erosionada (Horizonte superficial 0-16 cm: arcilla 23.5%; arena 7.0%; limo 69.5%).

El sitio experimental (32° 52' 33'' Sur y 61° 26' 59'' Oeste, altitud media de 114 m) tuvo agricultura continua durante 25 años y monocultivo de soja de primera en siembra directa, durante los últimos diez años.

El experimento se realizó siguiendo un diseño en parcelas divididas. Las parcelas mayores correspondieron al factor ambiente con tres niveles: Loma (ambiente con relieve subnormal, con pendiente media de 0.15% y sin erosión hídrica), Media Loma (ambiente de relieve normal, con una pendiente media de 0.9%, con erosión moderada y una pérdida de hasta el 25% del horizonte superficial) y Bajo (ambiente subnormal a cóncavo -pendiente media <0.1%- con recepción y acumulación de sedimentos y sin erosión hídrica) y las parcelas menores correspondieron al subfactor tratamiento, con dos niveles: CCC (con cultivos de cobertura) y SCC (sin cultivos de cobertura). Las seis combinaciones de ambientes y tratamientos fueron: Loma CCC, Loma SCC, Media Loma CCC, Media Loma SCC, Bajo CCC y Bajo

SCC. Las dimensiones de cada parcela resultaron de 30 m por 50 m y se distribuyeron en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones. Se implantó una mezcla de avena (*Avena sativa* L.) -peso de 1000 semillas: 33 g- y vicia (*Vicia sativa* L.) -peso de 1000 semillas: 59 g- con una densidad de siembra de 88 kg/ha, a fin de lograr 200 plantas por metro cuadrado y una relación de consociación 50:50 de cada especie. La siembra del CC se realizó el 8 de mayo con una sembradora de siembra directa de grano fino, con líneas de siembra separadas a 0.175 m y abresurcos de doble disco plano. El ciclo de crecimiento del CC fue de 155 días, desde la emergencia hasta la supresión química de su crecimiento, el 13 de octubre. Al momento de la supresión química del crecimiento de los CC, la producción de materia seca (MS) se obtuvo mediante seis muestras de 0.25 m² de la parte aérea de CC en cada parcela. Se llevó a estufa a 65 °C hasta peso constante, y se calculó la producción de MS en kg/ha. La siembra del cultivo de soja sucesor se efectuó el 10 de noviembre con una sembradora de siembra directa de grano grueso, con líneas de siembra separadas a 0.525 m, cuchillas turbo, doble disco plantador y placas monograno.

Del 10 al 14 de diciembre, previo a la floración del cultivo de soja, se aplicó una lluvia simulada en cada parcela con un Simulador de Intensidades Múltiples, que cuantifica el proceso de erosión hídrica (Meyer y Harmon, 1979; Meyer, 1983), adaptado en la EEA INTA Marcos Juárez (Marelli et al., 1986). Previamente a la aplicación de las lluvias simuladas, se evaluó el porcentaje de cobertura vegetal de la superficie del suelo, por el método de la transecta lineal de Laflen et al. (1981) y la rugosidad superficial en mm (RR), utilizando un perfilómetro de agujas (Iruetia et al., 2010). Las lluvias simuladas fueron aplicadas a una intensidad constante de 60 mm/h y tuvieron una duración de 1 h. Se instaló una micro-parcela de medición en cada unidad experimental. La micro-parcela de medición tuvo un área de 1 m² (1m x 1m), con una zona de borde de 0.5 m de ancho y estuvo ubicada en la parte central del área de aspersión. Se delimitaron tres de sus lados con chapas galvanizadas de 20 cm de altura, enterradas 10 cm en el suelo y en el borde inferior, perpendicular a la dirección de la pendiente, se usó una bandeja aforadora del escurrimiento del mismo material, en forma de vertedero.

Se registró en cada lluvia simulada, la pérdida total de agua en mm (l.m²) y se calculó el porcentaje respectivo sobre la lluvia total aplicada durante la hora de

duración del evento. Se midió la pérdida total de suelo para cada lluvia en g/m². Los sedimentos totales obtenidos de los escurrimientos se secaron a 105° C hasta peso constante y se convirtieron a kg/ha.

Los análisis estadísticos se realizaron mediante análisis de variancia según el diseño utilizado -parcelas divididas-, testeando particularmente los efectos de ambientes, tratamientos y su interacción. Seguidamente se realizaron los test de comparaciones de medias, de acuerdo a la significación de los efectos en los análisis de variancia, utilizando el test LSD de Fisher, a un nivel de significación del 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el propósito de mostrar las condiciones ambientales que se presentaron durante el periodo del ensayo, se indica que la temperatura media fue de 12.93°C, se registraron 19 heladas y las precipitaciones fueron de 391 mm, 50% por encima de la media histórica (1978/2011) para el período considerado. En el mes de diciembre -cuando se efectuó la medición de la lluvia artificial- la precipitación fue de 261mm.

La producción media de materia seca de los CC al momento del secado y en los diferentes ambientes fue: Loma: 5517 kg/ha; Media Loma: 5602 kg/ha; Bajo: 6734 kg/ha. No se hallaron diferencias significativas entre tratamientos y tampoco entre ambientes. La cobertura superficial fue significativamente superior en Loma CCC, Media Loma CCC y Bajo CCC (93%, 91% y 97%, respectivamente), en comparación con Loma SCC, Media Loma SCC y Bajo SCC (38%, 27% y 50%). Asimismo, la RR mostró diferencias significativas a favor de Loma CCC, Media Loma CCC y Bajo CCC (17.2; 19.7 y 16.4 mm, respectivamente) en relación a Loma SCC, Media Loma SCC y Bajo SCC (6.5; 2.9 y 7.8 mm, respectivamente).

Efecto en las pérdidas totales de agua

Las pérdidas totales de agua por escurrimiento superficial (Figura 1), mostraron efectos de tratamientos y ambientes altamente significativos, sin interacción entre ambos. Los registros fueron menores en las parcelas CCC con una media de 24% de agua total perdida, mientras que en las parcelas SCC los valores fueron de 38% en promedio. En Loma, Media Loma y Bajo, las pérdidas medias fueron de 27%, 38% y 27%, respectivamente.

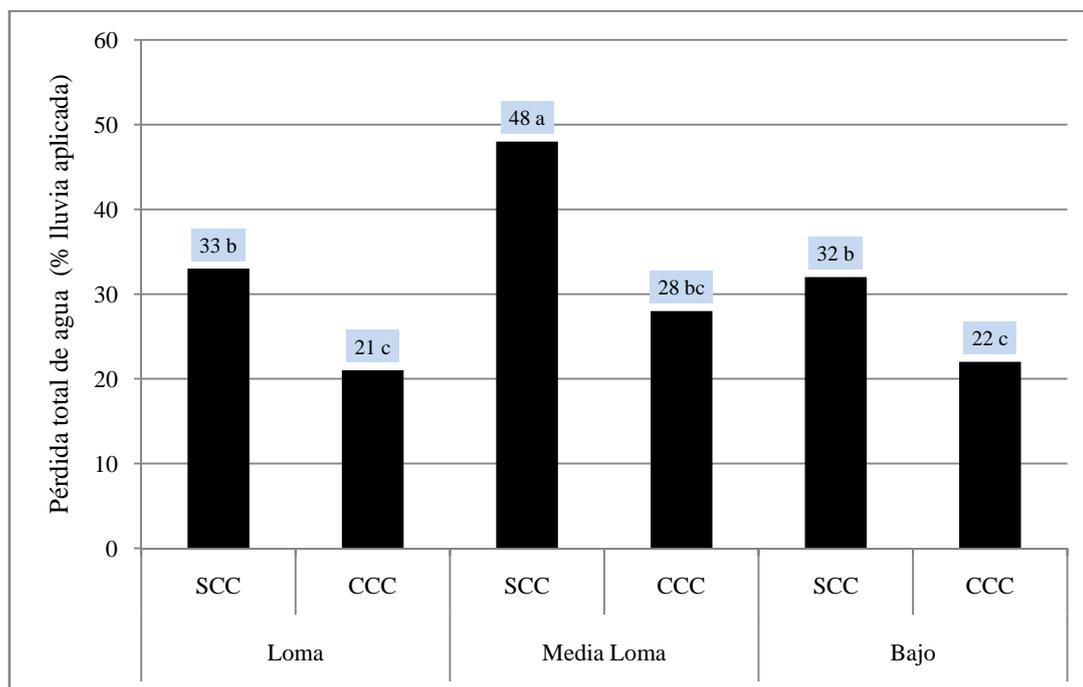


Figura 1. Pérdida total de agua por escurrimiento superficial, en porcentaje sobre la lluvia aplicada.

Ref: SCC: Sin Cultivos de Cobertura; CCC: Con Cultivos de Cobertura. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

La significativa disminución de los escurrimientos superficiales, en las parcelas CCC respecto de las SCC en cada ambiente, pudo generarse por el efecto de la cobertura vegetal, asociado al efecto de una más alta rugosidad. Estas condiciones, posiblemente, aumentaron la capacidad del suelo de resistir la acción erosiva de la lluvia, al impedir el contacto directo de las gotas con la superficie, e incrementaron la retención superficial del agua, mejorando su infiltración en el suelo. Coincidiendo con esto, Crespo et al. (2010) aplicaron lluvias simuladas en 34 sitios del centro de la provincia de Buenos Aires y determinaron que, independientemente del sistema de labranza utilizado, el escurrimiento dependió en gran parte de la cobertura vegetal de los mismos.

Las mayores diferencias establecidas entre los tratamientos en la Media Loma, pudieron estar relacionadas con el relativamente alto gradiente de la pendiente (0.9%), en un suelo con muy baja rugosidad debido a las lluvias anteriores y densificado superficialmente, en oportunidad de la siembra de soja después de un largo período de años en siembra directa. Estos factores contribuyeron al escurrimiento de una mayor masa de agua en un breve período de tiempo, provocando una pérdida equivalente a la mitad de la lluvia aplicada en las parcelas SCC.

Diversos autores (Bertol, 1986; Levien, 1999; Volk, 2002; Streck y Cogo, 2003; Cogo y Streck, 2003; Volk et al., 2004 y Castro et al., 2006, citados por Gilles et al., 2009) han observado que la escasa remoción del suelo en la siembra directa -dado por la profundidad de labor, la extensión de superficie de terreno trabajado y el nivel de fragmentación del volumen de suelo removido- ocasiona una disminución de la rugosidad superficial y ningún incremento adicional de porosidad total del horizonte superficial edáfico, además de resultar en una superficie de suelo generalmente consolidada. Esta condición, según los autores, favorece con el tiempo la conservación del suelo, pero en muchos casos, desfavorece la conservación del agua, por el aumento del escurrimiento superficial.

En este trabajo, el relieve en Loma y Bajo, probablemente, no favoreció la dinámica del agua en la misma proporción que en Media Loma, por lo que las condiciones de cobertura y rugosidad no fueron afectadas en la misma medida, no obstante alrededor de un tercio del agua aplicada se perdió por escurrimientos superficiales. En este sentido, Bertol y Miquelluti (1993) evaluaron pérdidas por erosión hídrica con distintos manejos de suelo y observaron que las pérdidas de agua fueron mucho menos influenciadas por los sistemas de manejo del suelo que las pérdidas de suelo, lo que condice, según estos autores, con la mayoría de los trabajos conducidos en ese área.

También con lluvias simuladas, Gilles et al. (2009) encontraron pérdidas de agua por escurrimientos superficiales, de hasta 71% y 46% de la lluvia aplicada en los momentos de siembra y floración, respectivamente, del cultivo de maíz (*Zea mays*) en siembra directa sobre suelos Ultisoles. Con resultados diferentes sobre una situación productiva contrastante, Bagatini et al. (2011) hallaron pérdidas de agua de menos del 20% de la lluvia aplicada, en un suelo con pocos años de agricultura y en base a un manejo conservacionista de labranzas y fertilización.

Efecto en las pérdidas totales de suelo

Se observaron efectos altamente significativos de tratamiento y ambiente, sin interacción entre ambos. Las parcelas CCC (Figura 2) tuvieron pérdidas de suelo significativamente menores a las parcelas SCC, con una media de 131 kg/ha en contraste con 524 kg/ha de promedio en las últimas. A su vez, el ambiente Media Loma mostró pérdidas de suelo significativamente superiores a los ambientes Loma y Bajo, con medias de 603, 244 y 136 kg/ha, respectivamente.

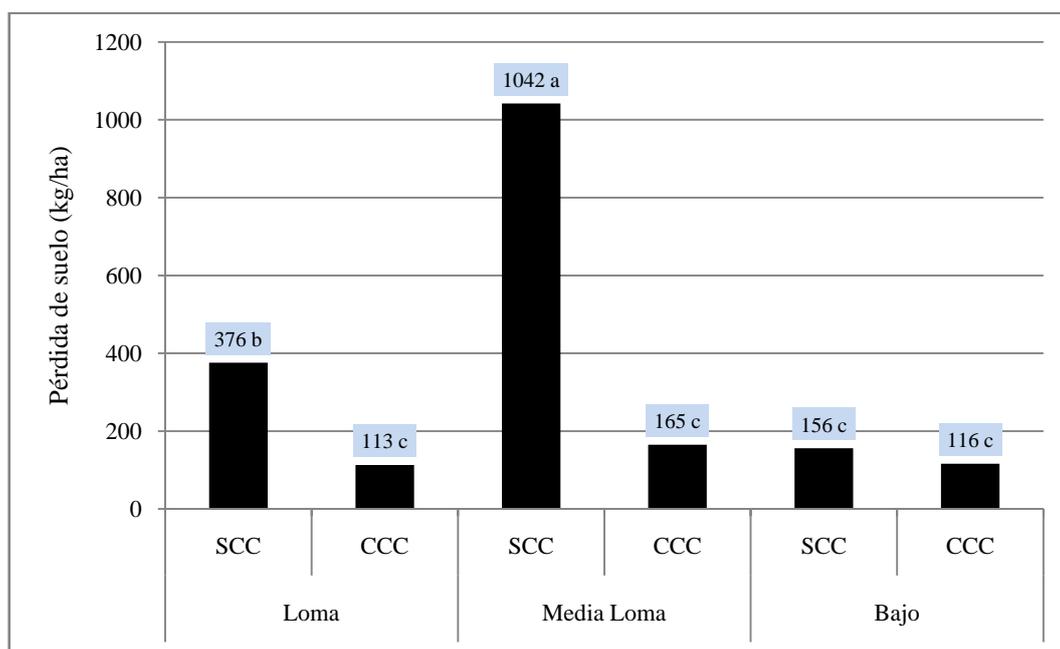


Figura 2. Pérdida total de suelo en kilos por hectárea, por erosión hídrica.

Ref: SCC: Sin Cultivos de Cobertura; CCC: Con Cultivos de Cobertura. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

El efecto de los CC fue de gran magnitud en la reducción de las pérdidas de suelo en Loma y Media Loma, probablemente debido a la protección frente al efecto erosivo de la lluvia aplicada, así como a la acción mecánica de las raíces, con diferencias entre ambientes en función de su posición en el relieve. Las gotas pueden llegar a ser muy erosivas cuando golpean un suelo sin vegetación, de acuerdo a Morgan (1997) citado por De la Cruz (2010), proporcionando además de la fuerza disgregadora, una fuerza de consolidación que lo compacta. El impacto es el agente más importante para el desprendimiento y disgregación de las partículas (De la Cruz, 2010) y la mayor parte de la energía que llevan las gotas precipitadas se va a consumir en dicho proceso.

Según Portela et al. (2011), el proceso de transporte de las partículas de suelo erosionadas por el agua

generalmente es más alterado que el escurrimiento superficial, respecto a las condiciones externas de la superficie del suelo. Weir (2002), trabajando con parcelas de escurrimiento con 1% de pendiente, determinó que el escurrimiento fue cinco veces mayor y la pérdida de suelo doce veces superior en las parcelas con suelo descubierto, que el promedio de parcelas cultivadas y con pasturas. A su vez, Bertol y Miquelluti (1993) citados por Torres et al. (2005) encontraron que las pérdidas de suelo y agua se reducían en un 85% y 29%, respectivamente cuando incorporaron cultivos de cobertura. Barcelonna y Rienzi (2003) encontraron disminuciones de 70% de la pérdida total de suelo al aplicar cobertura sobre un suelo con labranza convencional y 25% al aplicarla sobre un suelo proveniente de pradera.

No hubo diferencias significativas en la pérdida de

suelo entre tratamientos en el Bajo posiblemente debido a que, si bien las parcelas CCC mostraron los valores más altos de cobertura, también las SCC presentaron valores elevados. Esto podría estar vinculado con la acumulación de residuos de cosecha de soja provenientes de los ambientes superiores, desplazados por los movimientos de agua en superficie, y pudo influir en su respuesta ante la lluvia aplicada, disminuyendo las pérdidas de suelo en las parcelas sin CC de este ambiente.

CONCLUSIONES

Hubo un elevado incremento de la rugosidad y cobertura superficial del suelo por la inclusión de los CC. Los procesos de erosión hídrica fueron mitigados en todos los ambientes que tuvieron la cubierta vegetal invernal. Las pérdidas de agua por erosión hídrica, fueron menores en las parcelas CCC y lo mismo sucedió con las pérdidas de suelo. En el ambiente Media Loma, por sus características topográficas, las diferencias en estos parámetros fueron de mayor magnitud.

REFERENCIAS

- Bagatini, T.; Cogo, N. P.; Gilles, L.; Portela, J. C.; Portz, P. y Queiroz, H.T. (2011). Perdas de solo e água por erosão hídrica após mudança no tipo de uso da terra, em dois métodos de preparo do solo e dois tipos de adubação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35, 999-1011.
- Barcelonna, C. y Rienzi, E. A. (2003). Cambios producidos por la cobertura sobre la relación de enriquecimiento del sedimento erosionado en un Argiudol típico. *Revista Facultad de Agronomía*, 23 (2-3), 141-145.
- Bertol, I. (1986). *Relações da erosão hídrica com métodos de preparo do solo, na ausência e na presença de cobertura vegetal por resíduos culturais de trigo*. (Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre).
- Bertol, I. y Miquelluti, D. J. (1993). Perdas de solo, agua e nutrientes reduzidas pela cultura do milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 28(10), 1205-1213.
- Capurro, J.; Surjack, J.; Andriani, J.; Dickie, M. J. y Gonzalez, M. C. (2010). Evaluación de distintas especies de cultivos de cobertura en secuencias soja-soja en el área sur de la provincia de Santa Fe. p.1-5 (Resumen expandido). *XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Rosario, Santa Fe.
- Casas, R. (2007). Preservar la calidad y salud de los suelos: una oportunidad para la Argentina. *Anales de la Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria*, LX, 37-61.
- Castro, L. G.; Cogo, N. P. y Volk, L. B. S. (2006) Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e sua relação com a erosão hídrica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30, 339-352.
- Cogo, N. P. y Streck, E. V. (2003) Surface and subsurface decomposition of a desiccated grass pasture biomass related to erosion and its prediction with RUSLE. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27, 153-164.
- Crespo, R. J.; Sfeir, A.; Usunoff, E.; Ares, G. y Wingeyer, A. B. (2010). Efecto de la labranza y la cobertura vegetal sobre el escurrimiento y la pérdida de suelo en la Región central de la provincia de Buenos Aires. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo*, 42 (1), 93-106.
- De La Cruz, I. (2010). *Caracterización de lluvia simulada y su aplicación en parcelas experimentales de erosión en taludes de infraestructuras lineales*. (Trabajo Fin de Carrera. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. Universidad Politécnica de Madrid).
- Gilles, L.; Cogo, N. P.; Bissani, C. A.; Bagatini, T. y Portela, J. C. (2009). Perdas de água, solo, matéria orgânica e nutriente por erosão hídrica na cultura do milho implantada em área de campo nativo, influenciadas por métodos de preparo do solo e tipos de adubação. Seção VI - manejo e conservação do solo e da água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33, 1427-1440.
- Hudson, N. W. (1995). *Soil conservation*. (3^{ra}.ed.) Ames, Iowa State University Press.
- Irurtia, C. B.; Mon, R.; Gonzalez, N.; Elisei, J.; Cruzate, G. y A. Llovet. (2010). Variación en el corto plazo del microrelieve y la cobertura superficial en un suelo subsolado bajo siembra directa. p. 1-4 (Resumen expandido). *XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Rosario, Santa Fe.
- Lafren, J. M.; Amemiya, M. y Hintz, E.A. (1981). Measuring crop residue cover. *Journal of Soil and Water Conservation*, 36, 341-343.
- Levien, R. (1999). *Condições de cobertura e métodos de preparo do solo para a implantação da cultura do milho (ZeamaysL.)*. (Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista, Botucatu).
- Marelli, H. J.; Arce, J. M. y Massiero, B.L. (1986).

- Simulador de lluvias para investigación básica en conservación de suelos*. Publicación Técnica N°8. Serie Suelos y Agroclimatología. EEA INTA Marcos Juárez.
- Meyer, L. (1983). Portable rainfall simulator. Comunicación personal.
- Meyer, L.D. y Harmond, W.C. (1979). Multiple Intensity Rainfall Simulator for erosion research on row side slopes. *Transactions of the ASAE*. 22 (1): 0100-0103. doi: 10.13031/2013.34973.
- Morgan, R. P. C. (1997). *Erosión y conservación del suelo*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Ruffo, M. (2003). Factibilidad de inclusión de cultivos de cobertura en Argentina. *Actas XI Congreso de AAPRESID*, pp. 171-176.
- Portela, J. C.; Cogo, N. P.; Do Amaral, A. J.; Gilles, L.; Bagatini, T.; Pardo Chagas, J. y Portz, G. (2011). Hidrogramas e Sedimentogramas asociados à erosão hídrica em solo cultivado com diferentes sequências culturais, com diferentes condições físicas na superfície. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35, 225-240.
- Scianca, C.; Álvarez, C.; Barraco, M.; Quiroga, A. y M. B. Pérez. (2008). *Impacto de diferentes coberturas invernales sobre propiedades edáficas, población de malezas y productividad de soja*. Memoria Técnica 2007-08. EEA INTA General Villegas.
- Streck, E.V. y Cogo, N. P. (2003). Reconsolidation of the soil surface after tillage discontinuity, with and without cultivation, related to erosion and its prediction with RUSLE. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27,141-152.
- Torres R., D.; Florentino, A. y López, M. (2005). Pérdidas de suelo y nitrógeno por escorrentía en un Ultisol degradado bajo diferentes condiciones de cobertura vegetal en Chaguaramas-Guárico. *Agronomía Tropical*, 55(4), 475-496.
- Volk, L. B. S. (2002). *Erosão hídrica relacionada às condições físicas de superfície e subsuperfície do solo, induzidas por formas de cultivo e de manejo dos resíduos culturais*. (Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre)
- Volk, L. B. S.; Cogo, N. P. y Streck, E. V. (2004). Erosão hídrica influenciada por condições físicas de superfície e subsuperfície do solo resultantes do seu manejo, na ausência de cobertura vegetal. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28, 763-774.
- Weir, E. (2002). Pérdida de suelo y agua en parcelas de escurrimiento. p.1-7. (Informe Técnico) *Actas del Segundo Taller de Contaminación por Agroquímicos*, 23 Agosto 2002. Pergamino. Buenos Aires.
- Wischmeier, W. H. y Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses; a guide to conservation planning. *Agricultural Handbook*, 537. Washington, USDA.

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

Capurro, J. y Montico, S. (2020). Efecto de los cultivos de cobertura sobre las pérdidas de agua y suelo por erosión hídrica. *Cuadernos del CURIHAM*. 26:41-47. doi: 10.35305/curiham.v26i0.147

Tipo de Publicación: NOTA TÉCNICA.

Trabajo recibido el 03/04/2020 y aprobado para su publicación el 01/08/2020.

IRRIGATION DIMENSIONING OF REEL MACHINES WITH WATER DISTRIBUTION SYSTEMS: GUN AND BOOM WITH EMITTERS

DIMENSIONAMIENTO DEL RIEGO DE ENROLLADORES CON SISTEMAS DE DISTRIBUCION DE AGUA: CAÑÓN Y RAMAL CON EMISORES

Esequiel Rolando Jiménez Espinosa⁽¹⁾

⁽¹⁾ Agrometeorology Department, Hydrometeorological Service. Ministry of Agriculture of Guyana. Stabroek, Georgetown, Guyana.

e-mail: esequieljimenez79@gmail.com

ABSTRACT

The reel machines irrigation technique has expanded in recent years thanks to the technological improvements that have been introduced. Several investigations have been carried out regarding the effectiveness of the irrigation of this equipment with “gun” type water distribution systems, but very few about the “boom with emitters”. This includes methodological or calculation procedures for dimensioning irrigation in an agricultural area. Therefore, the objective of this work is *to establish a comprehensive methodology for the correct dimensioning of irrigation by reel machines with water distribution systems of the “gun” and “boom with emitters” type*. Agronomic design is addressed as a fundamental part, and hydraulic design up to the necessary pressure in the hydrant. The relevant aspects in this procedure are that, formulations are included for the dimensioning of irrigation with water distribution systems of the “boom with emitters” type, and that correct values and criteria are used to support the methodology, because these come from authors and institutions of international prestige.

Keywords: reel machines, gun, boom with emitters, water distribution, irrigation dimensioning.

RESUMEN

La técnica de riego por enrolladores se ha expandido en los últimos años gracias a las mejoras tecnológicas que se le han introducido. Se han realizado varias investigaciones en cuanto a la efectividad del riego de estos equipos con sistemas de distribución de agua del tipo “cañón”, pero muy pocas sobre los “ramales con emisores”. Esto incluye los procedimientos metodológicos o de cálculo para el dimensionamiento del riego en un área agrícola. Por lo que el objetivo de este trabajo es *establecer una metodología integral para el correcto dimensionamiento del riego por enrolladores con sistemas de distribución de agua del tipo “cañón” y “ramal con emisores”*. Se aborda el diseño agronómico como parte fundamental, y el diseño hidráulico hasta la presión necesaria en el hidrante. Los aspectos relevantes en este procedimiento son que, se incluyen formulaciones para el dimensionamiento del riego con sistemas de distribución de agua del tipo “ramal con emisores”, y que se utilizan valores y criterios acertados para soportar la metodología, ya que provienen de autores e instituciones de prestigio internacional.

Palabras clave: enrolladores, cañón, ramal con emisores, distribución de agua, dimensionamiento del riego.

INTRODUCTION

According to González (2003), the reel irrigation technique has led to a great expansion of its use in the world. These equipments have evolved over the years, expanding their use in terrain with considerable slopes, in addition to achieving a high use of hydraulic energy, due to new generations of sprinklers and booms with emitters, and also to the design of more efficient turbines (Allen et al., 2000; Uribe et al., 2001).

On the other hand, Jiménez et al. (2015) stated that in the irrigation with reels machines, there is a boom with emitters modality (ala piovana), for the irrigation of small crops that has the advantage that, during its operation, it requires low working pressure. However, what undermines this sprinkle irrigation technique is the high intensity of application, restricting its use to soils with high infiltration rates. Said author raised another problem where the overlapping percentages established for the design of this equipment with traveling sprinklers are inadequate where there are high wind speeds, as well as prevailing transverse and diagonal wind directions with respect to the movement of the sprinkler.

As in all irrigation techniques, there are methodologies for dimensioning irrigation in traveling irrigation machines (reels machines). For example, NRCS (2005) establishes some considerations for the correct design of traveling sprinklers. Sánchez et al (2015), proposed a methodology for the irrigation management in sugar cane where he establishes a series of formulations associated with traveling irrigation guns. Rolim and Teixeira (2016) propose a software with their methodological support for the design and evaluation of irrigation systems with traveling gun. Tarjuelo (2005), also developed a procedure for irrigation design with this type of water distribution system.

However, the established methodologies do not address specific aspects of reel machines with “boom with emitters” type water distribution systems. Some authors and institutions such as Tarjuelo (2005) and NRCS (2005) only refer to general aspects of these devices.

Based on the foregoing, the goal of this work is to establish a comprehensive methodology for the correct dimensioning of irrigation by reels machines with water distribution systems of the “gun” and “boom with emitters” type.

CALCULATION PROCEDURE

Agronomic design

The first step is to obtain information about crop water requirement (N) in its period of greatest demand (in mm or L/m^2). Then the partial net irrigation depth is determined with the following universal formula for the calculation of any irrigation system:

$$Dn = 10 \cdot bd \cdot H \cdot (Fc - Wp) \quad (1)$$

where Dn : partial net irrigation depth in mm; bd : bulk density in g/cm^3 ; H : roots effective depth in cm; Fc : field capacity in cm^3/cm^3 and Wp : wilting point in cm^3/cm^3

The physical properties of the soils can be obtained from local research data or values estimated by various authors such as Hansen et al. (1980) shown in Table 1. The formulations developed by Saxton et al. (1986) can also be used in the case where local soil texture data are available.

Table 1. Physical properties of soils according to texture.

Texture	Porosity (%)	Bulk Density (g/cm^3)	Field Capacity (pds)	Wilting Point (pds)
S	38	1.65	9	4
SL	43	1.5	14	6
L	47	1.4	22	10
CL	49	1.33	27	13
SC	51	1.3	31	15
C	53	1.25	36	17
pds- percent dry soil S- Sand SL- Sandy Loam L- Loam			CL- Clay Loam SC- Sandy Clay C- Clay	

The irrigation frequency is calculated as the ratio between the partial net irrigation depth (Dn) and the crop water requirements (N).

$$I_f = \frac{Dn}{N} \quad (2)$$

where I_f : irrigation frequency (dimensionless)

Decimal values of the irrigation frequency are generally obtained. But in practice it is convenient to irrigate with days of entire intervals. Therefore, the I_f value is approached to an integer value and equation (2) is solved for:

$$Dn_a = N \cdot I_{fe} \quad (3)$$

where Dn_a : adjusted partial net irrigation depth in mm and I_{fe} : irrigation frequency (entire value)

Then the gross irrigation depth is calculated:

$$Db = \frac{Dn_a}{Ea} \quad (4)$$

where Db : gross irrigation depth in mm and Ea : application efficiency

There is an extensive specialized literature where application efficiency values for this irrigation technique are provided. The following information is shown below (Table 2).

Table 2. Application efficiency values for traveling irrigation machines.

Denomination	Ea(%)	Source
Traveling sprinklers (gun type or boom)	55-65	NRCS (2005)
Travelling sprinkler (gun type)	65-77	Keller (1990)
Gun (drawn by reel or cable)	55-70	Santos et al (2010)

If there is information from field evaluations, the equation proposed by Walker (1979), quoted by USDA-SCS (1993), can be used.

$$Ea = [1 - (1.25 - 0.0125 \cdot CU)(3.634 - 1.123 \cdot A_u^{0.3} + 0.003 \cdot A_u^{1.233})] \quad (5)$$

where Ea : application efficiency (%); A_u : fraction of the field that is deficitly irrigated and CU : coefficient of uniformity.

To determine the flow of the irrigation system the formula is used (Tarjuelo, 2005):

$$Q = \frac{(3.6 \cdot N \cdot A)}{(Ea \cdot Trd)} \quad (6)$$

where Q : flow of irrigation system in L/s; A : area to irrigate in ha and Trd : hours of system operation in h/day.

Therefore, the water supply rate is calculated as:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (7)$$

where q : water supply rate in L/(s.ha).

Application rate is an important design parameter, because the infiltration capacity of the soil must be ensured. Therefore, the selection of the sprinkler is correct when the application rate of the rain is below the infiltration rate. In the case of irrigation guns, it is determined as follows:

$$I = \frac{Q_E}{A_S} \quad (8)$$

where I : application rate in mm/h; Q_E : flow of reel machine in L/h and A_S : circular sector area in m^2 .

$$A_S = \pi \cdot (0.9 \cdot R_c)^2 \cdot \frac{\alpha}{360} \quad (9)$$

where α : gun irrigation angle in degrees and R_c : gun irrigation radius in m

Application rate in boom with emitters is high and its use is limited to soils with a higher infiltration rate. Tarjuelo (2005), states that these water distribution systems must be well dimensioned, otherwise the irrigation depth would have to be applied on more than one route and would make the operation more expensive. On the other hand, Jiménez et al (2015), obtained considerably high application rates values and proposed that booms be developed with emitters of greater wetting width. In this case it is determined as:

$$I = \frac{Q_E}{(A_m \cdot F_m)} \quad (10)$$

where A_m : wet width of emitters in m and F_m : wet width by the boom with emitters in m.

The space between irrigation settings for the guns is calculated:

$$E = 2 \cdot R_c \cdot \frac{P_{DM}}{100} \quad (11)$$

where E : space between irrigation settings in m and P_{DM} : wet diameter percent.

Table 3 shows the spacing values in percent of the wet diameter for jet path angles of 23° to 25°.

Table 3. Recommended spacing between strips according to wind speed. (Keller and Bliesner, 1990)

Wind speed interval (km/h)	Spacing as % of the wet diameter
0 to 3.5	90
3.5 to 8	80 to 85
8 to 16	70 to 75
>16	60 to 65

About booms with emitters it is different because a rain curtain is generated. Therefore, the equation is as follows:

$$E = L_A \quad (12)$$

where L_A : boom length in m.

However, there are booms with sprinklers, where the last emitters on both sides have a considerable wetting radius. It must be considerate:

$$E = L_A + (2 \cdot R_{DE} \cdot \frac{P_{DME}}{100}) \quad (13)$$

where P_{DME} : wet diameter percent of the end sprinklers of the boom; L_A : boom length in m and R_{DE} : radius irrigation of the emitters of both tips in m.

$$R_{DE} = \frac{(F_m - L_A)}{2} \quad (14)$$

Table 3 can be used to define the P_{DME} value, and the values of F_m and L_A are obtained from the supplier's catalogs.

To define the number of strips to irrigate, the layout defined in the project is analyzed and the lengths of the straight sections of the pipe with hydrants are added to apply the following formula:

$$B = \frac{L_c}{E} \quad (15)$$

where B : number of strips to irrigate and L_c : length of the pipe with hydrants in m.

It also frequently happens that a decimal value of the number of strips to be irrigated is obtained. In this case, it approaches an integer value and the space

between irrigation settings is determined again, obtaining:

$$E_A = \frac{L_c}{B_R} \quad (16)$$

where E_A : adjusted space between irrigation settings, in m and B_R : number of strips to irrigate approximate to integer value.

The retraction speed of both the gun and the boom with emitters is determined by the following expression:

$$V = \frac{Q_E}{D_b \cdot E_A} \quad (17)$$

where V : retraction speed in m/h.

Equations 18, 19 and 20 are applicable only to traveling gun irrigation:

$$D_i = \frac{2}{3} \cdot R_c \quad (18)$$

where D_i : distance to the edge of the area to start irrigation, in m.

$$T_i = \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha}{360} \cdot \frac{R_c}{V} \quad (19)$$

where T_i : gun irrigation time without moving to the end of the strip, in min.

$$T_f = \frac{2}{3} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{360}\right) \cdot \frac{R_c}{V} \quad (20)$$

where T_f : gun irrigation time without moving at the beginning of the strip, in min.

To determine the time it takes for the reel machine to irrigate the strip, if the area has regular dimensions, it is determined by the following expression:

$$T_{RB} = \frac{L_B}{V} \quad (21)$$

where T_{RB} : time it takes for the reel machine to irrigate the strip, in h and L_B : strip length in m.

In the case of an irregular area, the lengths of all the strips are added together and divided by the number of strips in the area to obtain L_{BP} , obtaining:

$$T_{RB} = \frac{L_{BP}}{V} \quad (22)$$

where L_{BP} : average length of the strips in m.

So the number of strips to irrigate in a day would be:

$$N_B = \frac{T_{rd}}{T_{RB} + T_c} \quad (23)$$

where N_B : number of strip to irrigate in a day and T_c : change time between irrigation settings in h.

If it is considered that the reel machine must make the complete journey in the strip, the value of N_B must be an almost integer or integer number, otherwise the selection of the irrigation equipment must be proceeded to achieve this purpose. But if the reel machines can stay in the field without finishing its journey in the strip, the calculations continue.

To obtain the necessary flow at the pumping station, proceed with the following formulations:

$$A_{EI} = V \cdot T_{rd} E_A \cdot I_r \quad (24)$$

where A_{EI} : area irrigated by the reel machine in the irrigation frequency in ha.

$$C_E = \frac{A}{A_{EI}} \quad (25)$$

where C_E : number of reel machines in the area

$$Q_{EB} = Q_E \cdot C_E \quad (26)$$

where Q_{EB} : necessary flow at the pumping station in L/s.

Generally the Q_{EB} value differs from the Q value due to the adjustments that are made in the calculation process. Therefore, the Q_{EB} value is the one that will be used for the hydraulic design of the network.

Hydraulic Design

To determine the necessary pressure in hydrant output, suppliers offer technical, hydraulic and operational characteristics of their equipment, which

facilitate the design process of the irrigation system. However, the necessary parameters in the hydraulic calculation according to Tarjuelo (2005) are provided below.

$$P_E = P_e + \Delta h + h_m + h_e + h_t + h_s \quad (27)$$

where P_e : pressure in the gun or boom with emitters in m.c.a.; Δh : difference in terrain altitude in the direction of the hose in m (obtained from topographic information) and h_m : pressure loss in the hose in m.c.a.

$$h_m = (10.64 + C^{-1.85} + D^{-4.87} + Q_E^{1.85}) \cdot L_m \quad (28)$$

L_m : hose length in m; C : material coefficient; D : diameter inside the hose in m; Q_E : flow of reel machine in m³/s; h_e : height of gun or boom with emitters in m; h_t : pressure loss inside turbine in m.c.a. and h_s : pressure losses in other components in m.c.a.

CONCLUSIONS

The calculation procedure for irrigation systems with traveling guns and traveling booms with emitters has been established, the latter being the most relevant water distribution system because there is little information regarding formulations for its dimensioning in agricultural areas.

Reliable criteria and indicator values were shown to support this methodology, because this information comes from internationally recognized authors and institutions.

REFERENCES

- Allen, R. G.; Keller, J. and Martin, D. (2000). Center pivot system design. The irrigation association. VA, USA. 300 p. Recuperado de <http://www.irrigation.org>
- González, P. (2003). Avances del riego en el cultivo de la papa en Cuba: Las máquinas de pivote central. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 12 (4): 39-43.
- Hansen V. E., Israelson O.W. and Stringham G. E. (1980). *Irrigation: Principles and Practices*. Fourth Edition. New York, USA, Chichester: Wiley.
- Jiménez E. R.; Montero L. and Zanette J. (2015). Evaluación de la calidad de riego de máquinas

- móviles (enrolladores). *Revista Ingeniería Agrícola*, 5(3): 29-34.
- Keller J. and Bliesner R. D. (1990). Sprinkle and Tickle Irrigation. New York, NY, USA, Van Nostrand Reinhold.
- National Resources Conservation Service (NRCS) (2005). Irrigation System Design (chapter 6), 210-vi-NEH 652, IG Amend. NJ1. United State Department of Agriculture (USDA). Recuperado de www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs141p2_017641.pdf
- Rolim J. and Teixeira J. L. (2016). The design and evaluation of travelling gun irrigation systems: Enrolador Software. *Engenharia Agrícola*, 36(5): 917-927. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n5p917-927/2016>.
- Sánchez, J. A.; Fernández, Y.; Martínez, M.; Bonet, C.; Hernández, M. A.; Noy, A. (2015). Régimen de riego de explotación con la técnica por enrolladores, en el cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.). *Agrisost*, 22(1): 9-23.
- Santos L., de Juan J. A., Picornell M. R. and Tarjuelo J. M. (2010). El Riego y sus Tecnologías. Centro Regional de Estudios del Agua. Universidad de Castilla-La Mancha Campus universitario s/n 02071 Albacete. España. ISBN: 13:978-84-692-9979-1.
- Saxton K. E., Rawls W. J., Romberger J.S. and Papendick R. I. (1986) Estimating Generalized Soil-water Characteristics from Texture. *Soil Science Society of America Journal*. 50(4): 1031-1036.
- Soil Conservation Service. (1993). Irrigation Water Requirements (chapter 2). National Engineering Handbook (part 623). United States Department of Agriculture. (210-vi-NEH, September 1993) 2-1.
- Tarjuelo, J.M. (2005). El riego por aspersión y su tecnología. Madrid, Barcelona, México. Ed. Ediciones Mundi Prensa, 3^{ra} edición, ISBN: 84-8476-225-4.
- Uribe, H. C.; Lagos, L. O. and Holzaphel, E. (2001). Pivote Central. Comisión Nacional de Riego, Corporación de Fomento de la Producción. Chile. Recuperado de <http://www.cnr.gob.cl>.

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

Jiménez Espinosa, E. R. (2020). Irrigation dimensioning of reel machines with water distribution systems: gun and boom with emitters. *Cuadernos del CURIHAM*. 26: 49-54. doi: 10.35305/curiham.v26i0.152

Tipo de Publicación: NOTA TECNICA.

Trabajo recibido el 30/08/2020 y aprobado para su publicación el 06/11/2020.

COMPLETAMIENTO DE SERIES TEMPORALES DE NIVELES FREÁTICOS EN UN ÁREA DEPRIMIDA DE LA LLANURA BONAERENSE

COMPLETATION OF TIME SERIES OF WATER TABLE LEVELS IN A FLATLAND AREA OF THE BUENOS AIRES PROVINCE

Erik Zimmermann⁽¹⁾⁽²⁾

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

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

e_mail: erikz@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Se presenta como objetivo el completamiento de registros temporales de niveles freáticos someros en un sector deprimido perteneciente a la cuenca del Arroyo del Azul (provincia de Buenos Aires), en el marco de una modelación matemática de la hidrología subterránea. Los registros completados conforman la condición de contorno aguas arriba del dominio de modelación. Se contemplaron diferentes series temporales para correlacionarlas con los niveles freáticos: a) anomalías acumuladas de precipitación, b) anomalías gravimétricas (misión satelital GRACE) y c) anomalías acumuladas hidrológicas (diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial). De los seis pozos freáticos seleccionados para el análisis y para el período donde se presentan las series en forma completa (oct 2014- abr 2016) se deduce que las anomalías de precipitación (a) presentan los coeficientes de correlación r más bajos y fue descartada como serie análoga. Las anomalías gravimétricas mensuales (b), Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) misión conjunta de la NASA y el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) presentaron correlaciones buenas, con valores de r entre 0.624 y 0.798, aunque la serie suministrada se discontinúa desde 2017. Las anomalías hidrológicas acumuladas, que fueron calculadas a escala diaria y retrasadas respecto los niveles un *lag* semanal para mejorar las regresiones, presentaron correlaciones muy buenas, con r entre 0.861 y 0.894, fueron las seleccionadas como serie análoga de completamiento. Considerando la mejor disponibilidad de datos climáticos frente a los satelitales y en virtud de los buenos resultados alcanzados se recomienda el uso de esta metodología en sectores de niveles freáticos someros donde el proceso de evaporación puede considerarse una componente hidrológica de importancia.

Palabras clave: completamiento de series temporales, anomalías gravimétricas, anomalías hidrológicas

ABSTRACT

The objective is to complete temporary records of shallow water tables in a depressed sector belonging to the Azul river basin (province of Buenos Aires), within the framework of a groundwater mathematical modelling. The completed records make up the upstream boundary condition of the fluxes in the domain. Different time series were considered to correlate them with the water table levels: a) accumulated precipitation anomalies, b) gravimetric anomalies (GRACE satellite mission) and c) accumulated hydrological anomalies (difference between precipitation and potential evapotranspiration). From the six wells selected for the analysis and for the period where the series have completed records (Oct 2014-Apr 2016) it can be deduced that the precipitation anomalies (a) present the lowest correlation coefficients r and it was discarded as analog series. The monthly gravimetric anomalies (b), Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) joint mission of NASA and the German Aerospace Center (DLR) showed good correlations, with values of r ranged between 0.624 and 0.798, although the series support has been discontinued since 2017. The accumulated hydrological anomalies, which were calculated on a daily scale and lagged with respect to the water levels by a weekly lag to improve the regressions, presented very good correlations, with r ranged between 0.861 and 0.894, and were selected as an analog completion series. Considering the better availability of climatic data compared to satellite data and good results achieved, the use of this methodology is recommended in sectors with shallow groundwater levels where the evaporation process can be considered an important hydrological component.

Keywords: completion of time series, gravimetric anomalies, hydrological anomalies

INTRODUCCIÓN

El trabajo se plantea en el marco de una modelación matemática de la hidrología subterránea con el fin de conceptualizar los principales procesos hidrológicos que se verifican en la zona de estudio propuesta.

El área de estudio se focaliza en la cuenca del arroyo del Azul, se ubica en la zona central de la provincia de Buenos Aires, entre los 58° 51' y 60° 10' de longitud oeste y 36° 09' y 37° 19' de latitud sur (Figura 1).

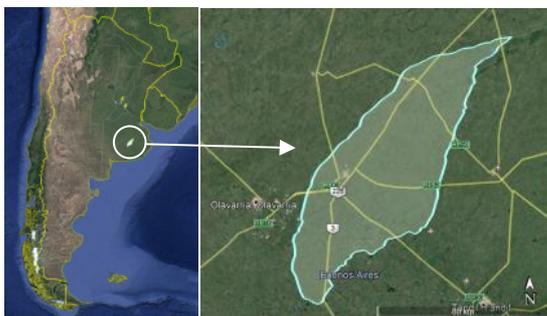


Figura 1. Cuenca del arroyo del Azul.

La cuenca abarca una superficie de 6237 km² y como formas destacables se reconocen un sub-ambiente serrano hacia el sur de la cuenca con altitudes por sobre los 200 msnm (pendiente media del terreno del 5 %), y un sub-ambiente de llanura hacia el norte, por debajo de los 130 msnm (con pendientes que varían entre 0.5 y 0.1 %), con una zona de transición entre ambos, caracterizada por suaves ondulaciones (Fajardo y Entraigas, 2017).

En el sector más bajo, sumamente llano, con sus suelos nátricos y drenaje deficiente, se desarrolla principalmente la cría ganadera extensiva en una matriz de pastizales naturales interrumpida por las numerosas cubetas y lagunas de carácter mayoritariamente semi-permanente y por dunas parabólicas y longitudinales.

Desde el punto de vista hidrológico, lo más notable del comportamiento del agua en cuencas tan deprimidas como la del Azul es la acumulación del agua sobre la superficie, y la interacción que se establece entre las aguas superficiales y las subterráneas, conformando un Sistema Hidrológico No Típico.

Específicamente se ha concentrado el interés en la modelación de los sectores más deprimidos de la cuenca (Figura 2).



Figura 2. Cuenca del arroyo del Azul y área de interés para la modelación.

CONDICIONES DE CONTORNO DE LA MODELACIÓN

El dominio de modelación consistió en un rectángulo de 24 km en dirección SO-NE y 29 km en dirección NO-SE, el que se encuentra en su mayor parte incluido en la cuenca superficial del arroyo del Azul (Figura 2), que incluyen los pozos de observación de niveles freáticos y se encuentra intersectada por la ruta nacional N° 3. La grilla de discretización fue subdividida en elementos cuadrados de 1 km de lado (Figura 3), totalizando 696 celdas (24 filas, 29 columnas).

El dominio de modelación se encuentra en un sector de interfluvio de cuencas superficiales por lo que resultó dificultoso establecer condiciones de borde. Las isofreáticas construidas para distintos momentos de mediciones sí manifestaron un patrón de flujo repetitivo, orientado hacia el NE, lo que permitió establecer hipótesis de contornos de no flujo en los laterales. En los contornos aguas arriba y aguas abajo se propusieron condiciones de niveles y flujos preestablecidos, respectivamente (Figura 3). La elección de las condiciones de contorno de los bordes SO y NE surgió en función de la información disponible. El borde SO cuenta con registros freáticos históricos en muchos pozos de ese frente. Complementariamente se consideró la condición de control de flujos regionales en el borde opuesto (NE) hacia el río Salado.



Figura 3. Grilla de modelación propuesta, pozos de observación de niveles freáticos y condiciones de borde.

PROCESAMIENTO DE LOS NIVELES FREÁTICOS AGUAS ARRIBA

Los registros históricos de niveles freáticos en el frente SO fueron discontinuos temporalmente y abarcan pocas celdas representativas. Son nueve pozos en los 29 km del frente con registros mensuales desde octubre de 2014 hasta mediados de 2018, con prácticamente un año (abril 2016 a marzo 2017) de discontinuidad.

El período de simulación del modelo se propuso en función de la información disponible entre octubre de 2014 a abril de 2018, en total 42 meses.

En principio, dada la importancia de contar con un registro continuo de niveles en la condición de borde, se propuso completar la serie de registros discontinuos mediante correlaciones con patrones análogos, y tras una selección previa, se consideraron las anomalías de precipitación y de gravedad (misión GRACE).

Las anomalías de precipitación se refieren a las diferencias de lluvia mensual respecto a la media del período analizado, posteriormente en forma acumulada.

Respecto a las anomalías de gravedad, la Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) fue una misión conjunta de la NASA y el Centro Aeroespacial Alemán (DLR). Los satélites gemelos tomaron medidas detalladas de las anomalías del campo gravitatorio de la Tierra desde su lanzamiento en marzo de 2002 hasta el final de su misión científica en octubre de 2017. Al medir las anomalías de la gravedad, GRACE mostró cómo la masa se distribuye alrededor del planeta y cómo varía con el tiempo. Los productos del satélite estiman cambios en la masa en unidades de espesor equivalente de agua líquida. Si bien las mediciones están afectadas por grandes masas de agua se analizó la posibilidad de correlacionar las anomalías de gravedad con los niveles freáticos observados en el sector de estudio.

El análisis de correlaciones se realizó en 9 pozos del frente SO (camino a la vieja estación de FFCC Shaw), representativos de 4 celdas de modelación (674, 681, 682, 684 – Figura 4).

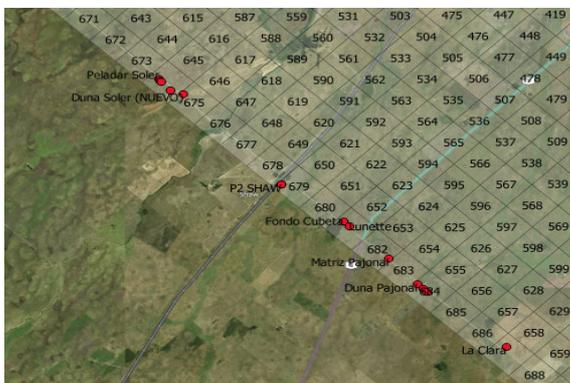


Figura 4. Pozos freáticos y celdas de modelación

Para construir las anomalías de precipitación, se contó con datos diarios de las estaciones Azul (Aeródromo) y la estación SHAW (ex FFCC). La primera distante unos 27 km del sector pero considerada estación de confianza y la segunda ubicada prácticamente en el sector. Se contó con información de evapotranspiración estimada y con un balance hidrológico en el área de La Baguala (Varni y Custodio, 2013; Vercelli et al., 2019), ubicada en el interior del dominio de modelación.

El planteo inicial consistió en la estimación de anomalías de precipitación con información agregada mensualmente, considerando algunos registros de pozos y su contraste gráfico.

Las profundidades freáticas en el área se dan someramente (en algunos pozos alrededor del metro o menos), lo que pone de manifiesto que la evapotranspiración constituiría una componente de importancia, por lo que se analizaron anomalías de las diferencias entre precipitación (P) y evapotranspiración potencial (ET_o), denominadas anomalías hidrológicas. Los valores de ET_o fueron estimados mediante método de Penman-Monteith por Varni y Custodio (2013). Como se observa en la Figura 5 las anomalías hidrológicas reflejan mucho mejor los patrones temporales de niveles freáticos.

En términos de coeficiente de correlación las anomalías de P presentaron un r promedio de 0.14 mientras que las de P-ET_o un r medio de 0.58 en la totalidad de los pozos considerados para el período completo. Si se analiza el último período continuo de datos (marzo 2017 – abril 2018) el coeficiente de correlación promedio para la totalidad de los pozos alcanza del valor de 0.82 para las anomalías hidrológicas. Por esta razón se consideraron solamente éstas últimas anomalías descartando las de precipitación.

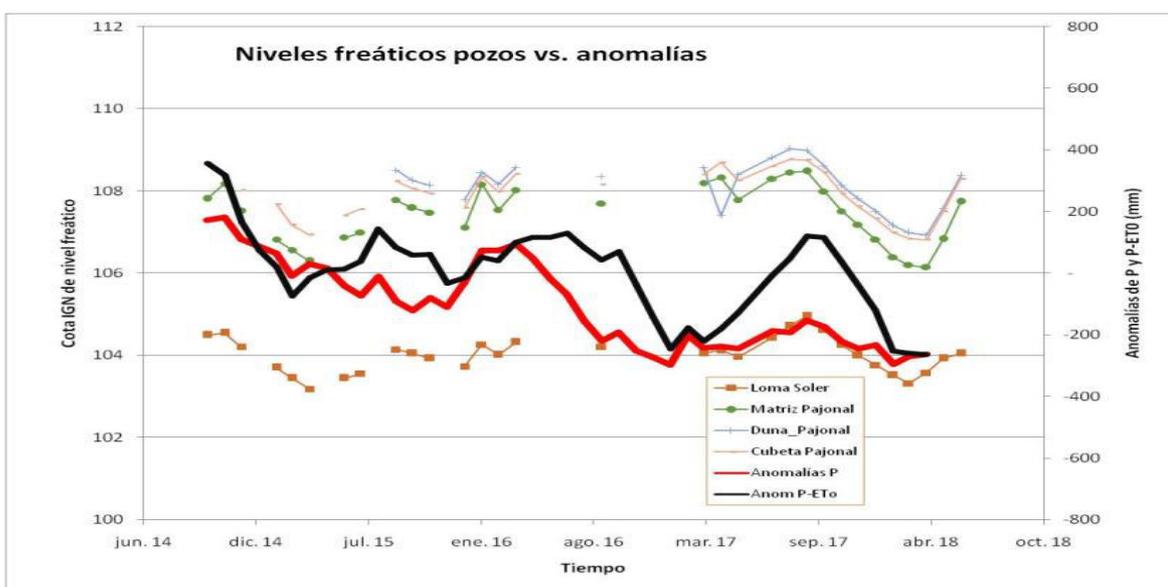


Figura 5. Niveles freáticos en pozos considerados y anomalías de P y de P-ET_o

Paralelamente se obtuvieron los valores de las anomalías gravimétricas que están disponibles en períodos mensuales. Se extractaron datos desde octubre de 2014 a enero de 2017 (28 meses). Para el análisis de las correlaciones se consideraron 15 meses en donde la información de las anomalías gravimétricas e hidrológicas (P-ETo) cuentan con información de freatimetría que van desde octubre de 2014 a abril de 2016 (con 4 meses faltantes).

Las anomalías hidrológicas se estimaron también en forma diaria, desplazando las series hasta unas tres semanas, es decir, lags entre 0 y 19 días, previendo un retardo en la reacción de los niveles respecto a las variables climáticas, analizando las correlaciones entre las series. En la Figura 6 puede observarse que los máximos r se observan para lags 7 días y 12 días, siendo mayores en el conjunto para el retardo de una semana.

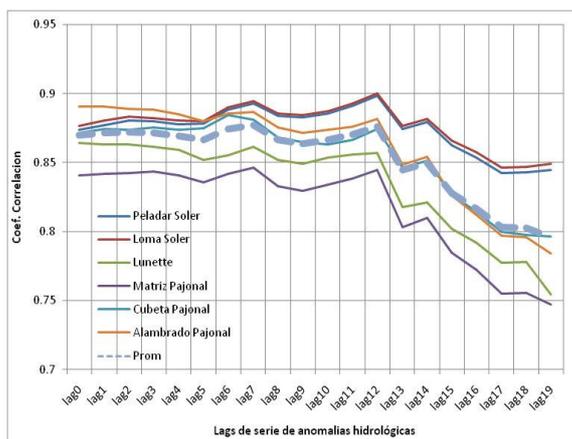


Figura 6. Correlaciones entre series de niveles y anomalías hidrológicas desplazadas temporalmente.

De los 9 pozos con información freatimétrica del camino Shaw se seleccionaron 6 que son los que tienen menor interrupción de registros. La Tabla 1 muestra los coeficientes de correlación para cada metodología. Las anomalías hidrológicas se consideraron desplazadas en una semana.

Adicionalmente se consideró una regresión múltiple con ambas anomalías. Puede observarse que no aportó demasiada ventaja la regresión múltiple. Posteriormente se detectó que existe una correlación importante entre ambas anomalías ($r = 0.793$, Figura 7). Los ajustes alcanzados por las metodologías mencionadas se muestran en la Figura 8.

Tabla 1. Coeficientes de correlación entre anomalías y niveles freáticos de los pozos seleccionados

Anomalías Pozos	Hidrológicas	Gravimétricas	Ambas
Peladar Soler	0.893	0.794	0.905
Loma Soler	0.894	0.798	0.909
Lunette	0.861	0.624	0.834
Matriz Pajonal	0.846	0.668	0.835
Cubeta Pajonal	0.881	0.748	0.885
Alabrado Pajonal	0.887	0.702	0.880

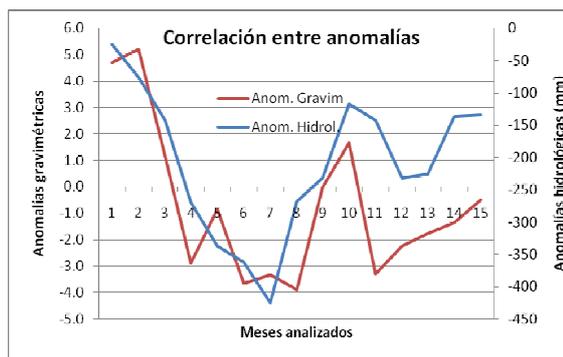


Figura 7. Correlación entre anomalías gravimétricas e hidrológicas

Considerando que la correlación con las anomalías hidrológicas es mayor y además representa un modelo simple y fácil de construir con datos climáticos (generalmente accesibles) se optó por considerarla como metodología de completamiento temporal de los registros freatimétricos.

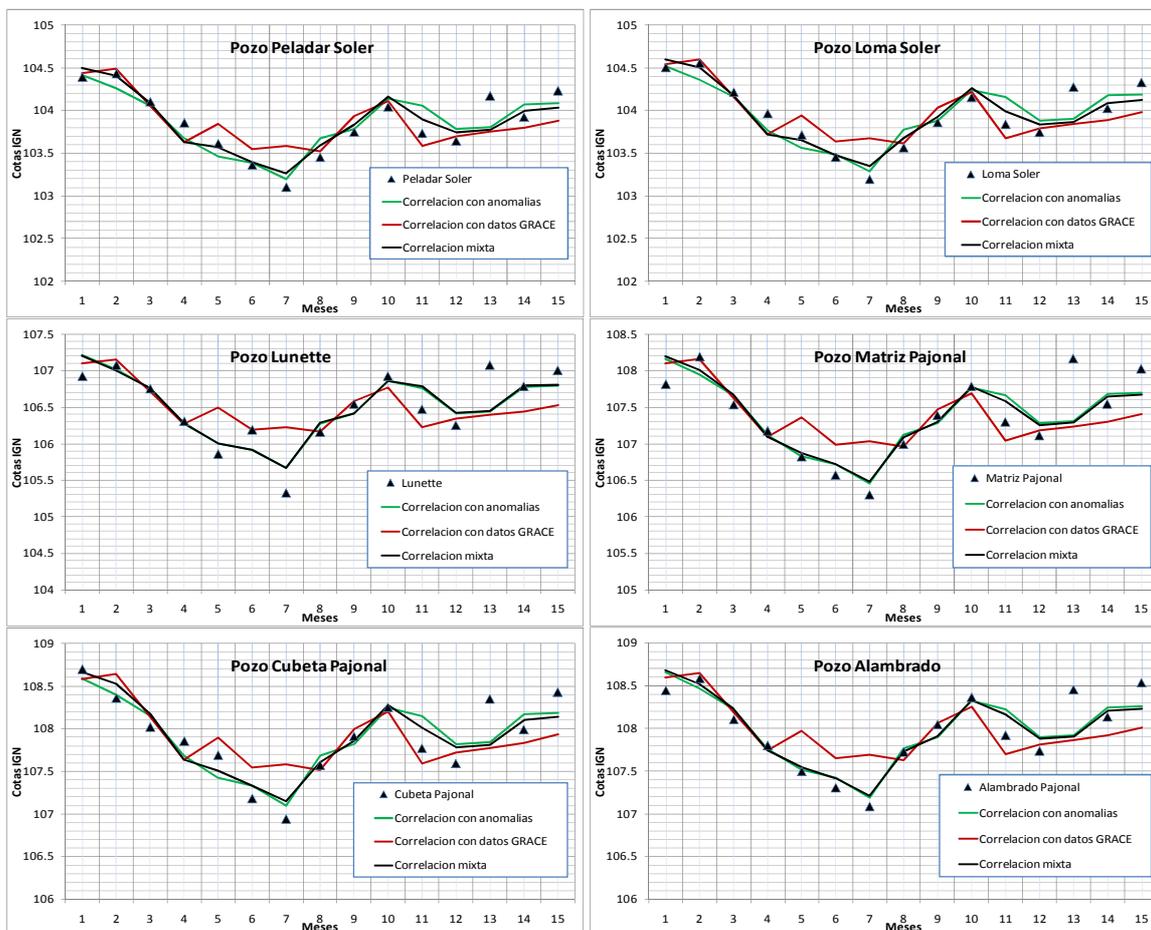


Figura 8. Ajustes entre pronósticos de niveles freáticos mediante anomalías hidrológicas (línea continua verde), anomalías gravitacionales (línea continua roja) y niveles registrados (triángulos negros)

CONCLUSIONES

Se presenta como objetivo el completamiento de registros temporales de niveles freáticos someros en un sector deprimido perteneciente a la cuenca del Arroyo del Azul, provincia de Buenos Aires. Para ello, se han contemplado diferentes series temporales para correlacionarlas con los niveles: a) anomalías acumuladas de precipitación, b) anomalías gravimétricas (misión satelital GRACE) y c) anomalías acumuladas hidrológicas (diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial). De los seis pozos freáticos seleccionados para el análisis y para el período donde se presentan las series en forma completa (oct 2014- abr 2016) se deduce que las anomalías de precipitación (a) presentan los coeficientes de correlación r más bajos y fue descartada como serie análoga. Las anomalías gravimétricas (b) presentaron correlaciones buenas, aunque la serie suministrada se discontinúa desde

2017. Las anomalías hidrológicas acumuladas, que fueron estimadas a escala diaria y regresadas linealmente con los niveles mediante un retardo semanal, presentaron correlaciones muy buenas y fueron las seleccionadas como serie análoga de completamiento. Considerando la mejor disponibilidad de datos climáticos frente a los satelitales y en virtud de los buenos resultados alcanzados se recomienda el uso de esta metodología en sectores de niveles freáticos someros donde el proceso de evaporación puede considerarse una componente hidrológica de importancia.

REFERENCIAS

Fajardo L. y Entraigas, I. (2017). Conectividad hidrológica en un sistema hidrológico no típico. Caso del sector llano de la cuenca del Arroyo del Azul. Informe de avance beca doctoral CIC.

IHLLA. Azul. Argentina.

Varni, M. y Custodio, E. (2013). Evaluación de la recarga al acuífero del Azul: 1. Análisis de las características climáticas. VIII Congreso Hidrogeológico Argentino y VI Seminario Hispano Latinoamericano sobre temas actuales de hidrología subterránea. La Plata. Argentina.

Vercelli, N.; Varni, M; Lara, B.; Entraigas, I. y Ares, G. (2019). Linking soil water balance with flood spatial arrangement in an extremely flat landscape. *Hydrological Processes* 34(1), 21-32. DOI: 10.1002/hyp.13567.

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

Zimmermann, E. (2020) Completamiento de series temporales de niveles freáticos en un área deprimida de la llanura bonaerense. *Cuadernos del CURIHAM*. 26:55-61. doi: 10.35305/curiham.v26i0.148

Tipo de Publicación: NOTA TÉCNICA.

Trabajo recibido el 02/09/2020 y aprobado para su publicación el 06/10/2020.

INSTRUCCIONES PARA AUTORES

INTRODUCCION

La Revista CUADERNOS DEL CURIHAM es una publicación de periodicidad anual (publica cada diciembre) 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).

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 remitirlas 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° 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

CUADERNOS DEL CURIHAM

Volumen 26 - Año 2020

Impresa en Xanto Conceptos Gráficos.
Pje. Mattos 3373, S2003.
Rosario, Santa Fe, Argentina
<http://xanto.com.ar/>
Edición de 100 ejemplares
Año 2021

