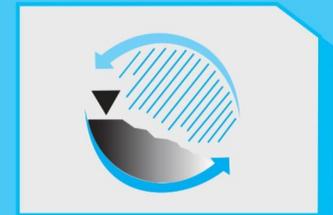


CUADERNOS DEL CURIHAM

REVISTA DE ESTUDIOS SOBRE LA CUESTION HIDROAMBIENTAL



Volumen 27
Año 2021

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

CURIHAM
Centro Universitario Rosario de
Investigaciones Hidroambientales

UNR
Universidad
Nacional
de Rosario

ISSN 2683-8168 (en línea)

Temario

Artículos

- Servicios Ecosistémicos Provistos por los Suelos en una Cuenca de Santa Fe, Argentina
- Capa freática: su influencia en la programación del riego en frutales de pepita
- Aplicación y calibración de una integración de los modelos TREX y SWMM para la simulación hidrológica-hidráulica distribuida en una cuenca fuertemente antropizada
- Esquema explícito para la solución numérica del flujo no saturado en medios heterogéneos bajo condición de niveles freáticos someros
- Modelación de áreas inundables en un sector minero de la cuenca Quebrada El Arrayán - Región de Coquimbo - Chile.
- Cuantificación de la recarga al acuífero en el sector inferior de la cuenca del río Carcarañá

Notas Técnicas

- Afectación ambiental por las descargas directas de las aguas residuales sobre fuentes hídricas: Caso de estudio Tona Santander

Editada por

CURIHAM

Centro Universitario Rosario de
Investigaciones Hidroambientales

CUADERNOS DEL CURIHAM / Volumen 27 / Año 2021

CUADERNOS DEL CURIHAM

REVISTA DE ESTUDIOS SOBRE LA CUESTIÓN HIDROAMBIENTAL

ISSN 2683-8168 (En línea)

CUADERNOS DEL CURIHAM

REVISTA DE ESTUDIOS SOBRE LA CUESTION HIDROAMBIENTAL

**Volumen 27
Año 2021**

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 27, Año 2021.

UNIVERSIDAD NACIONAL ROSARIO

Rector: Franco Bartolacci
Vicerrector: Darío Masía

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, INGENIERÍA Y AGRIMENSURA

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

Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales

Director: Hernán Stenta



CUADERNOS DEL CURIHAM
(Revista de Estudios sobre la Cuestión Hidroambiental)
Volumen Nro. 27 – Año 2021

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 Scuderi, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
Marina García, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
Alfredo Trento, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral, Argentina.
José Rodríguez, University of Newcastle, Australia.
Javier Heredia, Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, España.
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.
Víctor Lallana, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos. Argentina.
José Vargas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile.
Leopoldo Génova, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata. Argentina.
Pablo Jacovkis, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Argentina.
Virginia Pacini, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
Leticia 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.
Alberto Vich, CONICET Mendoza, Argentina.
Tomas Rodriguez, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones, Oberá. Argentina.
Steven Sandi Rojas, University of Newcastle, Australia.
Maria Emilia Zabala, Instituto de Hidrología de Llanuras, Azul, Buenos Aires, Argentina.

SOPORTE TECNICO

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

CUERPO DE TRADUCTORES

Universidad Nacional de Rosario.

ACERCA DE LA REVISTA

La Revista CUADERNOS DEL CURIHAM, ISSN 2683-8168 (En línea), es una publicación 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 la misma.

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

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

Los autores no pagan ningún costo por el procesamiento; 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 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

Servicios Ecosistémicos Provistos por los Suelos en una Cuenca de Santa Fe, Argentina Sergio Montico, Néstor Di Leo, Beatriz Bonel y José Berardi	01
Capa freática: su influencia en la programación del riego en frutales de pepita Juan Oreste Galeazzi y María Cristina Aruani.....	09
Aplicación y calibración de una integración de los modelos TREX y SWMM para la simulación hidrológica-hidráulica distribuida en una cuenca fuertemente antropizada Pablo Tomás Stehli, Juan Francisco Weber y Leandro RedinVestena.....	23
Esquema explícito para la solución numérica del flujo no saturado en medios heterogéneos bajo condición de niveles freáticos someros Erik Zimmermann.....	47
Modelación de áreas inundables en un sector minero de la cuenca Quebrada El Arrayán – Región de Coquimbo - Chile. Keyla Manuela Alencar da Silva Alves, Constanza Belén Contreras Franco y María Carolina Parodi Dávila.....	59
Cuantificación de la recarga al acuífero en el sector inferior de la cuenca del río Carcarañá Marcelo Polare y Luis Vives.....	69

NOTAS TECNICAS

Afectación ambiental por las descargas directas de las aguas residuales sobre fuentes hídricas: Caso de estudio Tona Santander Nelson Andrey Navas Gallo y Constanza Silva Jaimes.....	85
--	----

SERVICIOS ECOSISTÉMICOS PROVISTOS POR LOS SUELOS EN UNA CUENCA DE SANTA FE, ARGENTINA

ECOSYSTEM SERVICES PROVIDED BY SOILS IN A BASIN OF SANTA FE, ARGENTINA

Sergio Montico^(*), Néstor Di Leo, Beatriz Bonel y José Berardi

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

^(*)e_mail: smontico@unr.edu.ar

RESUMEN

Los suelos forman parte del ecosistema y brindan servicios múltiples que no son convenientemente ponderados por la sociedad. El objetivo de este trabajo es evaluarlos en una cuenca rural, con el propósito de identificar y valorar las funciones y beneficios ambientales, sociales, culturales y económicos que brindan. En la cuenca del arroyo Ludueña en el sur de Santa Fe (Argentina), se aplicó una metodología de valoración de la potencia de los servicios ecosistémicos que proporcionan los suelos según las categorías: de provisión, de regulación, de soporte y culturales. Esta consistió en cuatro etapas que posibilitaron evaluar la potencia de cada unidad cartográfica presente como la de la cuenca. En relación a los valores totales de los servicios ecosistémicos de las unidades cartográficas, se halló una diferencia del 5,8% entre las de menor potencia con las de mayor potencia, indicando que los servicios ecosistémicos de estas últimas no son muy superiores a pesar de poseer mejores aptitudes productivas. Las de menor aptitud aportan atributos beneficiosos al ambiente que equilibran la cuenta total de las potencias de los eco-servicios que brindan. La proporción de los servicios ecosistémicos de regulación provistos por los suelos es la más alta (32%), siendo menor los de soporte (17%). En la cuenca estudiada, los suelos proporcionan un relevante aporte para el mantenimiento del equilibrio de funciones y procesos que resulta independiente de sus aptitudes productivas. Es el rol que cumplen como recurso que brinda beneficios múltiples, lo que permite reconocerlos como articuladores de varias dimensiones ambientales.

Palabras clave: suelos, servicios ecosistémicos, cuencas rurales

ABSTRACT

Soils are part of the ecosystem and provide multiple services that are not properly considered by society. The objective of this work is to evaluate them in a rural basins, in order to identify and assess the environmental, social, cultural and economic functions and benefits they provide. In the Ludueña stream basin in the south of Santa Fe (Argentina), a methodology was applied to assess the power of the ecosystem services provided by the soils according to the categories: provision, regulation, support and cultural. This consisted of four stages that made it possible to evaluate the power of each cartographic unit present as well as of the basin. In relation to the total values of the ecosystem services of the cartographic units, a difference of 5.8% was found between those with the lowest power and those with the highest power, indicating that the ecosystem services of the latter are not much superior despite possess better productive ability. Those of less aptitude contribute beneficial attributes to the environment that balance the total account of the powers of the eco-services they provide. The proportion of regulating ecosystem services provided by soils is the highest (32%), with support being the lowest (17%). In the studied basin, soils provide a relevant contribution to maintaining the balance of functions and processes that is independent of their productive aptitudes. It is the role they perform as a resource that provides multiple benefits, which allows them to be recognized as articulators of various environmental dimensions

Keywords: soils, ecosystem services, rural basins

INTRODUCCIÓN

Las modificaciones producidas principalmente por el uso de la tierra en la agricultura, ha impactado en las capacidades que poseen los ecosistemas de brindar bienes y servicios que resultan de suma importancia para el desarrollo de las actividades humanas (Egoh et al., 2007; Metzger et al., 2006; Sarandón, 2014).

Los servicios que brindan los ecosistemas son beneficios múltiples que comprenden mejoras funcionales para los ambientes naturales y antropizados. Las cuencas representan espacios del territorio que reúnen las condiciones adecuadas para estudiar estos servicios. De acuerdo a lo establecido por Millennium Ecosystem Assessment (2005) se reconocen los siguientes tipos:

- *Servicios de Abastecimiento*: son los bienes y productos que se obtienen de los ecosistemas. Alimentos, fibra, combustible, bioquímicos, recursos genéticos y agua pura.

- *Servicios de Regulación*: son los beneficios resultantes de la regulación de los procesos ecosistémicos, inundaciones, control de plagas, polinización, dispersión de semillas, control de erosión, purificación de agua, control de enfermedades.

- *Servicios Culturales*: son los beneficios no materiales, valores espirituales y religiosos, sistema de conocimiento, educación, e inspiración, valores estéticos y recreativos.

- *Servicios de Soporte*: son aquellos necesarios para la producción de todos los otros servicios de los ecosistemas producción primaria, ciclo de nutrientes, provisión de hábitats, producción de oxígeno en atmósfera y agua.

Se asume que los suelos como parte de los ecosistemas proveen importantes servicios, y en este trabajo se planteó su evaluación en una cuenca agrohidrológica, con el propósito de identificar y valorar las funciones y beneficios ambientales, sociales, culturales y económicos que brindan.

La complejidad de los sistemas socioecológicos permite comprender la retroalimentación entre el sistema natural y el sistema social mediada por los servicios ecosistémicos y reflejada en los beneficios que suministran. La valoración integral de estos servicios también comprende la condición de incertidumbre y de sus variaciones espaciotemporales, y constituye una opción apropiada para abordarlos (Caro-Caro y Torres-

Mora, 2015). Esta integralidad permite además separar analíticamente el rol de los recursos naturales que conforman los ecosistemas y evaluar específicamente sus ecoservicios. El suelo es uno de ellos e influye considerablemente sobre el medio en el que se encuentra, condicionando las actividades sociales y económicas de los grupos humanos que se asientan en ese territorio, grupos que ejercen diferente grado de presión sobre el suelo y que generan su afectación o deterioro (Gardi et al., 2014).

El suelo es un componente clave para el bienestar del ecosistema y la salud del hombre y a pesar de ello, las políticas para protegerlo son todavía débiles, y no son de interés periodístico (López Ulloa, 2016), por esta razón es imprescindible intensificar las investigaciones que pongan en evidencia su relevancia.

El objetivo de este trabajo es evaluar los servicios ecosistémicos que brindan los suelos, con el propósito de identificar y valorar las funciones y beneficios ambientales, sociales, culturales y económicos, en la cuenca del arroyo Ludueña en el sur de Santa Fe (Argentina).

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la cuenca del arroyo Ludueña en la provincia de Santa Fe, la cual posee una superficie de 83.418,3 ha y se ubica entre los paralelos 32° 45' y 33° 08' S y los meridianos 61° 04' y 60° 39' O (Figura 1). El clima es subhúmedo mesotermal, con una temperatura media anual de 17 °C y con precipitaciones totales promedio de 1.110 mm (Cáceres, 1980).

Para el desarrollo del trabajo se plantearon cuatro etapas:

- *Etapa 1*: se identificaron las unidades cartográficas (UC) obtenidas del agrupamiento de suelos a escala 1:50.000 para la provincia de Santa Fe, digitalizadas y publicadas por la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina (Nodo EEA Rafaela, S.F.). Las UC presentes en este sistema están definidas por Asociaciones y Consociaciones de suelos a nivel de serie, clasificados según el Sistema Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1998). Las UC fueron obtenidas a partir de digitalización mediante escáner, georreferenciación a coordenadas globales y proyección, y posterior vectorización en pantalla de

las unidades cartográficas que se corresponden con la cuenca del arroyo Ludueña, obrantes en la Carta de Suelos de la Rep. Argentina, en la Hoja 3360-14 (INTA, 1988). El software empleado fue QGIS 2.18.

- *Etapa 2:* se obtuvo la potencia de las series de suelo representativas de la cuenca para proveer los servicios

(capacidad para realizarlo). Esta cuantificación se efectuó mediante la metodología elaborada por Castañeda Camacho (2013), la cual fue modificada y también aplicada en la misma cuenca por Montico et. al. (2019). El método contempla la utilización de criterios de evaluación y calificación de los mismos según se indica en la Tabla 1.

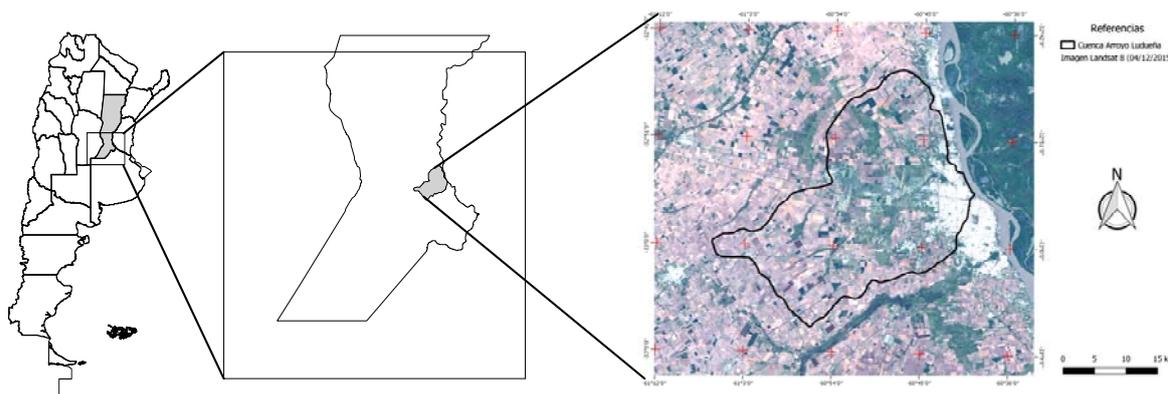


Figura 1. Ubicación de la cuenca en la provincia de Santa Fe.

Tabla 1. Descripción de los criterios de evaluación y valores de calificación utilizados en las series de suelo.

Criterio	Descripción	Calificación	Valor
Intensidad (Int)	*Nivel de magnitud con que se expresa el servicio. -Baja: cuando la magnitud es débil. -Media: cuando la magnitud se manifiesta de modo relevante -Alta: la magnitud con que se expresa es muy potente.	Baja	1
		Media	2
		Alta	4
Extensión (Ext)	*Sitio hasta donde se presta el servicio. -Puntual: comprende sólo el espacio donde se encuentra el suelo. -Local: cuando el servicio se extiende por fuera de su espacio. -Alta: implica una expansión del servicio a escala de cuenca, distrito o región.	Puntual	1
		Local	2
		Regional	4
Persistencia (Pers)	*Tiempo durante el cual se presta el beneficio. -Temporal: cuando el servicio se presta en días o meses. -Permanente: cuando el beneficio se presta en años	Temporal	1
		Permanente	4
Ocurrencia (Ocu)	*Probabilidad con la que el servicio podría ser prestado. -Improbable: implica escasa posibilidad de prestación del servicio. -Poco probable: cuando el servicio posee posibilidades de manifestarse. -Probable: cuando están dadas las condiciones para que el servicio se preste.	Improbable	1
		Poco Probable	2
		Probable	4
Duración (Dur)	*Tiempo que dura la expresión del servicio. -Corta: cuando el servicio se presta, pero por poco tiempo. -Mediana: el servicio se presta por un tiempo y luego deja de hacerlo. -Larga: el servicio se presta durante un tiempo indefinido.	Corta	1
		Mediana	2
		Larga	4
Periodicidad (Peri)	*Regularidad con la que se presta el servicio. -Periódico: el servicio se presenta de forma recurrente o cíclica. -Discontinuo: cuando el servicio se presenta de manera irregular o impredecible. -Continuo: cuando el servicio se presta constante en el tiempo.	Periódico	1
		Discontinuo	2
		Continuo	4

Para obtener la potencia de una serie de suelos, se debe aplicar la ecuación (1). La potencia de cada serie de suelos se clasificó en categorías según se indica en la Tabla 2.

$$\text{Potencia (P)} = \text{Intensidad (Int)} + \text{Extensión (Ex)} + \text{Persistencia (Pers)} + \text{Ocurrencia (Ocu)} + \text{Duración (Dur)} + \text{Periodicidad (Peri)} \quad (1)$$

Tabla 2. Valoración de la potencia de los eco-servicios que proveen las series de suelos.

Calidad de la potencia del SE	Valor
Muy Baja	< 5
Baja	5 – 9,9
Media	10 – 14,9
Alta	15 – 20
Muy alta	> 20

- *Etapa 3:* se calculó la potencia de cada UC mediante la ponderación relativa de las potencias de las series edáficas en relación a la proporción en que participan en cada una de ellas.

- *Etapa 4:* mediante la sumatoria de las potencias de cada servicio ecosistémico de cada UC se obtuvo el valor total de los servicios ecosistémicos (VTSEuc)

y a través de la sumatoria de las potencias de todas las UC se obtuvo el valor total de cada servicio ecosistémico en la cuenca (VTSEc).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se muestran las características más sobresalientes de las series de suelos de mayor representatividad areal en la cuenca.

Las UC que se indican en la Tabla 4, muestran la identidad de este recurso para proveer servicios ecosistémicos, dado que conjuntamente con lo descrito en la Tabla 3, aportan al reconocimiento de sus funciones y limitaciones.

La cartografía de las UC suelos de la cuenca se muestra en la Figura 2.

Tabla 3. Características de las series de suelo presentes en la cuenca Ludueña.

Serie de suelo	Clasificación taxonómica	Familia	Drenaje
Gelly	Natralbol típico	limosa fina, illítica, térmica	Imperfecto a pobre
Monte Flores	Argialbol típico	arcillosa fina, illítica, térmica	Imperfecto
Peyrano	Argiudol típico	arcillosa fina, illítica, térmica	Bueno
Roldán	Argiudol típico/vértico	arcillosa fina, illítica, térmica	Bueno a moderado
Zavalla	Natracualf típico	arcillosa fina, illítica, térmica	Pobre

Tabla 4. Representatividad, composición porcentual de las unidades cartográficas en la cuenca Ludueña, grupo de aptitud de tierra (GAT) e índice de aptitud de tierra (IAT) [Sistema de evaluación de tierras por aptitud de uso].

Unidad cartográfica (UC)	Área	GAT	IAT	Gelly	Monte Flores	Peyrano	Roldán	Zavalla
Py	24,7	1	90			100		
Py15	0,2	3/4ws	49			100		
Py20	1,0	2w	75			100		
Py2x	1,7	2w(e)	67			100		
Py8	3,0	1(e)	81			100		
Rd	9,3	1	82				100	
Rd10	15,3	4/5ws	49	20	20		30	30
Rd11	1,8	3w(e)	49	20	40		40	
Rd12	15,9	2/3w(p)	72	10	20		70	
Rd15	9,2	3/4ws	49	20	20		50	10
Rd8	3,3	3ws	67	30			70	
Za2	2,2	7ws	8	20	30			50
Za3	8,3	5ws	22	20	30			50

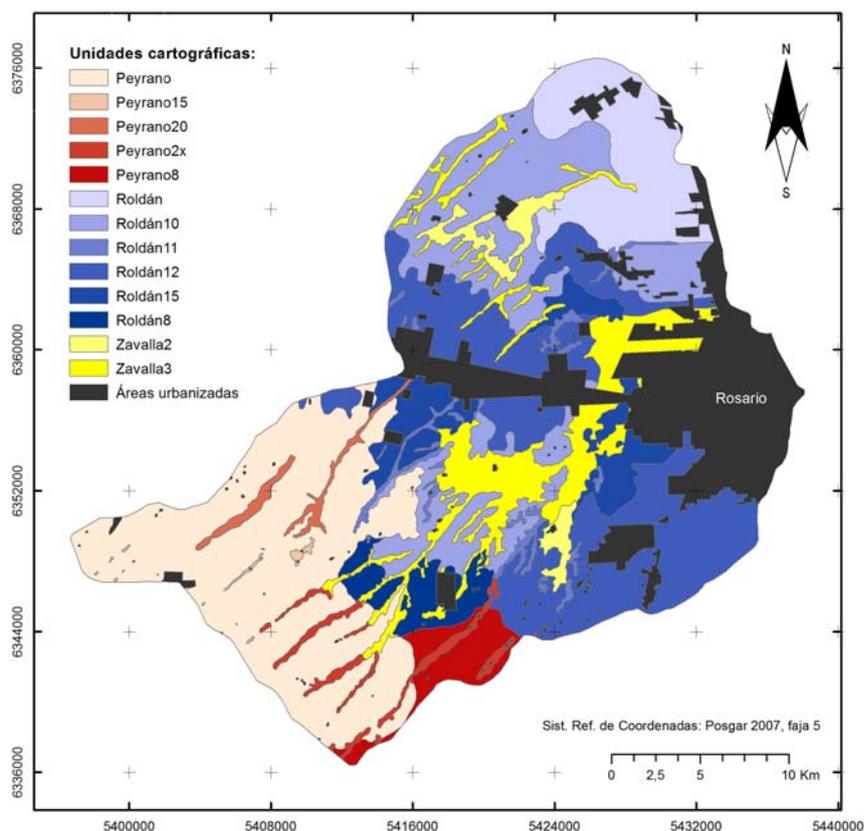


Figura 2. Mapa de unidades cartográficas presente en la cuenca del arroyo Ludueña, provincia de Santa Fe (Argentina).

Mediante los criterios de evaluación y valores de calificación de las series de suelo se obtuvo la potencia de cada una de ellas para proveer los diferentes servicios ecosistémicos (Tabla 5).

En la Tabla 6 se indican las potencias de los ecoservicios de las UC y los valores totales de la potencia de cada una de ellas (VTSEuc) y de cada servicio ecosistémico en la cuenca (VTSEc).

Del análisis de la matriz se destacan diferentes amplitudes de potencia entre las UC para los servicios ecosistémicos: 49 para los de Provisión, 4 para los de regulación, 15 para los de soporte y 26 para los culturales. La mayor amplitud en los de Provisión está asociada a las aptitudes productivas de la UC, las que por sus funciones y limitantes, principalmente edafogenéticas y ubicación paisajísticas, poseen mejores capacidades para sostener una producción amplia y diversificada de granos, oleaginosas, forrajes y forestales. La menor amplitud de los servicios de Regulación se debería a las compensaciones que se establecen entre las UC. Esto es, mientras para las que se encuentran en ambientes deprimidos, con pastizales naturales, cercanas a los escurrimientos y con napa freática próxima a la superficie, el aporte a plagas y enfermedades junto a corredor de

biodiversidad es mayor, resulta menor en relación a las otras ubicadas en planos altos y con pendientes, sin napa cercana y con producción mayormente de cultivos de renta, donde es mayor el aporte a drenaje/inundación y a sumidero de carbono.

En relación a los VTSEuc, la diferencia del 5,8% entre las UC de menor potencia (Za2 y Za3) con las de mayor potencia (Py, Py15; Py20, Py2x, Py8) indica que los servicios ecosistémicos de estas últimas no son muy superiores a pesar de poseer mejores aptitudes productivas. Precisamente, las de menor aptitud aportan atributos beneficiosos al ambiente que equilibran la cuenta total de las potencias de los ecoservicios que brindan. Esto fortalece la dimensión conceptual del servicio ecosistémico, dado que su relevancia no está regida por una valoración utilitaria basada sólo en las capacidades y fortalezas para producir commodities sino en las de proveer beneficios tangibles e intangibles que optimizan la calidad del ambiente y de la vida de las sociedades. Paruelo et al. (2006) reafirman este juicio cuando destacan las diferentes e importantes posibilidades de proveer ciertos servicios sin valor de cambio en el mercado frente a la producción de bienes comerciales como granos y oleaginosas, que poseen algunos componentes ambientales.

Tabla 5. Matriz de potencia de los servicios ecosistémicos brindados por las series de suelo de la cuenca.

		Serie de suelo				
		Gelly	Monte Flores	Peyrano	Roldán	Zavalla
SERVICIOS DE PROVISIÓN	Alimentos (Proteínas y Carbohidratos)	7	7	24	24	6
	Madera	14	16	24	24	10
	Fibras	16	18	24	24	14
	Recursos genéticos	12	12	24	24	12
SERVICIOS DE REGULACION	Clima	20	20	24	24	20
	Calidad superficial de agua	13	13	13	13	13
	Drenaje/Inundación	20	20	24	24	20
	Corredor de Biodiversidad	20	20	12	12	20
	Sumidero de carbono	18	18	24	24	18
	Plagas y enfermedades	20	20	18	18	20
SERVICIOS DE SOPORTE	Intervención en los ciclos biogeoquímicos	20	20	20	20	20
	Provisión de hábitats	24	24	11	11	24
	Intervención en el ciclo hidrológico	24	24	24	24	24
SERVICIOS CULTURALES	Recreativo	24	24	14	11	24
	Estético	24	24	14	11	24
	Educativo	20	20	20	20	20
	Identidad del sitio	24	24	24	24	24
	Herencia cultural	24	24	24	24	24

Tabla 6. Potencia de los eco-servicios provistos por cada unidad cartográfica y valores totales de las potencias de las unidades cartográficas y de la cuenca.

Servicios	Unidades cartográficas													
	Py	Py15	Py20	Py2x	Py8	Rd	Rd10	Rd11	Rd12	Rd15	Rd8	Za2	Za3	VTSEc
De Provisión	96	96	96	96	96	96	62	69	83	73	82	47	47	1039
De Regulación	115	115	115	115	115	115	112	113	114	113	114	111	111	1478
De Soporte	55	55	55	55	55	55	54	63	59	61	59	68	68	762
Culturales	96	96	96	96	96	90	108	105	97	103	97	116	116	1312
VTSEuc	362	362	362	362	362	356	336	350	353	350	352	342	342	4591

Tal como se asevera en un estudio realizado en la cuenca sobre las diferentes coberturas (Montico et al., 2019), la restricción al suministro de mayores servicios ecosistémicos también depende de la extensión areal del componente que lo provee, es decir, aunque se destaque por su provisión, la baja representatividad superficial en la cuenca condiciona su aporte global.

De la Tabla 6 se deduce que existe una importante diferencia de potencia entre los VTSEc. Tal como se muestra en la Figura 3, la proporción de los servicios

ecosistémicos de regulación provistos por los suelos es la más alta (32%), siendo menor los de soporte.

Esta condición jerarquiza la capacidad del recurso por intervenir en funciones y procesos que interactúan con el clima, el drenaje, el control de plagas y enfermedades, el sostenimiento de la biodiversidad, el almacenaje de carbono y la calidad del agua. Además se destacan los servicios culturales que brindan los suelos por sobre los de provisión. Esto indica que a pesar del reconocimiento que poseen los suelos como sostén

de la producción de alimentos, fibras y madera, es mayor el que tienen cuando se consideran los valores no materiales, es decir, aquellos vinculados a la significancia humanística.

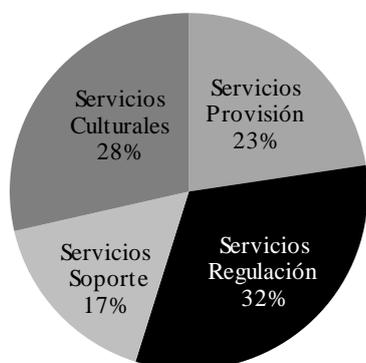


Figura 3. Proporción de los servicios ecosistémicos provistos por la cuenca.

Los suelos de la cuenca se erigen como pilares del sostenimiento de los servicios ecosistémicos y resulta necesario que este atributo sea reconocido por la sociedad más allá del proceso de generación de renta en el que participan. Las herramientas metodológicas que permitan evaluar su aporte pueden respaldar esta aseveración y fortalecer la consideración social (Rositano y Ferraro, 2017).

Según Camacho Valdez y Ruiz Luna (2012), la mayoría de las clasificaciones de los servicios ecosistémicos tienen como propósito principal mantener la salud de los ecosistemas y garantizar la provisión de sus servicios, pero también lo es considerar el contexto social y político dentro del cual los servicios ecosistémicos van a ser evaluados o utilizados. Así, entonces, la valoración de los suelos como proveedores de eco-servicios debe contextualizarse a nivel territorial comprendiendo todas las dimensiones ambientales involucradas. Tal como plantea Maris (2012), es imprescindible que la sociedad tenga un mayor involucramiento en las cuestiones vinculadas al sostenimiento de los beneficios que otorga la naturaleza.

CONCLUSIONES

En la cuenca estudiada, los suelos proporcionan un relevante aporte para el mantenimiento del equilibrio de funciones y procesos que resulta independiente de sus aptitudes productivas. Es el rol que cumplen como recurso que brinda

beneficios múltiples lo que permite reconocerlos como articuladores de varias dimensiones ambientales. La recuperación y restauración de suelos, tanto como su preservación y conservación, es un imperativo de la sustentabilidad ambiental, sea cual fuere su capacidad productiva, la cual es una valoración insuficiente al momento de evaluar su relevancia ambiental.

REFERENCIAS

- Cáceres, L. M. (1980). *Caracterización climática de la provincia de Santa Fe*. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Provincia de Santa Fe, Argentina. 35p.
- Camacho Valdez, V. y Ruiz Luna, A. (2012). Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. *Revista Bio Ciencias I* (4), 3 - 15.
- Caro-Caro, C. I. y Torres-Mora, M. A. (2015). Servicios ecosistémicos como soporte para la gestión de sistemas socioecológicos: aplicación en agroecosistemas. *Orinoquia*, 19 (2), 237-252.
- Castañeda Camacho, A. C. (2013). *Diseño de una metodología para evaluar el estado de los servicios ecosistémicos*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada - especialización en planeación ambiental y gestión integral de los recursos naturales.
- Egoh, B.; Rouget, M.; Reyers, B.; Knight, A. T.; Cowling, M. R.; van Jaarsveld, A. S. y Welz, A. (2007). Integrating ecosystem services into conservation assessments: a review. *Ecol. Econ.* 63, 714-721.
- Gardi, C.; Angelini, M.; Barceló, S.; Comerma, J.; Cruz Gaistardo, C.; Encina, A.; Jones, A.; Krasilnikov, P.; Mendonça, M.; Montanarella, L.; Muñiz, O.; Schad, P.; Vara, M. y Vargas, R. (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995, Luxembourg, 176 p.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - INTA (1988). *Carta de Suelos de la República Argentina*. Hoja 3560-13 y 14 "Cañada de Gómez" y "Rosario" Escala 1:50000. 197 p.
- López Ulloa, R. M. (2016). Servicios ecosistémicos del suelo *Revista Científica Ecuatoriana*. 10-12.
- Maris, V. (2012). De la naturaleza a los servicios ecosistémicos - una mercantilización de la biodiversidad. *Ecología Política*, 44, 27-32.
- Metzger, M. J.; Rounsevell, M. D. A.; Acosta-Michlik, L.; Leemans, R. y Schroter, D. (2006). The vulnerability of ecosystem services to land use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*

- 114, 69-85.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington D.C.: Island Press.
- Montico, S.; Di Leo, N.; Bonel, B. y Denoia, J. (2019). Cambios del uso de la tierra en la cuenca del arroyo Ludueña, Santa Fe: impacto en la sostenibilidad y en los servicios ecosistémicos. Cuadernos del *CURIHAM*, 25, 31:39. ISSN 1514-2906 impresa, ISSN 2683-8168, en línea.
- Paruelo, J. M.; Guerschman, J. P.; Piñeiro, G.; Jobbágy, E. G.; Verón, S. R.; Baldi, G. y Baeza, S. (2006). Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia*, X(2), 47-61.
- Rositano, F. y Ferraro, D.O. (2017). Una nueva aproximación metodológica basada en redes conceptuales y redes probabilísticas para evaluar la provisión de servicios de los ecosistemas. *Ecología Austral*, 27 (1).
- Sarandón, S. (2014). *El agroecosistema: Un ecosistema modificado*. En: Sarandón, S. y Flores, C. (Eds.) Agroecología. Bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables. La Plata, Buenos Aires, Argentina: Universidad Nacional de La Plata, 100-130.
- Soil Survey Staff. (1998). *Keys to soil taxonomy*. 8th Edition, US Govt. Printing Office, Washington, DC, USA. 305 p.
- Tipo de Publicación: ARTÍCULO.**
- Trabajo recibido el 10/01/2021 y aprobado para su publicación el 25/04/2021.**
- COMO CITAR**
- Montico, S.; Di Leo, N.; Bonel, B. y Berardi, J. (2021). Servicios Ecosistémicos provistos por los suelos en una cuenca de Santa Fe, Argentina. *Cuadernos del CURIHAM*, 27, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.35305/curiham.v27i.166>
- Este es un artículo de acceso abierto bajo licencia: Creative Commons Atribución - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>)*

CAPA FREÁTICA: SU INFLUENCIA EN LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO EN FRUTALES DE PEPITA

WATER TABLE: ITS INFLUENCE ON THE IRRIGATION SCHEDULE IN PEPITA FRUIT TREES

Juan Oreste Galeazzi^(*) y María Cristina Aruani

Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Comahue. Cinco Saltos, Río Negro, Argentina

^(*)e_mail: juan.galeazzi@faca.uncoma.edu.ar

RESUMEN

El objetivo fue analizar cuali-cuantitativamente el flujo capilar y evaluar su influencia en la programación del riego en un cultivo de pera (*Pyrus communis*) cv. William`s. Durante cuatro ciclos consecutivos se midieron con sensores específicos promedios diarios de humedad, potencial mátrico y salinidad del suelo y los niveles y salinidad de la freática. La profundidad de la freática fluctuó entre 1.00 m y 1.10 m y salinidad entre 1.5 y 1.6 dS.m⁻¹. Los valores medios de la humedad del perfil de exploración radicular se encontraron en la franja del agua fácilmente disponible con un balance salino equilibrado. Con el programa WinIsareg se ajustó el balance hídrico simulado al contenido de humedad del suelo registrado por los sensores en cada uno de los ciclos. Las láminas de reposición resultantes se contrastaron con los requerimientos hídricos del cultivo y se estimaron los aportes del flujo capilar en 290 a 499 mm según la temporada. Estos representaron entre 1/3 y 2/3 del requerimiento hídrico del cultivo reduciendo la dotación media de riego entre un 35 a 64%. Los riegos realizados permitieron obtener rendimientos similares al valor de referencia en la zona y fueron 50% menos que los programados en condiciones de capa freática profunda.

Palabras clave: agua subterránea, flujo capilar, riego sustentable, Patagonia Norte.

ABSTRACT

The goal was to quali-quantitatively analyze capillary flow and evaluate its influence on irrigation scheduling in pear (*Pyrus communis*) cv. William`s. During four consecutive cycles, the daily average humidity, the matric potential and salinity of the soil, and the levels and salinity of the phreatic were measured with specific sensors. The depth of the water table fluctuated between 1.00 m and 1.10 m, and its salinity between 1.5 dS.m⁻¹ and 1.6 dS.m⁻¹. The humidity mean values of the root exploration profile were in the band of the easily available water, maintaining a salt balance. By using the WinIsareg software, the simulated water balance was adjusted to the soil moisture content recorded by the sensors in each cycle. The resulting replacement sheets were contrasted with the crop water requirements and the contributions of the capillary flow were estimated to be 290 mm up to 499 mm, depending on the season. These values represented 1/3 - 2/3 of the crop water requirement, reducing the average irrigation provision 35% - 64%. The irrigations carried out allowed to obtain yields similar to the reference value in the area and were 50% less than those programmed in conditions of deep water table.

Keywords: groundwater, capillary flow, sustainable irrigation, Northern Patagonia.

INTRODUCCIÓN

En las regiones de clima árido, el riego a partir del agua superficial ha posibilitado el desarrollo regional de distintas zonas de nuestro país. El Alto Valle de Río Negro y Neuquén es una zona frutícola de producción intensiva bajo riego y está surcada por los ríos Negro, Neuquén y Limay. La superficie implantada con frutales es de 40428 ha, de las cuales el 86.2% corresponde a fruta de pepita (manzanas y peras) y el 13.8% a fruta de carozo (Senasa, 2017).

El método de riego ampliamente utilizado en la zona es el gravitacional, siendo el de melgas de inundación (o riego a manto) el más común, con un sistema de entrega del agua en compuerta por turnos rotativos (Galeazzi et al., 2018). Según el estudio Integral del Río Negro (CIL, 1991) la eficiencia media del sistema es del 30-40% consecuencia del manejo deficiente del riego predial sumado a pérdidas físicas y operacionales en la red de distribución. De esta manera el agrosistema frutícola queda condicionado por el acuífero freático subyacente, cuya dinámica depende de la operación e infraestructura del sistema de riego y drenaje y de los caudales de los ríos Neuquén, Limay y Negro (Marizza et al., 2009).

Los altos niveles freáticos abarcan, con distintos grados de afectación, el 40 % de la superficie regada del Alto Valle (Alvarez, et al., 1995). Los registros existentes en regiones bajo riego superficial, han mostrado alteraciones en el régimen de fluctuaciones de los niveles del agua subterránea (Smith et al., 2009; Pereira, 2010; Ortiz Maldonado y Carmona, 2008). La zona estudiada se caracteriza por la presencia de una capa freática cuya profundidad varía estacionalmente (Galeazzi et al., 2007; Montenegro et al., 2014) y los suelos están sujetos a diferentes niveles freáticos según su posición en el paisaje. En temporada de riego la freática está más cerca de la superficie que en invierno y en algunos sectores del Valle puede llegar a los 0.40 m en primavera-verano y a 1.50-2.00 m en invierno.

El crecimiento de muchas especies que son tolerantes a las condiciones anóxicas puede reducirse cuando las raíces se inundan y pueden reanudar el crecimiento rápidamente una vez restablecida la aireación de las raíces a diferencia de las especies sensibles (Crawford, 1982).

Los valores de salinidad de los ríos Neuquén, Limay y Negro varían entre 0.2 y 0.3 dS.m⁻¹, sin

ningún grado de restricción para riego (Ayers y Westcot, 1987), mientras que en el agua freática son muy variables y oscilan entre 0.5 – 2.6 dS.m⁻¹ (Apcarian et al., 2014). En los estudios de salinidad del suelo, el término profundidad crítica del nivel freático se usa para indicar “la profundidad más allá de la cual el agua que se eleva por capilaridad no causaría la salinización de los horizontes del suelo cultivable” (Saleh y Troeh, 1982). El flujo intenso ascendente del agua desde la freática, aumentará el riesgo de salinización en la superficie del suelo, incluso si el contenido de sal en el agua subterránea es bajo y no hay una capa salina en el perfil (Xiaopeng Li et al., 2013).

En las regiones áridas y semiáridas el agua subterránea poco profunda puede ser considerada un potencial recurso hídrico para los cultivos (Sepaskhah et al., 2003). La incorporación del aporte capilar de la freática en la programación de los riegos disminuiría la cantidad de riegos a aplicar (Soppe y Ayars, 2003) haciendo más sustentable el sistema de riego. La humedad del suelo y la demanda del cultivo son las variables a considerar en la programación de los riegos.

Los sensores de humedad determinan el contenido de la humedad en el perfil del suelo en forma continua y aportan información para el balance hídrico. Con los modelos hidrológicos como el programa WinIsarreg v 1.3.1 se pueden estimar las necesidades de agua de los cultivos y la programación de los riegos mediante la simulación del balance hídrico de los suelos (Pereira et al., 2003). Este modelo ha sido una herramienta útil y sencilla para determinar el balance hídrico en cultivos frutícolas y hortícolas en diferentes regiones (Grasso et al., 2018; Chaterlan et al., 2010; Cancela et al., 2006; Zairi et al., 2003).

En un trabajo previo a este estudio (Galeazzi y Aruani, 2019) se analizó la programación del riego promediando datos decadiarios de humedad del suelo, profundidad freática y evapotranspiración correspondientes a tres ciclos productivos de pera William's. Esta investigación es una continuación más detallada de la anteriormente mencionada donde se ajusta la humedad del suelo a promedios diarios de cuatro ciclos consecutivos del cultivo y se incorporan al análisis datos del potencial matricial, de la salinidad del suelo y de la freática. Por lo tanto el objetivo de este estudio fue analizar y evaluar cuali-cuantitativamente la influencia del flujo capilar en la programación de los riegos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del sitio

El estudio se llevó a cabo en una parcela comercial de 1 ha con 31 hileras plantadas con perales (*Pyrus communis* L.) cv. William's, conducidos en espaldera en un marco de plantación de 4 m x 2 m (1200 pl.ha⁻¹), ubicada a 38°51'11.38" S y 68°2'39.30" O. Se consideraron cuatro ciclos productivos 2013-2014; 2014-2015; 2015-2016 y 2016-2017 que se extendieron de octubre a marzo inclusive. El riego fue por gravedad en 15 melgas de 8 m x 100 m delimitadas por bordos y sin desagüe al pie. Se utilizaron caudales de 30-35 l.s⁻¹ con un tiempo de riego de 19-20 hs para toda la parcela y con una infiltración básica de 6-8 mm.hs⁻¹.

Los suelos son de origen aluvial, el régimen de humedad corresponde al árido y el de temperatura es térmico, lo que reflejan las condiciones de déficit hídrico durante todo el año (CIL, 1991). La precipitación media anual del período 2013 - 2017 fue de 216 mm y las temperaturas máxima y mínima medias fueron 22°C y 6.6°C respectivamente. En la Tabla 1 se consignan los valores de precipitación y evapotranspiración de referencia (ET_o) correspondientes a los ciclos del cultivo. Los datos climáticos fueron obtenidos de la estación meteorológica instalada en la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Comahue (38°50'41" S; 68°04'09" O) a 282 msnm, ubicada a 2400 m de la parcela en estudio.

Tabla 1. Registro de precipitaciones y evapotranspiración de referencia (ET_o) de los ciclos 2013 al 2017.

Meses	Registro de precipitaciones (mm)				ET _o (mm)			
	2013-14	2014-15	2015-16	2016-17	2013-14	2014-15	2015-16	2016-17
Setiembre	16.8	25.4	19.0	2.5	84.0	90.0	84.0	81.7
Octubre	40.4	51.6	16.6	186.6	118.3	99.0	98.2	92.5
Noviembre	0.2	9.4	2.4	4.8	99.5	134.0	135.9	125.4
Diciembre	0.2	8.8	0.4	2.8	171.6	145.0	145.9	152.4
Enero	0.0	5.2	21.8	0.0	167.0	155.3	140.7	155.8
Febrero	3.2	8.0	17.8	5.6	113.0	117.8	120.1	108.8
Marzo	0.4	0.4	4.0	12.3	98.4	97.4	86.3	81.4
Total	61.2	108.8	82.0	214.6	851.8	838.5	811.1	798.0

El suelo es de textura franco arcillo limosa en superficie y franco limosa hacia la profundidad, con presencia de capa freática poco profunda, clasificado como Acuicambid típico familia limosa fina, moderadamente bien drenado (Soil Survey Staff, 2014) y la conductividad hidráulica saturada fue $K_s = 0.6 \text{ m.dia}^{-1}$. Por debajo de 1.50 m de profundidad se encuentra un manto de grava (aluvión grueso) de alta permeabilidad ($K_s = 80 \text{ m.dia}^{-1}$) y espesor $D = 8.50 \text{ m}$ (CIL, 1991). En el perfil de exploración radicular, entre plantas y sobre la hilera de plantación, se colocaron diez (10) sensores Decagon Devices (Pullman, Washington, USA). Se utilizó el modelo EC-5 para determinar el contenido de humedad a 0.20, 0.40 y 0.60 m de profundidad. Con el sensor MPS-2 se midió el potencial mátrico y con el sensor 5TE la salinidad de la solución del suelo, ambos ubicados a 0.40 m de profundidad. Se colocó un sensor específico modelo CTD para medir la profundidad y salinidad de la capa freática. Los sensores fueron calibrados en laboratorio antes de su colocación. En diferentes sectores del cultivo se

realizaron muestreos periódicos a campo con barreno para controlar los valores obtenidos por los sensores. Los datos horarios almacenados en el datalogger fueron transformados en promedios diarios de cada ciclo, en correspondencia con los datos disponibles de la evapotranspiración de referencia (ET_o) calculada según Penman-Monteith por una sub-rutina del programa WinIsaregv-1.3.1 (Pereira et al., 2003).

Se determinaron en laboratorio las constantes hidrofísicas para cada horizonte del suelo tales como: capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), las curvas de retención hídrica sobre cinco (5) muestras disturbadas (Richards, 1956) y la densidad aparente (método del cilindro). Se realizó el ajuste de la curva de retención hídrica con el modelo Van Genuchten-Mualen ($m = 1-1/n$, programa RETC) (Van Genuchten, 1991). Los parámetros del modelo a ajustar fueron: inversa del potencial de entrada de aire $\alpha = 0.0049$, distribución de tamaño de poros $\lambda = -$

0.292 y parámetro empírico que afecta la forma de la curva de retención $n = 1.67$.

El nivel de agotamiento permisible del agua del suelo (NAP) se determinó teniendo en cuenta las fases de desarrollo del cultivo y la correspondiente evapotranspiración (Allen et al., 2006) fluctuando entre el 40% y 60% del agua útil (CC-PMP). Los valores de NAP tabulados son ajustados por el programa WinIsareg en función del contenido de sales del suelo (Campos et al., 2003) según la ecuación (1):

$$NAP_{aj} = NAP_{tab} [b(CEe - CE_{e_{umbral}})] NAP_{tab} \quad (1)$$

donde CEe es la conductividad eléctrica del extracto saturado de la zona radicular ($dS.m^{-1}$); $CE_{e_{umbral}}$ es el nivel crítico a partir del cual la productividad del cultivo comienza a disminuir ($dS.m^{-1}$); b es la tasa de reducción de la producción por unidad de aumento de CEe [$\%/(dS.m^{-1})$]. Los valores tabulados

(Rhoades et al., 1992) aplicables en el caso de frutales de pepita son (ecuación 2):

$$CE_{e_{umbral}} = 1.7 \frac{dS}{mb} = 21\% / \frac{ds}{m} \quad (2)$$

El agua fácilmente aprovechable (AFA) se definió como el contenido de humedad entre CC y el NAP, no produce estrés hídrico y la evapotranspiración del cultivo es máxima (ETm).

En la Tabla 2 se detallan los valores de las constantes hidrofísicas y de los diferentes niveles de agotamiento permisible del agua en el suelo. Los porcentajes de humedad a los diferentes niveles críticos del agua útil correspondieron a los períodos de mínima, media y máxima evapotranspiración del cultivo, siendo del 60% en las fases de brotación-floración y senescencia; del 50% en la fase de crecimiento del brote y desarrollo vegetativo y del 40% en la fase de pleno desarrollo del fruto y de cosecha.

Tabla 2. Contenidos de agua volumétrica a capacidad de campo (CC), punto de marchites permanente (PMP) y niveles de agotamiento permisible del agua en el suelo (NAP).

Profundidad(m)	CC (%)	PMP (%)	Densidad aparente ($Mg.m^{-3}$)	NAP _{tab}		
				0.6	0.5	0.4
0.00 - 0.15	40.5	18.9	1.35	Valor medio (%)		
0.15 - 0.30	47.7	17.9	1.40	26.8	29.4	31.9
0.30 - 0.60	39.8	15.2	1.43			

Se determinó profundidad de enraizamiento colocando en el perfil del suelo un cuadrante de 1 m x 1 m dividido en cuadrículas de 10 cm x 10 cm. La distribución de raíces dentro de cada cuadrícula fue mapeada después de remover una capa delgada de suelo para poner al descubierto las raíces del cultivo. Se cuantificaron raíces menores a 2 mm y entre 2 a 5 mm (Aruani, 2009). Se obtuvo un factor de ponderación con los porcentajes de raíces a diferentes profundidades para definir el contenido medio de humedad en el perfil del suelo.

Se calculó el Potencial Total del agua del suelo (Potencial Hídrico), expresado en kPa, como suma del Potencial mátrico más el Potencial osmótico. Previamente se convirtieron los valores de salinidad de la solución del suelo mediante la expresión de Richards (1956) (ecuación 3):

$$\Psi_o = -0.36 CEe \quad (3)$$

dónde Ψ_o es el potencial osmótico (bar); CEe es la conductividad eléctrica del extracto de saturación ($dS.m^{-1}$).

Al momento de cosecha, se recolectó el total de frutos de cinco (5) árboles seleccionados al azar en cada ciclo. Se pesaron todos los frutos para determinar rendimiento total y se expresó en $t.ha^{-1}$.

Simulación del balance de agua del suelo

Se utilizó el programa WinIsareg para determinar el balance hídrico y programación de riegos. Los datos de entrada que utilizó el programa fueron variables climáticas: temperatura, humedad relativa, radiación, viento y precipitación; variables del suelo: textura, CC y PMP y parámetros del cultivo: coeficiente de cultivo (Kc) correspondiente a cada fase de desarrollo, profundidad de enraizamiento y NAP_{tab}. Las fases del cultivo consideradas fueron: brotación-

floración que se extendió desde la tercera semana de septiembre a la segunda de octubre; la fase de crecimiento del brote y desarrollo vegetativo hasta la última semana de noviembre; la de crecimiento del fruto que se extendió hasta la última semana de diciembre; la fase de pleno desarrollo del fruto y cosecha hasta la última semana de enero, y finalmente la fase de postcosecha y senescencia desde febrero hasta fines de abril (Requena, 2001). Este programa además permitió introducir los datos del contenido de humedad del suelo registrados por los sensores.

El WinIsareg se utilizó en tres escenarios característicos: a) balance hídrico en condiciones reales del sitio con presencia de capa freática poco profunda, b) ajuste de la programación del riego en condiciones reales y c) balance hídrico y programación del riego en condiciones óptimas para el cultivo, sin aporte de flujo capilar.

a) Condiciones reales

Para evaluar la bondad del modelo WinIsareg se utilizaron predicciones cualitativas y estrategias estadísticas. Se siguió un procedimiento iterativo que minimiza las diferencias entre los contenidos de agua en el suelo medidos por los sensores y los calculados, ajustando los coeficientes K_c en función de la humedad presente en el perfil. El grado de asociación entre estos valores fue calculado mediante el coeficiente de correlación (ρ) y el coeficiente de variación del error (RMSE) que mide la bondad del ajuste. Los valores de humedad en el perfil del suelo se promediaron ponderados por el porcentual de raíces según profundidad. Para esta simulación se consideraron los riegos realizados, obteniéndose como resultado las láminas de reposición (ETa) y las dotaciones ($l \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$) media y máxima.

b) Ajuste de la programación

Con los coeficientes obtenidos en el inciso precedente (K_c ajustados), se simuló una re-programación de riegos con la condición que el contenido de humedad del suelo durante el ciclo de cultivo se encuentre siempre dentro del AFA. Se obtuvo la evapotranspiración ETm, la cantidad de riegos y fecha de realización.

c) Condiciones óptimas

Se realizó un balance hídrico en condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo, sin estrés hídrico y con

capa freática profunda, utilizando coeficientes de cultivo (K_c) obtenidos localmente en lisímetros (Requena et al., 2016). Dichos coeficientes representan la demanda de agua y varían según las fases fenológicas (Allen et al., 2006). Como resultado se obtuvo la ETc diaria, cantidad de riegos y fecha de realización, lámina neta de aplicación en cada riego y dotaciones media y máxima en cada uno de los cuatro ciclos estudiados.

Conocidas las láminas de reposición (ETa) en la situación real y calculados los requerimientos hídricos del cultivo (ETc), se pudo estimar el aporte capilar (q) desde la freática (ecuación 4):

$$q = ETc - ETa \quad (4)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El número de riegos realizados en el período de estudio fue diferente según los ciclos del cultivo analizados. En todos los casos el primer riego se realizó en la tercera o cuarta semana de octubre. En el ciclo 2013-14 se realizaron seis riegos con intervalos de riegos variables: 30 días entre el 1º y 2º riego y de 11 a 17 días en los riegos subsiguientes. En el ciclo 2014-15 se efectuaron cinco riegos con intervalos de 25 días entre 1º y 2º riego e intervalos de 15 a 20 días en los restantes. En el ciclo 2015-16 fueron cuatro los riegos aplicados con intervalos de 30 y 20 días. En el ciclo 2016-17 se aplicaron 5 riegos con un primer intervalo de 25 días y entre 11 y 20 días los intervalos subsiguientes. En los meses de febrero y marzo, periodo de cosecha para las otras variedades de peras y manzanas, no se efectuaron riegos. El último riego se realizó en abril y es utilizado para el lavado de sales del perfil.

Los valores de contenido de humedad obtenidos por los sensores en condiciones de campo se correlacionaron positivamente con los valores medidos por el método gravimétrico ($r = 0.75$; $p < 0.05$; $n = 10$). Los contenidos de humedad a diferentes profundidades se visualizan en la Figura 1 (para mejor visualización de la figura se presentan los valores de humedad del ciclo 2013-2014). En los cuatro ciclos se repitieron las siguientes situaciones: a 0.20 m de profundidad el contenido de humedad del suelo se encontró siempre por debajo del NAP_{aj} , a excepción del momento del riego. A 0.40 m de profundidad el contenido de agua en el suelo estuvo siempre dentro del AFA; la excepción fue febrero

del ciclo 2014-15 donde se manifestó algún grado de estrés. A 0.60 m de profundidad el contenido de humedad alcanzó valores superiores a CC, presentando condiciones de semi-saturación durante todo el ciclo excepto en febrero y marzo. Resultados similares fueron obtenidos en un cultivo de manzano

en la zona de Alto Valle (Montenegro et al., 2014). Los altos contenidos de humedad en el suelo al comienzo de cada ciclo se debieron a las precipitaciones ocurridas (Tabla 1) y a las prácticas de control pasivo de heladas primaverales mediante riegos por inundación (Tassara, 2005).

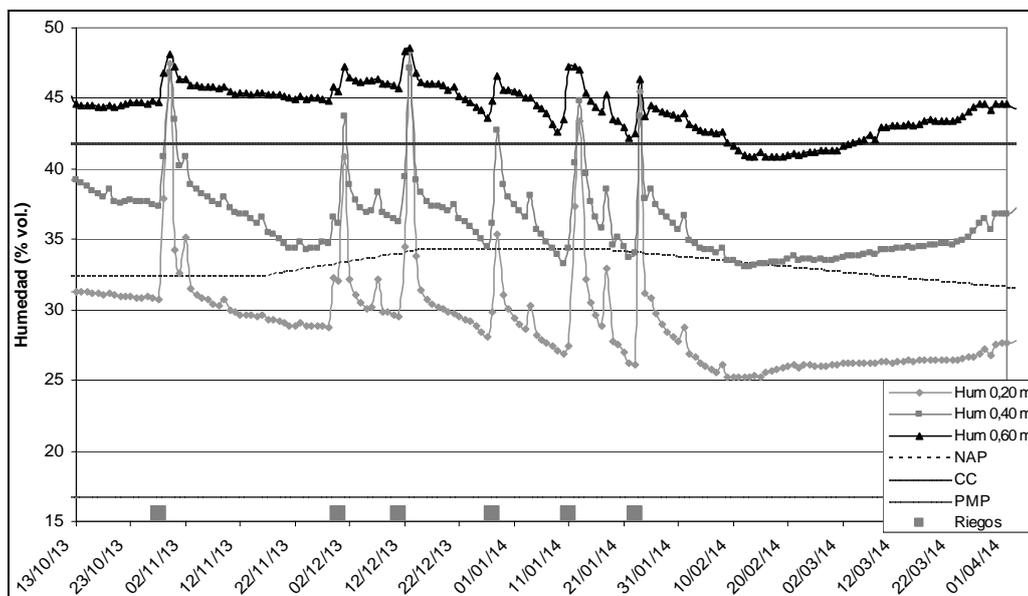


Figura 1. Contenido de Humedad en el perfil del suelo.

Para obtener el contenido de humedad promedio en la zona de raíces se utilizó un factor de ponderación. Las raíces activas del cultivo considerado se encontraron dentro de los 0.70 m (Aruani, 2009) de las cuales, el 30% se distribuyeron a 0.20 m de profundidad, el 32% se encontró a 0.40 m, el 23% a 0.60 m y el 15% restante a 0.70 m. Los valores de humedad obtenidos por los sensores a 0.40 m de profundidad se correlacionaron positivamente con los valores de humedad calculados como promedios ponderados ($r = 0.97$; $p < 0.05$; $n = 229$).

Los datos de potencial mátrico (sensor MPS-2) a 0.40 m de profundidad fueron ajustados en función de las curvas de retención hídrica ($R^2 = 0.94$; $p < 0.05$; $n = 38$). Se asumieron valores de -60 kPa para el periodo crítico (dic-ene) y -100 kPa para el resto del ciclo del cultivo como niveles de agotamiento del agua del suelo que no producen estrés hídrico (Hagan y Stewart, 1972). Los potenciales mátricos se encontraron dentro del AFA en el ciclo 2013-14. En el ciclo 2014-15 solo se presentaron condiciones de estrés con valores de -100 a -170 kPa entre fines de enero y fines de marzo. El ciclo 2015-16 solo presentó condiciones

leves de estrés en la segunda quincena de diciembre. El ciclo 2016-17 acusó datos faltantes de potencial.

Valores de salinidad de la solución del suelo a 0.40 m de profundidad (sensor 5TE) se correlacionaron positivamente con valores de CE_e (extracto de saturación) medidos en muestras obtenidas a campo ($r = 0.89$; $p < 0.05$; $n = 6$). Se realizó un ajuste por regresión de los datos obtenidos por el sensor ($R^2 = 0.81$; $p < 0.05$; $n = 6$) en función de la porosidad y el contenido de humedad (sensor EC-5). El valor de referencia comúnmente aceptado para definir como salino a un suelo es CE_e > 4.0 dS.m⁻¹. Valores registrados al comienzo y final de cada ciclo como también otros característicos de cada periodo figuran en la Tabla 3.

Las variaciones en el contenido de humedad del suelo debido a los aportes (riego, lluvia, capilaridad) y pérdidas (evapotranspiración) explican la dinámica salina en la rizósfera. Los incrementos observados en la CE_e de la solución del suelo acusados por el sensor se produjeron, como era de esperar, en los periodos previos a los riegos y/o lluvias. Estos incrementos, variables según el intervalo entre

riegos, oscilaron entre 0.5 y 1.4 dS.m⁻¹. Las láminas de percolación permitieron el descenso de la salinidad en los días posteriores a cada riego. La duración de estos ciclos en la dinámica salina fue de 20/25 días en octubre/noviembre y 10/15 días en diciembre/enero.

Tabla 3. Valores de Conductividad Eléctrica del extracto saturado (CEe) a 0.40 m de profundidad.

CEe (dS.m ⁻¹)	Ciclos de cultivo			
	2013-2014	2014-2015	2015-2016	2016-2017
CEe inic.	3.36	2.54	2.78	2.54
CEe fin.	2.78	3.03	2.62	2.29
CEe min.	1.96	1.79	2.12	-
CEe med.	2.87	2.37	2.62	-
CEe max.	4.02	3.03	3.44	-

Los potenciales hídricos obtenidos en todos los ciclos estudiados arrojaron valores inferiores a los de

referencia, afectando en distinto grado la ETc. Al comienzo de la temporada (octubre – noviembre) los ciclos 2014-15, 2015-16, 2016-17 presentaron valores entre -100 y -150 kPa, que representan un grado de estrés leve (Hagan y Stewart, 1972). Según Marsal. et al., (2002) el rendimiento relativo no se ve afectado por déficits de ETc de 15-20 %. En el ciclo 2013-14 los potenciales variaron entre -150 y -200 kPa. Molina-Ochoa et al. (2015) determinaron que disminuyendo el potencial hídrico en la fase de crecimiento rápido del fruto a -100 kPa no se observaron diferencias significativas en los rendimientos.

En diciembre-enero se registraron potenciales entre -150 y -200 kPa excepto en el ciclo 2014-15 y segunda quincena de enero 2013-14 con valores entre -100 y -150 kPa. En febrero-marzo se registraron potenciales de -150 a -200 kPa a excepción del ciclo 2014-15 con valores de -200 a -250 kPa. En la Figura 2 se observa la evolución de los potenciales del agua del suelo en uno de los ciclos estudiados.

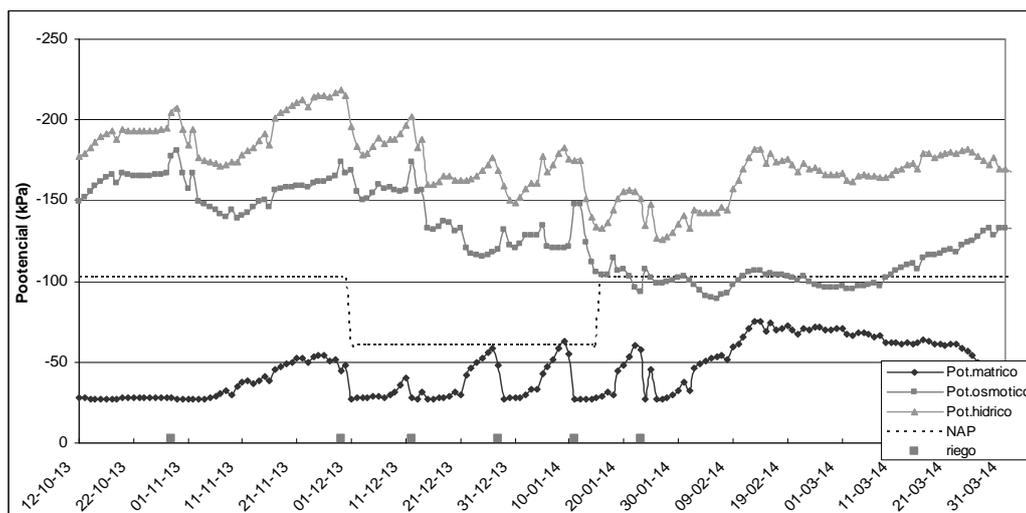


Figura 2. Potencial total del agua del suelo a 0.40 m de profundidad, ciclo 2013-2014.

Los niveles freáticos (NF) registrados por el sensor CTD mostraron variaciones similares entre los diferentes ciclos productivos. Posterior a cada riego los niveles ascendieron a escasos centímetros de la superficie como consecuencia de las pérdidas por percolación profunda (Figura 3).

La recuperación de los niveles previos al riego se produjo entre los 6 y 10 días de finalizado el riego como consecuencia del drenaje natural, a una velocidad de 10 a 15 cm.d⁻¹. Las recargas puntuales debidas a riegos en áreas vecinas y una alta permeabilidad del estrato subyacente inciden en la

dinámica freática de la parcela y explican las variaciones en su velocidad de descenso.

Las mayores profundidades de la capa freática, 1.42 m a 1.49 m según el ciclo de cultivo, se observaron en el periodo comprendido entre la segunda quincena de enero y mediados de marzo, coincidente con la cancelación de riegos en tiempo de cosecha. Las profundidades medias fluctuaron, según la temporada, entre 1.00 m y 1.10 m. La Figura 4 representa la variación de los niveles freáticos a lo largo de todo el periodo estudiado, observándose un equilibrio dinámico como resultado de los procesos de recarga y

descarga del acuífero. Según FAO (1985) y experiencias locales (FCA UNCo-INTA) la profundidad crítica del nivel freático para suelos de textura media y cultivos frutícolas oscila entre 1.40 – 1.60 m. La franja capilar, de espesor variable, es la

zona por encima de la capa freática donde se mantienen las condiciones de casi saturación, va disminuyendo progresivamente hacia la superficie y puede abastecer parcial o totalmente la demanda evapotranspiratoria del cultivo (Grassi, 1998).

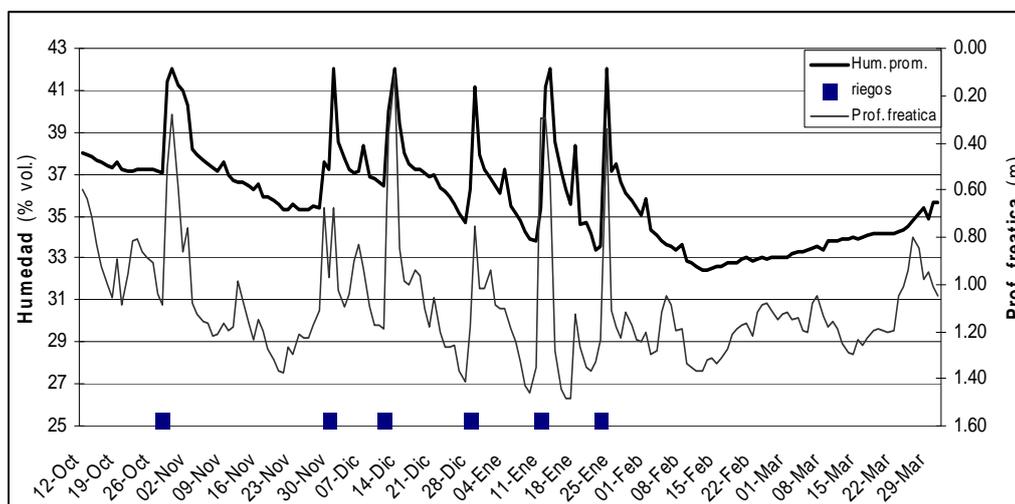


Figura 3. Niveles freáticos y Contenido promedio de humedad en el suelo, ciclo 2013-2014.

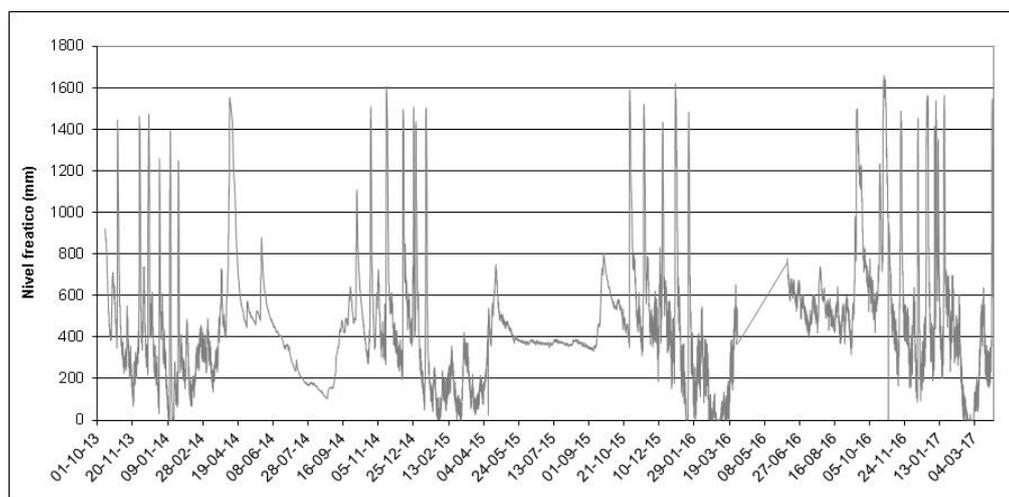


Figura 4. Fluctuación de los niveles freáticos en el periodo 2013-2017.

La salinidad del agua freática fluctuó en función de los aportes por percolación profunda del riego parcelario. Los promedios por temporada variaron entre 1.5 dS.m^{-1} y 1.6 dS.m^{-1} con máximos que excepcionalmente sobrepasaron los 2.5 dS.m^{-1} . A mediados de abril, ya realizado el último riego de temporada, los valores de CE oscilaron entre 1.2 dS.m^{-1} y 1.6 dS.m^{-1} . A comienzos de cada ciclo la salinidad de la freática fue diferente dependiendo de la mayor o menor ocurrencia de las lluvias otoño

invernales. En la temporada 2013-14 recibió una lluvia excepcional de 140 mm a finales del ciclo y los valores inicial y final de CE fueron 1.8 y 2.4 dS.m^{-1} respectivamente. Mientras que en las otras temporadas los valores de finales de ciclo fueron inferiores a los de comienzo de ciclo: CE = $2.4 - 1.4 \text{ dS.m}^{-1}$ (ciclo 2014-15), $1.5 - 1.2 \text{ dS.m}^{-1}$ (ciclo 2015-16) y $3.0 - 1.7 \text{ dS.m}^{-1}$ (ciclo 2016-17). Como dato de referencia la salinidad del agua de riego presenta una CE = 0.23 dS.m^{-1} (CIL, 1991).

Programa WinIsareg

Se utilizó el modelo WinIsareg en el cálculo del balance hídrico y programación del riego. En primera instancia se efectuó un balance hídrico teniendo en cuenta los riegos efectivamente realizados y las condiciones del cultivo, suelo y clima ya especificados. El contenido promedio de humedad del perfil del suelo registrado por los sensores permitió ajustar el balance hídrico simulado modificando los Kc experimentales (Requena et al.,

2016). En la Figura 5 se grafica el resultado del ajuste logrado en uno de los ciclos (2013-2014).

Los nuevos coeficientes representan la variación del contenido de humedad del suelo como resultado de los aportes de los riegos, precipitaciones y flujo capilar y el consumo por evapotranspiración. El programa considera el flujo capilar cuando es ingresado como dato al modelo (Liu et al., 2006). Los estadísticos que miden la calidad del ajuste se indican en la Tabla 4.

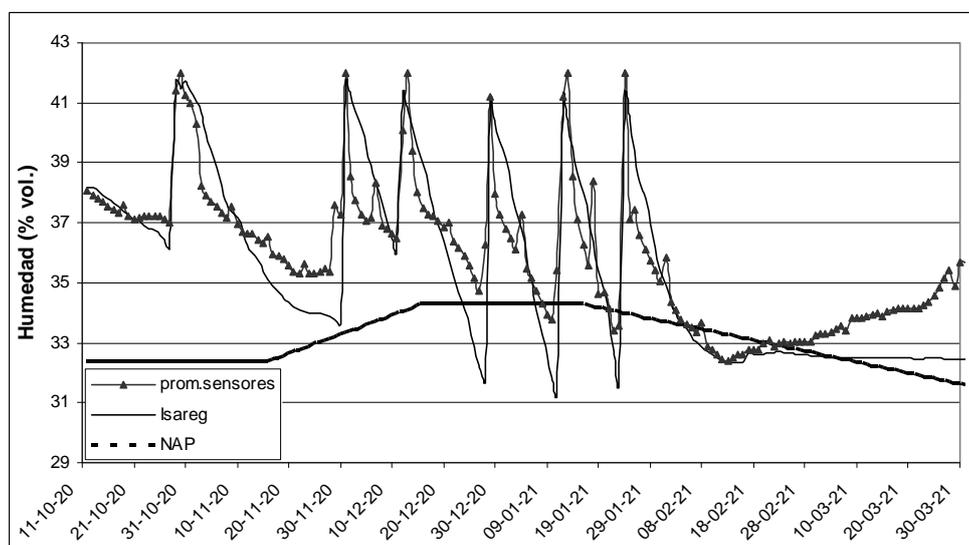


Figura 5. Comparación Balance hídrico simulado vs. Contenido de humedad promedio de sensores.

Tabla 4. Medida de la calidad del ajuste entre valores calculados por WinIsareg y el contenido de humedad promedio en el perfil de exploración radicular.

Ciclo	Error medio (EM)	Coef. Variación Error (RMSE)	Coef. Correlación (r)
2013-2014	1.44	4.0	0.89
2014-2015	2.15	6.2	0.94
2015-2016	0.89	2.5	0.90
2016-2017	2.16	6.0	0.88

En la Tabla 5 figuran los resultados obtenidos de la simulación del balance hídrico en las condiciones reales de manejo del riego. La relación ET_a/ET_m representa la comparación entre la lámina de reposición (ET_a) que surge de dicha simulación con la esperada (ET_m) en condiciones de balance hídrico dentro de la franja del AFA (Figura 6).

Se observaron dos situaciones comunes a todos los ciclos a excepción de la que comprende el ciclo 2015-16 con un estrés hídrico leve solo en diciembre:

- a) En los meses de octubre, noviembre y diciembre, con los tres primeros riegos efectuados, el agotamiento del agua en el suelo no llegó al límite inferior del AFA (NAP). Este contenido de humedad del suelo, entre capacidad de campo y el umbral de riego, es favorable para que el fruto alcance el 80% de su peso final (Requena, 2001).
- b) A partir de enero y hasta fines de marzo se manifestó cierto grado de stress ya que los niveles de humedad del suelo se encontraron por debajo del NAP. Shaozhong et al., (2002) demostraron que los perales en condiciones de stress de agua y presencia de capa freática poco profunda extraen eficientemente el agua de la franja capilar. Además, se evita un crecimiento vegetativo no deseado al disminuir el consumo de agua al final del ciclo del

cultivo (Requena, 2001). Los resultados obtenidos a partir de estos balances hídricos en condiciones reales considerando los riegos realizados, mostraron frecuencias de riego inadecuadas, ya sea por exceso o por defecto. Seguidamente se realizaron simulaciones bajo condiciones de balance hídrico y programación dentro de la franja del AFA a fin de

ajustar la oportunidad del riego, donde el periodo considerado se extendió hasta el momento posterior a la cosecha. El programa reordenó las frecuencias de riego en base al esquema de riegos efectuado por el productor en los ciclos estudiados. En la Figura 6 se presenta el resultado de la simulación para la temporada 2013-2014.

Tabla 5. Dotación y lámina de reposición en condiciones reales.

Ciclo	ETa (mm)	Lam neta media(mm)	Dotación media día (l.s ⁻¹ .ha ⁻¹)	Dotación máxima (l s ⁻¹ ha ⁻¹)	ETm (mm)	ETa/ETm	Cantidad de Riegos
2013-2014	413.2	65	0.24	0.72	419.0	0.99	6
2014-2015	510.9	70	0.30	0.91	534.9	0.96	5
2015-2016	272.1	60	0.16	0.40	272.1	1.00	4
2016-2017	403.4	70	0.23	0.91	411.8	0.98	5

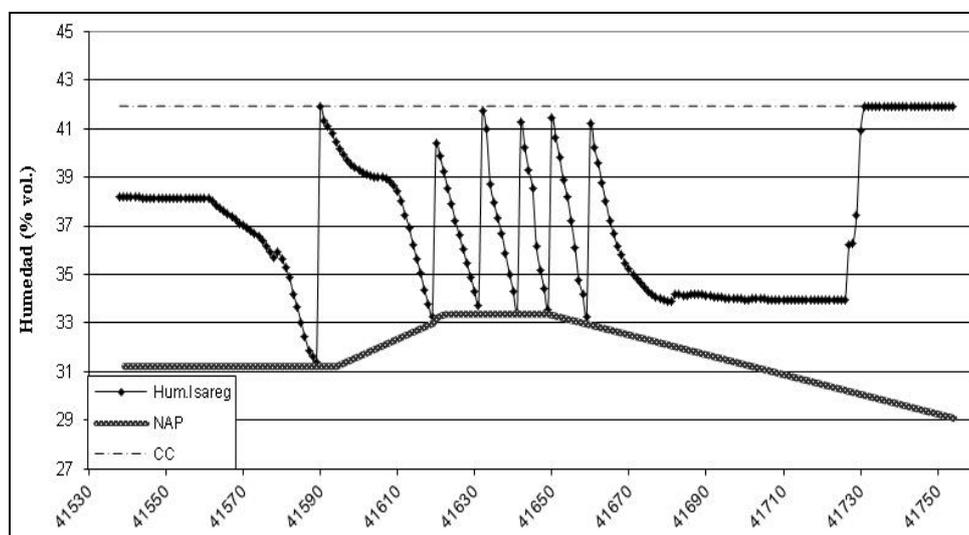


Figura 6. Reprogramación de riegos.

Como resultado aumentó a siete el número de riegos, sin modificar la dotación media ya que la relación ETa/ETm fue prácticamente 1 (ver Tabla 5). Una síntesis de los resultados se visualiza en la Tabla 6.

Tabla 6. Programación de riegos propuesta. Síntesis de las temporadas.

Riego	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°
Fecha (semana)	4° oct	4° nov	3° dic	4° dic	2° ene	3° ene	4° ene
Intervalo (días)	30	20	15	10	7	7	

Según Villarreal y Santagni (2004) un monte frutal de pera William's en plena producción y sin restricciones para el desarrollo tiene un rendimiento estándar de 50 t.ha⁻¹. En los ciclos analizados se

midieron los rendimientos del cultivo (Aruani, 2010; Aruani et al., 2014) que fueron coincidentes con el valor estándar mencionado.

Para conocer los requerimientos hídricos del cultivo en esta situación sin restricciones y considerando al riego como el único aporte de agua al perfil radicular, se ejecutó la opción de balance hídrico y programación de riegos dentro de la franja del AFA. Los Kc utilizados, obtenidos en los lisímetros de la EERA-INTA Alto Valle, de octubre a abril fueron: 0.6, 0.8, 1.14, 1.35, 1.18, 0.97, 0.9 respectivamente.

Los resultados obtenidos en cada ciclo figuran en la Tabla 7 y el gráfico del balance hídrico y programación de riegos correspondiente al ciclo 2013-2014 se observa en la Figura 7.

Tabla 7. Requerimientos hídricos del peral William's

Ciclos	ETc (mm)	Dotación media (l.s ⁻¹ .ha ⁻¹)	Dotación máxima (l.s ⁻¹ .ha ⁻¹)	Cantidad de Riegos
2013-14	811.0	0.47	0.93	13
2014-15	800.7	0.46	0.83	11
2015-16	771.2	0.45	0.75	11
2016-17	760.6	0.44	0.79	11

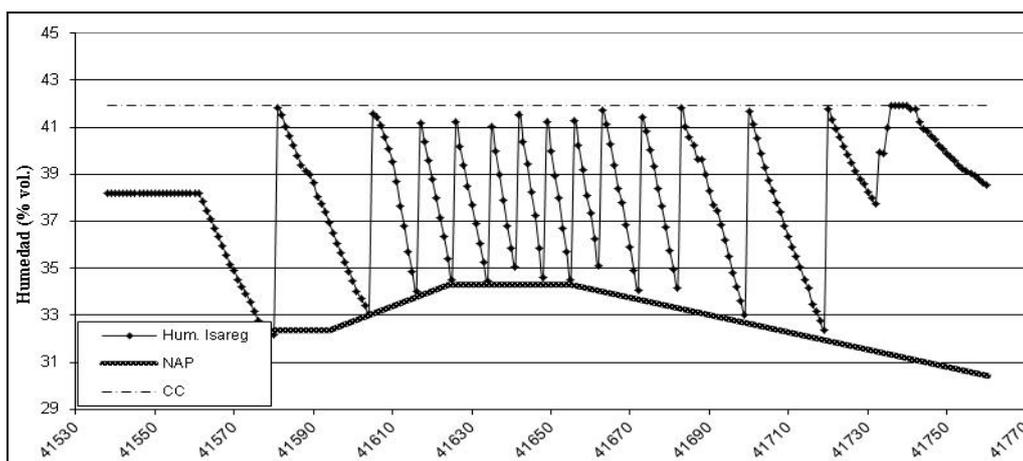


Figura 7. Balance hídrico y programación del riego sin Aporte capilar.

Los aportes del flujo capilar a la rizósfera se estimaron a partir de los balances hídricos obtenidos con las simulaciones realizadas en condiciones de presencia y ausencia de capa freática. A través de los datos de humedad del suelo medidos a campo (Figura 1) se observó que en todos los ciclos estudiados, durante los meses de octubre a enero inclusive, el flujo capilar se manifestó hasta los 0.60m de profundidad dado que los sensores indicaban condiciones de semi-saturación con porcentajes superiores a capacidad de campo. En el período de cosecha (febrero-marzo), al no registrarse riegos, el ascenso capilar se mantuvo por debajo del nivel mencionado. Este aporte desde la freática conjuntamente con el de los riegos efectuados (Tabla 5), logró mantener el balance de humedad del suelo en condiciones satisfactorias para el desarrollo pleno del cultivo. En la Tabla 8 figura el aporte del flujo capilar calculado en función de la lámina de reposición (ETa) y del requerimiento hídrico del cultivo (ETc).

El análisis de la información presente en las Tablas 5, 6 y 7 permitió contrastar los resultados obtenidos de las simulaciones efectuadas bajo situación real del cultivo con las realizadas en condiciones donde el flujo capilar no ingresa a la rizósfera. El aporte promedio del flujo capilar a la rizósfera fue de 390 mm ± 100 mm y representa

una significativa contribución a las necesidades de agua del peral, llegando a cubrir en algunas situaciones hasta dos terceras partes de las mismas. La incidencia en el calendario de riegos, teniendo en cuenta la reprogramación propuesta, se manifiesta en el número de riegos y en el caudal medio por unidad de superficie (dotación). Los riegos se reducen de 11 a 7 y la dotación media de 44-47 l.s⁻¹.ha⁻¹ a 16-30 l.s⁻¹.ha⁻¹.

Tabla 8. Cálculo del aporte por flujo capilar.

Ciclos	ETa (mm)	ETc (mm)	Aporte flujo capilar	
			(q = mm)	% ETc
2013-14	413.2	811.0	397.8	49
2014-15	510.9	800.7	289.8	36
2015-16	272.1	771.2	499.1	65
2016-17	403.4	760.6	357.2	47

CONCLUSIONES

La profundidad promedio de la capa freática a lo largo de los cuatro ciclos analizados fue de 1.00 m a 1.10 m, fluctuando entre los 0.10 m después de cada riego y valores cercanos a 1.50 m en post-cosecha. La CE promedio en cada uno de los ciclos fue 1.55 dS.m⁻¹. Al final de cada ciclo los valores de CE

fueron inferiores a los del comienzo, excepto en la temporada 2013-2014.

El flujo capilar durante el ciclo del cultivo ascendió hasta 0.60 m de profundidad y ocasionalmente a 0.40 m. El aporte desde la freática significó entre 1/3 y 2/3 de las necesidades de agua del peral y redujo un 36 % el número de riegos.

La condición de suelo no salino se mantuvo al finalizar cada ciclo y el potencial hídrico del suelo medido a 0.40 m de profundidad fue de -100 a -200 kPa, excepcionalmente de -250 kPa.

Los coeficientes K_{aj} , resultantes de la calibración del modelo, fueron menores a los K_{c} experimentales en un 50% en promedio durante octubre, noviembre y diciembre; previo a cosecha fueron un 20 % menos y en postcosecha 70 %.

REFERENCIAS

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. 29 p. Estudio FAO Riego y Drenaje N° 56. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), Roma, Italia.
- Alvarez, O., Galeazzi, J., Stangaferro, S. y Polla, G. (1995). Organización, procesamiento y evaluación de la información sobre niveles del agua freática en el Alto Valle de Río Negro p. 1-93 (Informe técnico), Convenio FCA – DPA. ITAC.
- Apcarian, A., Schmid, P., Aruani, M.C. (2014). Suelos con acumulaciones calcáreas y yesíferas en el alto Valle de Río Negro. Patagonia Norte, p. 149-182. En: P. A. Imbelone (Ed.), Suelos con acumulaciones calcáreas y yesíferas en Argentina (pp 219). Buenos Aires, Argentina: Editorial INTA.
- Aruani, M.C. (2009). Raíces: condiciones del suelo que afectan su crecimiento. Boletín Electrónico de la FCA – UNCo 1(5):1-5. Disponible en <https://sites.google.com/site/boletinfaunco/numeros-publicados/vol-1-nro-5-dic-2009> (Consulta 19 diciembre 2020).
- Aruani, M.C. (2010). Pera Williams: suelos que la sustentan. Boletín electrónico de la FCA – UNCo 2(7):1-5. Disponible en <https://sites.google.com/site/boletinfaunco/numeros-publicados/vol-2-nro-7-jul-2010> (Consulta 19 diciembre 2020).
- Aruani, M.C., Reeb, P.D. Y Barnes, N.E. (2014). Influence of soil properties on yield and fruit maturity at harvest of ‘Williams’ pear. *Chilean J. Agric. Res.* 74(4):460-467.
- Ayers, R.S. y Westcot, D.W. (1987) La calidad del agua para agricultura. Estudios FAO: Riegos y Drenajes n° 29. Roma: Re. FAO. 1987. 174p.
- Campos, A.A., Pereira, L.S., Goncalvez, J.M., Fabiao, M.S., Liu, Y., Li, Y.N., Mao, Z., Dong, B. (2003). Water saving in the Yellow River Basin. Irrigation Demand Scheduling. *Agricultural Engineering Internacional*, Vol. V. (www.cigr-ejournal.tamu.edu).
- Cancela, J.J., Cuesta, S., Neira, X. y Pereira, L. (2006). Modelling for improved irrigation water management in a temperature region of Northern Spain. *Biosystems Eng.* 94(1):151– 63. doi:10.1016/j.biosystemseng.
- Chaterlan, Y., Duarte, C., León, M., Pereira, L.S., Teodoro, P.R. y García, R.R. (2010). Determinación de coeficientes de cultivo para cultivos hortícola en Cuba, a través de la simulación de balance hídrico y experimentos de campo. *Rev. Cie. Téc. Agr.* 9(1):90-95.
- CIL. (1991). Estudio para el Aprovechamiento Integral del Río Negro. Etapa II. Informe final. 643 p. Consorcio Inconas Latinoconsult (CIL), Buenos Aires, Argentina.
- Crawford, R.M.M. (1982). Physiological responses to flooding. In: Lange OL, Noble PS, Osmond CB, Ziegler H (eds) Physiological plant ecology. Vol II: water relations and carbon assimilation. Encyclopedia of plant physiology, new series. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp 453–477.
- FAO. (1985). Elementos para el proyecto de drenajes. 40 p. Estudio Riego y Drenaje N° 38. Roma, Italia.
- Galeazzi, J., Pesan, P., Muñoz, J., Signorelli, V. y Quiroga, J. (2007). Análisis del comportamiento de los niveles freáticos en un área piloto del Alto Valle de Río Negro. 10 p. En IX Congreso Argentino de Ingeniería Rural y I Mercosur. 19-22 Setiembre. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Galeazzi, J., Mañueco, M.L., Montenegro, A., Storti, C., Sheridan, M. (2018). Gestión Consorciada del Agua de Riego en el Alto Valle de Río Negro y Neuquén. p. 309-316. I Jornadas Patagónicas de Acceso y Gestión del Agua en la Agricultura Familiar. Plottier, Neuquén, Argentina.
- Galeazzi, J.O., y Aruani, M.C. (2019). Manejo del riego en pera (*pyrus communis*) cv. Williams cultivada en suelo con capa freática poco profunda. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 35(2), 151-162.
- Grassi, C.J. (1998). Fundamentos del riego. 3era

- ed.393 p. CIDIAT, Venezuela.
- Grasso, J., Cadenazzi, M., Giménez, L. (2018). Evaluación del modelo de simulación WinIsareg para soja en el litoral oeste del Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, vol. 221:98-106. ISSN 1510 0839.
- Hagan, R.M., Stewart, J.I. (1972). Water deficits irrigation design and programming. *J of the Ir&Dr Div. ASCE*, 98 (IR2), Proc. Paper 8955, pp 215-237.
- Liu, Y., Pereira, L.S. y Fernando, R.M. (2006). Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils; Parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation. *Agric. Water Manage.* 84:27-40. doi:10.1016/j.agwat.2006.01.018.
- Marizza, M., Galeazzi, J., Vives, L., y Nittmann, J. (2009). Modelación del flujo subterráneo en un área piloto del Alto Valle de Río Negro. En VI Congreso Argentino de Hidrogeología. 24-28 agosto. Santa Rosa, La Pampa. Argentina.
- Marsal, J., Mata, M., Arbones, A., Rufat, J. y Girona, J. (2002). Water stress limits for vegetative and reproductive growth of 'Barlett' pears. *Acta Horticulturae*, 596:659-663.
- Molina-Ochoa, M.J., Vélez-Sánchez, J.V. y Rodríguez, P. (2015). Efecto del riego controlado en las tasas de crecimiento de fruto de pera (*Pyrus communis* L.) variedad Triunfo de Viena. *Rev. Colomb. Cienc. Agric.* 9(2):234-246. doi: <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2015v9i2.4179>.
- Montenegro, A., Galeazzi, J., Polla, G. y Aramayo, V. (2014). Manejo del riego en un monte frutal con niveles freáticos críticos. Aplicación del modelo de balance hídrico WinIsareg. 9 p. 2º Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH). Santa Fe, Argentina.
- Ortiz Maldonado, G. y Carmona, V. (2008). Comportamiento y clasificación de riesgos freáticos. Lavalle, Mendoza, Argentina. *Rev. FCA UNCuyo*. Tomo XL. N° 2. 25-40. Mendoza – Argentina.
- Pereira, L.S., Teodoro, P.R., Rodrigues, P.N. and Teixeira; J.L. (2003). Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG. p. 161-180. In Rossi, G., A. Cancelliere, L.S. Pereira, T. Oweis, M. Shatanawi, A. Zairi (eds). *Tools for drought mitigation in Mediterranean Regions*. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.
- Pereira L. S. (2010). Water balance and irrigation scheduling simulation model. The WinIsareg model. Institute of Agronomy, Technical University of Lisbon. CEER-Biosystems Engineering. Lisboa, Portugal.
- Requena, A. (2001). Peras, riego y calidad. Lo importante no es la cantidad de agua sino cuando es aplicada. *Rompecabezas Tecnológico. Publicaciones Regionales EEA Alto Valle* 29:18-21.
- Requena, A., Ponce, V., Sánchez, L. y Castillo, E. (2016). Riego por goteo en frutales en producción. Peras Abate Fetel y Beurré D'Anjou. *Revista F&D. Publicaciones Regionales EEA Alto Valle* 78:34-39.
- Rhoades, J.D., Kandiah, A. y Mashali, A.M. (1992). The use of saline waters for crop production. FAO: Estudio de Riego y Drenaje No. 48. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, 133 páginas.
- Richards, L.A. (1956). Sample retainers for measuring water retention by soil. *Soil Sci. Am. Proc.* 20:301-303.
- Saleh, H.H. y Troeh, F.R. (1982). Salt distribution and water consumption from a water table with and without a crop. *Agron. J.* 74(2): 321-324. doi:10.2134/agronj1982.00021962007400020015x.
- Sepaskhah, A.R., Kanooni, A. y Ghasemi, M.M. (2003). Estimating water table contributions to corn and sorghum water use. *Agricul. Water Manag.* 58:67-79.
- Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA). (2017). Anuario Estadístico 2017 - Centro Regional Patagonia Norte. [en línea]. Argentina. 154 p. [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/anuario_estadistico2017c.pdf]. [Consulta: marzo 2021].
- Shaozhong, K., Xiaotao, H., Goodwin, I. y Jerie, P. (2002). Soil water distribution, water use, and yield response to partial root zone drying under a shallow groundwater table condition in a pear orchard. *Scientia Horticulturae* 92(3-4):277-291. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(01\)00300-4](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(01)00300-4).
- Smith, A., Pollock, D. y Palmer, D. (2009). Ord River Irrigation Area annual groundwater elevation and water-table depth 1995 to 2008. CSIRO: Water for a Healthy Country National Research Flagship. Rev. A.
- Soil Survey Staff. (2014). Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA. Natural Resources Conservation Service, Washington, DC, USA.
- Soppe, R.W.O. y Ayars, J.E. (2003). Characterizing ground water use by sunflower using weighing lysimeters. *Agricul. Water Manag.* 60:59-71. doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00149-X.
- Tassara, M. (2005). Defensa contra heladas. *Revista F&D. Publicaciones Regionales EEA Alto Valle*.

45:20-24.

Van Genuchten, M.Th., Leij, F.J. y Yates, S.R. (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. 85 p. US Salinity Laboratory, Riverside, California, USA.

Villarreal, P. y Santagni, A. (2004). Pautas tecnológicas frutales de pepita: Manejo y análisis económico financiero. Estación Experimental Agropecuario Alto Valle. Centro Regional Patagonia Norte. p 126. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-pautas_pepita.pdf (Consulta 16 diciembre 2020).

Xiaopeng Li, X. Chang, S. y Salifu, K. F. (2013). Soil texture and layering effects on water and salt dynamics in the presence of a water table: *Revisión ambiental* 22(1):1-10. doi:10.1139 / er-2013-0035.

Zairi, A., Amami, H.E.I., Slatni, A., Pereira, L., Rodríguez, P.N. y Machado, T. (2003). Doping with drought: deficit irrigation strategies for cereals and field horticultural crops in Central Tunisia. In Rossi, G., A. Cancelliere, L.S. Pereira, T. Oweis, M. Shatanawi, and A. Zairi (Editors). *Tools for Drought Mitigation in Mediterranean*

Regions. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, pp 181–201.

Tipo de Publicación: ARTÍCULO.

Trabajo recibido el 02/08/2021 y aprobado para su publicación el 24/10/2021.

COMO CITAR

Galeazzi, J. O. y Aruani, M. C. (2021). Capa freática: su influencia en la programación del riego en frutales de pepita. *Cuadernos del CURIHAM*. 27,9-22. DOI: <https://doi.org/10.35305/curiham.v27i.167>

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

**APLICACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UNA INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS TREX Y SWMM
PARA LA SIMULACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA DISTRIBUIDA EN UNA CUENCA
FUERTEMENTE ANTROPIZADA**

**APPLICATION AND CALIBRATION OF AN INTEGRATION OF THE TREX AND SWMM
MODELS FOR DISTRIBUTED HYDROLOGICAL-HYDRAULIC SIMULATION IN A
STRONGLY ANTHROPIZED BASIN**

Pablo Tomás Stehli^{(1)(*)}, Juan Francisco Weber⁽¹⁾ y Leandro Redin Vestena⁽²⁾

⁽¹⁾ Facultad Regional Córdoba. Universidad Tecnológica Nacional. Córdoba, Argentina.

⁽²⁾ Departamento de Geografía, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, Brasil.

^(*)e-mail: pablo_stehli@hotmail.com

RESUMEN

Este trabajo describe la aplicación y calibración de un modelo hidrológico espacialmente distribuido en la cuenca del Río Cascavel, en el estado de Paraná, Brasil. Se aplicó el modelo TREX incluyendo una modificación en su código fuente que permite la simulación de bocas de tormenta; y en conjunto se aplicó el modelo hidrodinámico semidistribuido SWMM para simular los flujos en los conductos y cauces. La recopilación y procesamiento de información incluyó: la corrección del modelo digital de elevación, mapas de tipos y usos de suelo, relevamiento de la ubicación de bocas de tormenta y conductos. Finalmente, se seleccionaron una serie de eventos (precipitaciones y caudales líquidos medidos) para la calibración del modelo para la cuenca de estudio. En el trabajo se presentan los resultados de la calibración de cinco eventos seleccionados, obteniendo un aceptable ajuste del modelo. Se concluyó de esta forma, que los modelos utilizados en su conjunto permiten la simulación completa de una cuenca urbana. En particular, las características de TREX, permite utilizar información raster, agilizando el ingreso de datos para la modelación totalmente distribuida de una cuenca urbana.

Palabras Claves: Modelación hidrológica, modelación hidráulica, SWMM, TREX.

ABSTRACT

This paper is about the application and calibration of a spatially distributed model in the watershed of Cascabel river, in the state of Parana, Brazil. For this reason, first a TREX model previously adapted is used to model elements of the urban watersheds, such as storm inlets, and then the semidistributed SWMM model is used to simulate the flow in the conducts and channels. The basin data were collected and processed to carry out these works, as for example the correction and adaptation of the digital elevation model, the maps about the land types and its uses, the survey about the location of the storm inlets and conducts. Finally, a series of events were selected (pairs of measured rainfall and liquid flow data) to perform the calibration of the model for the basin studied. The work presents the results of the calibration of five selected events, obtaining an acceptable fit of the model. In this way, it was concluded that the models used as a whole allow the complete simulation of an urban basin. In particular, the characteristics of TREX allow the use of raster information, speeding up data entry for the fully distributed modeling of an urban watershed.

KEYWORDS: Hydrological modeling, hydraulic modeling, SWMM, TREX.

INTRODUCCIÓN

Los entornos urbanos son sistemas muy complejos debido a su variabilidad en una amplia gama de escalas espaciotemporales, y a la interacción entre las actividades humanas y los procesos naturales. Un ejemplo de ello, es el continuo proceso de urbanización que cambia la cobertura de la tierra y ejerce una fuerte influencia en el comportamiento hidrológico de las cuencas urbanas.

A lo largo del tiempo, se han desarrollado diversos modelos hidrológicos para ser aplicados en cuencas urbanas. Los mismos se pueden clasificar como de base física, conceptual o empírica, pero también se pueden clasificar según su resolución espacial y su capacidad de representar la complejidad de la hidrología urbana, de esta forma se agrupan en semi-distribuidos, totalmente distribuidos o de unidades de respuestas hidrológicas (HRU).

En este trabajo se utiliza un modelo hidrológico totalmente distribuido como TREX para modelar los procesos hidrológicos superficiales que se ocasionan en una cuenca urbana y SWMM para simular los procesos hidráulicos que allí se producen.

Se presenta la aplicación de ambos modelos en conjunto en una cuenca urbana y la calibración de los parámetros de los modelos para cinco eventos.

Un modelo de este tipo hidrológico-hidráulico totalmente distribuido calibrado para una cuenca fuertemente urbanizada podrá ser una herramienta más para la gestión de los desagües pluviales urbanos como ser el análisis del impacto de nuevas urbanizaciones, cambios de uso de suelo en la cuenca y capacidad de elementos hidráulicos entre otras aplicaciones.

OBJETIVOS

Como objetivo general se puede mencionar el de desarrollar y validar una metodología para la modelación distribuida de escurrimiento superficial en áreas urbanas, en base al formato raster de información. Sumado a esto, se fijaron los siguientes objetivos particulares:

Aplicar el modelo hidrológico distribuido TREX (modelo raster) a la cuenca del Río Cascavel para simular eventos históricos de interés, calibrando sus parámetros para lograr la mejor representación de la

respuesta hidrológica observada.

Utilizar el modelo SWMM para la modelación de los conductos y canalizaciones y la cuenca del Río Cascavel.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Para evaluar la respuesta hidrológica de un sistema, regularmente es indispensable la elaboración de algún tipo de esquema, por medio del cual se pueda representar en forma simplificada, un sistema real; en otras palabras: un modelo. El mismo podrá ser utilizado para reconstruir eventos pasados y predecir los futuros (Puricelli, 2003).

El modelo es la representación de algún objeto o sistema, en un lenguaje o forma de fácil acceso y uso, con el objetivo de entenderlo y poder generar sus respuestas para diferentes entradas. Un modelo hidrológico es una herramienta que la ciencia desarrolló para entender mejor y representar el comportamiento de la cuenca hidrográfica y prever condiciones diferentes a las observadas (Tucci, 1998).

Los modelos hidrológicos se empiezan a desarrollar en los años 1960. En 1972 comienzan a publicarse los primeros estudios de efectos de urbanización sobre cuencas. Posteriormente se desarrollan modelos que incluían la simulación de embalses de detención. Se desarrollan modelos como el ILLUDAS (Universidad de Illinois), el HEC-1 (Centro de Ingeniería Hidrológica), el TR55 (Servicio de Conservación de Suelos), STORM (Cuerpo de Ingenieros EEUU). Además surge un poderoso modelo como el SWMM (EPA Agencia norteamericana de protección del Medio Ambiente) que incorpora el transporte de contaminantes (Riccardi, 1997).

En Argentina se han desarrollado modelos como OCINE-2 (UNL, Santa Fe, Argentina, 1986); ARHYMO (CRA. INCYTH. Argentina, 1994); los que son versiones modificadas del modelo OCINE en el caso del primero y del HYMO10 y OTTHYMO el segundo (Riccardi, 1997).

Luego, en los párrafos siguientes se describirá en primer lugar las clasificaciones típicas de los modelos hidrológicos, especialmente en función de su representación espacial y luego más en detalle los modelos hidrológicos utilizados actualmente en el ámbito urbano.

Los modelos, se pueden clasificar según la naturaleza de los algoritmos empleados (empíricos, conceptuales o con base física; Salvadore et al., 2015), o su resolución espacial y cómo representan la complejidad del programa de hidrología urbana.

Los modelos agregados (Kleidorfer et al., 2009) y semi-distribuidos (INSA-Valor, 1999) son modelos conceptuales y dependen de una representación simplificada de la heterogeneidad de la cuenca urbana. De hecho, toda la cuenca se considera como una sola unidad con características homogéneas para los agregados, mientras que la cuenca se divide en un número limitado de homogéneas subcuencas para los modelos semidistribuidos. Estos dos enfoques fueron ampliamente desarrollados y utilizados porque requieren una cantidad limitada de datos para su implementación, y muestran un tiempo de cálculo rápido. A menudo, en el proceso de calibración, estos modelos de “fuerzan” para representar los datos observados. Sin embargo, estos modelos dan información de salida en la escala de subcuencas, que puede ser una escala muy grande como para cumplir con los requisitos de la gestión de las aguas urbanas para entender algunos problemas de inundación muy local o para evaluar estrategias de manejo a escalas muy pequeñas.

Los modelos hidrológicos totalmente distribuidos son los más complejos porque tienen en cuenta la heterogeneidad espacial en las entradas y los parámetros. Éstos, separan los procesos a simular en elementos pequeños o celdas de cuadrícula. También pueden estar estructurados como un modelo basado en la física que los hace más identificables con el proceso hidrológico real. Los modelos espacialmente distribuidos han influido en las prácticas de gestión al proporcionar datos detallados para elementos pequeños (Sitterson, et al., 2017).

Los modelos que se describen a continuación son utilizados en el ámbito urbano. Los mismos fueron seleccionados a partir de una serie de trabajos que realizaron una recopilación o comparación de modelos hidrológicos utilizados en ámbitos urbanos con distintos objetivos (Abdullah et al., 2019; Lind, 2015; Rangari et al., 2015; Armitage et al., 2014; Ochoa-Rodriguez et al., 2013; Mitchell et al., 2007; Freni et al., 2003). La información se amplió con recopilación propia y con información de los manuales (cuando se encuentran disponibles) de cada uno de los modelos.

El programa SWMM (Storm Water Management

Model) fue elaborado por la USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (Rossman, 2010). Es un modelo ampliamente difundido en áreas urbanas, pero que en realidad es un modelo semi-distribuido, donde las cuencas son unidades hidrológicas de terreno cuya topografía y elementos del sistema de drenaje conducen la escorrentía directamente hacia un punto de descarga. El usuario del programa es el encargado de dividir el área de estudio en el número adecuado de cuencas e identificar el punto de salida de cada una de ellas. Los puntos de salida de cada una de las cuencas pueden ser bien nudos del sistema de drenaje o bien otras cuencas.

PCSWMM es una interfaz para SWMM y está desarrollada por Computational Hydraulics Inc. (CHI) (<https://www.pcswmm.com/>). Es un modelo integrado de SIG que utiliza SWMM 5.0 como modelo de motor computacional para los cálculos hidrológicos e hidráulicos. Es una herramienta de modelado independiente con todas las herramientas SIG necesarias incluidas y tiene soporte para varios formatos CAD y GIS (Shamsi, 2005; CHI, 2014b, citados en Lind, 2015). Los modelos PCSWMM se pueden usar tanto para predicciones continuas a largo plazo como para modelado de eventos únicos. Es un modelo de captación integrada que incluye alcantarillas pluviales, alcantarillas combinadas, sistemas fluviales, plantas de tratamiento y aguas receptoras. El área de captación se puede dividir en subcuencas y el modelo se puede utilizar para cálculos 1D y 2D (Lind, 2015).

XP Storm y XP SWMM son productos que actualmente se encuentran bajo licencia del grupo de investigación “HR Wallington Software”, igual que Infoworks. Es posible obtener información de los modelos a partir del sitio web de dicho grupo (<https://www.innovyze.com/en-us/products/xpstormy> <https://www.innovyze.com/en-us/products/xpswmm>). XPS Storm y XPSWMM originalmente fueron desarrollados por XP Solutions de Australia.

XPS Storm es un modelo hidráulico e hidrológico integrado utilizado para sistemas de aguas pluviales y fluviales/gestión de llanuras de inundación. Las áreas de uso en relación con el análisis, diseño y planificación de aguas pluviales incluyen, entre otros, el diseño del plan maestro de aguas pluviales, estructuras de bajo impacto de escurrimiento, optimización de estanques de detención, inundaciones urbanas 1D y 2D. El programa tiene integraciones

SIG y CAD y puede importar y exportar varios formatos SIG y CAD. Los formatos SWMM 5.0 también se pueden importar y exportar. Los resultados de la simulación pueden presentarse como documentos de resultados, tablas, diagramas de perfil, mapeo de inundaciones y animaciones (Lind, 2015).

Al igual que XP Storm, XPSWMM incluye aguas pluviales y sistemas fluviales / llanuras aluviales. Además, también incluye la gestión de aguas residuales. El modelo simula flujos de red 1D en combinación con flujos terrestres 2D, estructuras LID y calidad de aguas pluviales. La herramienta se puede utilizar para sistemas naturales como, por ejemplo, estanques, ríos y lagos y entornos artificiales como tuberías, conductos y calles.

InfoWorks ofrece un modelado rápido, preciso y estable de los elementos clave de las aguas residuales y sistemas de alcantarillado. Ofrece una completa solución para el problema del modelado de los efectos de remanso y el flujo inverso, canales abiertos, alcantarillas maestras, conexiones de tuberías complejas y estructuras auxiliares.

InfoWorks CS-2D es un paquete de software que incluye un módulo para la simulación 2D del flujo terrestre utilizando una malla triangular. Por lo tanto, InfoWorks CS-2D permite el modelado de drenaje doble 1D-2D, con la interacción entre el alcantarillado y los sistemas de superficie que se producen en pozos de registro y barrancos. Cuando se utiliza InfoWorks CS-2D, es posible aplicar lluvia a través de subcuencas o directamente en el modelo 2D de la superficie. Sin embargo, este paquete de software no permite el modelado de lluvia-escorrentía cuando la lluvia se aplica directamente en el modelo 2D de la superficie. Para sortear este problema, el modelista debe calcular la escorrentía externamente y restarla del hietograma de lluvia antes de aplicarlo al modelo. Este problema se ha resuelto en el nuevo paquete de software InfoWorks ICM (Integrated Catchment Modeling), que constituye una actualización sobre InfoWorks CS y, entre otras mejoras, permite la estimación de la escorrentía cuando la lluvia se aplica directamente en el modelo 2D de la superficie (Ochoa-Rodríguez et al., 2013).

MIKE Urban es un paquete de software desarrollado por DHI y basado en SWMM 5.0. Es una herramienta de modelado completa integrada con SIG desarrollada por el grupo DHI, organización independiente de investigación y consultoría. El software MIKE URBAN se puede utilizar para sistemas de aguas

pluviales y residuales, alcantarillas combinadas y separadas, así como sistemas de distribución de agua.

MIKE Urban es un software de módulos. El Model Manager es el módulo principal de MIKE Urban e incluye un módulo de datos común para los sistemas de distribución y recolección de agua. Es posible cargar archivos de SWMM5 y EPANET y archivos de resultados de cualquier tamaño. El motor SWMM5 se incluye para el modelado de aguas pluviales y alcantarillado, mientras que EPANET se incluye para el modelado de distribución de agua. El sistema de recolección consta de varios módulos adicionales como CS-Pipeflow, CSRainfall Runoff, CS- Pollutant Transport, CS- Control y CS- procesos biológicos. Para el módulo adicional CS-Pipeflow se utiliza el motor computacional MOUSE (Modelado de alcantarillas urbanas) a largo plazo, a través de estadísticas.

Los módulos anteriormente citados se combinan y se acoplan de distinta manera para poder modelar correctamente según el caso de estudio y sus necesidades. De esta forma es posible simular las precipitaciones, la evaporación (para un modelo continuo), el humedecimiento, la infiltración (mediante la relación de Horton), el almacenamiento superficial, escurrimiento superficial y el flujo en tuberías.

Modelo HYDRAS. Mobayed y Cruickshank (1998), Mobayed y Ortiz (2000) y Mobayed (2009) desarrollaron el modelo hidrológico distribuido HIDRAS, el cual integra bajo una misma plataforma el procesamiento de la información digital climatológica, hidrométrica, fisiográfica y topográfica para la estimación de parámetros hidrológicos y tiene implementados algoritmos de cálculo de las diferentes etapas del proceso lluvia-escurrecimiento.

El modelo hidrológico distribuido HIDRAS usa la información de los modelos digitales de elevación (MDE), no sólo para definir direcciones de flujo y la acumulación de elementos para configurar la red de drenaje, sino también para hacer el escalado de la cuenca en celdas geomorfológicas, esto es una agrupación mínima y suficiente de elementos que dan forma a una superficie tributaria. Tal agrupación corresponde al área mínima capaz de formar un cauce incipiente de escurrimiento.

Modelo Casc-2d-TREX. El punto de partida para el desarrollo de TREX (Two-dimensional Runoff, Erosion, and eXport model) fue el modelo hidrológico

CASC2D (CASCade of planes, 2-Dimensional (Julien & Saghafian, 1991)). La estructura básica es un modelo basado en eventos que simula el flujo superficial, la erosión de la superficie del suelo y la deposición, flujo en canal y transporte de sedimentos a través de los cauces fluviales (England et al., 2007). Como parte del desarrollo de TREX, los componentes hidrológicos y de transporte de sedimentos de CASC2D se ampliaron de manera significativa y mejoraron para soportar el modelado de las inundaciones y las características químicas de transporte (Velleux et al., 2008).

CASC2D y TREX fueron pensados originalmente para cuencas rurales pero se encuentran varios trabajos en los cuales se aplican en cuencas urbanas con aceptables resultados. El inconveniente se presenta principalmente porque no modela los flujos en tuberías. TREX y CASC2D son modelos de dominio público desarrollados por la Universidad Estatal de Colorado ubicada en Fort Collins (Colorado State University-Fort Collins), Estados Unidos.

Multi-Hydro, es un modelo totalmente distribuido, que se está desarrollando actualmente en la Ecole des Ponts ParisTech. Presenta varios componentes que interactúan entre sí para simular los distintos procesos hidrológicos e hidráulicos que intervienen en una cuenca periurbana. Cada componente se basa en modelos existentes y ampliamente validados, y que son software de dominio público. Los procesos modelados son las precipitaciones, la escorrentía, la infiltración en suelos heterogéneos, y el drenaje en los sistemas de alcantarillado (Giangola-Murzyn, 2013).

El modelado de los procesos de superficie está realizado por TREX (citado anteriormente). Con este modelo se realiza la simulación de los procesos superficiales: precipitación, interceptación, almacenamiento, infiltración y escorrentía superficial.

El modelado del flujo en zona no saturada se realiza con el software VS2DT (Healy, 1990). Este modelo permite simular el flujo y transporte en medios porosos variablemente en una y dos dimensiones. El modelo VS2DT es un modelo de diferencias finitas que resuelve la ecuación de Richards para el flujo y la ecuación de advección-dispersión para el transporte de solutos.

Por último para la simulación de las redes de saneamiento se utiliza el modelo SWMM (también ya descrito anteriormente).

El modelo Itzi es el trabajo del proyecto de Doctorado de Laurent Courty bajo la supervisión del Dr. Adrián Pedrozo-Acuña, de la Universidad Autónoma de México. Dicho proyecto se encuentra en desarrollo y es posible encontrar los avances del mismo, como así también tutoriales, ayudas, aplicaciones, etc. en la página web del proyecto: <https://www.itzi.org/>.

Itzi es un modelo hidrológico dinámico, totalmente distribuido que simula los flujos 2D de la superficie regular con la ayuda de mapa raster y el flujo en la red de drenaje a través del modelo SWMM.

El modelo Itzi, resuelve las ecuaciones de inercia parcial amortiguada, está escrito en lenguaje Python y es compatible con plataformas de Sistemas de Información Geográfica de libre distribución (por ejemplo GRASS) (Courty et al, 2017).

Itzi integra el modelo SWMM con un modelo inercial de superficie. Las interacciones entre el modelo de superficie y la red de drenaje se realizan en el nodo de la red a través de las ecuaciones de orificio, según el tirante de agua en cada modelo. Los dos modelos se ejecutan simultáneamente y el intercambio entre los dos son bidireccionales. El agua puede entrar o salir de la red de drenaje.

El modelo presentado resuelve las ecuaciones de aguas someras de forma simplificada, a través del método de diferencias finitas. El cálculo de flujo está compuesto por ecuaciones cuasi-bidimensionales, que resuelven de manera independiente el flujo en cada dimensión (Courty et al, 2017).

StormCAD es un producto de Bentley (<https://www.bentley.com/es/products/product-line/hydraulics-and-hydrology-software/stormcad>) y es una herramienta utilizada para diseñar y analizar sistemas de alcantarillado de aguas pluviales. StormCAD utiliza el método racional para calcular los flujos máximos y no tiene en cuenta las estructuras de detención y los cambios de flujo a lo largo del tiempo (Lind, 2015).

Otro producto de Bentley es CivilStorm (<https://www.bentley.com/es/products/product-line/hydraulics-and-hydrology-software/civilstorm>). Es un software de modelado de aguas pluviales que modela más aspectos del sistema que StormCAD. CivilStorm es un modelo dinámico que tiene en cuenta el almacenamiento, la detención y los flujos a lo largo del tiempo y, por lo tanto, es una herramienta de modelado más avanzada que

StormCAD. Se utiliza para la planificación maestra y estudiar la calidad del agua. Puede, como StormCAD, usarse como un producto independiente pero también dentro de AutoCAD y otras herramientas de software. El usuario puede optar por utilizar el motor SWMM o la solución incorporada CivilStorms. Los resultados se pueden presentar como, por ejemplo, mapeo temático, gráficos dinámicos, perfiles y tablas (Lind, 2015).

El Modelo para la conceptualización de la mejora de las aguas pluviales urbanas (MUSIC) es una herramienta de evaluación de la calidad de las aguas pluviales desarrollada por la empresa australiana de gestión del agua, eWater. El modelo se utiliza para analizar los diseños conceptuales de la infraestructura de aguas pluviales y pone un énfasis particular en los objetivos de calidad del agua (Elliott y Trowsdale, 2007, citado en Armitage et al., 2014). MUSIC modela el control del flujo aguas abajo y los beneficios de calidad del agua logrados a través de la instalación de mejores prácticas de gestión (BMP) estructurales (Lloyd et al., 2002, citado en Armitage et al., 2014). Desarrollado por primera vez en 2001, el software está diseñado para ayudar a los profesionales urbanos de aguas pluviales a crear y visualizar estrategias para abordar los problemas asociados con la hidrología de las aguas pluviales y los impactos de la contaminación.

MUSIC puede operar en un rango de escalas espaciales y temporales; Puede simular cuencas de 0.01 a 100 km² con pasos de tiempo que van desde 6 minutos a 24 horas.

La última versión de MUSIC, es decir, MUSIC 6.3 se lanzó en Noviembre de 2017, es posible su descarga en la página web australiana de eWater (<https://ewater.org.au/products/music/>).

Sobek fue desarrollado por la compañía holandesa Deltares y, como tal, es el software más utilizado en los Países Bajos.

Sobek es un paquete comercial para modelar procesos hidrológicos e hidráulicos tanto en áreas rurales como urbanas. Comprende una serie de módulos para aplicaciones específicas; uno de ellos es Sobek-Urban, que puede usarse para modelar sistemas de drenaje urbano e inundaciones pluviales urbanas. Sobek-Urban ofrece capacidades de modelado 1D y 2D. Al igual que InfoWorks CS, Sobek-Urban-1D es un paquete de modelado semi-distribuido, con precipitaciones aplicadas al modelo

a través de subcuencas, cada una de las cuales puede comprender diferentes tipos de superficie con diferentes parámetros de escorrentía (Ochoa-Rodríguez et al., 2013).

El módulo Sobek-Urban-2D ofrece la posibilidad de implementar un modelo 2D de la superficie que se puede vincular con el modelo 1D del sistema de alcantarillado, lo que resulta en un modelo de drenaje doble 1D-2D. Sobek-Urban-2D simula el flujo terrestre utilizando una cuadrícula rectangular (que permite cuadrículas anidadas de menor resolución). Se basa en las ecuaciones completas de Saint Venant. Cuando se implementa un modelo 2D de la superficie en Sobek, es posible aplicar la lluvia al modelo a través de subcuencas o directamente en la superficie. Sin embargo, de manera similar a InfoWorks CS-2D, Sobek-Urban-2D no permite el modelado de lluvia-escorrentía (es decir, estimación de escorrentía) cuando la lluvia se aplica directamente sobre el modelo 2D de la superficie.

Se puede encontrar más información sobre este paquete de software en <https://www.deltares.nl/en/software/module/sobek-1dflow-urban/>.

Canoe es un paquete de software comercial dedicado a la hidrología urbana de uso común en Francia. Es el resultado de un convenio entre dos de los softwares franceses más utilizados en ese país en el campo de la hidrología urbana: CEDRE, desarrollado por el laboratorio URGC-Urban Hydrology de INSA Lyon y CAREDAS, desarrollado por SOGREAH.

Es un paquete de modelado semi-distribuido, similar a InfoWorks CS. Al igual que en InfoWorks CS, las subcuencas pueden comprender diferentes tipos de superficie, cada uno de los cuales tiene diferentes parámetros de escorrentía y tiempos de respuesta. En Canoe, el flujo en el sistema de alcantarillado se modela con la ayuda de una aproximación numérica de la forma más completa de las ecuaciones de Saint-Venant (es decir, enfoque de onda dinámica). Canoe no permite el modelado 2D de la superficie urbana; sin embargo, permite el modelado 1D de la superficie. Se puede encontrar más detalles sobre este paquete de software en el manual del usuario (Allison et al., 2005, citado en Ochoa-Rodríguez et al., 2013).

A partir de la recopilación presentada anteriormente se puede observar lo siguiente:

- Existe una gran variedad de modelos hidrológicos aplicados a áreas urbanas principalmente orientados al cálculo de la red de drenaje/conductos pluviales.

- SWMM se presenta como el modelo hidrológico-hidráulico disponible gratuitamente más completo para el ámbito urbano. Por el mismo motivo, es utilizado en varios modelos con licencia paga.

- Si se tiene en cuenta modelos totalmente distribuidos disponibles gratuitamente para aplicar al área urbana se podría mencionar actualmente al modelo Itzi, sin embargo, al comenzar con el trabajo actual (año 2014) no estaba disponible dicho proyecto. Por otro lado, el modelo Multihydro que combina el modelo TREX con SWMM aún a la fecha de finalización del trabajo (Finales de 2019) no se encontraba libremente a disposición para su descarga.

Por dichos motivos, se procedió a utilizar de manera combinada el modelo TREX para modelar la transformación lluvia-escorrentamiento y el flujo del escorrentamiento superficial y el modelo SWMM para modelar la red de drenaje pluvial.

El modelo TREX

TREX (Two-dimensional Runoff, Erosion, and eXport model) es un modelo bidimensional de escorrentamiento, erosión y transporte de sedimentos y contaminantes (England et al., 2007; Velleux et al., 2008). Está basado en el modelo de cuencas CASC2D. Los procesos hidrológicos simulados son: precipitación, intercepción, infiltración y pérdidas por transmisión en el cauce, almacenamiento, flujo superficial y en canales y derretimiento de nieve.

Este modelo utiliza la relación de Green y Ampt para definir la infiltración en la superficie del terreno y en los cauces, y a partir del balance, el flujo superficial. Este flujo está gobernado por las leyes de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento. TREX utiliza la aproximación de la onda difusiva unidimensional en cauces y bidimensional en la superficie de la cuenca, suponiendo que el flujo es turbulento y que la resistencia al flujo se puede describir utilizando la formulación de Manning (Stehli et al., 2012).

Para simular el proceso hidrológico, TREX plantea una solución numérica explícita de las ecuaciones de balance de masa mediante la segmentación de la cuenca en elementos cuadrados iguales, a los cuales se le asignan los parámetros relativos a las

características de infiltración del suelo y coeficientes de rugosidad. Este modelo es de código libre, está escrito en el lenguaje de programación C y está disponible en la página web de la Universidad Estatal de Colorado, tiene una fuerte base física en la conceptualización de los procesos superficiales, pero no considera los procesos subsuperficiales y subterráneos (Jorquera et al., 2012).

A continuación, se describen resumidamente los procesos hidrológicos representados por el modelo TREX (Velleux et al., 2008).

El volumen bruto de precipitación (V_g) que llega a la superficie en función del tiempo, es igual a la intensidad de precipitación bruta (i_g) por el área de la región donde ocurre la precipitación (A_s). El volumen neto (V_n) resulta de descontarle al bruto el volumen interceptado (V_i). El balance se explicita en la ecuación (1).

$$\frac{\delta V_g}{\delta t} = i_g \cdot A_s \rightarrow V_n = V_g - V_i \quad (1)$$

Según el volumen interceptado sea mayor o menor al volumen bruto, habrá o no volumen neto de agua sobre la superficie de la cuenca.

Para definir la infiltración de agua en la superficie de la cuenca como así también en los cauces que la forman, el modelo TREX utiliza la relación de Green y Ampt (1911, citado por Chow et al., 1994).

$$f = K_h \cdot \left(1 + \frac{\Psi(1 - S_e)\theta_e}{F} \right) \quad (2)$$

donde K_h es la conductividad hidráulica, ψ es la altura de succión del frente de saturación (altura de succión capilar), S_e es el porcentaje de saturación efectiva del suelo, θ_e la porosidad efectiva del suelo, f la tasa de infiltración y F la altura de infiltración acumulada, vinculadas a través de:

$$f = \frac{dF(t)}{dt} \quad (3)$$

lo cual da lugar a una relación no lineal resuelta a través de un método iterativo (Chow et al., 1994).

La fracción de precipitación no retenida ni infiltrada genera un flujo superficial, tanto mantiforme (bidimensional) como en canales (unidimensional). El flujo superficial puede ocurrir cuando la

profundidad del agua en el plano terrestre supera el umbral de almacenamiento de la depresión. La ecuación de continuidad para el flujo en dos dimensiones gradualmente variado, sobre un plano rectangular en coordenadas (x, y) es:

$$\frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta q_x}{\delta x} + \frac{\delta q_y}{\delta y} = i_n - f + W = i_e \quad (4)$$

donde h es la altura de flujo superficial, W es un término fuente/sumidero (descarga/aporte unitario puntual), i_n es la intensidad de precipitación neta, obtenida a partir de (1), i_e es la intensidad de precipitación en exceso, y q_x, q_y son los caudales por unidad de ancho en la dirección x o y. Suponiendo que el flujo es turbulento, la resistencia se puede describir utilizando la formulación de Manning (Chow et al., 1994) tanto para los flujos bidimensionales como unidimensionales. La ecuación (4) es discretizada en el espacio por el método de diferencias finitas, mientras que para la integración temporal se utiliza el método de Euler.

El modelo SWMM

El programa SWMM (Storm Water Management Model) es un proyecto de software mantenido en la actualidad por la USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). Este modelo ha sido especialmente desarrollado para la simulación de sistemas de desagües pluviales y cloacales en forma combinada o separada (EPA, 2005).

Este modelo permite interpretar el comportamiento hidrológico de las cuencas de aportes y la respuesta hidrodinámica del sistema de desagüe. Esta es la principal diferencia respecto de los modelos hidrológicos – hidráulicos estándar, los cuales no consideran las perturbaciones de aguas abajo hacia aguas arriba.

SWMM utiliza para el tránsito de los hidrogramas métodos hidrológicos e hidráulicos, estos últimos consideran las ecuaciones de Saint-Venant en su forma completa. La posibilidad de modelar el tránsito hidráulico resulta fundamental en la simulación de desagües donde las condiciones de aguas abajo influyen sobre el escurrimiento en el sistema, como por ejemplo en tramos de baja pendiente o aguas arriba de conductos de escasa capacidad.

SWMM está compuesto por diferentes módulos (adaptado del manual de referencia de SWMM) (EPA, 2015):

- El Módulo Atmosférico, desde la cual se analiza la lluvia caída y los contaminantes depositados sobre la superficie del suelo, que se analiza en el Módulo de Superficie del Suelo.

- El Módulo de Superficie del Suelo, que se representa a través de uno o más objetos cuenca. Estos objetos reciben la precipitación del Módulo Atmosférico en forma de lluvia o nieve; y generan flujos de salida en forma de infiltración para el Módulo de Aguas Subterráneas y también como escorrentía superficial y cargas de contaminantes para el Módulo de Transporte.

- El Módulo de Aguas Subterráneas recibe la infiltración del Módulo de Superficie del Suelo y transfiere una parte de la misma como flujo de entrada para el Módulo de Transporte.

- El Módulo de Transporte contiene una red con elementos de transporte (canales, tuberías, bombas y elementos de regulación), unidades de almacenamiento y tratamiento que transportan el agua hacia los Nudos de Vertido o salidas del sistema. Los flujos de entrada de este Módulo pueden provenir de la escorrentía superficial, de la interacción con el flujo subterráneo, de los caudales sanitarios correspondientes a periodos sin lluvia, o de hidrogramas de entrada definidos por el usuario. Los componentes del Módulo de Transporte se modelan con los objetos Nudos y Conducciones.

Las conexiones son nudos del sistema de drenaje donde se conectan diferentes líneas entre sí. Físicamente pueden representar la confluencia de canales superficiales naturales, pozos de registro del sistema de drenaje, o elementos de conexión de tuberías. Los aportes externos de caudal entran en el sistema a través de las conexiones. El exceso de agua en un nudo se traduce en un flujo parcialmente presurizado mientras las conducciones conectadas se encuentren en carga. Este exceso de agua puede perderse completamente del sistema o por el contrario estancarse en la parte superior para posteriormente volver a entrar de nuevo en la conexión.

Los conductos son tuberías o canales por los que se desplaza el agua desde un nudo a otro del sistema de transporte. Es posible seleccionar la sección transversal las distintas variedades de geometrías abiertas y cerradas definidas en el programa.

SWMM emplea la ecuación de Manning para establecer la relación entre el caudal que circula por

el conducto, la sección del mismo, su radio hidráulico y la pendiente tanto para canales abiertos como para conductos cerrados parcialmente llenos.

MODELACIÓN EN CONJUNTO DE TREX CON SWMM

De la aplicación del modelo TREX en áreas urbanas (Giangola-Murzyn, 2013, Stehli et al., 2016) se verifica que el mismo no incluye las formulaciones para simular el funcionamiento de las bocas de tormenta y los conductos cerrados. Como estos elementos son de gran importancia en la dinámica de las cuencas urbanas, se procedió a la modificación del código fuente de TREX para que simule el funcionamiento de las bocas de tormenta. Estas modificaciones fueron realizadas en el módulo de infiltración. Existirán celdas en donde al haber escurrimiento superficial se infiltra una parte del mismo dependiendo el tipo y característica de boca de tormenta a modelar. De este modo, se simula el caudal insumido en una boca de tormenta.

En las bocas de tormenta a cordón abierto en un punto intermedio se estableció la ecuación de Guo (1997, presentada en Riccardi, 2004) en la cual en primer lugar se calcula la longitud teórica de la boca de tormenta L_t en función del caudal total Q_0 la pendiente longitudinal S_t , el coeficiente de rugosidad de Manning n de la calle y la pendiente transversal S_r . Luego el caudal insumido Q_i en la boca de tormenta depende de la relación de la longitud teórica de la boca de tormenta y la real L_c .

$$L_t = 0.817 Q_0^{0.42} S_t^{0.30} \left(\frac{1}{\eta S_t} \right)^{0.5} \quad (5)$$

$$Q_i = Q_0 \left[1 - \left(\frac{L_c}{L_t} \right)^{1.8} \right] \quad (6)$$

En las bocas de tormenta a cordón abierto en punto bajo se utilizó la ecuación de Bertoni (1995, presentada en Riccardi, 2004) la cual diferencia entre el funcionamiento como orificio o vertedero según la relación del tirante de agua con respecto a la abertura de la boca. Estas relaciones están en función de la longitud de la boca de tormenta L_c , el tirante de agua y_0 y la altura de boca de tormenta h . En las ecuaciones (7) y (8) se encuentran estas relaciones.

$$Q_i = 1.656 L_c y_0^{1.5} \quad (y_0 \leq 1.5 h) \quad (7)$$

$$Q_i = 0.67 L_c h \left[2g \left(y_0 - \frac{h}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (y_0 > 1.5 h) \quad (8)$$

Para aquellas bocas de tormenta horizontales que se encuentran en puntos bajos se estableció la relación de Neenah (1977, presentada en Riccardi, 2004), la cual relaciona el tirante de agua y_0 , con un coeficiente adimensional K que depende de la pendiente transversal y la pendiente longitudinal. Para el caso, se fijó una pendiente transversal de 2.5 % de forma tal que el coeficiente K dependerá solamente de la pendiente longitudinal de la calle. La ecuación (9) muestra la relación de Neenah. Se obtuvo una relación para el coeficiente K para una rejilla de un ancho de 0.45 m y un largo de 0.90 m. Tanto la ecuación (9) como la relación obtenida del K fueron ingresadas al código fuente de TREX.

$$Q_i = 0.205 K y_0^{5/3} \quad (9)$$

Para las bocas de tormenta horizontales situadas en puntos bajos se utilizó la relación de Guo (1997, descripta en Riccardi, 2004). En las relaciones descriptas se establecen nuevas variables; A_u es el área útil de la abertura horizontal y P_R es el perímetro vertedero de la reja. En las ecuaciones (10) y (11) se encuentran las relaciones dependiendo si la reja trabaja hidráulicamente como vertedero o como orificio.

$$Q_i = 1.656 y_0^{1.5} P_R \quad (y_0 \leq 1.792(A_u/P_R)) \quad (10)$$

$$Q_i = 2.91 y_0^{0.5} A_u \quad (y_0 > 1.792(A_u/P_R)) \quad (11)$$

Finalmente, también se ingresaron las relaciones para las bocas de tormenta combinadas. Para este tipo de bocas de tormenta, se utilizaron las mismas ecuaciones anteriormente descriptas incorporando el procedimiento adecuado para el cálculo de las mismas. En el caso de las bocas que se encuentren en un punto intermedio se calcula en primer lugar el caudal interceptado por la rejilla, con el caudal excedente se calcula la longitud teórica de la boca de cordón abierto, luego la eficiencia de esta boca de tormenta y finalmente el caudal total insumido en la boca de tormenta mixta será la suma del caudal insumido por la rejilla más el caudal insumido por la boca de tormenta abierta. Para el caso de que esté ubicada en punto bajo se calcula el caudal insumido por los dos tipos de elementos (horizontal y vertical) de forma independiente y luego el caudal total es la suma de los dos caudales.

Para ingresar las relaciones anteriores en TREX se modificaron tres archivos del código fuente del programa, entre ellos, el archivo *Infiltration-r5.c* donde se encuentran las relaciones del cálculo de infiltración, luego los archivos que manejan la memoria y declaraciones del programa: *trex_water_declarations.h* y *trex_water_definitions.h*.

Previamente se intentó realizar las modificaciones en el módulo de escurrimiento superficial de TREX, tratando de usar el modelo con múltiples salidas del sistema dentro de la cuenca. Sin embargo, esta propuesta no tuvo éxito.

Las modificaciones realizadas fueron probadas y verificadas con ejemplos teóricos encontrados en

distintos libros especializados en la temática (Mays, 2001).

Posteriormente, se estableció un procedimiento de modelación en conjunto con SWMM para simular los conductos enterrados como así también los arroyos y cauces naturales. En primer lugar se modeló la cuenca con el modelo TREX teniendo en cuenta las bocas de tormenta, es decir, con TREX se modelaron los procesos hidrológicos superficiales. Los cauces a cielo abierto en TREX se representaron como un tipo de suelo especial en el cual se infiltra todo el escurrimiento que llega a esa celda. Luego, con SWMM se modelaron los elementos hidráulicos del sistema, esto es tanto las conducciones cerradas como los canales y arroyos, teniendo como ingreso las salidas de TREX correspondientes a las bocas de tormenta y a los arroyos o canales a cielo abierto (Figura 1).

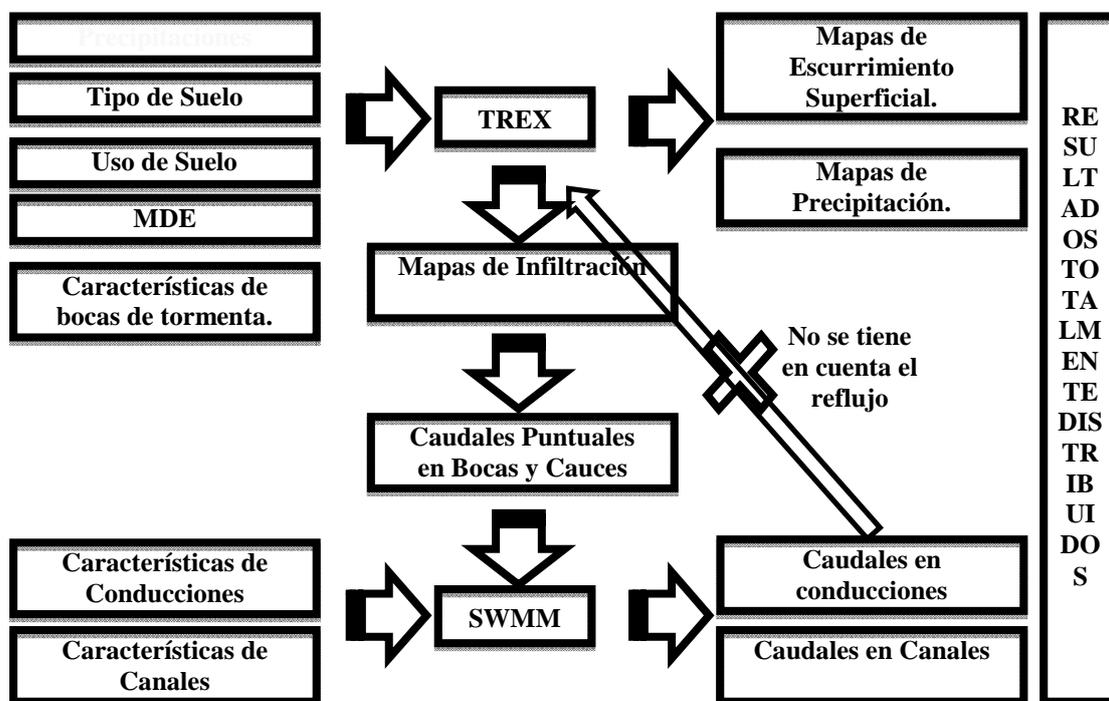


Figura 1. Esquema de procedimiento de modelación distribuida en áreas urbanas con TREX modificado y SWMM.

Al implementar este procedimiento, se desarrollaron programas ad-hoc para extraer de los mapas de infiltración de salida de TREX los valores de caudales a ingresar en cada nodo (conexión) de boca de tormenta o cauce de SWMM.

CASO DE APLICACIÓN

El caso de estudio presentado en este trabajo es

la Cuenca del Rio Cascavel, en el municipio de Guarapuava localizada en el Centro Sur del Estado de Paraná, Brasil. La cuenca tiene un área aproximada de 81 km². De su área total, 55km² es decir, 69 % están dentro del perímetro urbano oficial de la localidad de Guarapuava (Figura 2).

Para la modelación de la cuenca se utilizaron los siguientes datos de entrada, los cuales fueron procesados para realizar los modelos en TREX y SWMM.



Figura 2. Cuenca del Río Cascavel – Adaptado de Gomes (2014).

Topografía: El modelo digital de elevación fue elaborado a través de la interpolación lineal de datos relevados por distintas campañas efectuadas por la Municipalidad de Guarapuava, asignadas por la Universidad Estatal de Centro Oeste (UNICENTRO) de Brasil.

Uso y tipo de suelo: Se utilizaron los mapas elaborados por Gomes (2014). En lo que respecta al mapa de uso de suelo, el mismo es resultado del procesamiento de imágenes Rapideye del 27/09/2011. De la clasificación se evidencia que predominan las clases de vegetación rastrera/cultivo y las áreas construidas con un porcentaje de 26.7 % y 35.8 % respectivamente, del área total. Los tipos de suelo en la cuenca son tres: lattosolos brunos y nitosolos brunos y litólicos.

Precipitaciones: Se seleccionaron eventos históricos correspondientes a una estación pluviográfica y dos estaciones pluviométricas. Las fechas de los eventos seleccionados van desde Junio de 2011 hasta diciembre de 2013, en correspondencia a la existencia de datos de caudales líquidos.

Caudales líquidos: Se utilizaron para la calibración los resultados de medición de un limnógrafo automático que se encuentra en coincidencia a la estación pluviográfica, dentro de la cuenca Cascavel (no en el punto de cierre de la misma). Los valores medidos del caudal líquido en la estación Cascavel se encuentran con un intervalo de 15 minutos.

En el mapa de tipo de suelo se agregaron los tipos correspondientes a las distintas bocas de tormenta existentes en la cuenca, las cuales fueron relevadas a través de Google Street View®, esto debido a la inexistencia de documentos que indiquen la cantidad y ubicación de las mismas (Figura 3). También se agregaron dos tipos de suelo adicionales, uno para simular un suelo impermeable en correspondencia a las construcciones y calles pavimentadas o asfaltadas y otro tipo de suelo totalmente permeable para simular las celdas correspondientes a los arroyos y cauces naturales.

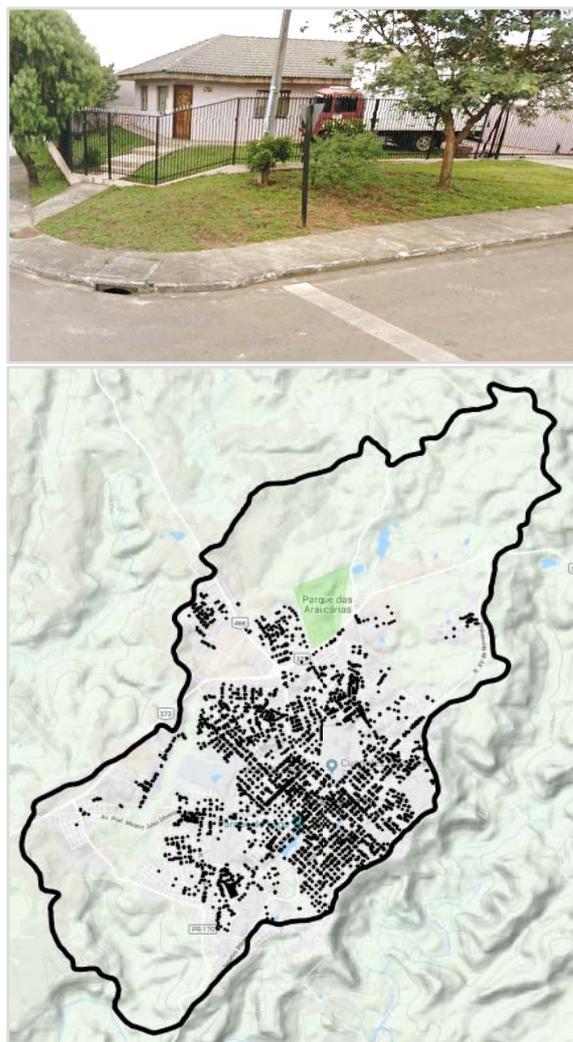


Figura 3. Arriba: vista de una zona de la ciudad de Guarapuava en Street View. Abajo: identificación de las bocas de tormenta.

Con estos mapas, y el de uso de suelo, se elaboraron los archivos de ingreso para el modelo TREX (Figura 4). Debido a la densidad de bocas de

tormenta, la resolución base del mapa de uso de suelo (5 m x 5 m) y la densidad de levantamientos topográficos dentro de la zona urbana, se eligió realizar las modelaciones con celdas de 5 m x 5 m en las áreas urbanas y celdas de 30 m x 30 m en áreas rurales, dividiendo la cuenca en 8 subcuencas

(Figura 5). Esto facilitó también el manejo de los datos, especialmente en el modelo TREX, donde se genera gran información de salida (mapas de infiltración, precipitación y escurrimiento superficial a distintos intervalos de tiempo).

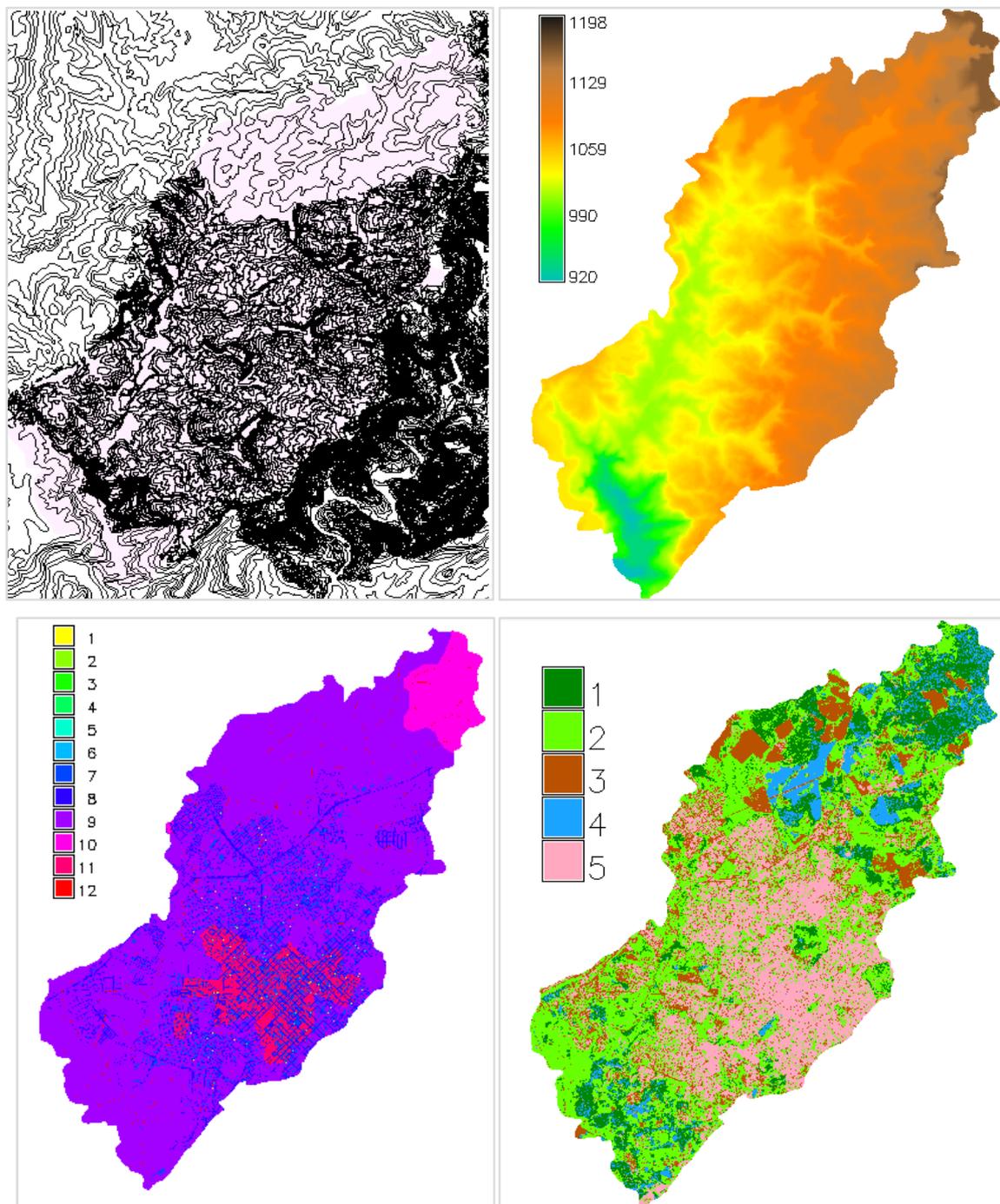


Figura 4. Mapas de ingreso para la modelación de la cuenca de Cascavel en TREX. De izquierda a derecha: curvas de nivel de la cuenca utilizado para producir MDE, MDE, mapa de tipo de suelo y mapa de uso de suelo.

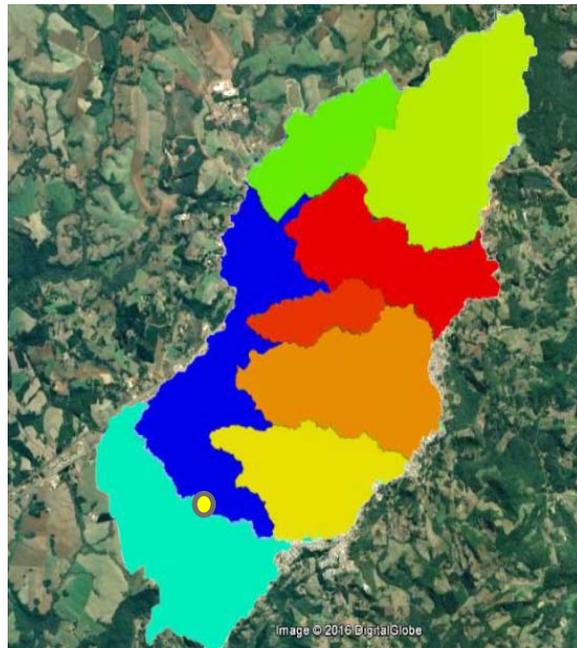


Figura 5. División de la Cuenca del Río Cascavel en ocho subcuencas para mejorar la trabajabilidad en el modelo TREX.

En SWMM se creó la red de drenaje compuesta por nodos correspondientes a las bocas de tormenta (que tienen como ingreso el flujo infiltrado en TREX en ese tipo de suelo) y nodos cauces (que tienen como ingreso el flujo infiltrado en TREX en el tipo de suelo cauce) y los conductos que representan los cauces. Estos elementos se modelaron utilizando el relevamiento realizado anteriormente para ubicar las bocas de tormenta y por mapas desarrollados por el Instituto Militar donde representan la red de drenaje

natural. Al no existir documentación de ubicación y características de conductos, se simuló la red como una red cerrada donde los conductos corren en la parte central de las calzadas y se unen entre ellos en un nodo auxiliar al intersectarse. Las bocas de tormenta descargan a la red a través de un conducto que une a las mismas al nodo auxiliar más cercano. Se procedió de la misma forma para las conexiones conductos-cauce (Figura 6).

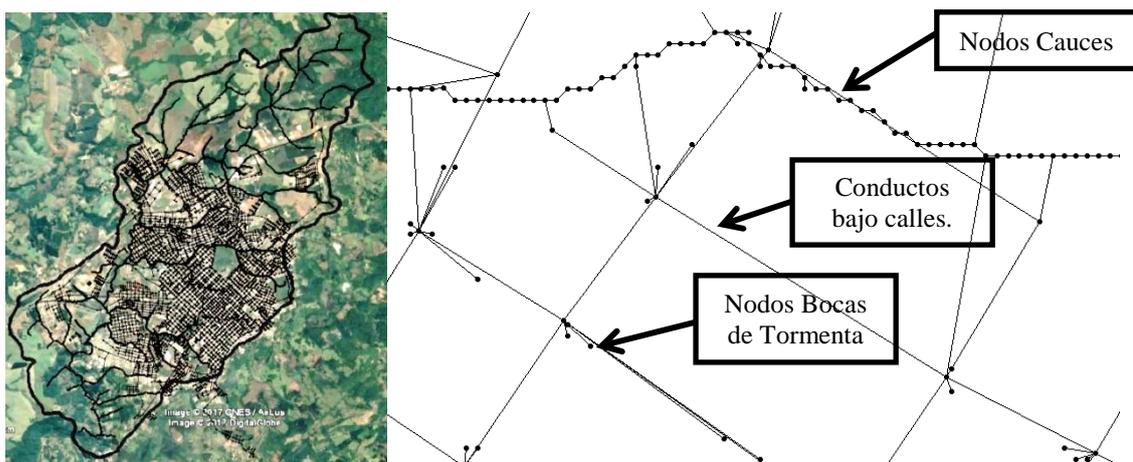


Figura 6. Izquierda vista del modelo completo de SWMM de la Cuenca de Cascavel. Derecha detalle de un sector del modelo.

De esta forma se creó un modelo que contiene 3494 nodos de conexión de conductos de calle (red

cerrada), 5285 conductos que simulan las cañerías bajo calles, 4211 nodos que representan las bocas de

tormenta en la Ciudad de Guarapuava, con su correspondientes conductos de conexión con la red de conductos de drenaje, 15095 nodos correspondientes a celdas cauces con sus correspondientes conductos de conexión, 1 embalse y 15306 datos de ingreso de caudal puntual al sistema. A estos elementos, se les asociaron los parámetros característicos para su adecuada modelación, por ejemplo, en los nodos la cota de fondo (según MDE) y profundidad y en los conductos longitud (según coordenadas de nodos), forma (según relevamiento) y rugosidad (Stehli et al., 2021).

La red de drenaje de conductos cerrados fue simulada como una malla cerrada, esto fue debido al desconocimiento de la traza real de las conducciones. Por este motivo, el método de cálculo hidráulico utilizado en SWMM fue el de la onda dinámica, para poder simular los distintos flujos que se producirán en las conducciones de la malla.

RESULTADOS

Se presentan a continuación los resultados de la calibración de los eventos seleccionados.

En base a los caudales medidos de cada evento, se extrajo de cada uno el caudal base para poder comparar entre escurrimiento directo medido y escurrimiento directo simulado. Esto es consecuencia, de que en TREX no es posible simular los fenómenos que producen variaciones en los caudales base. Para la separación del escurrimiento directo se utilizó el método de Barnes (Orsolini et al., 2000).

A continuación se presentan los resultados gráficos de los eventos calibrados y los parámetros estadísticos de ajuste (Figura 7 a 12y Tabla 1). En estas figuras los valores medidos han sido registrados por puntos, y el resultado de la simulación con TREX y SWMM con línea continua. Además se agrega el hietograma medio de la cuenca. En Tabla 1, también se presentan los valores de precipitación media caída en toda la cuenca para cada uno de los eventos.

La calibración se realizó de forma manual, ajustando los parámetros de infiltración, rugosidad del flujo mantiforme e intercepción vegetal en TREX (donde se modela la transformación lluvia-caudal) y los parámetros de rugosidad de cauces y conductos en SWMM. En el modelo de infiltración, se debe calibrar el parámetro de déficit de humedad. Este depende de cada evento debido a las condiciones antecedentes de humedad, las cuales se estimaron previamente según los valores de precipitación de los días anteriores al evento simulado y luego se ajustaron para cada evento de forma tal de mejorar los indicadores de evaluación de bondad de ajuste (Tabla 1). En algunos eventos simulados, como el evento 5 y 9 en los días previos existe un valor bajo de precipitación en la cuenca, que no se correspondería con los valores de déficit de humedad calibrado. Sin embargo, se observa por ejemplo en el evento 9 que si se tienen en cuenta 15 días antecedentes al evento, existe un evento extraordinario; del 29/06/2011 al 03/07/2011 se registra en la estación pluviográfica de Cascavel 338 mm precipitados. En cuanto a la intercepción vegetal, la misma está relacionada en TREX para cada uso de suelo, existiendo una diferencia entre los valores en áreas impermeables/construidas que los sectores boscosos y de praderas.

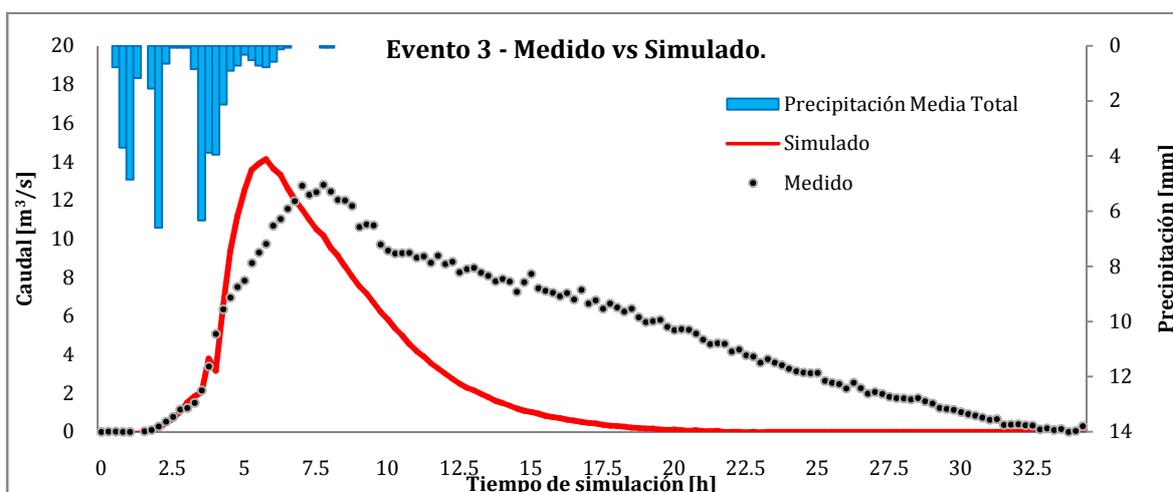


Figura 7. Comparación de escurrimientos directos medidos y simulados – Evento 3.

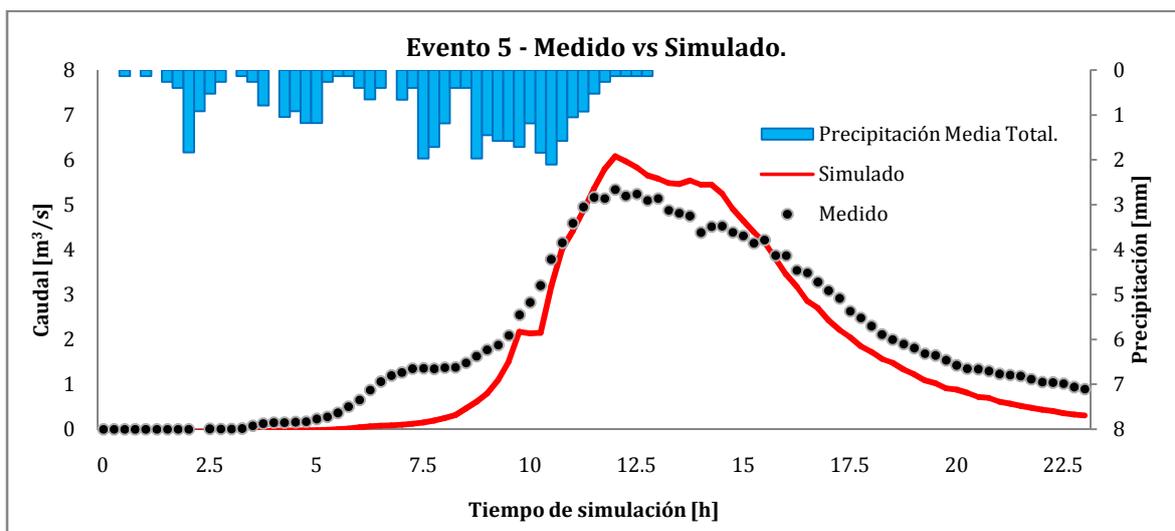


Figura 8. Comparación de escurrimientos directos medidos y simulados – Evento 5.

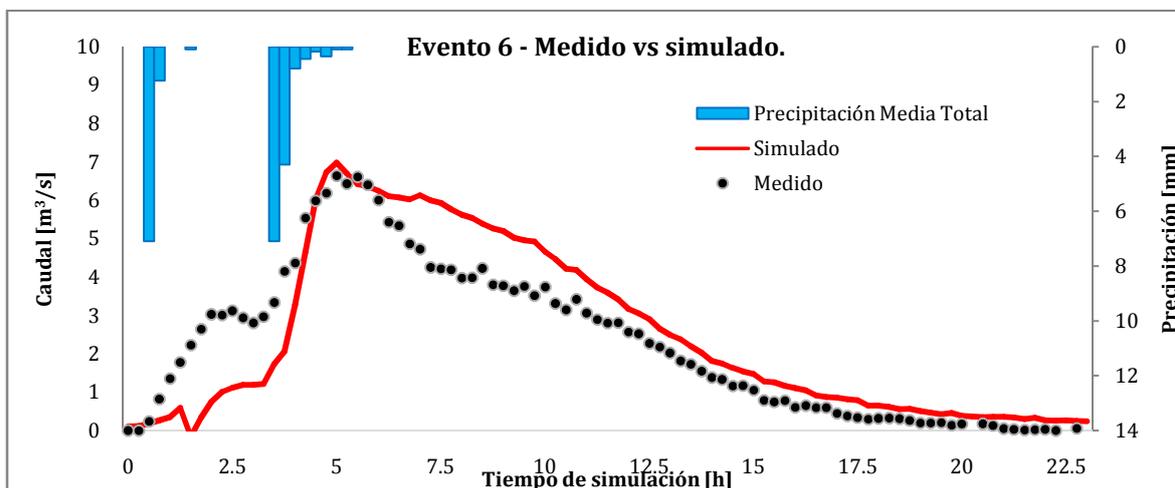


Figura 9. Comparación de escurrimientos directos medidos y simulados – Evento 6.

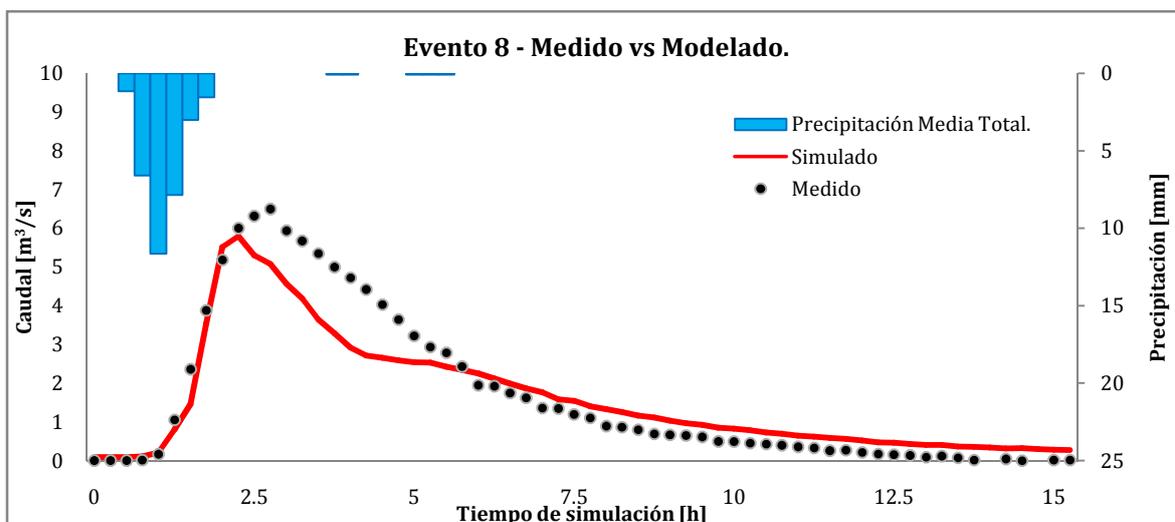


Figura 10. Comparación de escurrimientos directos medidos y simulados – Evento 8

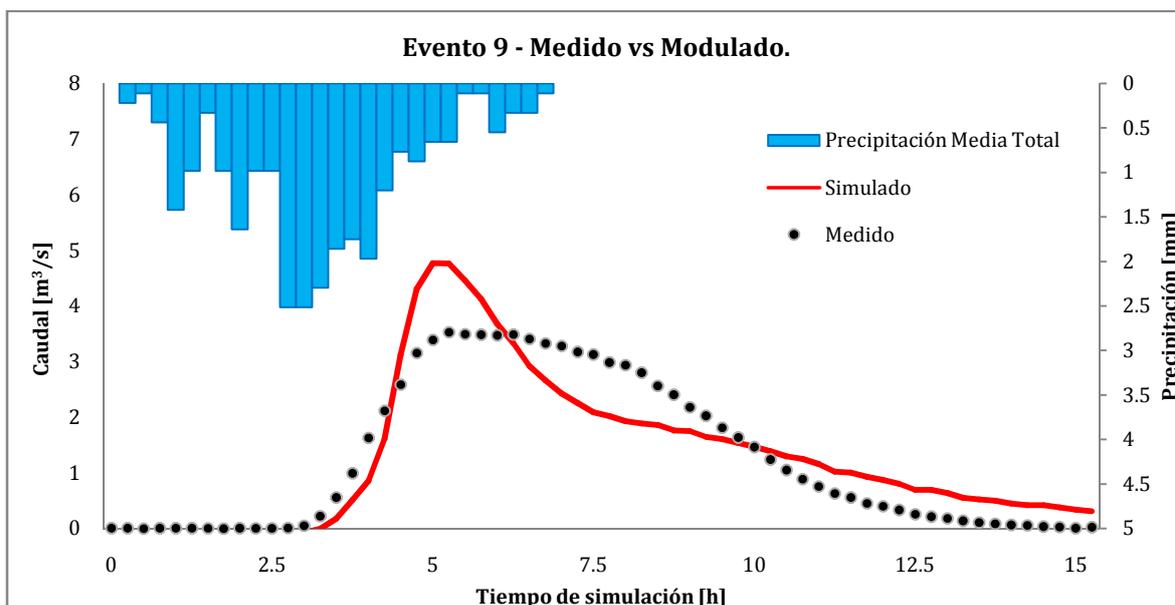


Figura 11. Comparación de escurrimientos directos medidos y simulados – Evento 9.

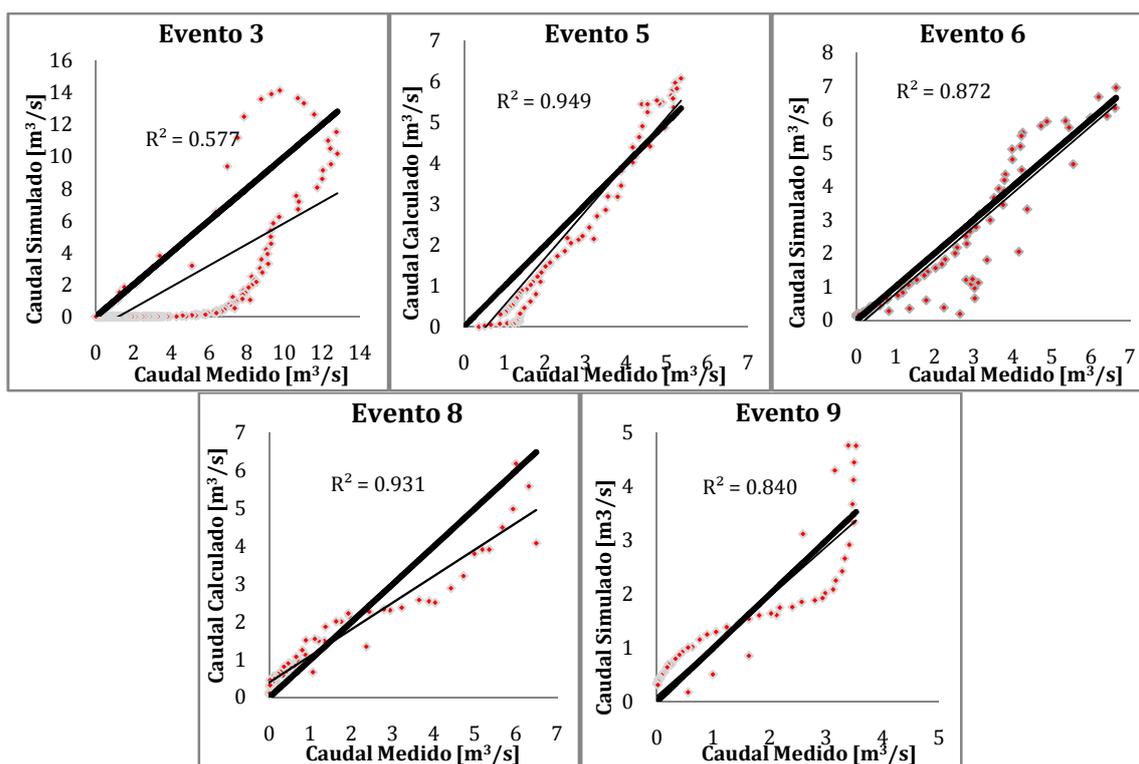


Figura 12 - Gráficos de correlación de cada uno de los eventos calibrados. En gris, la línea que representa un ajuste perfecto.

Tabla 1 - Indicadores estadísticos para evaluación de bondad del ajuste de hidrogramas obtenidos en eventos de calibración.

Evento	Fecha	P _{media evento} [mm]	P _{media 5 días previos} [mm]	R ²	NSE	PBIAS [%]	Media	Desviación estándar	Déficit de Humedad calibrado
Evento 3	08/01/2013	47.86	54.57	0.545	-0.649	48.26	3.22	1.796	0.050
Evento 5	26/08/2013	36.85	-	0.949	0.874	0.19	0.516	0.719	0.035
Evento 6	06/01/2013	43.61	22.35	0.872	0.842	9.19	0.207	0.455	0.070
Evento 8	12/12/2012	32.40	2.10	0.945	0.905	4.49	0.072	0.268	0.300
Evento 9	17/07/2011	26.68	1.50	0.840	0.832	-0.83	0.010	0.102	0.090

En la calibración, se observa en general una aceptable correlación entre los caudales simulados con los observados. Dicha correlación se aprecia observando también los resultados del coeficiente R². Sin embargo, se observa en el Evento 3 que los valores de NSE y PBIAS se alejan sensiblemente del valor ideal.

Al observar la gráfica de los hidrogramas simulados de los eventos mencionados se puede inferir algunas de las posibles causas de los desvíos entre los valores simulados y los medidos, por ejemplo se aprecia en el Evento 3 la diferencia entre el volumen de escurrimiento simulado con respecto al volumen de escurrimiento medido. En cuanto al evento 6 (Figura 9), no es posible captar un pico inicial de crecida que se da anteriormente al pico principal.

Estos errores pueden deberse a diversos motivos. En el caso de estudio puede atribuirse a la incertidumbre de la distribución temporal de las precipitaciones, ya que, como se mencionó anteriormente, se la adoptó proporcional a la distribución temporal dada por el pluviógrafo. Esto, dependiendo la naturaleza del evento considerado puede tener un cierto grado de error, más todavía en cuencas de un tamaño considerable. Lo anterior, se puede inferir de trabajos anteriores (Weber et al., 2012) en donde se demuestra que el movimiento de la tormenta al ocurrir un evento influye en la salida del sistema hidrológico.

Se analizó también la diferencia porcentual entre el volumen escurrido calculado y el volumen escurrido medido, como así también los caudales picos medidos y simulados. En las Tabla 2 se presenta lo anterior y se puede observar lo que se mencionó anteriormente respecto al evento 3 que no se pudo simular adecuadamente la rama descendente del hidrograma, por lo tanto el volumen escurrido simulado es considerablemente menor al volumen

escurrido medido. Teniendo en cuenta también para dicho evento que el caudal pico simulado es levemente superior al medido, se podría inferir que hay algún error en las precipitaciones o en las distribuciones temporal y espacial de las mismas. Adicionalmente, en la Tabla 3 se agregaron el tiempo de ocurrencia de los caudales picos de los hidrogramas medidos y simulados (tiempo desde el inicio de la precipitación de cada evento). En dicha tabla se puede observar que en general los caudales picos de los hidrogramas simulados ocurren en coincidencia o casi en coincidencia con los caudales picos medidos, exceptuando el evento 3 en donde en la simulación el caudal pico se adelanta 2.2 horas con respecto al caudal medido. Esta diferencia en el tiempo del caudal pico sumada a la diferencia del volumen escurrido entre lo simulado y medido en el evento 3, nos permite inferir que puede que exista una diferencia en la precipitación caída, principalmente en su distribución temporal. Esto último teniendo en cuenta que se tiene información de la distribución temporal de las lluvias de una sola de las tres estaciones, en la que existe el pluviógrafo, y luego para las dos estaciones pluviométricas se adoptó dicha distribución temporal. Sin embargo, se puede considerar como aceptable el grado de ajuste obtenido en los eventos seleccionados y para los pares de datos utilizados para la calibración, más aun teniendo en cuenta los grados de incertidumbre, por ejemplo en las precipitaciones y en tipología y características de la red de drenaje subterránea.

Como se mencionó anteriormente, con el procedimiento establecido se pueden obtener resultados distribuidos en toda la cuenca, tanto de escurrimientos superficiales, precipitación e infiltración (TREX) como de flujos en conductos y cauces (SWMM).

Se presentan la visualización de algunos resultados en la extensión de la cuenca (Figuras 13, 14 y 15) y

la serie de valores calibrados para los eventos seleccionados (Tabla 4).

Se observa también que en general en todos los eventos para los mayores caudales medidos se corresponde caudales simulados aún más grandes que los medidos (se observan por encima de la línea identidad del gráfico, Figura 12) y luego para caudales menores, los caudales simulados son menores que los medidos (puntos por debajo de la línea identidad del gráfico). Esto se observa en todos los eventos en mayor o menor medido, exceptuando el evento 8. Por lo tanto explicaría que para poder lograr un buen ajuste de los hidrogramas lo que se está haciendo es sobredimensionar levemente el pico de crecida y

que luego las ramas de ascenso y descenso del hidrograma simulado están por debajo del hidrograma medido. Es decir, que la crecida simulada llega antes al punto de medición que la real y a la vez se evacúa también más rápidamente. Aunque esto último pudiera indicar que se estaría utilizando en la calibración una rugosidad menor a la correcta para que la respuesta de la cuenca sea más lenta, se observa en el proceso de calibración que al utilizar una rugosidad mayor (ya sea de flujo mantiforme, de cauces o de conductos) el pico de crecida se demoraba en demasía en comparación al pico de crecida medido.

Tabla 2. Análisis de diferencias entre volumen escurridos y caudales picos medidos y simulados para los eventos de calibración.

	Volumen Escurrido			Caudal Pico		
	Medido [m ³]	Simulado [m ³]	Diferencia [%]	Medido [m ³ /s]	Simulado [m ³ /s]	Diferencia [%]
Evento 3	559457.65	289472.41	-48%	12.8	13.89	9%
Evento 5	170679.97	144601.87	-15%	5.34	6.081	14%
Evento 6	188460.82	171143.33	-9%	6.4	6.95	9%
Evento 8	93275.14	89543.03	-4%	6.49	5.63	-13%
Evento 9	70888.50	71474.18	1%	3.53	4.77	35%

Tabla 3. Tiempo de ocurrencia de caudal pico de crecida en hidrograma medido y simulado para los eventos de calibración.

	Tiempo de ocurrencia de pico.		
	Medido [horas]	Simulado [horas]	Diferencia [horas]
Evento 3	7.70	5.50	-2.20
Evento 5	12.00	12.00	0.00
Evento 6	5.00	5.00	0.00
Evento 8	2.75	2.50	-0.25
Evento 9	5.25	5.00	-0.25

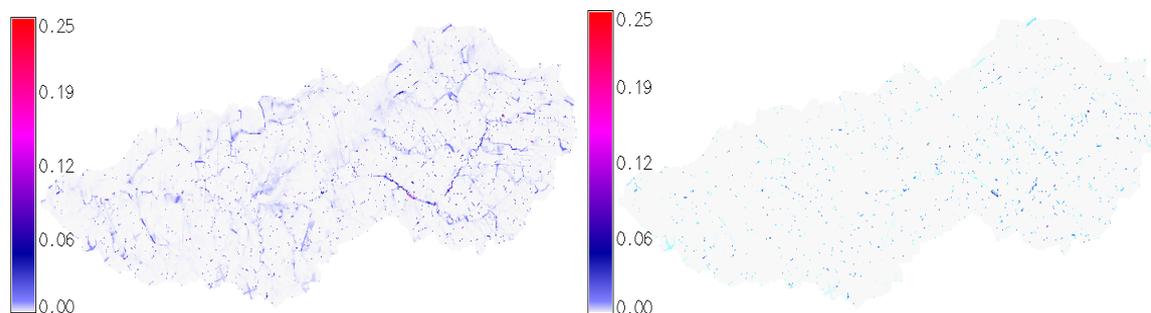


Figura 13. Altura de escurrimientos superficiales [m], subcuenca Barro Preto para los tiempos 10 y 15 horas (imagen izquierda y derecha respectivamente) de iniciada la precipitación – Evento 5.



Figura 14. Altura de escurrimientos superficiales, sector de la subcuenca Barro Preto para 10 horas de iniciada la precipitación, comparación con imagen satelital – Evento 5.

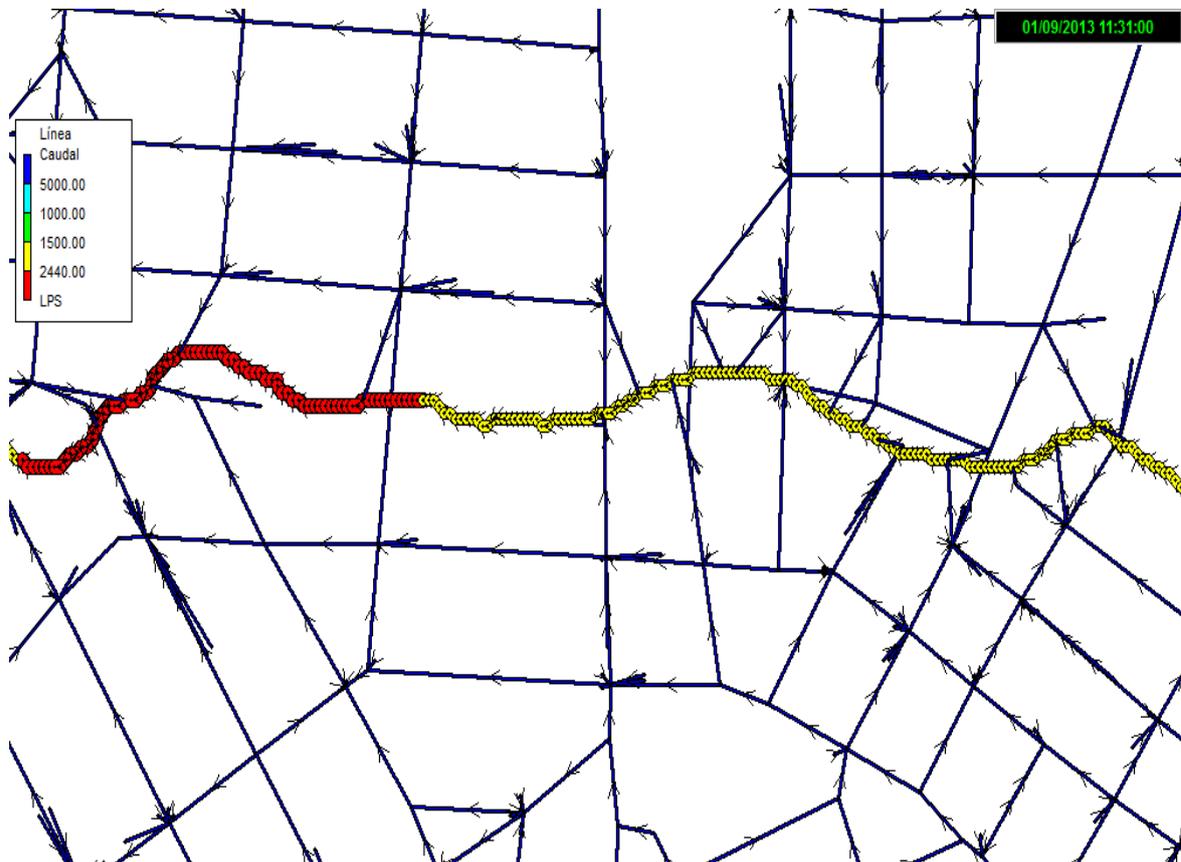


Figura 15. Caudal en cauces y conductos de un sector de la cuenca de Cascavel a 15 horas de iniciada la precipitación, visualizado en SWMM – Evento 5.

Tabla 4. Valores calibrados de los parámetros de infiltración y rugosidad del modelo TREX.

Parámetros de Infiltración			
Tipo de suelos considerados	K_h [m/s]	Altura de succión [m]	Porosidad efectiva [adimensional]
Construcciones (Impermeable)	12.00 E-25	0.1903	0.010
Calles (Impermeable)	12.00 E-25	0.1903	0.010
Lattosolo	8.33 E-8	0.3163	0.385
Nittosolos Brunos	1.77 E-7	0.3163	0.385
Nittosolos Litólicos	1.77 E-7	0.3163	0.385
Cauces Permeables/Lagunas	12.00 E-0	0.1903	1.00
Parámetros de rugosidad del modelo TREX.			
Usos del Suelo considerados	Rugosidad [n de Manning]		
Vegetación arbórea	0.300		
Vegetación rastrera	0.080		
Suelo expuesto	0.013		
Áreas húmedas	0.013		
Construido	0.013		

Para la modelación de cada evento completo se tardó aproximadamente entre 2 a 5 días para modelar el escurrimiento en TREX dependiendo el evento y entre 2 a 4 horas para modelar el sistema hidráulico en SWMM, en una computadora con un procesador Intel Core i5-3230 M, con 8.00 GB de memoria RAM instalada

aceptables teniendo en cuenta los valores que fueron reflejados en los indicadores de ajuste.

Por lo tanto, se logró obtener un modelo totalmente distribuido de la cuenca del Río Cascavel que refleja de manera aceptable su comportamiento y es posible obtener resultados en cada uno de los puntos de la cuenca, ya sea de escurrimientos superficiales, caudales en conductos, en cauces naturales, etc.

CONCLUSIÓN

A través del uso de los programas TREX y SWMM se logró realizar la calibración de un modelo totalmente distribuido en una cuenca fuertemente antropizada, pudiéndose simular elementos característicos de una cuenca urbana.

El procedimiento del trabajo en conjunto planteado entre un modelo totalmente distribuido como TREX y un modelo semi distribuido como SWMM, tuvo buenos resultados en la modelación de la cuenca urbana. Esto sigue la línea de las últimas investigaciones en modelación distribuida en áreas urbanas. Para la aplicación de este procedimiento, fue necesario la modificación parcial del código fuente del modelo TREX.

Los resultados de la calibración de ambos modelos funcionando en conjunto se pueden considerar

El trabajo permitió observar distintas dificultades que se presentan en la modelación hidrológica totalmente distribuida en una cuenca urbana, como por ejemplo: la incertidumbre que existe por la baja calidad de algunos de los datos de entrada del modelo, entre ellos: modelo digital de elevación, desconocimiento de ubicación, tamaño y disposición de los conductos de red de drenaje, datos de precipitación, etc. Por otro lado, se destaca el gran tiempo requerido para la simulación de cuencas urbanas al utilizar una resolución de 5 metros, tal cual se mencionó anteriormente, para cada evento completo se tardó aproximadamente entre 2 a 5 días para la modelación en TREX. Esta resolución fue elegida para las calles, construcciones y demás elementos del ámbito urbano. Por último, las modificaciones necesarias en los datos de ingreso, principalmente al modelo digital de elevación para poder representar lo más fielmente posible las diferencia de nivel de las calles con respecto al

terreno natural, las parcelas y las barreras materializadas por construcciones o terraplenes.

A pesar de lo anterior, los modelos y el procedimiento establecido pueden ser utilizados sin inconvenientes en distintas cuencas urbanas ya que se contemplan todos los elementos que conforman a las mismas. Se deberá tener la precaución de evaluar el costo computacional según la extensión de la cuenca y resolución adoptada.

De esta forma, se puede concluir que se desarrolló un procedimiento de trabajo entre un modelo hidrológico distribuido (TREX) y un modelo semidistribuido (SWMM) el cual se utiliza su módulo de transporte hidráulico para simular de manera completa la transformación lluvia-caudal y el escurrimiento de una cuenca urbana.

La ventaja de este procedimiento es que utiliza las mejores características de ambos modelos. En primer lugar, tiene la capacidad de simular los escurrimientos superficiales con TREX a través de información brindada en formato raster, la cual en los últimos tiempos tiene un crecimiento sostenido en cuanto a calidad y disponibilidad. De esta forma, al obtener un MDE de buena calidad a través de relevamientos o información satelital se puede simular con TREX las direcciones de los escurrimientos de manera automática sin tener que indicar criterios aproximados como por ejemplo, tiempo de concentración, pendiente media, áreas de subcuencas, etc. Lo mismo sucede con el uso de suelo, a través de la información inferida de imágenes satelitales es fácilmente aplicable al modelo TREX para definir los parámetros de tipo y uso de suelo.

Por otro lado, se aprovecha las probadas potencialidades del modelo hidráulico que contiene SWMM modelando conductos abiertos y cerrados.

Las anteriores características de cada modelo se potencian al haber modificado el código fuente de TREX para que simule el flujo que ingresa al sistema de drenaje a través de las bocas de tormenta. De esta forma, se pudieron vincular ambos modelos utilizando las mejores características de cada uno.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo quieren manifestar su agradecimiento al Conselho Nacional de

Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) de Brasil por el apoyo económico, como así también a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional (Argentina).

REFERENCIAS

- Abdullah, J., Muhammad, N. S., Muhammad, S. A., Mohammad Amin, N. F., y Tahir, W. (2019). Research trends in hydrological modelling. *Jurnal Teknologi*, 81(4). <https://doi.org/10.11113/jt.v81.13080>
- Armitage, N., Fisher-Jeffes, L., Carden, K., Winter, K., Naidoo, V., Spiegel, A., Mauck, B. y Coulson, D. (2014). *Water Sensitive Urban Design (WSUD) for South Africa: Framework and Guidelines*, WRC Report No. TT 588/14. Water Research Commission, Pretoria, South Africa.
- Chow V.T., Maidment R. y Mays L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Mc Graw-Hill.
- Courty, L. G., Pedrozo-Acuña, A., y Bates, P. D., (2017). Itzi (version 17.1): an open-source, distributed GIS model for dynamic flood simulation. *Geoscientific Model Development*, 10(4), 1835-1847.
- England, J., Velleux, M. y Julien, P. (2007). Two-dimensional simulations of extreme floods on a large watershed. *Journal of Hydrology*, 347(1), 229-241.
- EPA (2005). *SWMM – Manual del Usuario* (Versión 2005, en español).
- EPA (2015). *SWMM - Storm Water Management Model Reference Manual – Volume I – Hydrology*.
- Freni, G, Maglionico, M. y Federico Di V. (2003). *Estado del arte en la modelación de drenaje urbano*. CARE-S Report D7.
- Giangola-Murzyn, (2013). *Modelación y parametrización hidrológica de la ciudad, resistencia a inundaciones*. Tesis de Doctorado. Université Paris-Est.
- Gomes, E. de S. (2014). *A dinâmica hidrológica fluvial em bacias hidrográficas com diferentes taxas de impermeabilização do solo em Guarapuava/PR*. Dissertação como requisito de Mestre em Geografia, UNICENTRO, Guarapuava, Parana.
- Healy, R. W. (1990). *Simulation of solute transport in variably saturated porous media with supplemental information on modifications to the U.S. Geological Survey's Computer Program VS2D*, U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 90-4025, 125 p.

- INSA-Valor, S. O. G. R. E. A. H. (1999). *Canoe: logiciel d'hydrologie urbaine, conception et évaluation de réseaux d'assainissement, simulation des pluies, des écoulements et de la qualité des eaux*. Manuel de l'utilisateur.
- Jorquera E., Weber J.F. y Reyna S.M. (2012). *Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada*. Primer Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos. Ezeiza, Bs. As.
- Julien, P. Y. y Saghafian, B. (1991). *CASC2D user's manual: a two-dimensional watershed rainfall-runoff model*. CER; 90/91-12.
- Kleidorfer, M., Deletic, A., Fletcher, T. D. y Rauch, W. (2009). Impact of input data uncertainties on urban stormwater model parameters. *Water Science and Technology*, 60(6), 1545-1554.
- Lind, J. (2015). *Stormwater modelling tools: a comparison and evaluation*. Tesis de Doctorado. Universidad de Uppsala, Suecia.
- Mays, W. M. (2001). *Stormwater Collection Systems Design Handbook*. Mc Graw-Hill.
- Mitchell, V. G., Duncan, H., Inman, M., Rahilly, M., Stewart, J., Vieritz, A., Holt, P., Grant, A., Fletcher, T., Coleman, J., Maheepala, S., Sharma, A., Deletic, A. y Breen, P. (2007). *Integrated Urban Water Modelling - Past, Present, and Future*. Joint 13th International Rainwater Catchment Systems Conference and the 5th International Water Sensitive Urban Design Conference, Conference 21-23 August, 2007, Sydney, Australia.
- Mobayed, K. N. (2009). Simulador de inundaciones en áreas urbanas: Un modelo de pronóstico con fines de alertamiento. *CIENCI@UAQ*, 2, 72-90.
- Mobayed K. N. y Cruickshank V. (1998). *Ordenamiento sistemático de redes de drenaje para la modelación físico-hidrológica*. In: XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Oaxaca, México. pp: 611-620.
- Mobayed K. N. y Ortiz, A. (2000). *Modelo integral simplificado de las ecuaciones de Saint-Venant para el tránsito de avenidas*. In: XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Córdoba, Argentina. 8 p.
- Ochoa-Rodríguez, S., Wang, L-P., Assel J.V., Gires A., Ichiba A., Bruni G y ten Veldhuis M. C. (2013). *Urban Pluvial Flood Modeling: Current Theory and Practice*. Paris: RainGain. http://www.raingain.eu/sites/default/files/wp3_review_document.pdf
- Orsolini, H. E., Zimmermann, E.D. y Basile, P.A. (2000). *Hidrología: Procesos y Métodos*. ISBN 950-673- 254-4. UNR Editora. Editorial de la Universidad Nacional de Rosario.
- Puricelli, M. M. (2003). *Estimación y distribución de parámetros del suelo para la modelación hidrológica*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
- Rangari, V. A., Patel, A. K. y Umamahesh, N. V. (2015). *Review of urban stormwater models*. HYDRO 2015, 20th Int. Conf. On Hydraulics, IIT Roorkee, India.
- Riccardi, G. (2004). *Hidrología en medios antropizados*. Libro electrónico. CURIHAM, FCEIA-UNR. <http://cvirtual.fceia.unr.edu.ar>.
- Riccardi, G. A. (1997). La transformación lluvia-caudal en ambientes rurales y urbanos. Los procesos hidrológicos y el modelado. *Cuadernos del CURIHAM*, 4, 69-87.
- Rossman, L. A. (2010). *Storm water management model user's manual, version 5.0* (p. 276). Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- Salvadore, E., Bronders, J., y Batelaan, O. (2015). Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. *Journal of hydrology*, 529, 62-81
- Sitterson, J., Knightes, C., Parmar, R., Wolfe, K., Muche, M. y Avant, B. (2017). *An Overview of Rainfall-Runoff Model Types*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-17/482, 2017.
- Stehli P.T., Weber J.F. y Jorquera E. (2012). *Implementación de un modelo hidrológico espacialmente distribuido de simulación de eventos*. Primer Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos. Ezeiza, Bs. As.
- Stehli, P., Weber J. y Vestena L. (2016). *Avances en la aplicación de un modelo hidrológico distribuido en una Cuenca fuertemente antropizada*. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica 2016.
- Stehli, P. T., Weber, J. F., y Vestena, L. R. (2021). Mapeamento dos bueiros na bacia do Rio Cascavel, cidade de Guarapuava, Brasil. *Brazilian Journal of Development*, 7(3), 30490-30508.
- Tucci, C. E. (1998). *Modelos hidrológicos*. UFRGS.
- Velleux, M., England, J. y Julien P. (2008). *TREX: Spatially Distributed Model to Assess Watershed Contaminant Transport and Fate*. *Science of the Total Environment*, 404(1):113-128.
- Weber, J. F., Stehli, P. T., Jorquera, E. (2012). Simulación de la respuesta hidrológica de una

cuena ante el movimiento de una tormenta. *Mecánica Computacional*, XXXI(4), 579-603. Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Salta. ISSN: 16666070.

Tipo de Publicación: ARTÍCULO.

modelos TREX y SWMM para la simulación hidrológica-hidráulica distribuida en una cuenca fuertemente antropizada. *Cuadernos del CURIHAM*. 27, 23-45. DOI: <https://doi.org/10.35305/curiham.v27i.168>

Trabajo recibido el 25/09/2021 y aprobado para su publicación el 29/10/2021.

COMO CITAR

Stehli, P. T., Weber, J. F. y Vestena, L. R. (2021). Aplicación y calibración de una integración de los

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

ESQUEMA EXPLÍCITO PARA LA SOLUCIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO NO SATURADO EN MEDIOS HETEROGÉNEOS BAJO CONDICIÓN DE NIVELES FREÁTICOS SOMEROS.

EXPLICIT SCHEME FOR THE NUMERICAL SOLUTION OF UNSATURATED FLOW IN HETEROGENEOUS MEDIA UNDER SHALLOW WATER TABLE CONDITIONS.

Erik Zimmermann^{(1) (2)}

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

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

e-mail: erikz@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Se propone un esquema numérico explícito de 4 celdas (4C) para la integración de las ecuaciones de flujo en la zona no saturada diseñado para áreas de llanura con niveles freáticos someros. El esquema contempla un coeficiente de ponderación para definir la conductividad hidráulica no saturada representativa entre celdas adyacentes y considera la heterogeneidad de cada horizonte edáfico. El esquema 4C es comparado con estimaciones realizadas por el HYDRUS-1D en dos grupos de ensayos modelados, uno con saturación de superficie durante 10 días y otro con series de precipitaciones durante 96 días. Los ensayos numéricos se hicieron para 14 tipos de asociaciones de suelos características de la zona de estudio (A° del Azul, Bs. As.) y 6 profundidades freáticas (entre 300 y 50 cm). Para el primer ensayo, la respuesta del esquema se considera aceptable con diferencias porcentuales del orden al 19%. En el segundo, el esquema propuesto estimó satisfactoriamente las recargas freáticas con diferencias porcentuales del 1% entre ambos esquemas. Complementariamente, mostró un muy buen ajuste en las evoluciones de contenidos de humedad de cada estrato. Estos resultados validan el esquema simplificado propuesto permitiendo una respuesta rápida en términos de tiempo computacional.

Palabras clave: esquema numérico explícito, flujo no saturado, llanura, freática somera.

ABSTRACT

An explicit 4-cell (4C) numerical scheme is proposed for the integration of the flow equations in the unsaturated zone designed for plain areas with shallow water tables. The scheme contemplates a weighting coefficient to define the representative unsaturated hydraulic conductivity between adjacent cells and considers the heterogeneity of each edaphic horizon. The 4C scheme is compared with estimates made by HYDRUS-1D in two sets of modeled tests, one with surface saturation for 10 days and the other with rainfall series for 96 days. The numerical tests were performed for 14 types of soil associations characteristic of the study area (A° del Azul, Bs. As.) and 6 phreatic depths (between 300 and 50 cm). For the first trial, the response of the scheme is considered acceptable with percentage differences of about 19%. In the second, the proposed scheme estimated satisfactorily the phreatic recharge with percentage differences of 1% between both schemes. In addition, it showed a very good adjustment in the evolution of moisture contents of each stratum. These results validate the proposed simplified scheme allowing a fast response in terms of computational time.

Keywords: explicit scheme, unsaturated flow, plain, shallow water table.

INTRODUCCION

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. Son los denominados Sistemas Hidrológicos Típicos (SHT).

El concepto clásico de cuenca, en sentido estricto, refleja sólo una parte de los posibles sistemas hidrológicos 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 denominados Sistemas Hidrológicos No Típicos (SHN).

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, Kruse y Zimmermann 2002). Hay un aspecto clave en el funcionamiento hidrológico de esos sistemas que es la marcada interacción de la hidrología superficial con la subterránea.

En función de los niveles freáticos los excedentes hídricos pueden incorporarse al perfil del suelo o generar derrames y acumulación superficial de consideración. La zona no saturada (ZNS) representa la interfaz entre los procesos superficiales y subterráneos, y la estimación correcta de los flujos de intercambio entre ambos ambientes a través de ella es crucial a la hora de realizar simulaciones mediante modelos hidrológicos en áreas de llanura. Como una alternativa aplicable a estos sistemas se han desarrollado esquemas de modelación, basados en celdas interconectadas representativas de los ambientes que intercambian materia, energía e información. Un ejemplo de esto es el modelo de Simulación Hidrológica de Áreas de Llanura, SHALL (Zimmermann y Riccardi 2000).

El modelo es hidrodinámico cuasi-3D, que contempla las componentes subterráneas y superficiales de flujos de agua, conjuntamente con los flujos verticales hacia el acuífero y la atmósfera.

En cada celda ó unidad de discretización espacial, el modelo SHALL puede cuantificar dinámicamente variables de estado (almacenamientos por intercepción, superficial, en el perfil del suelo y subterráneo) y flujos de intercambio (evapotranspiración, ascenso capilar, escurrimiento superficial, mantiforme y encauzado, a superficie libre y a través de constricciones -puentes, alcantarillas, sobrepaso de terraplenes, etc.-, infiltración, percolación profunda y escurrimiento subterráneo). La aptitud de conectar la hidrología de superficie con la subterránea, lo habilita para realizar predicciones acerca de evoluciones en los procesos hidrológicos provocados por acciones antrópicas a escala de cuenca y en el largo plazo.

El modelo ha sido aplicado en sistemas abiertos del sur santafesino (Zimmermann y Riccardi 2003, Méndez Zacarías y Zimmermann 2011) y sistemas cerrados pampeanos (Zimmermann y Mecca 2010). Actualmente se prevé la aplicación del modelo en un sector deprimido de la cuenca del arroyo del Azul, que conforma la vertiente sur del río Salado (provincia de Bs. As.). Es aquí donde los niveles freáticos se manifiestan someramente otorgando una particularidad a la modelación de cierta complejidad.

Con fines de adaptación a esta realidad es que se ha propuesto un esquema numérico novedoso para el flujo de intercambio superficial-subterráneo para áreas de niveles freáticos someros, el cual se denominó 4C (cuatro celdas). El esquema propuesto contempla la heterogeneidad de la ZNS y, a su vez, presenta simplicidad y rápida resolución en términos de tiempo computacional. Este nuevo esquema numérico se ha incorporado en la estructura del modelo hidrológico-hidrodinámico SHALL.

Es el propósito de este trabajo comparar el esquema 4C con estimaciones realizadas por otros modelos de flujo en ZNS de reconocida trayectoria como el HYDRUS-1D (Simunek *et al.*, 1998) para ejemplos propuestos y analizar su posible performance en la aplicación del modelo en las áreas deprimidas del arroyo del Azul.

AREA DE ESTUDIO

La cuenca del arroyo del Azul se ubica en la zona central de la provincia de Buenos Aires, entre los meridianos 58° 51' y 60° 10' de longitud oeste y paralelos 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).

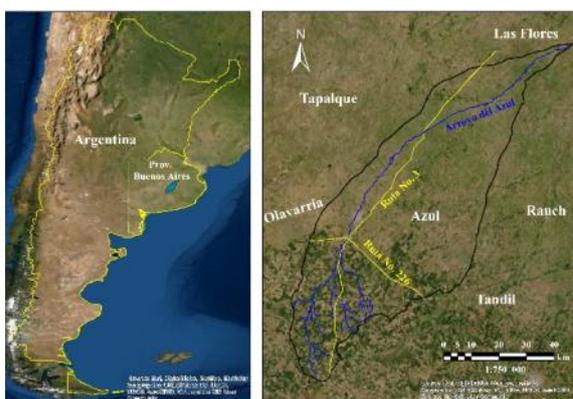


Figura 1. Ubicación relativa de la cuenca del arroyo del Azul, y principales localidades y vías de comunicación.

presencia de niveles freáticos muy someros (50-100 cm de profundidad) en casi su totalidad, y durante gran parte del año.



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

Entre ambos ambientes se desarrolla una zona de transición, caracterizada por suaves ondulaciones.

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 No Típico. Específicamente se ha concentrado el interés en la modelación de un sector del área más deprimida de la cuenca (Figura 2).

El dominio de modelación consiste 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. Para cumplimentar con los fines comparativos es necesario caracterizar físicamente el medio que constituye la ZNS.

Una característica marcada del área de estudio es la

Estos dos escenarios, características físicas del medio y presencia de napa somera, marcan las condiciones que deben respetarse en las simulaciones a comparar.

Caracterización Edafológica

Para este propósito se contó con información elaborada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) la cual fue cartografiada digitalmente obteniendo un mapa con asociaciones de perfiles típicos de suelos. En el área de estudio se detectaron 18 series de suelos que se combinan dando lugar a 23 asociaciones, de las cuales se seleccionaron las más representativas para este estudio. En cada perfil de las series, en función de su profundidad y su estratigrafía, se detallan en las cartas de INTA entre 3 y 8 horizontes de los cuales se ha publicado la composición textural, junto a otros parámetros tales como contenido de materia orgánica, contenido de carbono, capacidad de intercambio catiónico, pH, etc. Con esta información, aplicando funciones de pedotransferencia de reconocida representatividad en la región pampeana (Zimmermann y Basile 2008, 2011, 2014) se obtuvieron los parámetros hidráulicos respectivos para las series de suelos en las simulaciones. Los parámetros hidráulicos de la ZNS que se estimaron son los siguientes: conductividad hidráulica saturada; potencial de entrada de aire y conectividad de poros para la curva de retención (modelo de Brooks-Corey) y humedades volumétricas

residuales y de saturación. En primer lugar se estimaron los parámetros medios para cada serie de suelo en toda su profundidad y luego en función de ellos se valoraron

los parámetros para cada asociación ó consociación de suelos ponderando con la fracción de series de suelos que la componen (Figura 3).

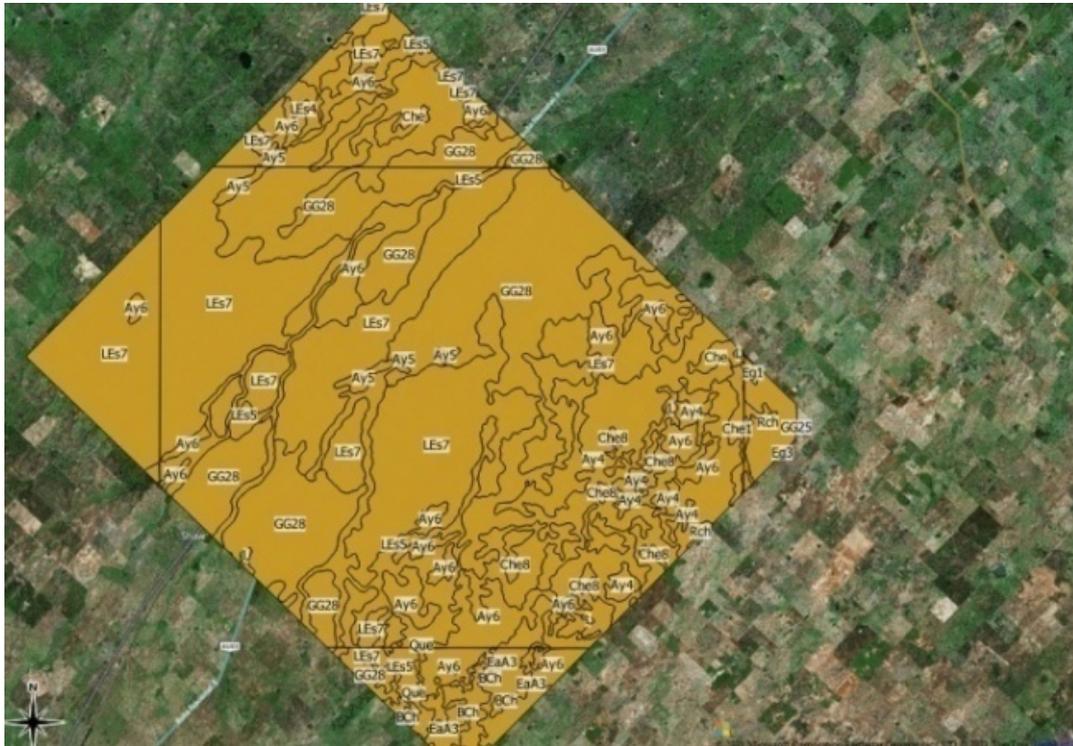


Figura 3. Mapa de ubicación de asociaciones de suelos en el área de estudio

Para estimar humedades características se emplearon las funciones propuestas por Vereecken *et al.* (1989), para densidad aparente la fórmula de Tomasella y Hodnett (1998), para el potencial de entrada de aire la fórmula de Wösten *et al.* (1999) y las conductividades hidráulicas saturadas la fórmula de Saxton *et al.* (1986).

En todos los casos se consideró discriminar los parámetros por horizontes edáficos con el propósito de caracterizar la heterogeneidad del perfil.

MODELO DE FLUJOS 4C PROPUESTO PARA LA ZONA NO SATURADA.

El modelo está basado en la ecuación de Richards, para estimar la redistribución de humedad en la ZNS y los montos de agua intercambiados con la atmósfera y el acuífero. Solamente está contemplado el flujo en la dirección vertical. La resolución de la ecuación de continuidad (ecuación 1) se realiza finalmente en términos del contenido volumétrico de humedad, θ , para conocer una de las variables del balance hidrológico de manera directa aunque la ecuación de flujo se plantea

en términos del potencial mátrico, ψ , (ecuación 2):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} \quad (1)$$

$$q = - K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \quad (2)$$

donde q es la velocidad de Darcy del flujo no saturado, θ el contenido volumétrico de humedad, z la coordenada vertical (positiva hacia arriba), $K(\theta)$ la conductividad hidráulica no saturada, $\psi(\theta)$ el potencial mátrico o potencial de succión.

El medio poroso no saturado se representa en forma discreta mediante un conjunto de 4 celdas que se extienden verticalmente desde la superficie hasta el nivel freático NF, tres celdas representativas de cada horizonte edáfico (A, B y C) y la última celda sumergida en el acuífero freático la cual representa la condición de borde inferior (Figura 4).

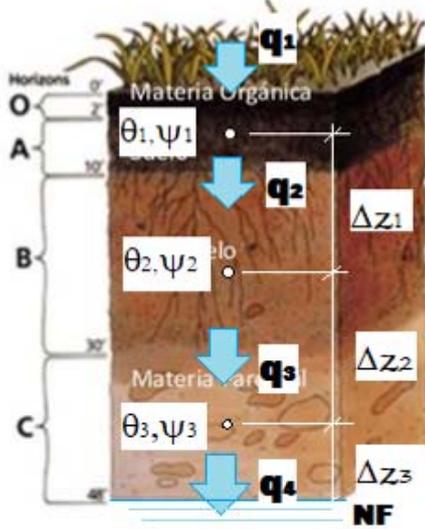


Figura 4. Esquema de discretización de la ZNS

Los 3 horizontes edáficos están presentes en la zona de estudio (caracterizada por suelos molisoles). Cada celda (horizonte) con su contenido de humedad θ_i , potencial mátrico ψ_i y sus intercambios de flujo q_i determinados, separadas por distancias variables Δz_i según las asociaciones de suelos que las caracterizan. Para la resolución de las ecuaciones (1) y (2) se ha propuesto un esquema numérico de tipo explícito en diferencias finitas. El esquema es centrado en el espacio y progresivo en el tiempo. En los bordes de celdas se evalúan los flujos de intercambio y en los centros de celdas se estiman las humedades y potenciales:

$$\theta_j^{n+1} = \theta_j^n - \frac{2\Delta t}{\Delta z_j + \Delta z_{j+1}} (q_j^n - q_{j+1}^n); j=1, jf \quad (3)$$

$$q_j^n = -K_\epsilon \left(\frac{\psi_{j-1}^n - \psi_j^n}{\Delta z_{j-1}} + 1 \right); j=2, jf+1 \quad (4)$$

donde j y n representan los índices de discretización espacial y temporal, respectivamente, mientras que jf es un indicador de la celda que alcance el nivel freático. Como valor “representativo” de la conductividad hidráulica no saturada K_ϵ se propone aquí:

$$K_\epsilon = \epsilon K_{\min} + (1 - \epsilon) K_{\max} \quad (5)$$

donde K_{\min} y K_{\max} son las conductividades

hidráulicas no saturadas mínima y máxima entre los estratos contiguos, respectivamente, y ϵ un coeficiente de ponderación ($0 < \epsilon < 1$). De esta manera, ϵ pondera el peso del estrato menos permeable en el valor del flujo no saturado.

La secuencia de cálculo es la siguiente: (a) Partir de una condición inicial de humedades θ_j^0 en el perfil, (b) resolver la ecuación de flujo (ecuación 4) para las celdas no saturadas, (c) resolver la ecuación de continuidad (ecuación 3) determinando las humedades del perfil en el siguiente paso de tiempo y (d) retomar paso (b) hasta tiempo de finalización de la simulación.

Para las condiciones de contorno, se plantea en el borde superior una condición de flujo establecida balanceando la capacidad de infiltración y la intensidad de precipitación:

$$q_1^n = \max \left[-K_\epsilon \left(\frac{-2\psi_1^n}{\Delta z_1} + 1 \right); -i^n \right] \quad (6)$$

donde i^n es la intensidad de lluvia efectiva, estimada como la intensidad de precipitación (lámina caída sobre intervalo de tiempo) que no es interceptada por la vegetación. El primer término de la ecuación (6) representa la capacidad de infiltración y el segundo la disponibilidad de agua para infiltrarse.

Como condición de borde inferior se considera la última celda incluida en la capa acuífera con humedad de saturación y potencial mátrico respectivo igual a cero:

$$\theta_{jf}^n = \theta_s; \psi_{jf}^n = 0 \quad (7)$$

Deben conocerse parámetros del suelo tales como las curvas de conductividad hidráulica $K(\theta)$, y de retención de humedad $\psi(\theta)$. En el presente trabajo se han adoptado las relaciones de Brooks-Corey cuyos parámetros para cada horizonte y asociación de suelos analizada se han obtenido mediante ecuaciones de pedotransferencia, según se ha detallado previamente. Los lazos de histéresis entre secado y mojadura no se han tenido en cuenta.

Este submodelo de flujos en la ZNS se ha incorporado en el contexto del modelo de simulación SHALL que se ha descrito en la introducción.

MODELO DE REFERENCIA HYDRUS-1D

HYDRUS-1D, es un software diseñado para la simulación del movimiento de solutos, calor y agua en un medio unidimensional con saturación variable (Simunek *et al.*, 1998). El programa HYDRUS resuelve numéricamente la ecuación de Richards para el flujo de agua en medio no saturado y las ecuaciones de tipo convección-dispersión para el transporte de calor y solutos. La versión empleada incorpora un término de sumidero para tener en cuenta la absorción de agua por las raíces de las plantas, también puede considerar porosidad dual con una fracción del contenido de agua móvil y fracción inmóvil, aunque en los ejemplos que se analizaron no se emplearon estos complementos. La región de flujo puede estar compuesta por suelos heterogéneos o estratificados.

La parte de flujo de agua del modelo puede tratar con límites prescritos de altura y flujo, límites controlado por las condiciones atmosféricas, así como por las condiciones de frontera de drenaje libre. Las ecuaciones de flujo y transporte que gobiernan se resuelven numéricamente usando elementos finitos lineales tipo Galerkin. HYDRUS también incluye una optimización de parámetros de reacción y transporte de solutos y/o hidráulicos del suelo mediante un algoritmo de tipo Marquardt-Levenberg para la estimación inversa de los mismos.

El programa original se ha complementado con un menú de interfase gráfica para facilitar la carga de datos e interpretación de resultados (Simunek *et al.*, 2005). El programa ha sido ampliamente utilizado en la solución de problemas de flujo y transporte de la ZNS y constituye un software de referencia mundial.

ENSAYOS REALIZADOS

Descripción general

El objetivo primordial, y sobre el cual se hará hincapié en las comparaciones, es lograr una satisfactoria estimación de la percolación acumulada (al final de cada ensayo) del perfil bajo diversas situaciones en sus contornos. Esto se ve justificado sobre la idea que el esquema propuesto para el flujo en la ZNS representa la interfase entre hidrología de superficie y subterránea en el modelo SHALL, por ende es importante una buena representación de los flujos de intercambios con ambos ambientes, por

encima de una buena representación de la distribución de los contenidos de humedad en el perfil de suelo.

Además, dado que la composición textural de los perfiles de suelo tienen un importante contenido de arcilla y los flujos se prevén lentos, se propusieron simulaciones en el largo plazo para contemplar la llegada desde la superficie al nivel freático.

Las simulaciones sólo se realizaron para el flujo hidráulico unidimensional, con tres capas representativas de la heterogeneidad del perfil (horizontes edáficos), sin considerar porosidad dual ni histéresis en las curvas de conductividad hidráulica y de retención de humedad.

La condición de borde superior consistió en flujo establecido para el primer ensayo y una serie de eventos de precipitación a lo largo de un período de simulación, como condición variable en el tiempo, en el segundo.

La condición de borde inferior consistió en un valor de potencial mátrico preestablecido (nulo) a la profundidad coincidente con el nivel freático adoptado en cada ensayo.

La condición inicial se propuso con el perfil de humedad en equilibrio, es decir, $\psi(z) = -z_{NF} - z$, donde z es la coordenada vertical ($z=0$ en la superficie y el sentido positivo del eje z es ascendente).

Para las simulaciones con el modelo HYDRUS-1D, se discretizó cada perfil de suelo con intervalos uniformes de 5 cm para poder analizar el flujo a través de la ZNS, comenzando por el nodo 1 desde la superficie y avanzando en profundidad hasta la freática.

Se adoptaron los pasos máximos y mínimos de tiempo sugeridos por el programa para simulación numérica, así como también para los criterios de iteración y control de paso de tiempo.

Las simulaciones con el esquema de 4 celdas propuesto se hicieron bajo las mismas funciones de curva de retención y condiciones de borde propuestas para HYDRUS. La discretización del perfil consistió en hacer coincidir con los baricentros de cada perfil edáfico con los nodos de simulación de los perfiles de humedad y potencial mátrico, mientras que el nodo de condición de flujo inferior se seleccionó en función de la profundidad freática, variable en cada ensayo.

Como el esquema propuesto es de tipo explícito, se verifica en cada momento de simulación la condición de Courant.

En principio, de las 23 asociaciones de series de suelos presentes área de estudio, descritas precedentemente, se seleccionaron 14 representativas para realizar los ensayos comparativos. Los diferentes perfiles edáficos se grafican esquemáticamente en la Figura 5.

La composición textural general de los perfiles es franca, con un tercio de cada fracción (arena, limo y arcilla). Los horizontes A son predominantemente francos-franco arenosos con un 23% de arcilla, 37% de limo y 40% de arena en términos medios. Los horizontes B son predominantemente franco arcillosos, con un 44% de arcilla, 31% de limo y 25% de arena. En los horizontes C con frecuencia hay presencia de tosca (cementado con carbonatos).

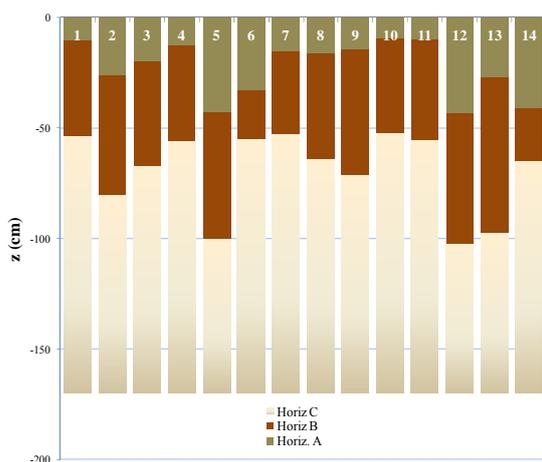


Figura 5. Esquema de los perfiles de suelo analizados

En Tabla 1, se resumen las principales características de los 14 perfiles edáficos analizados, el símbolo de la asociación respectiva cuya distribución geográfica se muestra en la Figura 3, la serie principal del perfil de suelos dominante, el nodo que representa la profundidad de cada horizonte, las propiedades hidráulicas de cada estrato y los nodos de observación que coinciden con los baricentros del esquema de 4 celdas simplificado que se propone como alternativa.

Cuantificación de las comparaciones

Para cuantificar el grado de cercanía entre las dos estimaciones de la percolación (HYDRUS y esquema 4C) se consideraron, a saber: el coeficiente

de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el error medio cuadrático (RMSE), el sesgo (BIAS) y un error porcentual (EP) definidos bajo las siguientes formulaciones:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (R_{4C}^i - R_{Hy}^i)^2}{\sum_{i=1}^N (R_{Hy}^i - R_{Hy}^{med})^2} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (R_{4C}^i - R_{Hy}^i)^2}{N}} \quad (9)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (R_{4C}^i - R_{Hy}^i)}{N} \quad (10)$$

$$EP = 100 \frac{BIAS}{R_{Hy}^{med}} \quad (11)$$

donde N es el número de ensayos realizados, R_{4C}^i y R_{Hy}^i representan las recargas acumuladas al nivel freático realizadas con el esquema de 4 celdas e HYDRUS-1D en el ensayo i, respectivamente y R_{Hy}^{med} es el promedio de recargas acumuladas obtenidas mediante HYDRUS-1D para todos los ensayos.

Se consideró el coeficiente de ponderación ϵ variable entre 0 y 1, calculando las recargas R_{4C} para distintos ϵ variando con intervalos de 0.05, y evaluando los estadísticos de ajuste para cada ensayo.

RESULTADOS

Ensayo 1: Intensidad de lluvia constante durante 10 días

Una primer simulación se propuso con un flujo de baja intensidad constante de 0.5 mm/h durante 10 días, como condición de borde superior, lo que resulta en una superficie casi permanentemente encharcada.

En el borde inferior se propusieron diferentes profundidades freáticas, a saber: 2 m, 1.5 m, 1 m y 50 cm, todas representativas del sector de estudio. No se consideraron profundidades mayores porque, para el tiempo de simulación propuesto, el flujo no las alcanzaría dadas las bajas permeabilidades de los estratos iluviales (horizonte B), principalmente.

Tabla 1. Características de los perfiles edáficos analizados

Perfil Nº	Nodos/estrato	θ_r	θ_s	α		n	Ks	Nodos Observ.
				l/cm	cm/h			
1	2	0.02	0.45	0.067	0.33	0.94	1	
LEs7	11	0.08	0.39	0.030	0.33	0.12	6	
La Escocia	22	0.05	0.41	0.048	0.33	0.43	17	
2	5	0.03	0.43	0.091	0.33	0.68	3	
Ay6	16	0.08	0.39	0.032	0.33	0.15	11	
Ayacucho	30	0.03	0.43	0.091	0.33	0.68	23	
3	4	0.03	0.43	0.091	0.33	0.68	2	
GG28	13	0.08	0.39	0.032	0.33	0.15	9	
Gral Guido	28	0.03	0.43	0.091	0.33	0.68	21	
4	3	0.03	0.43	0.091	0.33	0.68	1	
Che	11	0.08	0.39	0.031	0.33	0.13	7	
Chelforó	26	0.03	0.43	0.077	0.33	0.62	19	
5	9	0.03	0.42	0.067	0.33	0.70	4	
Eg	20	0.08	0.39	0.033	0.33	0.20	14	
Egaña	29	0.05	0.41	0.056	0.33	0.46	24	
6	7	0.04	0.41	0.071	0.33	0.80	3	
Eg1	11	0.09	0.39	0.030	0.33	0.10	9	
Egaña	27	0.05	0.38	0.050	0.33	0.90	19	
7	3	0.03	0.43	0.091	0.33	0.68	2	
Rch	11	0.09	0.39	0.029	0.33	0.09	7	
Rauch	26	0.04	0.43	0.071	0.33	0.61	18	
8	3	0.02	0.47	0.045	0.33	1.20	2	
LEs5	13	0.08	0.39	0.028	0.33	0.07	8	
La Escocia	19	0.08	0.39	0.032	0.33	0.15	16	
9	3	0.03	0.44	0.077	0.33	0.78	1	
Che1	14	0.08	0.39	0.030	0.33	0.10	9	
Chelforó	30	0.04	0.42	0.067	0.33	0.55	22	
10	2	0.02	0.45	0.071	0.33	0.84	1	
Che8	11	0.08	0.39	0.031	0.33	0.10	6	
Chelforó	23	0.04	0.42	0.056	0.33	0.53	17	
11	2	0.02	0.49	0.048	0.33	1.32	1	
LEs4	11	0.08	0.40	0.028	0.33	0.07	7	
La Escocia	18	0.09	0.39	0.029	0.33	0.11	14	
12	9	0.03	0.42	0.077	0.33	0.60	4	
Ay5	21	0.08	0.39	0.034	0.33	0.18	15	
Ayacucho	30	0.05	0.42	0.059	0.33	0.50	25	
13	5	0.06	0.42	0.042	0.33	0.56	3	
EaA3	20	0.07	0.40	0.029	0.33	0.09	12	
Est. Aldecoa	27	0.07	0.40	0.037	0.33	0.21	23	
14	8	0.07	0.33	0.036	0.33	0.43	4	
BCh	13	0.08	0.39	0.038	0.33	0.23	11	
Blanca Chica	22	0.08	0.35	0.032	0.33	0.30	18	

La combinación de escenarios entre condiciones de borde y materiales seleccionados para la simulación resultaron en 56 casos (N =56), de los cuales en 13 situaciones la solución con HYDRUS-1D no alcanzó la convergencia y no fueron consideradas en las comparaciones.

Esto ocurrió para los casos de nivel freático somero (entre 1 m y 50 cm), principalmente. Entre las causas comunes a este comportamiento, y posibles fuentes de inestabilidades en los casos de no convergencia, se encontraron: baja conductividad hidráulica del horizonte iluvial, gran contraste entre conductividades hidráulicas entre horizontes contiguos y la presencia

somera del horizonte iluvial. Posiblemente estos inconvenientes puedan subsanarse en el HYDRUS mediante una discretización espacial mas detallada en los contactos entre materiales distintos, pero esto no fue analizado aquí.

El valor de ε óptimo que reflejó los mejores NSE y menores errores RMSE y BIAS fue de 1.00. En los casos de nivel freático más profundo (NF = -2 m) se obtuvieron buenos resultados también con $\varepsilon = 0.95$.

La Figura 6 resume las concordancias encontradas con $\varepsilon = 1$, y las diferencias encontradas entre ambos esquemas. El error porcentual EP en este caso fue del 19%.

Ensayo 2: Período de lluvias de 96 días.

La intención de este ensayo es analizar el comportamiento del esquema numérico simplificado bajo situaciones en las que será aplicado, tanto respecto al sistema hidrológico como a sus forzantes pluviales. Para construir la serie de lluvias características de la región bajo estudio se contó con información pluviométrica del período 2014-2018. Se realizó un estudio estadístico considerando precipitaciones y ocurrencias de lluvia en intervalos de clase de 96 días. Los resultados obtenidos fueron los siguientes: precipitación media cada 96 días = 259 mm (desvío estándar = 84 mm) y ocurrencia media de lluvias cada 96 días = 17 días (desvío estándar = 7 días).

Consecuentemente, se optó por construir una serie de precipitaciones con 4 períodos de 68 mm caídas en 4 días, separados entre sí con períodos diferentes, los que fueron seleccionados de manera arbitraria y no constantes (Figura 7). Esto se realizó con el fin de analizar el comportamiento de la recarga simulada bajo diferentes condiciones de humedad previas a cada tormenta.

Con el fin de simplificar el ensayo, se consideraron sólo 4 de los 14 perfiles edáficos numerados como: 3, 6, 10 y 14 (Figura 5). Los mismos representan situaciones medias y extremas en cuanto a conductividades hidráulicas y profundidad del horizonte iluvial.

Dado que el tiempo de simulación de este nuevo ensayo es casi 10 veces el del anterior, se consideraron dos profundidades adicionales del nivel freático, las cuales se sumaron a los ensayos: 2.5 m y 3 m.

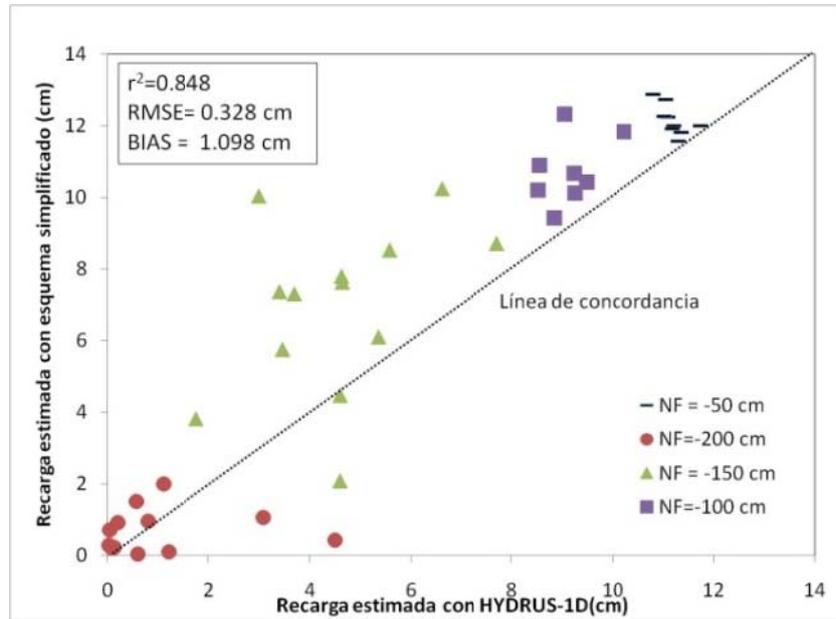


Figura 6. Concordancia entre ambos esquemas propuestos

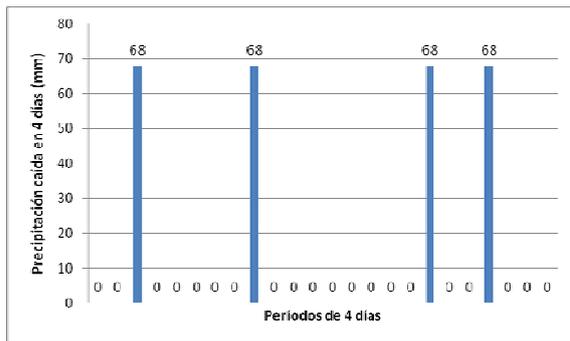


Figura 7. Serie de precipitaciones construida

Los valores óptimos del coeficiente de ponderación de permeabilidades, ϵ , fueron diferentes para cada profundidad del nivel freático, pudiéndose encontrar una correlación lineal entre ambas variables. Por esta razón se propusieron expresiones para estimar ϵ en función de la profundidad freática, a saber:

$$\epsilon = \begin{cases} PF > 150\text{cm} & 0.7 \\ 150\text{cm} > PF > 100\text{cm} & 1.6 - 0.6PF \\ PF < 100\text{cm} & 1.0 \end{cases} \quad (12)$$

donde PF es a profundidad freática.

La Figura 8 resume las concordancias encontradas entre ambos esquemas, estimando ϵ con las expresiones previas. El error porcentual EP en este caso fue del 1%.

Aún cuando la función objetivo en las comparaciones ha sido las diferencias entre las recargas acumuladas al final de cada ensayo, se inspeccionaron las evoluciones de los contenidos volumétricos de humedad para cada perfil y horizonte edáfico considerado en ambos modelos. Pudo comprobarse una buena estimación de los perfiles de humedad en el tiempo por parte del esquema propuesto (Figura 9).

DISCUSION

Se han realizado dos ensayos para testear un esquema simple, explícito, de resolución numérica basado en diferencias finitas frente a otro de probada eficacia basado en un esquema de elementos finitos, de grilla variable, implícito iterativo (HYDRUS-1D) para modelar el flujo no saturado entre el nivel superficial y el freático.

El sistema a modelar está emplazado en una zona deprimida de la llanura bonaerense con elevada frecuencia de niveles freáticos a escasa profundidad.

El esquema simplificado propuesto forma parte de un modelo de flujo superficial y subterráneo cuasi 3D de celdas (SHALL) y surge la necesidad de validar su comportamiento en situaciones similares a las que operará, poniendo énfasis principalmente en el intercambio de flujo (recarga) entre ZNS y acuífero.

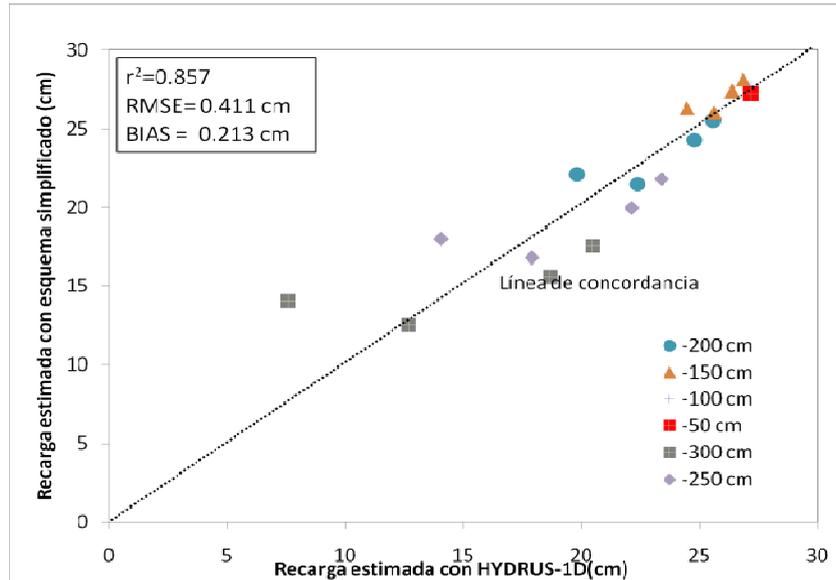


Figura 8. Concordancia entre ambos esquemas propuestos

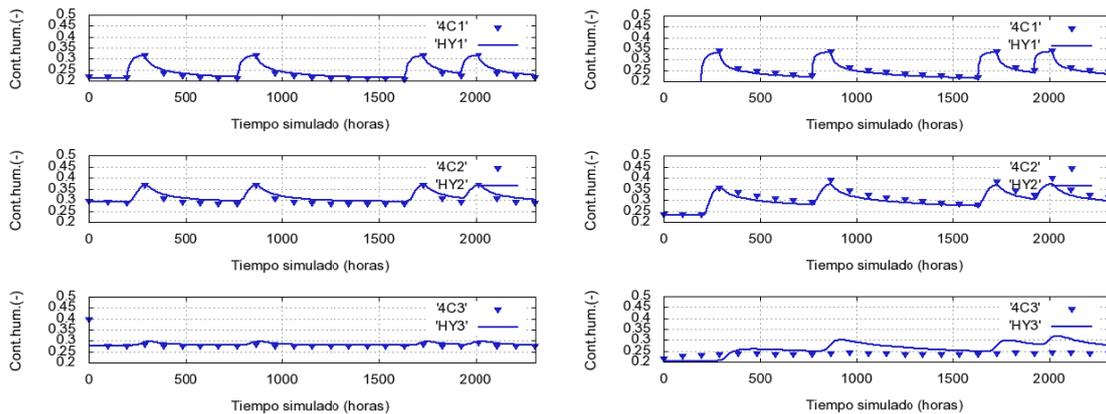


Figura 9. Evolución de contenidos de humedad en el segundo ensayo para los 3 horizontes edáficos del perfil N° 6 y profundidad de napa -150 cm (izquierda) y perfil N° 10 profundidad de napa -300 cm (derecha). Simulación con HYDRUS-1D (líneas continuas, HY1, HY2, HY3) y esquema 4C (triángulos, 4C1, 4C2, 4C3).

Se consideran 14 tipos de perfiles edáficos representativos de la zona, cuyas propiedades hidráulicas se han obtenido mediante funciones de pedotransferencia.

El primer ensayo propuesto para las comparaciones, implica una situación difícilmente alcanzada en la realidad, son 10 días consecutivos de precipitación de baja intensidad, pero ha permitido conocer los comportamientos de los modelos a comparar en un escenario de saturación progresiva bajo niveles freáticos de someros a casi superficiales.

El comportamiento del esquema simplificado fue aceptable ($r^2 = 0.848$, $RMSE = 0.328$ cm), aunque con

una tendencia a la sobreestimación de la recarga respecto al HYDRUS ($BIAS = +1.098$ cm).

Cabe mencionar que la propuesta del coeficiente de ponderación de permeabilidades de horizontes adyacentes tuvo como efecto darle el peso total al horizonte menos permeable, ya que el valor óptimo fue prácticamente la unidad (ecuación 5). En otras palabras, el horizonte iluvial controla el flujo en situaciones de saturación superficial y niveles freáticos poco profundos.

Si bien este ensayo representa una situación poco común, diferencias del 20% entre ambos esquemas muestran una expectativa no alcanzada.

En el segundo ensayo, las condiciones del borde superior propuestas sí representan situaciones comunes a las que será sometido el esquema simplificado en el contexto de la modelación con el SHALL. De hecho, estas condiciones se han extraído de estadísticas de precipitación relativamente recientes.

Dado que la simulación se extiende a 96 días, con tiempo suficiente para flujos más penetrantes, se incorporan dos situaciones adicionales de niveles freáticos más profundos como condiciones para el borde inferior.

Para estos casos el coeficiente de ponderación de permeabilidades encontró su valor óptimo en 0.7, lo que implica una distribución del peso para las permeabilidades entre los estratos adyacentes, caso que se diferencia del ensayo anterior. Esto da la pauta para situaciones donde el nivel freático es más profundo el flujo es comandado por las características hidráulicas de ambos horizontes adyacentes. Cuando el nivel freático es más somero, el flujo es comandado por el horizonte menos permeable, como sucede en el ensayo 1. Esta dualidad de comportamiento justifica la propuesta de un coeficiente de ponderación vinculado al nivel freático, mediante una relación lineal, como se propuso en el ítem anterior. Esta propuesta mejoró sustancialmente el pronóstico de la recarga para el esquema simplificado ($r^2 = 0.857$).

En este set de comparaciones los errores cuadráticos medios resultaron semejantes (RMSE = 0.411 cm) y los sesgos muchos menores (BIAS = +0.213 cm). El error porcentual del 1% respecto al sesgo es bajo y hace que las comparaciones entre ambos esquemas sean similares.

Contemplando que este segundo ensayo se ajusta a condiciones reales y factibles para la zona de estudio se considera el desempeño del esquema simplificado propuesto como satisfactorio.

Además, si bien el objetivo propuesto para los ajustes era una estimación muy próxima en los valores de recarga final acumulada entre ambos esquemas, la estimación de las evoluciones de humedades en el perfil resultó muy similar. No obstante en las simulaciones con niveles freáticos más profundos (mayores incrementos Δz entre los últimos estratos en el esquema 4C), como se manifiesta en la Figura 9, derecha, se observa una distorsión en la estimación razón por la cual deberán analizarse estas situaciones con más detenimiento.

Estos dos elementos dan la pauta que el esquema simplificado propuesto para ser integrado en el modelo SHALL es un buen estimador de variables de estado y los flujos de intercambio en la ZNS.

CONCLUSIONES

Se propone un esquema numérico de diferencias finitas explícito de 4 celdas, físicamente basado, para representar el flujo no saturado y heterogéneo entre el nivel superficial y el freático. En este esquema y para la ecuación de flujo, basada en la ecuación de Richards, se propone una ponderación entre las conductividades hidráulicas de estratos adyacentes, que presentan contrastes marcados entre sí. El esquema es comparado con modelos de reconocida trayectoria como el HYDRUS-1D.

El sistema hidrológico a representar se emplaza en una zona deprimida de la llanura bonaerense con elevada frecuencia de niveles freáticos someros y presencia de un estrato arcilloso a poca profundidad.

Se realizan dos ensayos para testear la bondad del esquema, uno con intensidad de lluvia constante durante 10 días y otro con una serie de precipitaciones, estadísticamente representativas de la climatología local, extendida durante 96 días. En ambos escenarios se consideraron las características físicas de los perfiles edáficos de la zona de estudio y la presencia somera de los niveles freáticos.

El primer ensayo representa un situación hipotética, difícilmente alcanzada en la realidad, pero ha permitido conocer las respuestas ante escenarios de saturación progresiva con niveles freáticos casi superficiales. La respuesta del esquema se considera aceptable con diferencias porcentuales del orden al 19%.

En el segundo, el cual refleja situaciones estadísticamente posibles en cuanto a series climáticas, el esquema propuesto presentó un comportamiento satisfactorio, con diferencias porcentuales del 1% respecto al modelo HYDRUS-1D. Además, muestra un buen ajuste en las evoluciones de contenidos de humedad de cada estrato.

Se considera que estos resultados validan el esquema simplificado propuesto permitiendo una respuesta rápida en términos de tiempo computacional, haciéndolo apto para su inclusión en el modelo SHALL.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Caamaño Nelli, G. y Zimmermann, E. (1990). *Tipología de los Sistemas Hidrológicos Superficiales*. XVI Congreso Nacional Asoc. Arg. Geofis. Y Geod.. Bahía Blanca. Argentina.
- Entraigas, I., Vercelli, N., 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>
- Fertonani, M., y Prendes, H. (1983) *Hidrología en áreas de llanura. Aspectos Conceptuales Teóricos y Metodológicos*. Coloquio de Hidrología de Grandes Llanuras. Olavarría. Argentina., 1, p 119-156.
- Kovacs, G. (1983). *General Principles of Flatlands Hydrology*. Coloquio de Hidrología de Grandes Llanuras. Olavarría. Argentina, p 297-357.
- Kruse, E. y Zimmermann, E. (2002). *Hidrogeología de grandes llanuras. Particularidades en la llanura pampeana (Argentina)*. In: Workshop publication on Groundwater and Human development (pp. 2025-2038).
- Méndez Zacarías J. y Zimmermann E. (2011). *Uso De Sistemas De Información Geográfica Para Parametrización De Modelos De Simulación Hidrológica En Llanuras*. XXIII Congreso Nacional del Agua y VI Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. Resistencia. Argentina.
- Saxton, K., Rawls, W., Romberger, J., and Papendick R. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Geoderma*, (102), 275 - 297.
- Simunek, J., Huang K., y Van Genuchten, M. (1998). *The HYDRUS code for simulating the one dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Version 6.0*, Research Report No. 144, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California, 164pp.
- Simunek, J., Van Genuchten, M. T., & Sejna, M. (2005). *The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media*. University of California-Riverside Research Reports, 3, 1-240.
- Tricart, J. (1983) *L'Hydrologie des Grands Plains, Quelques Reflexions Methodologiques*. Coloquio de Hidrología de las grandes Llanuras. Olavarría, Argentina, 2, p 1191-1193.
- Tomasella, J. y Hodnett, M. (1998). Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. *Soil science*, 163(3), 190-202.
- Vereecken, H., J. Maes, J. Feyen, and P. Darius (1989). Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Science*. 148, 389-403.
- Wösten, J, A. Lilly, A. Nemes, and C. Le Bas (1999). Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90, 69-185.
- Zimmermann E. y Riccardi, G. (2000) *Modelo de simulación hidrológica superficial para áreas de llanura*. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Córdoba. Argentina.
- Zimmermann, E. y Riccardi, G. (2003). Modelo hidrológico superficial y subterráneo desarrollado para la simulación de sistemas de llanura. 1. Aplicación en el sistema Ludueña (Santa Fe, Argentina). *Boletín Geológico y Minero*, 114(2), 147-158.
- Zimmermann, E. y Basile, P. (2008). Uso de funciones de pedotransferencia para la estimación de parámetros hidráulicos en suelos limosos (Llanura Argentina). *Boletín del Instituto Geológico Minero de España*, 119(1), 71-80.
- Zimmermann E. y J. Mecca (2010). *Aplicación del modelo SHALL en los sistemas hidrológicos de las lagunas don Tomás y bajo Giuliani (La Pampa, Argentina) para la evaluación de impactos provocados por efluentes y escurrimientos*. I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Azul, Buenos Aires, Argentina.
- Zimmermann, E. y Basile, P. (2011). Estimación de parámetros hidráulicos en suelos limosos mediante diferentes funciones de pedotransferencia. *Tecnología y ciencias del agua*, 2(1), 99-116.
- Zimmermann, E. y Basile, P. (2014). Metodología de agregación para estimar conductividades hidráulicas en suelos heterogéneos insaturados. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(4), 39-55.

Tipo de Publicación: ARTICULO

Trabajo recibido el 27/10/2021 y aprobado para su publicación el 29/11/2021.

COMO CITAR

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

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

**MODELACIÓN DE ÁREAS INUNDABLES EN UN SECTOR MINERO DE LA CUENCA
QUEBRADA EL ARRAYÁN – REGIÓN DE COQUIMBO - CHILE.**

**MODELING OF FLOODABLE AREAS IN A MINING SECTOR OF THE ARRAYAN
BASIN - COQUIMBO REGION - CHILE.**

**Keyla Manuela Alencar da Silva Alves^(*), Constanza Belén Contreras Franco y María Carolina Parodi
Dávila**

Facultad de Ingeniería. Universidad Tecnológica Metropolitana. Santiago, Chile.

^(*) e_mail: keyla.dasilva@utem.cl

RESUMEN

La cuenca hidrográfica Quebrada del Arrayán, se encuentra ubicada en la región de Coquimbo, al norte de Chile. Es una zona reconocida por la intensa actividad minera de extracción de cobre y oro, y por los inúmeros tranques de relaves instalados en los alrededores de la zona urbana a oeste de la cuenca. Existen 108 tranques de relaves instalados en el sector oeste de la cuenca, la mayoría de ellos en estado de abandono o inactividad. El sector oeste de la cuenca es un área susceptible a inundaciones, destacando las ocurridas en 1997, 2015, 2017 y 2020. El clima semiárido con régimen de precipitaciones concentradas en pocos días, combinado con sectores de depresión en montaña, como la pampa ondulada y los cordones transversales, son factores que contribuyen con la susceptibilidad de inundación en el área de estudio. La dinámica hídrica en zonas con concentración de numerosos tranques de relaves abandonados puede representar un agravamiento potencial del riesgo, considerando el arrastre de metales pesados y la contaminación del agua y suelo. Como resultado, por medio de modelación matemática en SIG se identificó que 63% de los tranques de relaves abandonados se encuentran instalados en zonas inundables y cercanos a sectores poblados.

Palabras clave: inundaciones, modelos, SIG, tranques de relave, minería.

ABSTRACT

The Arrayan basin is in the Coquimbo region of northern Chile. It is an area of intense mining activity for copper and gold extraction, and for the numerous tailings dams installed in the urban area west of the basin. There are 108 tailings dams in the western sector of the basin, most of them abandoned or inactive. The western sector of the basin is an area susceptible to flooding, with floods occurring in 1997, 2015, 2017 and 2020. The semi-arid climate with rainfall concentrated in a few days, combined with mountain depression sectors, such as the undulating plain to the west of the basin, are factors that contribute to the susceptibility to flooding in the study area. Water dynamics in areas with a concentration of abandoned tailings dams may represent a potential aggravation of the risk, considering the entrainment of heavy metals and water and soil contamination. As a result, through mathematical modeling in GIS, it was identified that 63% of the abandoned tailings dams are in flood zones and close to populated areas.

Keywords: floods, modeling, GIS, tailings dams, mining.

INTRODUCCIÓN

La industria minera en Chile produce 5.82 millones de toneladas métricas de cobre fino; sin embargo, su extracción genera una tasa de producción de relaves de 530 millones de metros cúbicos (m³) al año (SERNAGEOMIN, 2019). Los tranques son la técnica más común de depositación de residuo sólido (sedimentos) minero en Chile, y pueden encontrarse en tres diferentes tipos de estado de funcionamiento: activo, inactivo o abandonado.

Los tranques son inherentemente inestables y suelen concentrar grandes cantidades de sustancias tóxicas (Kossoff et al., 2014). Conforme al último catastro del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN) actualizado al 10 de agosto de 2020, Chile cuenta con 757 tranques de relaves en total, donde 112 son activos, 5 se encuentran en construcción, 173 están abandonados y 467 inactivos.

El norte de Chile es la región donde concentran la mayor cantidad de tranques de relaves del país. En lo cual se destaca la región de Coquimbo con la mayor concentración de tranques, con 244 inactivos y 106 abandonados, según el Catastro Nacional de Relaves (SERNAGEOMIN, 2020).

En la cuenca Quebrada del Arrayán, ubicada en la región de Coquimbo, específicamente en el sector urbanizado de dicha cuenca, donde se ubica la Comuna de Andacollo, es el sector a nivel nacional donde se concentran la mayor cantidad de tranques de relaves. Existen 108 tranques de relaves, entre ellos 35 se encuentran abandonados, 5 activos, 68 inactivos y los demás sin identificar su estado actual.

Además, de acuerdo con la base de datos geoquímica de SERNAGEOMIN, los relaves abandonados e inactivos en Andacollo superan el límite máximo de concentración en cobre, arsénico, plomo, cadmio y níquel según la norma internacional canadiense (Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health, 2018).

Otro aspecto relevante respecto al riesgo ambiental e impacto a la salud de las personas que representa la existencia de estos tranques de relaves en lugares poblados son las características físicas topográficas de donde están instalados los tranques. Según la CEPAL, 57% de los tranques de relaves a nivel nacional se encuentran instalados en zonas

susceptibles a remociones en masa e inundaciones (Silva y Souza, 2020). En este contexto, se enfatiza las características hidrológicas y geomorfológicas de la cuenca quebrada del Arrayán, principalmente en el sector donde se concentran los tranques. Dicha cuenca se encuentra ubicada en la pampa ondulada de los valles transversales. Los tranques están instalados en la zona de depresión de la cuenca donde ya han ocurrido inundaciones, cuales se destacan los eventos ocurridos en 1997, 2015, 2017 y 2020, que resultaron en el colapso de algunos tranques de relaves (Miralles, 2013; Rojas et al., 2014; Mardones, 2019, Pacheco et al., 2020).

Los estudios de zonificación de la susceptibilidad y del riesgo asociados a los impactos ocasionados por eventos naturales adquiere un potencial peligro cuando estos eventos se desarrollan en zonas donde hay acumulación de residuos peligrosos, tales como residuos mineros. Por lo tanto, caracterizar las áreas susceptibles a la inundación y correlacionarla con la ubicación de los tranques de relaves contribuirá con la definición de las áreas de riesgo de contaminación por esparcimientos de los desechos tóxicos.

OBJETIVOS

En este contexto, considerando el potencial peligro de ocurrencia de inundaciones y consecuentemente el colapso de los tranques de relaves y la dispersión de los residuos mineros presentes en el sector oeste de la cuenca Quebrada del Arrayán, este estudio tiene como objetivo identificar las zonas susceptibles a inundaciones por medio del modelo Geomorphic Flood Area (GFA) del software Qgis 2.18.3, y a partir de resultado obtenido del GFA, correlacionarlo con la ubicación de los tranques de relaves y zonificar las áreas de riesgo en el sector urbanizado (zonas pobladas) de la cuenca.

METODOLOGÍA

La metodología de este estudio consiste en tres etapas: 1. Clasificación del estado de funcionamiento de los tranques de relaves existentes en el área de estudio, utilizando la base de datos del Catastro Nacional de Relaves 2020 del SERNAGEOMIN. 2. Zonificación de áreas inundables por medio de la ejecución del modelo Geomorphic Flood Area (GFA) integrado al software Qgis 2.18. 3. Mapeo de las zonas de riesgo basándose en los criterios implementados por la Guía de Evaluación de Riesgos Ambientales (MMA,

2010) y el Plan Regulador Intercomunal de la región de Coquimbo (2019).

Área de estudio

La Cuenca Quebrada del Arrayán forma parte de la gran cuenca del río Elqui y se encuentra en la región de Coquimbo, Chile. Cuenta con un área de 557.72 km² y un perímetro de 134.64 km (Figura 1). Su superficie se extiende sobre las comunas de Andacollo y Vicuña, siendo esta última el punto de desembocadura de la quebrada.

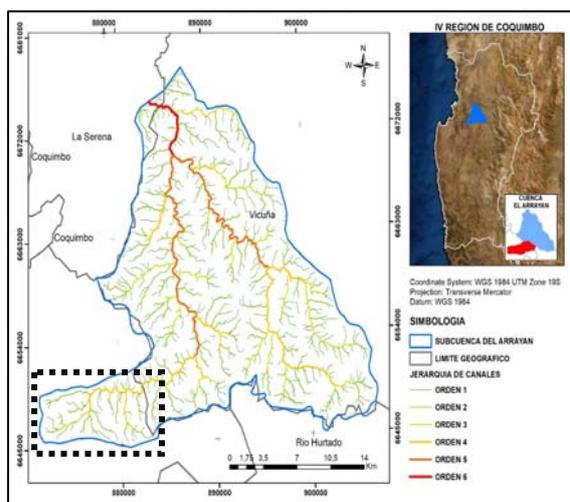


Figura 1. Ubicación y jerarquía del drenaje de la cuenca Quebrada del Arrayán. En destaque el área de estudio.

El área de estudio se encuentra rodeada de grandes montañas, ya que forma parte de las últimas ramificaciones de la cordillera de los Andes en el Norte Chico de Chile. Posee vegetación tipo matorral xerófila. La zona cuenta con un clima de carácter estepa cálida los que se caracteriza por ser un clima de transición entre los desiertos cálidos y los climas semiáridos (Squeo et al., 2001; Bascuñán, 2010; Cortés et al., 2012).

Las precipitaciones son concentradas e intensas, considerando las características climáticas locales, en el contexto de la aridez regional. Se intensifican bajo la influencia del fenómeno de El Niño, registrando un promedio de precipitaciones de 130 mm anuales en el sector oeste de la cuenca. No obstante, el total de precipitaciones anuales están concentradas en 1 o 2 días de precipitaciones (Salas et al., 2012, Scaff, 2012). Donde fueron registradas ocurrencias de inundaciones al oeste de la cuenca durante los años 1997, 2015, 2017 y 2020, siendo este un sector urbanizado y minero.

Clasificación del estado de funcionamiento de los tranques de relaves

Desde del Catastro Nacional de relaves obtenidos de la base de datos del Sernageomin, se creó un mapa representativo de la distribución de los tranques de relaves instalados en la cuenca. Fueron identificados 108 tranques de relaves mineros, de los cuales 35 en estado de abandonados, 5 activos y 68 inactivos. Todos ubicados en el sector oeste de la cuenca, siendo este mismo sector el más urbanizado de la cuenca, donde se localiza la comuna de Andacollo. La delimitación del área urbana y minera en este sector de la cuenca fue realizada por medio de fotointerpretación de imágenes satelitales Google Earth (Figura 2).

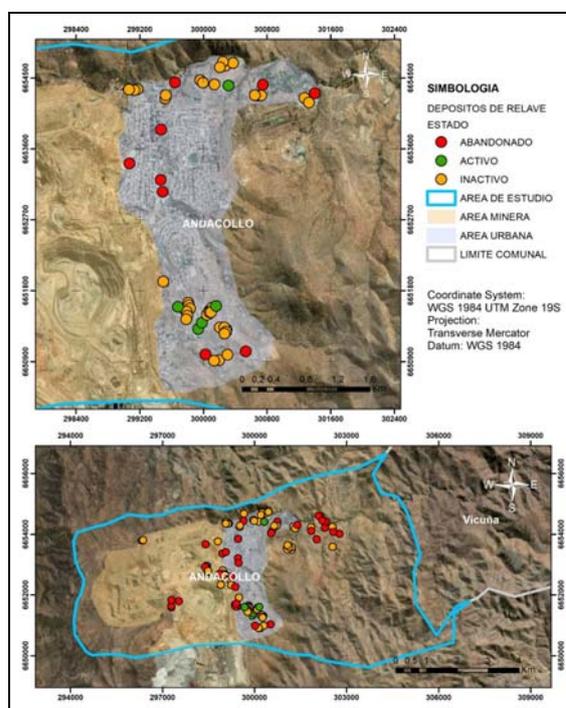


Figura 2. Distribución espacial de la ubicación de los tranques de relaves, clasificados según estado de funcionamiento.

En Chile existen normas legislativas que regulan la estabilidad física y química de los tranques de relaves, incluyendo factores del proceso de creación y desarrollo, desde su apertura, operación, cierre y post – cierre, hasta el tipo de diseño y construcción. El artículo 3° de la ley 2055/2011 apunta que la estabilidad física corresponde a una forma de seguridad dirigida en la resistencia y la disminución de fuerzas que desestabilicen los tranques u obras de una faena minera, empleando medidas para evitar

fallas, colapsos o remoción. Mientras que el reglamento de la ley de cierre de faenas e instalaciones mineras apunta que la estabilidad química es una situación de control en agua, aire y suelo, de las características químicas que se encuentran en los materiales en tranques u obras de una faena minera, para de esta forma evitar, prevenir o eliminar reacciones químicas y evitar el contacto del agua con residuos que se encuentren en obras y tranques mineros.

No obstante, dichas normas presentes en la ley 20551/2011 tiene restricciones y no es retroactiva a su fecha de publicación. Es decir, los criterios presentes presentados en ley 20551/2011 solo son aplicadas a los tranques de relaves que estén en estado activo o inactivo (a partir del año de publicación de la ley). De esta forma, todos los tranques de relaves que fueron inactivos anterior a 2011 no están regulados por la ley mencionada anteriormente. Siendo estos pasivos ambientales un potencial riesgo para población circundante y al medio ambiente.

Los tranques de relaves abandonados no se encuentran identificados por ninguna normativa vigente, por lo tanto, no están bajo ningún parámetro de seguridad que garantice su estabilidad física o química, lo que implica que aquellos que se encuentren en estado de abandonado presentan un mayor riesgo para la salud de las personas y los ecosistemas cercanos.

Por lo tanto, en base a la clasificación del estado de funcionamiento de los tranques de relaves, se establece su grado de peligrosidad, según su estado físico, siendo: los tranques de relaves Activos de baja peligrosidad, los inactivos de mediana peligrosidad y los abandonados de alta peligrosidad (MMA, 2012).

Zonificación de áreas inundables por medio de la ejecución del modelo Geomorphic Flood Area (GFA).

La herramienta Geomorphic Flood Area permite derivar el mapa de susceptibilidad de inundación de una cuenca combinando información geomorfológica extraída del DEM, junto con información de riesgo de inundación derivada de mapas de inundación preexistentes, generalmente disponibles para porciones limitadas de una cuenca en los planes reguladores comunales.

Este método permite clasificar los puntos dentro de una cuenca en dos grupos: áreas propensas a

inundaciones y áreas no propensas a inundaciones, utilizando un referente binario lineal clasificador basado en el índice de inundación geomórfica (GFI) (Samela et al., 2017; Faridani et al., 2020, Alencar da Silva et al., 2021).

Según Samela et al. (2020), el GFA posee un logaritmo natural entre la relación entre una profundidad de agua variable h_r y la diferencia de elevación H , cuya ecuación se describe a continuación:

$$GFA = \ln(h_r/H) \quad (1)$$

Donde h_r representa la profundidad de agua de la red fluvial más cercano a un punto cualquiera de la cuenca y H corresponde a la diferencia de altura entre ambos puntos mencionados anteriormente. Procedimiento iterativo para cada punto de la cuenca.

$$h_r \approx A_r^n \quad (2)$$

Donde h_r es la profundidad del agua (m), A_r (km^2) es el área contribuyente calculada en el punto más cercano del río conectada al punto más bajo del cauce, y n es el exponente (sin dimensiones). (Samela et al., 2018).

El índice está basado en parámetros morfométricos y topográficos generales tales como: (A) representación de cuenca fluvial; (B) vista en sección transversal del canal y la llanura de inundación. Área máxima precipitable (C) (Figura 3).

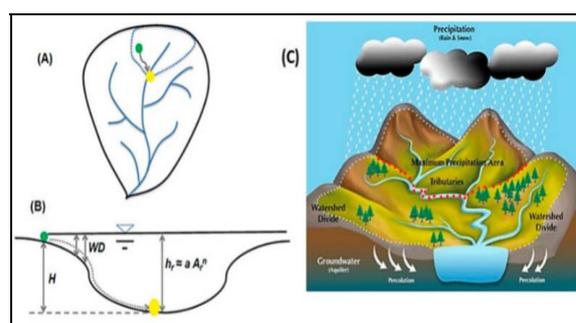


Figura 3. Descripción esquemática de los parámetros utilizados para derivar el Índice de Inundación Geomórfica. Fuente: Faridani et al., 2020.

Mapeo de las zonas de riesgo en el sector urbano minero

La definición de las áreas de riesgo fue determinada a partir de la intersección del resultado del modelo

GFA, la ubicación de los tranques de relaves abandonados y las manzanas urbanas de la comuna de Andacollo.

Los criterios implementados fueron basados en los establecidos por la Guía de Evaluación de Riesgos Ambientales (MMA, 2010) y Plan Regulador Intercomunal de la región de Coquimbo (2019), donde detallan los criterios para los distintos riesgos que se identifican en la región de Coquimbo, entre ellos se encuentran el peligro de inundaciones costeras asociadas a maremotos, los cuales corresponden a:

- Zonas de Susceptibilidad Muy Alta: sectores ubicados bajo la cota 8 m.
- Zonas de Susceptibilidad Alta: sectores ubicados entre las cotas 8 y 12 m.
- Zonas de Susceptibilidad Moderada: sectores ubicados entre las cotas 12 y 16 m.

Donde para efecto de esta investigación se adaptó lo anterior a inundaciones producidas por crecidas que corresponden al evento prominente en la zona de estudio. La adaptación consta de un promedio entre las cotas que bordean las áreas propensas a inundaciones que entran en contacto con el área urbana, obteniendo una cota promedio de 1064 m, a la cual se le consideraron los 12 metros más para definir el área de riesgo moderado, resultando en las siguientes categorías:

- Áreas con riesgo muy alto: Resultado obtenido del GFA, es decir, áreas propensas a inundaciones.
- Áreas con riesgo moderado: Cotitas entre 1064 m y 1076 m.
- Áreas sin ningún riesgo: Lo restante sobre la cota 1076 m.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Simulación de las áreas inundables

El modelo GFA simula las áreas inundables a partir de las características topográficas de la cuenca. De esta forma, el modelo entrega un resultado único

rasterizado del área inundable. La cuenca Quebrada del Arrayán se encuentra en la zona de los valles transversales. Pero a pesar de las altas altitudes, el sector oeste de la cuenca, que corresponde al sector estudiado, geomorfológicamente es formado por una zona de planicie, definida como pampa ondulada, que está ubicada entre dos cordones transversales cordilleranos.

También fue caracterizado el suelo según su uso urbano y minero, para definir el alcance de las áreas inundables en estos sectores, donde se obtuvo los siguientes resultados de mensura de inundación (Figura 4):

- Un total de 9.73 km² de área de inundación en el sector oeste de la cuenca en estudio.
- Del total del área de minería un 1.84 km² corresponde a zona de inundación.
- Del total de área urbana un 1.67 km² corresponde a área propensa a inundación.

Resultado de intersección entre las zonas susceptibles a inundación e inventario de tranques de relaves.

Obtenida el área susceptible a inundación, se realizó una intersección con la capa georreferenciada de los tranques de relaves, la información fue según estado de funcionamiento actual activo, inactivo y abandonados (Figura 5).

Este resultado corrobora con lo evidenciado en terreno durante las visitas ocurridas en marzo de 2020 y con los registros de inundaciones en los años 1997, 2015, 2017 y 2020. Los registros erosivos identificados durante las visitas a terreno comprueban la exposición de los tranques a procesos erosivos hídricos, y la susceptibilidad de transporte del material sedimentario, que presenta baja cohesión. La erosión hídrica proporciona pérdida de material y transporte de estos tranques de relaves. En particular, es importante enfatizar que el material transportado son sedimentos mineralizados que poseen altas concentraciones de metales pesados, altamente peligrosos a la salud de las personas.

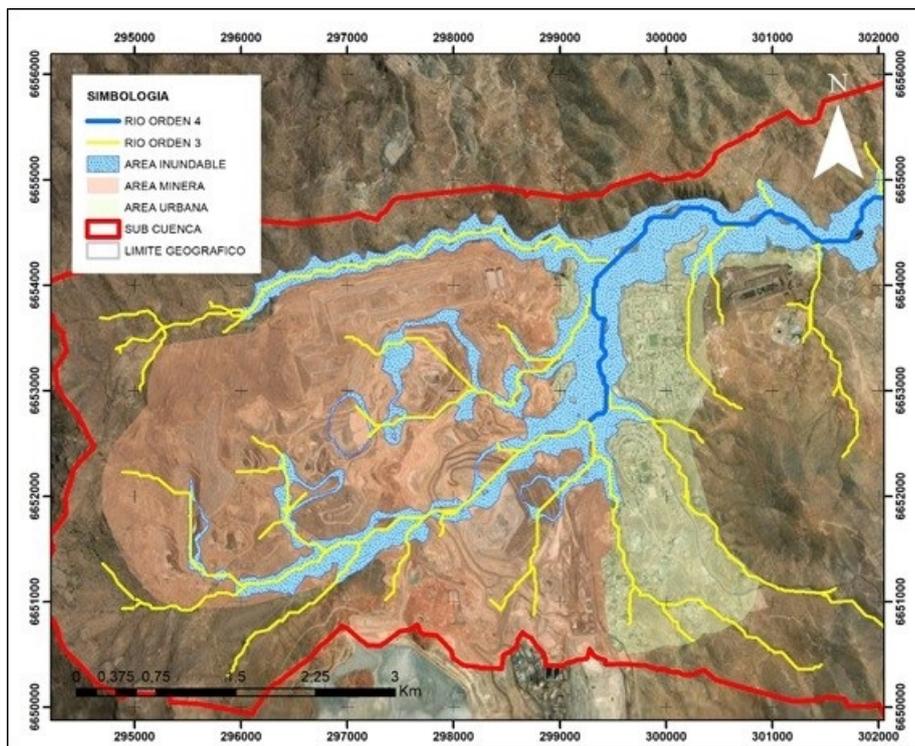


Figura 4. Áreas inundables resultantes de la modelación GFA y el uso de suelo correspondiente al área de estudio.

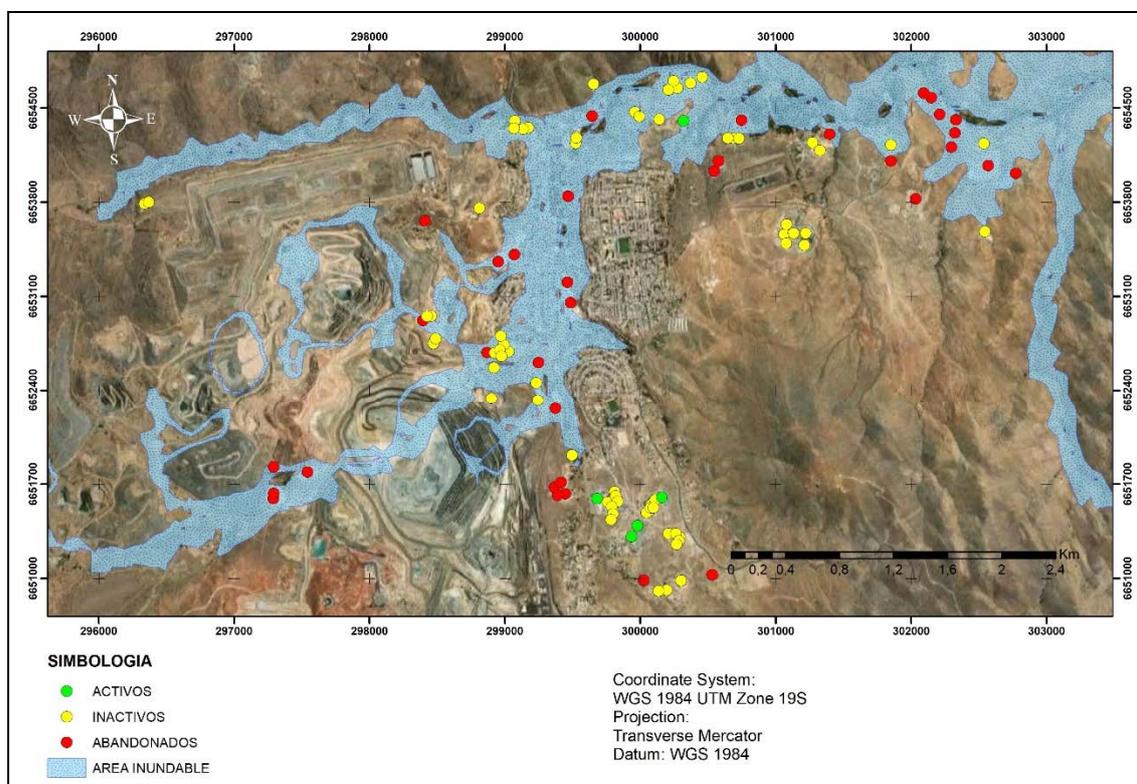


Figura 5. Intersección de las áreas inundables con la ubicación de los tranques de relaves activos, inactivos y abandonados instalados en el sector oeste de la cuenca Quebrada del Arrayán.

La intersección de los resultados presentados anteriormente demuestra que 63% de total de tranques de relaves abandonados se encuentra instalados en las áreas inundables. Esto representa un peligro ya que estos tranques no están bajo ninguna normativa y están compuestos por valores sobre las normativas internacionales respecto a la concentración total de metales pesados. Los demás porcentajes en relación con la ubicación de los tranques se presentan en la siguiente Tabla 1:

Tabla 1: Porcentaje de tranques de relaves en área propensa inundación. (Fuente: Elaboración de las autoras.)

Estado de funcionamiento	Nº de tranques de relaves	Área inundable	% de tranques de relaves en área inundable
activos	5	1	20
inactivos	68	26	38
abandonados	35	22	63
total	108	49	45

Del total de 108 tranques de relaves ubicados en la cuenca, 49 de estos se encuentran dentro del área propensa a inundaciones, lo que corresponde a un 45% del total, donde:

- De los 5 tranques de relaves ubicados en la comuna de Andacollo en estado activo, 1 se encuentra dentro del área propensa a inundación, lo que es equivalente a un 20%.
- De los 68 tranques de relaves ubicados en la comuna de Andacollo en estado inactivo, 26 se encuentra dentro del área propensa a inundación, lo que es equivalente a un 38%.
- De los 35 tranques de relaves ubicados en la comuna de Andacollo en estado abandonado, 22 se encuentra dentro del área propensa a inundación, lo que es equivalente a un 63%.

Zonificación de las áreas de riesgo

En este estudio el concepto de riesgo hidrológico no se marca como el único factor que proporciona peligro a la población. Dada las características de uso del suelo presentados anteriormente, la actividad minera y la gran cantidad de tranques instalados en el área de estudio, proporciona un aumento potencial

del riesgo. Principalmente considerando la de los 35 tranques de relaves existentes 22 se encuentran instalados en zonas inundables.

El estado de deterioro avanzado de muchos de los relaves abandonados se refleja en la inestabilidad estructural de ellos, y consecuentemente llevando al colapso parcial y/o total de ellos. De esta forma aumentando el radio de contaminación, por medio del transporte de los sedimentos mineralizados (Alencar da Silva et al., 2021).

La zonificación de riesgo en este estudio consistió en cruzar los datos espaciales de dos amenazas: áreas inundables y tranques de relaves abandonados, con el objetivo de destacar los sectores que representa mayor riesgo en función del mayor número de relaves abandonados por manzana urbanas y los rangos de nivel de la inundación en función de la altura. Para esto fueron aplicados los criterios basándose en la Guía de Evaluación de Riesgos Ambientales (MMA, 2010) y el Plan Regulador Intercomunal de la región de Coquimbo (2019). En el Plan Regulador de Coquimbo se detallan los parámetros aplicados para definir los distintos riesgos que se identifican en la región de Coquimbo. Entre ellos se encuentran el peligro de inundaciones costeras, los cuales corresponden a las categorías presentadas en la metodología.

Donde para efecto de este estudio se adaptó lo anterior a inundaciones en zonas de valles transversales que corresponden al evento prominente en la zona de estudio. La adaptación consta de un promedio entre las cotas que bordean las áreas propensas a inundaciones que entran en contacto con el área urbana, obteniendo una cota promedio de 1064 m, a la cual se le consideraron los 12 metros más para definir el área de riesgo moderado, lo cual resulta de la siguiente manera (Figura 6):

- Áreas con riesgo muy alto: Resultado obtenido del GFA, es decir, áreas propensas a inundaciones.
- Áreas con riesgo moderado: Cotras entre 1064 m y 1076 m.
- Áreas sin ningún riesgo: Lo restante sobre la cota 1076 m.

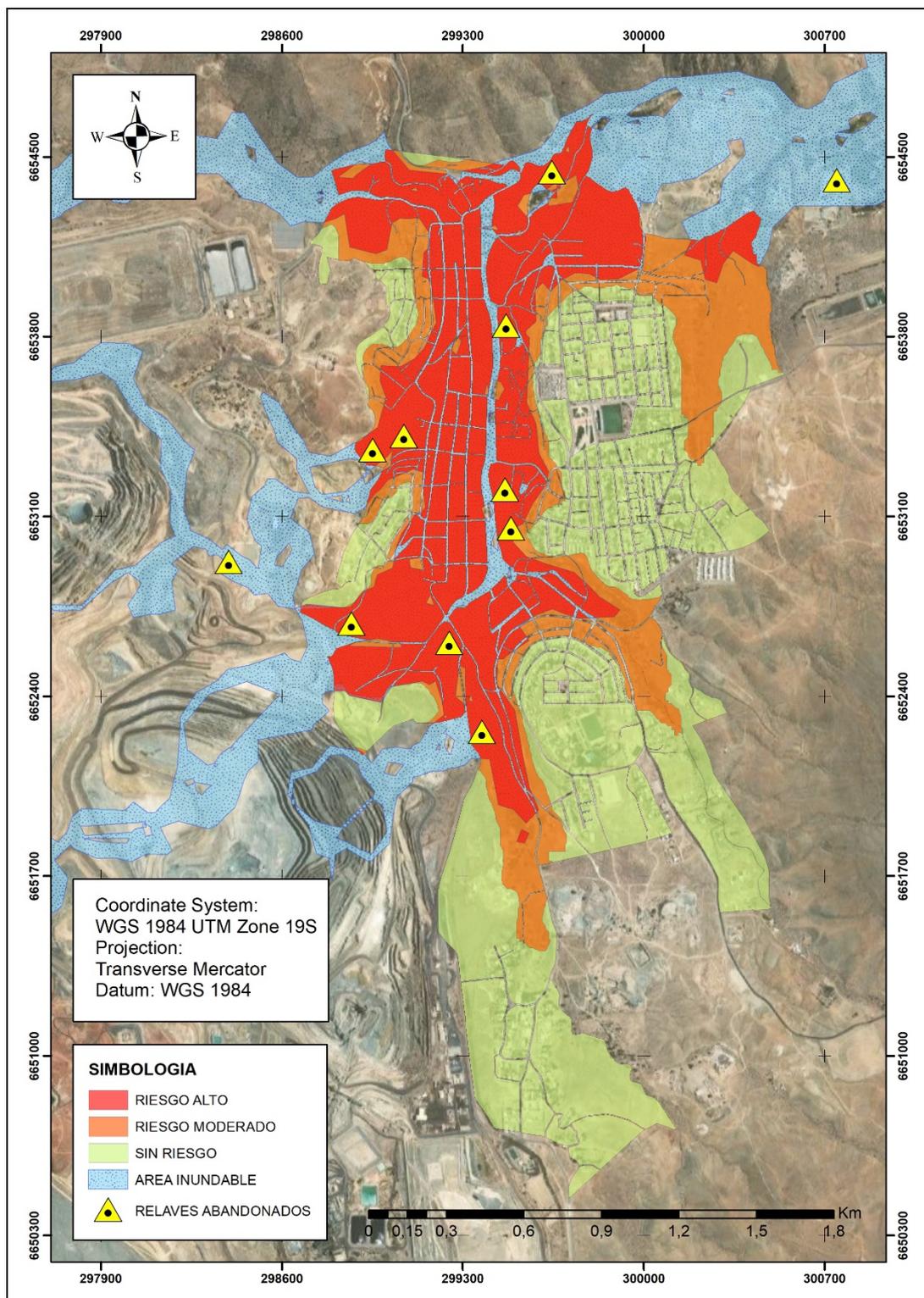


Figura 6. Zonificación de áreas de riesgo según la intersección de áreas inundables, tranques de relaves abandonados y sectores poblados de la cuenca Quebrada de Arrayán.

Las áreas inundables resultantes del modelo GFA, que además coincidieran con la presencia de tranques de relaves y áreas pobladas fueron definidas como las áreas de alto riesgo (Zonas en color rojo). Las zonas de riesgo moderado fueron el resultado de la adaptación realizada en base a los criterios establecidos por el Plan Regulador Intercomunal de la región de Coquimbo y las manzanas urbanas que representan las zonas pobladas. En la zona de riesgo moderado no se encuentra instalados ninguno de los tranques de relaves (zonas en color naranja). Por último, la zona que no presenta ningún riesgo son las que se encuentra sobre la cota 1076 m. El riesgo es nulo en esta zona porque no existen tranques de relaves instalados, ni tampoco fue identificada como área inundable según los resultados del modelo GFA.

CONCLUSIONES

Este estudio corroboró con la identificación de la ubicación inadecuada de los tranques de relaves en la cuenca Quebrada del Arrayán, cruzando datos de la modelación de áreas inundables e inventario de tranques de relaves georreferenciados, instalados en zonas pobladas de la cuenca.

El modelo GFA es un modelo de base geomórfica, define las áreas inundables solamente a partir de las características topográficas del terreno. Para cumplimiento del objetivo propuesto para este estudio, el modelo GFA entregó resultados que posibilitaron identificar si los tranques de relaves existentes estaban instalados en una zona inundable. No obstante, para estudios específicos de la dinámica hidrológica de las inundaciones, el modelo GFA no es compatible, ya que solamente entrega como resultado el área de inundación.

Considerando los resultados que indican que 63% de los tranques de relaves abandonados se encuentran instalados en zonas inundables, que también son zonas pobladas. Se concluye que el riesgo fundamental en el área de estudio es la posibilidad de colapso y/o transporte del material de los tranques de relaves durante un evento hidrometeorológico tal como una inundación. El riesgo de inundaciones en el área de estudios se intensifica una vez que en la zona potencialmente susceptible a la ocurrencia de dicho evento se encuentra instalados depósitos de residuos mineros que están compuestos mayoritariamente por metales pesados.

El uso de los modelos numéricos combinados con herramientas SIG son recursos de muy bajo costo y que entregan excelentes resultados para la gestión de riesgo, que puedan venir a colaborar con planes de mitigación y políticas públicas a nivel comunal.

AGRADECIMIENTOS

Iniciativa financiada por Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), por medio del “Primer Concurso IDeA de I+D del FONDO DE FOMENTO AL DESARROLLO CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO, FONDEF/CONYCIT, 2018 Fondef ID18I10189” y apoyada por la Municipalidad de Andacollo y por la Universidad Tecnológica Metropolitana (UTEM) de Chile. Se agradece también al Laboratorio de Suelos y Medio Ambiente, dependiente del Departamento de Industria, Facultad de Ingeniería de la UTEM y al Consejo Nacional de Investigación y Técnicas (CONICET - ARGENTINA) por medio de la beca postdoctoral Latinoamérica 2020, por el apoyo en la ejecución del estudio.

REFERENCIAS

- Alencar da Silva, A. K. M., Parodi, D. M. C., Zimmermann, E. (2021). Diagnóstico y Zonificación de Áreas Susceptibles a Inundaciones en la Comuna De Andacollo – Región De Coquimbo - Chile. *Revista Contexto Geográfico*, 6(11), 44–55.
- Bascuñán Walker, F. (2010). Crecimiento urbano y balance de CO₂ en la cuenca del río Elqui (Chile). *Bosque (Valdivia)*, 31(2), 109-116.
- Canadian Council of Ministers of the Environment – CCME, 2018. Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health.
- Cortés, A. E., Oyarzún, R., Kretschmer, N., Chaves, H., Soto, G., Soto, M., ... & Maturana, H. (2012). Aplicación del Índice de Sustentabilidad de Cuencas en la cuenca del río Elqui, Centro-Norte de Chile. *Obras y proyectos*, 12, 57-69.
- Faridani, F., Bakhtiari, S., Faridhosseini, A., Gibson, M. J., Farmani, R., & Lasaponara, R. (2020). Estimating Flood Characteristics Using Geomorphologic Flood Index with Regards to Rainfall Intensity-Duration-Frequency-Area Curves and CADDIES-2D Model in Three Iranian Basins. *Sustainability*, 12(18), 7371.

- Kossoff, D., Dubbin, W. E., Alfredsson, M., Edwards, S. J., Macklin, M. G., Hudson-Edwards, K. A. (2014). Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, 51, 229-245.
- Ley N° 20551/2011 *Regulación del Cierre De Faenas e Instalaciones Mineras*. 28-10-2011. Ministerio de Minería. ID norma 1032158.
- Mardones Morales, P. (2019). *Análisis estadístico de precipitaciones desencadenantes de flujos de detritos en la Región de Coquimbo*. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170764>.
- Miralles González, C. (2013). *Evaluación de los factores que controlan la geoquímica de sedimentos fluviales de la cuenca del río Elqui, IV Región de Coquimbo, Chile*. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/115370>.
- MMA. Ministerio del Medio Ambiente, P. (2010). *Guía de evaluación de riesgos ambientales*.
- MMA. Ministerio del Medio Ambiente (2012). *Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes*.
- Pacheco, P. R., Parodi, M. C., Mera, E. M., Salini, G. A. (2020). Variables meteorológicas y niveles de concentración de material particulado de 10 µm en Andacollo, Chile: un estudio de dispersión y entropías. *Información tecnológica*, 31(6), 171-182.
- Plan Regulador Intercomunal de la región de Coquimbo, G. R. I. R. (2019, April). Resolución-110-Abr-2019 Ministerio del Interior y Seguridad Pública; Gobierno Regional Iv Región De Coquimbo (Biblioteca del Congreso| Ley Chile). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J. L., & Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*, (57), 177-192.
- Salas, S., Jiménez, E., Montaña, E., Garay-Flühmann, R., Gauthier, D., & Díaz, H. P. (2012). *Vulnerabilidad al cambio climático, desafíos para la adaptación en las cuencas de Elqui y Mendoza*. La Serena, Chile. Editora del Norte.
- Samela, C., Troy, T. J., Manfreda, S. (2017). Geomorphic classifiers for flood-prone areas delineation for data-scarce environments. *Advances in water resources*, 102, 13-28.
- Samela, C., Albano, R., Sole, A., & Manfreda, S. (2018). A GIS tool for cost-effective delineation of flood-prone areas. *Computers, Environment and Urban Systems*, 70, 43-52.
- Samela, C., Persiano, S., Bagli, S., Luzzi, V., Mazzoli, P., Humer, G., Castellarin, A. (2020). Safer_RAIN: a DEM-based hierarchical filling-&-Spilling algorithm for pluvial flood hazard assessment and mapping across large urban areas. *Water*, 12(6), 1514.
- Scaff, F. M. (2012). *Interpretación hidro-meteorológica de los gradientes orográficos de precipitación en el Valle del Elqui*. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/112074>.
- SERNAGEOMIN. Servicio Nacional de Geología y Minería, 2019. *Anuario de la Minería de Chile*, https://www.sernageomin.cl/pdf/anuario_2019_act100720.pdf
- SERNAGEOMIN. Servicio Nacional De Geología y Minería, 2020. *Catastro Nacional Depósito de relaves*. Disponible desde internet en: <https://www.sernageomin.cl/deposito-de-relaves/> (con acceso el 13/10/2021).
- Silva, M., Souza, G. (2020). *Metodologías para el uso de factores de emisión: material particulado en depósitos de relaves abandonados*, serie Medio Ambiente y Desarrollo, N° 170 LC/TS.2020/92), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Squeo, F. A., Arancio, G., Cavieres, L. A. (2001). *Sitios prioritarios para la conservación de la flora nativa con riesgos de extinción en la IV Región de Coquimbo, Chile*. Libro rojo de la flora nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Coquimbo, 171-193.

Tipo de Publicación: ARTÍCULO.

Trabajo recibido el 08/11/2021 y aprobado para su publicación el 05/12/2021.

COMO CITAR

Alencar da Silva, A. K. M.; Contreras Franco, C. B. y Parodi, D. M. C. (2021). Modelación de áreas inundables en un sector minero de la cuenca Quebrada El Arrayán – Región de Coquimbo - Chile.. *Cuadernos del CURIHAM*, 27, 59-68. DOI: <https://doi.org/10.35305/curiham.v27i.170>

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

CUANTIFICACIÓN DE LA RECARGA AL ACUÍFERO EN EL SECTOR INFERIOR DE LA CUENCA DEL RÍO CARCARAÑÁ

QUANTIFICATION OF THE RECHARGE TO THE AQUIFER IN THE LOWER SECTOR OF THE CARCARAÑÁ RIVER BASIN

Marcelo H. Polare^{(1)(*)} y Luis S. Vives⁽²⁾⁽³⁾

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

⁽²⁾Instituto de Hidrología de Llanuras. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Azul, Buenos Aires, Argentina.

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

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

RESUMEN

En este trabajo se presenta el cálculo de la recarga al acuífero en el sector inferior de la cuenca del río Carcarañá, provincias de Córdoba y Santa Fe, Argentina. En primer instancia se definieron cinco zonas de recarga a partir de un profundo estudio edafológico de los suelos, y desarrollando de manera novedosa el empleo de la capacidad de uso de los mismos como una herramienta robusta a la hora de la delimitación y zonificación. En función de los datos meteorológicos recopilados, se dividió la zona de estudio en tres sectores representados cada uno por una localidad (Oliveros, Casilda y Marcos Juárez). En cada uno de estos sectores se cuantificó la recarga mediante balances hídricos seriados aplicando el método exponencial a paso diario. Para esto, y teniendo como datos de ingreso las variables agrohidrológicas de los suelos, precipitaciones y evapotranspiraciones potenciales diarias, se implementó una planilla de cálculo que brinda valores de recarga diarias, mensuales y anuales. Como resultados para el período 1962-1966, la relación promedio recarga – precipitación para la mejor zona de recarga varió de 16.5% en Oliveros a 6.5% en Marcos Juárez.

Palabras clave: mapa de recarga, capacidad de uso del suelo, balance hídrico seriado, cálculo de recarga.

ABSTRACT

This paper presents the calculation of aquifer recharge in the lower sector of the Carcarañá river basin, provinces of Córdoba and Santa Fe, Argentina. In the first instance, five recharge zones were defined on the basis of an in-depth edaphological study of the soils, and the use of their capacity of use as a robust tool for delimitation and zoning was developed in a novel way. Based on the meteorological data collected, the study area was divided into three sectors, each represented by a locality (Oliveros, Casilda and Marcos Juárez). In each of these sectors, recharge was quantified by means of serial water balances applying the exponential method at a daily rate. For this purpose, and taking as input data the agro-hydrological variables of the soils, precipitation and potential daily evapotranspiration, a spreadsheet was implemented that provides daily, monthly and annual recharge values. As results for the period 1962-1966, the average recharge - precipitation ratio for the best recharge zone varied from 16.5% in Oliveros to 6.5% in Marcos Juárez.

Keywords: recharge map, land use capacity, serial water balance, recharge calculation.

INTRODUCCIÓN

La cuenca inferior del río Carcarañá se extiende desde el sudeste de la provincia de Córdoba y ocupa la zona centro – sur de la provincia de Santa Fe. El río toma su nombre desde la confluencia del río Tercero y el sistema conformado por los ríos Cuarto y Saladillo, en la provincia de Córdoba, e ingresa en la provincia de Santa Fe en cercanías de la localidad de Cruz Alta. Antes de desembocar en el río Coronda, el río Carcarañá recorre la provincia de Santa Fe a lo ancho, recibiendo los aportes de los arroyos Tortugas, de las Mojarra, Leones y Cañada de Gómez.

La cuenca está enclavada en una zona agrícola ganadera por excelencia, donde en los últimos tiempos hubo una evolución desde la ganadería a una actividad agrícola predominante, siendo los cultivos principales: soja, maíz, trigo, sorgo y girasol. Más de 40 localidades se encuentran ligadas a la cuenca baja del río Carcarañá, las que, además de la agricultura y la ganadería, tienen su sostén en diversos emprendimientos comerciales e industriales, en donde la provisión de agua de calidad adquiere un carácter importante para el sostén de la población.

Si bien las localidades ubicadas al este de la provincia de Santa Fe captan agua potable de los cursos de agua superficiales, la problemática vinculada a la calidad y cantidad del agua disponible se manifiesta en el oeste de la provincia, fundamentalmente en lo que hace a la concentración de arsénico, que llega a alcanzar más de treinta veces lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud para las personas. Pero también es para prestar mucha atención lo concerniente a la presencia de flúor, donde en la zona de estudio promedia el doble de lo recomendado por dicha organización. Salvo el abastecimiento de agua potable a las escasas localidades de la zona de estudio que se encuentran conectadas a los acueductos construidos, las aguas subterráneas constituyen la única fuente de suministro disponible, a través de captación mediante pozos de bombeo y posterior tratamiento mediante diversos métodos, como el de ósmosis inversa en localidades, o bien consumo directo para las numerosas estancias que se encuentran en dicha zona.

La gran mayoría de los pozos de captación se encuentran ubicados en los acuíferos que posee el paquete sedimentario cuaternario de la llanura

pampeana (lo que informalmente se denomina: Sedimentos Pampeanos o Formación Pampeana) y en menor proporción en los localizados en las arenas que infrayacen a los Sedimentos Pampeanos. De los acuíferos citados, los pozos de captación se ubican en aquellos acuíferos que, fundamentalmente, provean agua de razonable calidad, ya que existen otros en donde las aguas no son aptas para el consumo, y con variaciones a nivel local dentro de la misma cuenca.

Por lo tanto, con la idea de implementar en un futuro cercano, un plan robusto de gestión del uso sustentable del agua subterránea apoyado con el empleo de un modelo numérico de flujo de agua subterránea, se requirió conocer en detalle los mecanismos para determinar la infiltración eficaz de este sistema acuífero de la cuenca inferior del río Carcarañá, que para este caso se asumió como la recarga al acuífero. Esto se realizó en el período 1962-1966 previo al inicio de los estudios y de esta forma comenzar con un sistema acuífero en equilibrio. La metodología para el cálculo de la recarga de este trabajo podrá ser extensiva en estudios para períodos posteriores hasta la actualidad.

METODOLOGÍA

El trabajo se desarrolló en dos etapas: la primera consistió en definir las distintas zonas de recarga de la zona de estudio, teniendo en cuenta las características físicas y químicas de los distintos tipos de suelos existentes en el área, sus texturas, la topografía y la intensidad de los procesos erosivos que los afectan. Estos factores son considerados de las Cartas de Suelos, utilizando como herramienta innovadora el empleo de las respectivas capacidades de uso de los suelos, y en particular de aquellos involucrados en la zona de estudio. Las zonas de recarga están constituidas por unidades cartográficas de suelos en función de los condicionantes que presentan para el escurrimiento superficial y el drenaje interno.

La segunda etapa fue cuantificar la recarga. Para ello se desarrollaron Balances Hídricos Seriadados (BHS) aplicando el método exponencial a paso diario utilizando el procedimiento de Thornthwaite y Mather -TM- (1957). Este método se combinó con la modificación propuesta por Scozzafava y Tallini (2001), empleando el método del número de curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos

(USDA-SCS), actualmente Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS), para el cálculo del escurrimiento superficial provocado por un evento aislado, y que tiene en cuenta el tipo de suelo, el uso del mismo, la pendiente del terreno y la condición de humedad del suelo previa al evento.

Particularmente, Scozzafava y Tallini (2001) plantean a través del método del CN calcular primero el escurrimiento superficial (Q) y luego restar este valor a la lluvia total del evento (P), obteniendo una lluvia ficticia $P_f = P - Q$, y a la que se le aplican las ecuaciones correspondientes al balance hídrico. De esta manera, los excedentes calculados corresponden a la infiltración neta.

Para el cálculo de los BHS se tienen como datos las precipitaciones y evapotranspiraciones potenciales diarias en el período de estudio.

Con respecto a éstas últimas, el concepto de evapotranspiración potencial (ETP) fue introducido independientemente por Penman (1948) y Thornthwaite (1948), definiendo a la ETP como la máxima evaporación posible en un tiempo dado, cuando el suelo se encuentra en su contenido óptimo de humedad, sin limitante en el suministro hídrico y cubierto totalmente con un cultivo verde de baja altura, con un albedo entre 0.22 y 0.25. En dicha definición la tasa de evapotranspiración no está relacionada a un cultivo específico.

Por este motivo se introdujo el concepto de evapotranspiración de la superficie de referencia, denominada evapotranspiración del cultivo de referencia o evapotranspiración de referencia (ET_0), definiendo (Allen et al., 2006) dicho cultivo como "...un cultivo hipotético con una altura asumida de 0.12 m, con una resistencia de la superficie de 70 $s.m^{-1}$ y un albedo de 0.23, lo que asemeja a la evaporación que ocurre en una superficie extensa de grama verde de altura uniforme, creciendo activamente y bien regada" (p. xiii).

El concepto de una superficie de referencia fue introducido con el fin de evitar la necesidad de definir los parámetros únicos de evapotranspiración para cada cultivo y etapa de crecimiento. Los valores de evapotranspiración de los diferentes cultivos se relacionan con la ET_0 por medio de los coeficientes de cultivo (Allen et al., 2006).

De los diversos métodos existentes para el cálculo de la ET_0 , y tras una reunión de expertos en 1990, se

recomienda adoptar para su cálculo el método combinado de Penman-Monteith de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) según la publicación FAO-56 (método FAO-56 P-M), ya que los valores obtenidos por dicho método son más consistentes con datos reales del uso de agua de diversos cultivos en todas las regiones y climas (Allen et al., 2006). La ecuación utiliza datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento (Ecuación 1):

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (1)$$

donde ET_0 ($mm.d^{-1}$) es la evapotranspiración de referencia, R_n ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$) es la radiación neta en la superficie del cultivo, G ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$) es el flujo del calor del suelo, T ($^{\circ}C$) es la temperatura media del aire a 2 m de altura, u_2 ($m.s^{-1}$) es la velocidad del viento a 2 m sobre la superficie, e_s (kPa) es la presión de vapor de saturación, e_a (kPa) es la presión real de vapor, Δ ($kPa.^{\circ}C^{-1}$) es la pendiente de la curva de presión de vapor y γ ($kPa.^{\circ}C^{-1}$) es la constante psicrométrica. De esta forma $e_s - e_a$ (kPa) es el déficit de presión de vapor.

Finalmente, y para efectuar los estudios de balance hídrico, se desarrolló e implementó una planilla de cálculo que realiza un BHS aplicando el método exponencial a paso diario utilizando el procedimiento de TM, combinándolo con la modificación propuesta por Scozzafava y Tallini (2001) que emplea el método del número de curva (CN).

La planilla incorpora un módulo inicial destinado a la determinación de la Capacidad de Agua Disponible (CAD) para el cultivo y que es la cantidad de agua que puede retener el suelo entre los valores de Capacidad de Campo (CC) y de Punto de Marchitez Permanente (PMP). La CAD es el agua que dispone el cultivo para su crecimiento.

Para ello se implementó un modelo de suelo edáfico estructurado en cuatro horizontes, caracterizados cada uno por los datos de espesor y las humedades correspondientes a la CC y al PMP expresadas en volumen (Figura 1).

Además, se necesita ingresar el valor de la profundidad radicular efectiva del cultivo. La planilla calcula automáticamente, en función de los

espesores de los horizontes cargados, las profundidades radiculares parciales correspondientes al modelo de suelo considerado.

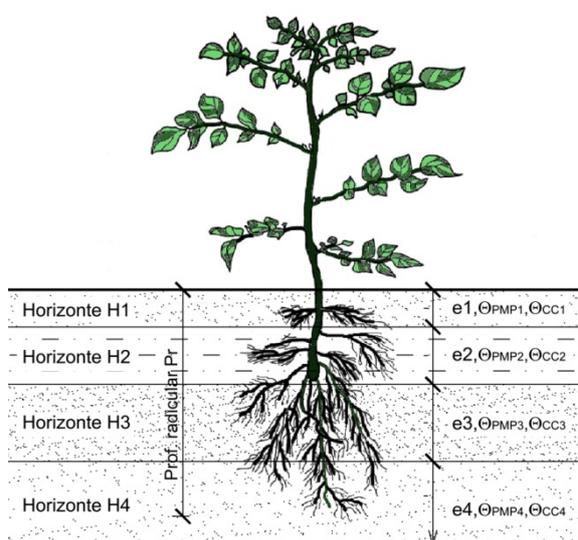


Figura 1. Modelo de suelo implementado en el programa y datos requeridos para cada horizonte. Fuente: Polare (2019).

La CAD se calcula mediante la Ecuación (2):

$$CAD = \sum_{i=1}^4 (\theta_{CC_i} - \theta_{PMP_i}) Pr_i \quad (2)$$

donde CAD (mm) es la capacidad de agua disponible, $\theta_{CC_i}(\text{m.m}^{-1})$ es la humedad de la capacidad de campo de cada horizonte, $\theta_{PMP_i}(\text{m.m}^{-1})$ humedad del punto de marchitez permanente de cada horizonte y Pr_i (mm) es la profundidad radicular efectiva en cada horizonte.

Los datos de humedades de CC y de PMP de cada horizonte fueron calculados previamente mediante funciones de pedotransferencia incluidas en el programa SOILPAR (Acutis y Donatelli, 2003). Este programa permite determinar las propiedades agrohidrológicas de los suelos, previo ingreso de datos provenientes de las descripciones analíticas de series de suelos que se encuentran en las Cartas de Suelos de INTA. Dichos valores calculados se contrastaron posteriormente con datos brindados por la bibliografía existente, como Rawls et al. (1982).

Luego se ingresan en la planilla de cálculo los datos relacionados al método del CN, como ser el número de curva CN_{II} y el coeficiente de abstracción inicial λ . El CN_{II} se obtiene de tablas en función del Grupo Hidrológico de Suelo (GHS), uso y cobertura del

suelo, condición previa de humedad media o promedio y $\lambda = 0.20$. La planilla ofrece la posibilidad de elegir entre dos valores de λ (0.20 o 0.05), ya que para simulaciones continuas puede llegar a ser más apropiado, incrementando el escurrimiento directo para precipitaciones pequeñas (Westenbroek et al., 2010; Woodward et al., 2003). Si se elige $\lambda = 0.05$, la planilla recalcula automáticamente el valor de CN_{II} (Hawkins et al., 2009), ya que éste corresponde a un valor de $\lambda = 0.20$, como se citó anteriormente.

Para la elección de los números de curva correspondientes a condiciones de suelo seco y húmedo en función de la condición de humedad antecedente (CN_I y CN_{III} , respectivamente), se adoptó el criterio de la precipitación de los 5 días previos al evento considerado, adoptando los valores límites del método original.

Para iniciar el BHS se necesita cargar en la planilla de cálculo el almacenamiento inicial al principio del período de estudio.

Como se citó anteriormente, al trabajar con la lluvia ficticia P_f los excedentes determinados por el balance hídrico constituyen las recargas a considerar para el acuífero. La planilla brinda los valores diarios de recarga, como así también los valores mensuales y anuales.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende parte de las provincias de Santa Fe y Córdoba y abarca una superficie de 18000 km². Se encuentra ubicada en plena Llanura Pampeana, comprendiendo la cuenca inferior del río Carcarañá (Figura 2). Presenta un paisaje con evidentes rasgos tectónicos y una morfología en la que se destaca la participación hídrica y eólica entre los procesos geomórficos de superficie, con un desnivel máximo de la superficie topográfica cercano a los 120 m. El 57% del área de estudio corresponde a la cuenca baja del río Carcarañá, y el resto a cuencas de cursos contiguas que no aportan al mismo.

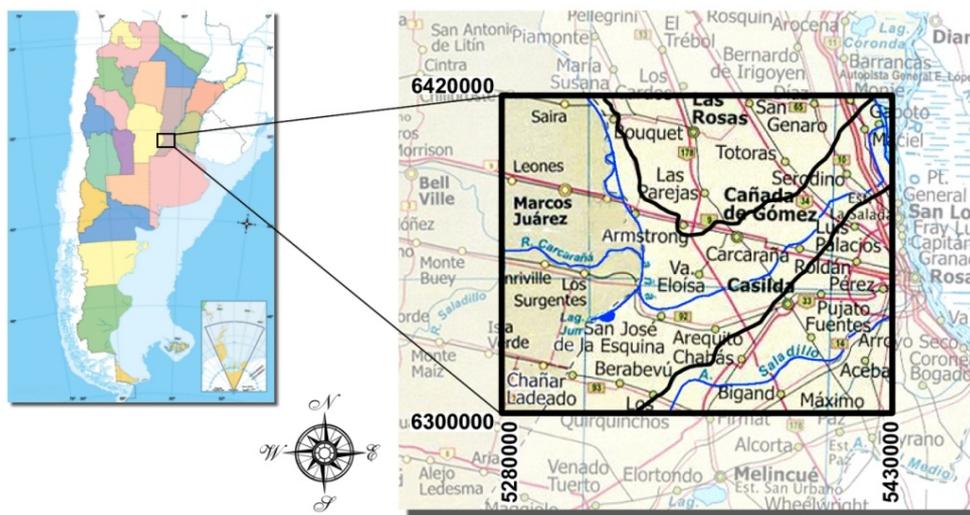
Aspectos climáticos de interés

De acuerdo a la clasificación climática de Köppen, el clima de la zona de estudio es Cfa (subtropical húmedo), con veranos lluviosos y cálidos, sin

estación seca (Kottek et al., 2006; Rubel y Kottek, 2010; Rohli y Vega, 2015).

Las precipitaciones medias anuales para el período 1921-2000 en la zona de estudio, llegan en la región oriental a un máximo de alrededor de 1000 mm, disminuyendo hacia el oeste alcanzando valores de

900 mm. Las precipitaciones semestrales siguen la misma tendencia. En el semestre cálido (octubre a marzo), las precipitaciones varían de 750 mm en el sector este y disminuyen a unos 650 mm en el sector oeste, mientras que en el semestre frío (abril a setiembre), varían de 350 mm a 250 mm (Bianchi y Cravero, 2010; Cravero et al., 2017).



Coordenadas de Gauss-Krüger en metros. Datum CAI69

Figura 2. Área de estudio con los límites de la cuenca inferior del río Carcarañá. Fuente: Basada en Polare (2019).

A través de información pluviométrica recopilada en diversas estaciones de la provincia de Santa Fe (Rafaela, Oliveros, La Silesia, Marcos Juárez y Zavalla) entre 1971 y 2000, Venencio (2007) manifiesta que el máximo mensual de precipitación se produce al final del verano y principios de otoño (marzo, abril), mientras que el mínimo en invierno (junio-agosto). La concentración pluvial es desde octubre a marzo, y en algunos casos abril, cuando cae más del 70% de la precipitación anual, mientras que en la estación seca (restodel año) se produce solamente un 30%, y menos aún del total anual. Aun así, dicha región tiene lluvias todo el año. En la llanura cordobesa el 82% de las lluvias se concentran en primavera-verano y sólo el 18% en otoño-invierno, de acuerdo a registros de precipitación que corresponden a series de 30 a 76 años (Blarasin et al., 2000).

En cuanto a las temperaturas, la zona de estudio presenta variación de la temperatura media anual,

como así también una variabilidad térmica media mensual en el mes más cálido (enero) y en el más frío (julio), respectivamente. Para el período 1921-2000, la temperatura media anual promedio para la zona de estudio es cercana a los 18 °C, y mientras en enero la temperatura media mensual oscila entre 25 °C y 26 °C, en julio varía entre 10 °C y 11 °C, aproximadamente.

Refiriéndonos al período de estudio 1962-1966, la temperatura media anual promedio ronda los 17 °C. La temperatura media mensual en enero es de alrededor de 24 °C y en julio de 11 °C. Las precipitaciones medias anuales varían desde 930 mm en el sector este hasta los 720 mm en el sector oeste.

Se muestra en la Figura 3 las precipitaciones medias mensuales en Oliveros y Marcos Juárez, ambas cercanas a los límites este y oeste de la zona de estudio, respectivamente.

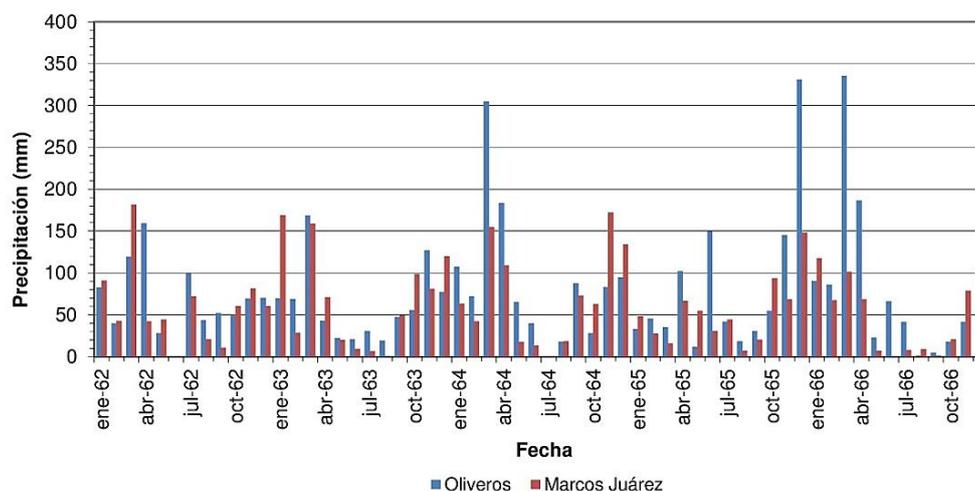


Figura 3. Precipitaciones medias mensuales en Oliveros y Marcos Juárez (1962-1966).

Edafología

Para la descripción y mapeo de los suelos que componen el área de estudio se tuvo como base la información en escala 1:500000 de la plataforma GeoINTA (un sistema para consulta de mapas, imágenes y bases de datos georreferenciadas de proyectos y programas del INTA - GeoINTA, 2013), el Mapa de Suelos de la provincia de Santa Fe (INTA – MAG, 1981), y el Atlas de Suelos de la República Argentina (INTA, 1990; INTA-Aeroterra SA, 1995).

En la Figura 4 se observan las unidades cartográficas de los suelos presentes en la zona de estudio, y cuyas leyendas están compuestas por cuatro partes que describen los nombres del suelo a nivel de Orden, Gran Grupo, Subgrupo y número de unidad cartográfica.

A continuación se describen brevemente las principales unidades cartográficas de suelos presentes en la zona.

La unidad MI_{tc}-1 ocupa cerca del 40% de la superficie de la zona de estudio y comprende planicies altas, bien drenadas y suavemente onduladas con una red de drenaje bien definida. Esta unidad está compuesta por Argiudoles típicos con una gran aptitud para la agricultura. Estos suelos presentan un horizonte B_{2t} con mayor porcentaje de arcilla que dificulta la normal infiltración del agua de lluvia.

La unidad MI_{tc}-40 comprende una zona de transición de planos altos a planos bajos, ubicada al

este del Bloque de San Guillermo y al este de la Falla El Trébol, considerando a éstas como referencias geológicas. La componen una asociación de Argiudoles típicos en las partes más altas y mejor drenadas del relieve, Argiudoles ácuicos en las partes intermedias y Argialboles típicos en las depresiones, donde el drenaje es sensiblemente inferior al de las anteriores disposiciones del paisaje. Las limitaciones de la unidad son la permeabilidad lenta en los Argiudoles ácuicos y el drenaje imperfecto en los Argialboles típicos.

La unidad MI_{tc}-6 corresponde a planicies altas muy extendidas y bien drenadas superficialmente. La planicie se presenta interrumpida por ejes de drenaje, o cauces de escurrimiento temporario, de orientación OSO-ENE dispuestos en forma paralela, compuestos por una sucesión de cubetas pequeñas que se interconectan en periodos de lluvia de cierta magnitud, drenando normalmente los sectores. La unidad está compuesta por una asociación de Argiudoles típicos en los sectores bien drenados, de lomas planas extendidas y Argiudoles ácuicos en los sectores deprimidos del paisaje, teniendo éstos como limitaciones la menor permeabilidad y drenaje.

La unidad MI_{ve}-1 tiene su desarrollo en un paisaje suavemente ondulado con lomas planas y extendidas, y moderadamente bien drenado. Está compuesta por Argiudoles típicos y Argiudoles vérticos. Comprende el área SE de la cuenca del Carcarañá y extendiéndose fuera de ella en el departamento San Lorenzo. Por el elevado contenido de materiales finos, estos suelos presentan problemas de permeabilidad, y en épocas de lluvias excesivas, los cultivos pueden sufrir asfixia por esa causa.

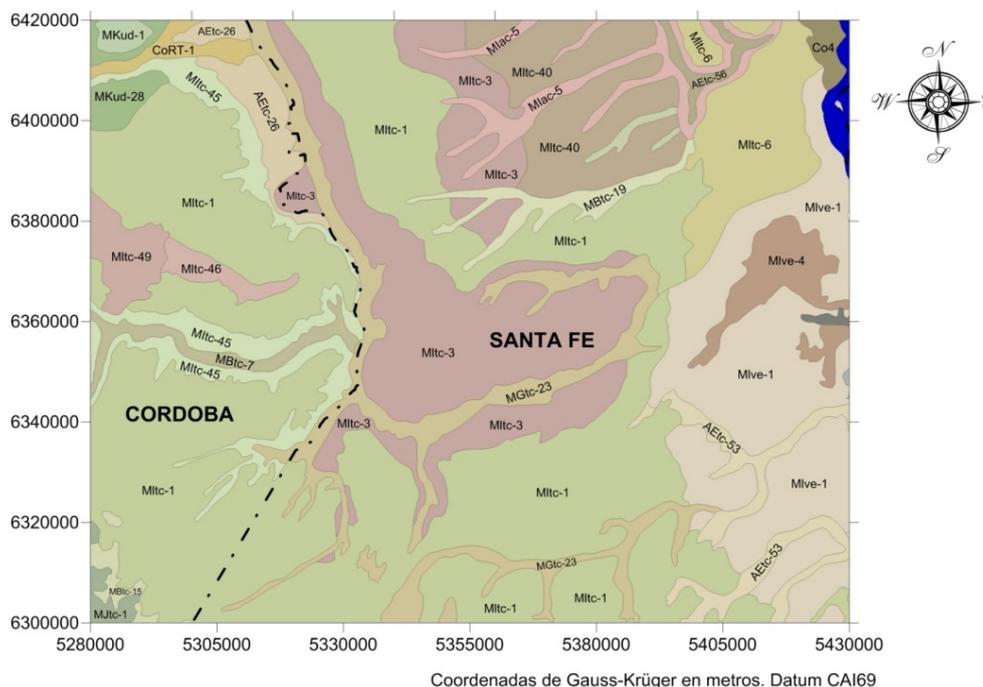


Figura 4. Mapa de suelos del área de estudio. Fuente: GeoINTA (2013).

La unidad Mlve-4 ocupa el centro del departamento San Lorenzo en un paisaje muy suavemente ondulado con lomas planas extendidas de relieve normal-subnormal y moderadamente bien drenadas, interrumpidas por planos bajos de relieve subnormal cóncavo, aledaños a vías de escurrimiento permanentes de lento drenaje. Se compone de una asociación de Argiudoles vérticos en los sectores de lomas y Natracualfes típicos en los planos bajos extendidos. La limitante de los Argiudoles vérticos es la permeabilidad lenta derivada del alto contenido de arcilla del horizonte Bt, haciéndolos relativamente impermeables en períodos lluviosos, mientras que las limitaciones de los Natracualfes típicos es la sodicidad debida a su ubicación.

La unidad Mltc-3 está compuesta por Argiudoles típicos presentando erosión hídrica actual. Ocupa altos suavemente ondulados y planos extendidos, áreas bien drenadas, con pendientes de hasta 2 % ubicadas a ambos márgenes de los cauces principales (río Carcarañá y arroyo Cañada de Gómez). Ello contribuye a que los suelos sean susceptibles a la erosión hídrica ligera o moderada no solo por la pendiente natural del terreno sino por el mal manejo de estos suelos. Dichos suelos forman el extremo sur del Bloque Elevado de San Guillermo, y particularmente se desarrollan en las pendientes laterales del valle del río Carcarañá y

fondos de valles tributarios y en el talud asociado a la Falla El Trébol.

La unidad Mltc-45 ocupa parte de las pendientes laterales del valle del río Carcarañá en la provincia de Córdoba, y en las pendientes vinculadas a las cañadas de San Antonio, Santa Lucía y Las Totoras, como así también a los arroyos Tortugas y Leones. Está conformada por Argiudoles típicos ubicados en zonas de media loma y con limitaciones debidas a erosión hídrica actual, y Natracualfes típicos localizados en pies de pendiente y con limitaciones debidas a erosión hídrica actual y sodicidad.

Las restantes unidades (MGtc-23, MBtc-7, MBtc-19, AETc-26, AETc-53, AETc-56, MIac-5, CoRT-1 y Co4) ocupan aproximadamente el 15% de la zona de estudio, y corresponden a planos bajos extendidos y aledaños tanto a vías de escurrimiento de cauce elaborado como a las que no poseen una dirección definida. Se pueden encontrar en dichas unidades complejos de Natracualfes típicos, Natracualfes típicos, Argiudoles ácuicos, Natralboles típicos, Argialboles típicos, como así también complejos indiferenciados. Las limitaciones principales de los suelos están dadas por su imperfecto drenaje, susceptibilidad a inundación o anegamiento, pobre permeabilidad, lento a muy lento escurrimiento del exceso de agua, sodicidad y salinidad.

MAPA DE ZONAS DE RECARGA

El mapa de zonas de recarga se confeccionó a partir de un mosaico aerofotográfico compuesto por 49 fotocartas de suelos en escala 1:50000, digitalizadas y georreferenciadas en proyección Gauss-Krüger faja 5 Datum CAI69. Además, se tomó como base la información brindada por las Cartas de Suelos de INTA (INTA, 1974-1988), como así también las correcciones de las mismas llevadas a cabo por dicho instituto (Tosolini -INTA-, com. pers.).

Se distinguieron en el área de estudio cinco zonas, atendiendo a los condicionantes presentes en las unidades cartográficas de suelos que las integran y

que están íntimamente ligados al escurrimiento superficial y el drenaje interno. En la Tabla 1 se presenta un resumen de las características más relevantes de cada una de las zonas de recarga.

Los límites de cada zona de recarga se efectuaron a través de un proceso de vectorización mediante un programa de soporte SIG.

En la Figura 5 se muestra un modelo digital de elevaciones del área de estudio superpuesto con el mapa de zonas de recarga. En dicha figura puede observarse claramente la Zona 2 asociada a las mayores pendientes del terreno, generados por deformación tectónica o por acción fluvial.

Tabla 1. Características de las zonas de recarga.

Zona	Tipo de suelo	Textura	Topografía y/o erosividad	Drenaje, salinidad/alcalinidad	Capacidades de uso
1	Argiudoles típicos, con una baja proporción en el total de Argiudoles ácuicos y Argiudoles vérticos	Franco limosa con un horizonte de textura franco arcillo limosa intercalado	Relieves llanos a suavemente ondulados y con nula a ligera erosión	Suelos profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados	I-1, I-1/2 y I-2
2	Argiudoles típicos, con una baja proporción de Argiudoles ácuicos y suelos con alto contenido de Sodio y/o Sales Solubles (Nátricos)	Franco limosa con un horizonte de textura franco arcillo limosa intercalado	Relieves con pendientes suaves a moderadamente pronunciadas, con erosión laminar y en surcos moderada a severa	Drenaje restringido por ligera a moderada salinidad y/o alcalinidad	IIe, IIs, IIIe y IIIes
3	Argiudoles típicos y Argiudoles ácuicos, y con presencia de Argialboles y suelos con alto contenido de Sodio y/o Sales Solubles (Nátricos)	Franco limosa con interc. de horizontes de textura franco arcillo limosa y arcillo limosa	Suelos de relieve llano, con pendientes largas y gradientes bajos, en general, como así también sectores cóncavos alargados que reciben excesos de agua provenientes de los sectores contiguos más elevados. Nula a ligera erosión	Drenaje interno imperfecto a pobre; en algunos casos se presenta una ligera a moderada salinidad y/o alcalinidad	IIw, IIws, IIIs y IIIw

Tabla 1. Características de las zonas de recarga (cont.).

4	Predominio de Argialboles y suelos con alto contenido de Sodio y/o Sales Solubles (Nátricos) y baja presencia de Argiudoles típicos y Argiudoles ácuicos	Franco limosa con interc. de horizontes de textura franco arcillo limosa y arcillo limosa	Suelos excesivamente húmedos, de relieve llano y poco permeables	Drenaje interno pobre asociados con suelos afectados moderada a fuertemente por salinidad y/o alcalinidad	IIIws, IVws y IVes
5	Suelos que constituyen los Complejos Indeterminados, casi en su totalidad	Franco limosa y subsuperf. franco arcillo limosa a arcillo limosa y arcillosa	Comprende suelos que ocupan terrenos casi llanos, como así también suelos ubicados en pendientes muy pronunciadas y con grave erosión laminar y en surcos	Drenaje interno pobre o impedido, fuertemente afectados por salinidad y/o alcalinidad	VIws, VIIws, VIII y VIes

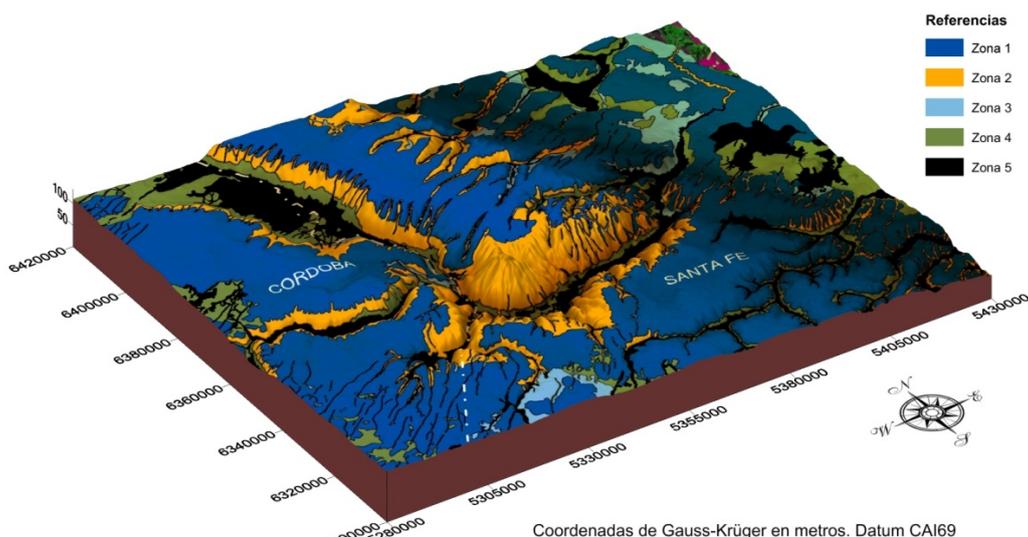


Figura 5. Mapa de recargas superpuesto al modelo digital de elevaciones. Fuente: Polare (2019).

CUANTIFICACIÓN DE LAS RECARGAS

Datos meteorológicos

Teniendo como fuentes al Centro de Información Meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional (CIM-SMN) y al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), se recopilaron, contrastaron y procesaron, para el período de estudio, los datos meteorológicos diarios (y algunos horarios) de

diversas estaciones ubicadas en la zona de estudio y alrededores (Figura 6).

Los datos meteorológicos recopilados corresponden no solo a precipitaciones sino también a diversas variables involucradas en distintos tipos de estudios de evapotranspiración potencial como ser temperaturas máximas y mínimas, temperatura de punto de rocío, humedad relativa, tensión de vapor, velocidad del viento a 2 m y a 10 m, etc.

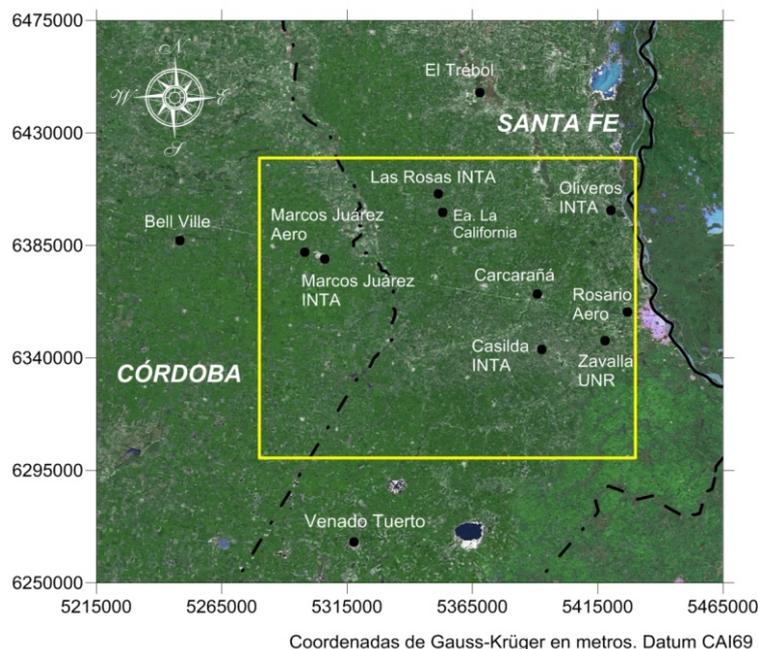


Figura 6. Estaciones meteorológicas empleadas. En línea continua amarilla la zona de estudio. Fuente: Basada en Polare (2019).

Para el presente estudio, por ser las estaciones que presentan las series de datos más completas y por estar además ubicadas en la zona de estudio, se eligieron como las más representativas las de Marcos Juárez, Oliveros y Casilda (con apoyo de la estación UNR Zavalla).

Cálculo de las evapotranspiraciones

Para el cálculo de las evapotranspiraciones correspondientes a un período de cinco años (01/01/1962 - 31/12/1966) surgió el inconveniente de que la implementación del cálculo de la ET_0 por el método de FAO-56 P-M no fue factible llevarla a cabo en dicho período dada la falta parcial de datos de algunas variables meteorológicas necesarias para el cálculo de la ET_0 . La velocidad del viento u_2 fue la variable que presentó menor cantidad de datos para el período en cuestión, ya que no se dispuso por casi un año de datos en la localidad de Oliveros, de todo el período en Casilda y de tres meses en Marcos Juárez. En cambio sí se podían desarrollar los cálculos pertinentes de la ET_0 para períodos posteriores al año 1966.

A pesar de ser la velocidad del viento u_2 la variable que presenta la menor sensibilidad en la ecuación del método de FAO-56 P-M (Howard y Lloyd, 1979; Gong et al., 2006), para el estudio se optó (en primera instancia) no rellenar los datos faltantes por ningún método estadístico, sino que, apoyado en

diversos estudios existentes como los de Xu y Singh (2002), Lu et al. (2005), Yoder et al. (2005), Alexandris et al. (2008), Almorox et al. (2008), Ocampo et al. (2009), Ocampo y Rivas (2010), Sánchez Martínez y Carvacho Bart (2011), Fisher y Pringle III (2013), Tabari et al. (2013), Soriano Soto et al. (2012), entre otros, se llevó a cabo un estudio de diversos métodos de estimación de ETP y ET_0 en el período 1970-2009 con el objetivo de elegir aquel que tuviera el mejor ajuste al método de FAO-56 P-M y que involucrara la menor cantidad de variables con datos disponibles. Se evaluaron los métodos de Priestley - Taylor (1972), Hargreaves - Samani (1985), Turc (1961) y Thornthwaite (1948).

Se efectuó un trabajo que contempló el cálculo de diversos estadísticos como el coeficiente de eficiencia (E) (Nash y Sutcliffe, 1970) y el coeficiente de determinación (R^2) a través de análisis de regresión simple de cada método respecto al estándar FAO-56 P-M, como así también el cálculo de los valores totales anuales, el valor promedio anual de ETP/ ET_0 , y las diferencias porcentuales respecto al método estándar con la finalidad de evidenciar las variaciones interanuales, entre otras.

Finalmente, el método adoptado fue el de Hargreaves-Samani (H-S) (Ecuación 3), que fue el que mejor ajustó para la década 1970-1979, con valores de E y R^2 de 0.97 y 0.98, respectivamente.

$$ET_O = 0.0023(T_{\max} - T_{\min})^{0.5}(T_{\text{med}} - 17.8)Ra \quad (3)$$

donde ET_O (mm.d^{-1}) es la evapotranspiración de referencia, T_{\max} y T_{\min} ($^{\circ}\text{C}$) corresponden a las temperaturas máximas y mínimas diarias, respectivamente, T_{med} ($^{\circ}\text{C}$) es la temperatura media diaria y Ra (mm.d^{-1}) es la radiación extraterrestre.

En la Figura 7 se muestran los valores de evapotranspiración mensual obtenidos por el método elegido para el período 1962-1966 en las localidades de Oliveros, Casilda y Marcos Juárez, observándose que los máximos valores de evapotranspiración se dan en los meses estivales, mientras que los mínimos en los meses invernales, adoptando un comportamiento periódico en el tiempo.

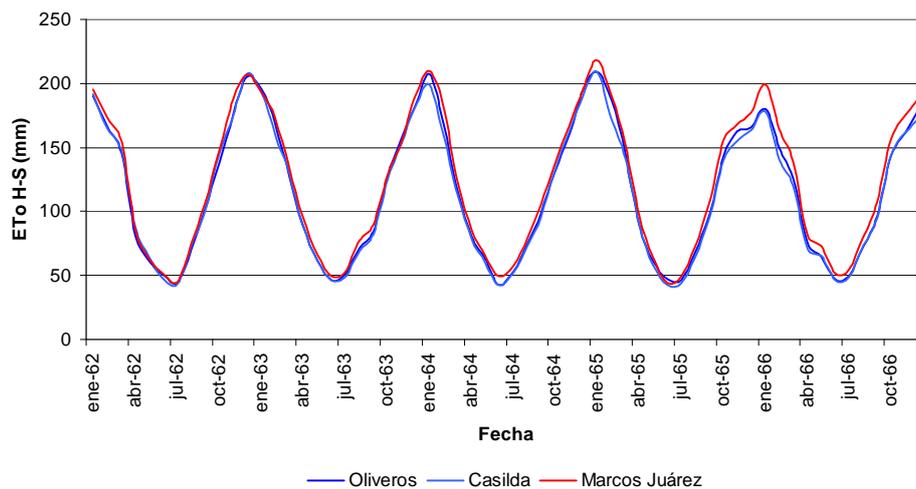


Figura 7. ET_O H-S mensuales, período 01/1962 al 12/1966. Fuente: Polare (2019).

Determinación de los balances hídricos en las zonas de recarga

Se observan en la Figura 8 las cinco zonas de recarga definidas en su momento. Dado que las estaciones meteorológicas adoptadas para los estudios de balance hídrico fueron Oliveros, Casilda (ambas en la provincia de Santa Fe) y Marcos Juárez (provincia de Córdoba), se dividió la zona de estudio en áreas de influencia aplicando el método de los polígonos de Thiessen.

De esta manera la zona de estudio quedó dividida en tres Sectores de Estudios de Balance Hídrico (SEBH), donde se emplearon las precipitaciones y evapotranspiraciones potenciales diarias de Oliveros, Casilda y Marcos Juárez, según corresponda.

Para el cálculo de las CAD fue necesario analizar cuáles son las series, asociaciones y complejos de suelos con mayor presencia areal en cada una de los tres SEBH y cómo estaban distribuidos en los mismos. Una vez terminado este análisis, se cruzaron los datos recopilados y se confeccionó en cada SEBH un perfil edáfico representativo para cada una de las zonas de recarga. Los horizontes que

conformaron cada uno de los perfiles citados estuvieron definidos por sus espesores, texturas y humedades correspondientes a la CC y PMP. Luego, a través del dato de la profundidad radicular efectiva de los cultivos predominantes en cada zona de recarga, se obtuvieron los valores de la CAD para cada una de ellas.

Posteriormente, y aplicando el método del CN-SCS, se determinaron los Grupos Hidrológicos de Suelos (GHS) a los cuales pertenecían los perfiles edáficos representativos definidos anteriormente, basándose para dicha clasificación en las características texturales de los mismos.

Teniendo en cuenta esto y en función del tipo de cultivos y el uso del suelo, se determinaron los números de curva CN_{II} para cada zona de recarga (Luque et al., 1979; USDA-NRCS, 2002, 2004, 2009; Riccardi et al., 2008; Scuderi et al., 2008; Forestieri, et al., 2013).

Una característica importante en la zona 2 de recarga es la presencia de erosión en el suelo debida a que es la zona que presenta el mayor gradiente de pendiente topográfica del área de estudio.

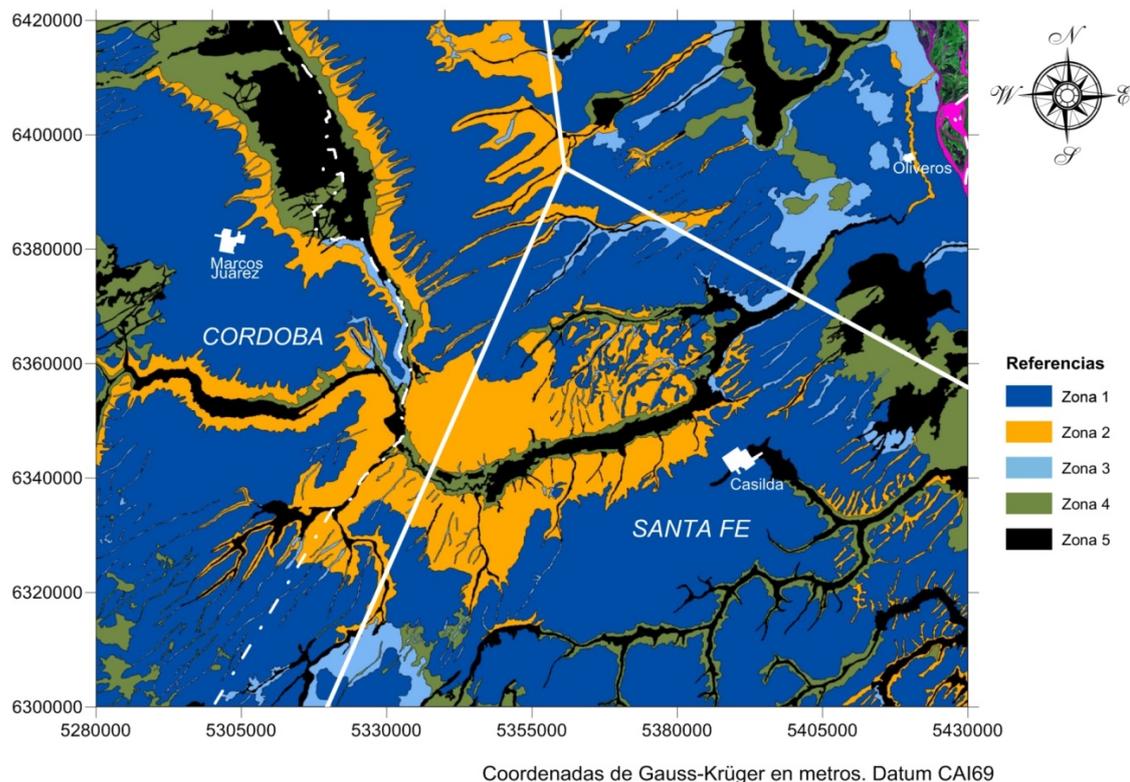


Figura 8. Zonas de recarga. División de la zona de estudio en tres sectores de acuerdo con qué estación meteorológica se trabaje: Oliveros, Casilda o Marcos Juárez. Fuente: Polare (2019).

A pesar de que la pendiente máxima asumida por el método del SCS para no modificar el CN es del 5% (Huang et al., 2006; Ritzema, 2006; Hawkins et al., 2009), Luque et al. (1979) consideraron en su trabajo la incidencia de la pendiente en el valor del CN_{II} , aumentando éste a medida que crece la pendiente topográfica, por lo que se adoptó este criterio para los CN_{II} de la zona 2 de recarga, en función del rango de pendiente que adopta la moda en cada una de los SEBH.

A modo de ejemplo, se muestran para el SEBH Casilda los valores de las variables citadas anteriormente de cada una de las cinco zonas de recarga (Tabla 2).

Por último, se efectuaron los balances hídricos seriados para todas las zonas de recarga del área de estudio para el período de tiempo (01/01/1962 a 31/12/1966).

RESULTADOS

Para el valor de la recarga de cada una de las zonas se adoptó el promedio anual de las recargas

obtenidas en el BHS para el período de estudio 1962-1966.

En la Figura 9 se observan, a modo de ejemplo, los valores de recargas y precipitaciones diarios, mensuales y anuales para la zona 1 de recarga en el período de estudio para la SEBH Casilda.

Se observa en el estudio diario que las recargas prácticamente coinciden con eventos de precipitaciones importantes, consecuencia de las lluvias de días previos y las condiciones de humedad en las que se encuentra el suelo al momento de dichos eventos, de acuerdo a la metodología aplicada.

A nivel mensual, si bien se pierde la distribución temporal de las precipitaciones, se mantendría la tendencia antes señalada. En el estudio anual, se observa que la recarga representa un porcentaje bajo respecto a las precipitaciones.

En la Tabla 3 se presentan, para cada zona de recarga, los valores de recarga finales para cada una de las cinco zonas definidas, como así también el porcentaje de la recarga respecto a la precipitación media.

Tabla 2. SEBH Casilda. Variables edáficas y de escurrimiento superficial consideradas para cada zona de recarga.

Variable		Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Horizonte 1	textura	FL	FL	FL	FL	FL
	espesor (cm)	20	10	25	30	25
	CC (m.m ⁻¹)	0.37	0.36	0.38	0.35	0.35
	PMP (m.m ⁻¹)	0.18	0.18	0.20	0.16	0.16
Horizonte 2	Textura	FAL	FAL	AL	FAL-AL	AL-FAL
	espesor (cm)	70	60	65	65	70
	CC (m.m ⁻¹)	0.40	0.37	0.45	0.40	0.44
	PMP (m.m ⁻¹)	0.23	0.20	0.28	0.23	0.26
GHS		C	C	D	D	D
Pr (mm)		700	700	650	650	450
CAD (mm)		123	120	113	117	84
CN _{II}		72	78	77	80	84

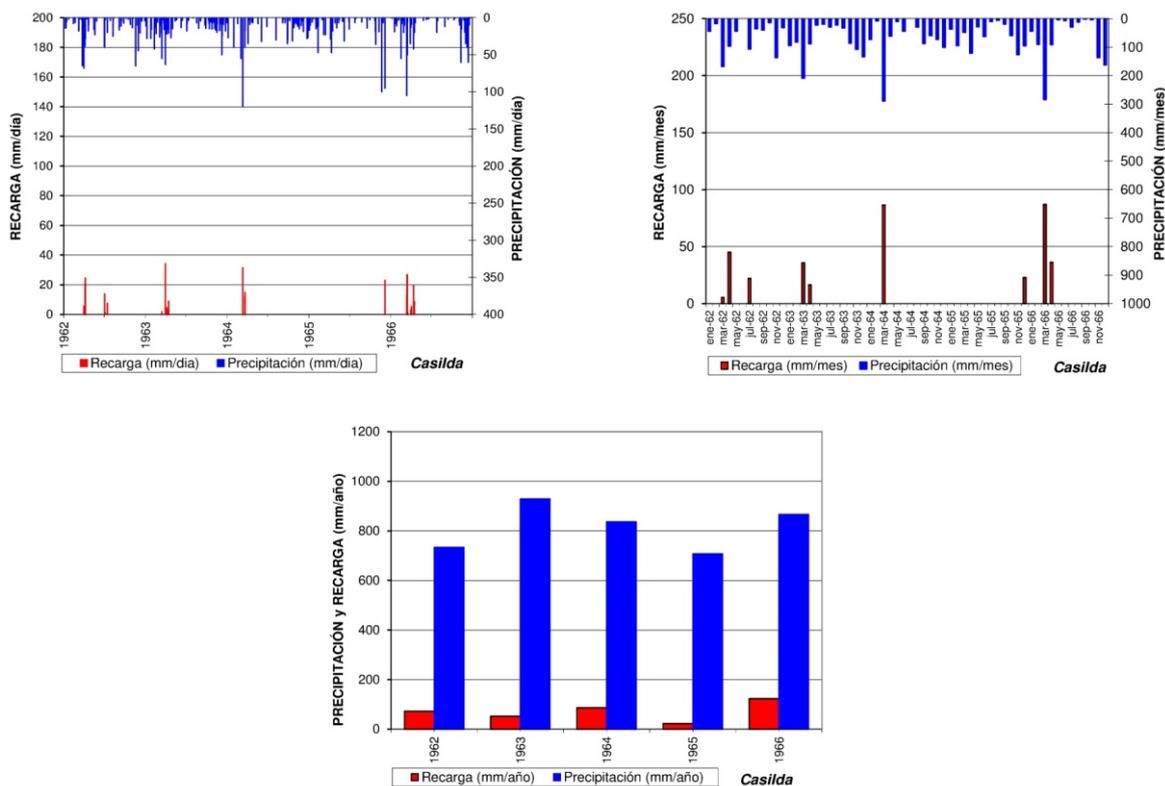


Figura 9. SEBH Casilda. Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales (zona 1 de recarga). Basado en Polare (2019).

Tabla 3. Recargas estimadas en mm.año⁻¹ y porcentaje de la recarga respecto a la precipitación media.

Localidad	Zona 1		Zona 2		Zona 3		Zona 4		Zona 5	
	mm.año ⁻¹	%	mm.año ⁻¹	%	mm.año ⁻¹	%	mm.año ⁻¹	%	mm.año ⁻¹	%
Oliveros	153.5	16.5	130.3	14.0	117.1	12.6	87.2	9.4	54.6	5.9
Casilda	71.6	8.8	58.9	7.2	53.7	6.6	31.0	3.8	20.3	2.5
Marcos Juárez	46.7	6.5	42.1	5.9	38.2	5.3	17.0	2.4	5.1	0.7

CONCLUSIONES

Empleando la capacidad de uso de los suelos, haciendo énfasis en aquellos factores relacionados con la dinámica de escurrimiento superficial y subterráneo, se zonificó en detalle la recarga y se desarrolló una herramienta robusta para el cálculo de la misma.

Para el cálculo de las recargas se desarrolló e implementó una planilla de cálculo para los estudios de balance hídrico seriado a paso diario y que contempla las distintas variables involucradas, pudiendo obtener valores de recarga diarios, mensuales y anuales.

Tomado como ejemplo la zona 1 de recarga, es decir, la zona con buen drenaje y sin limitantes, se observan para el período 1962-1966 que las relaciones recarga-precipitación decrecen desde un máximo en el este (Oliveros con 16.5%) hasta Marcos Juárez en el oeste con 6.5%, teniendo entre ambas a Casilda con 8.8%.

AGRADECIMIENTOS

A los ingenieros agrónomos Jorge Postma (FCEIA-UNR) y Dr. Ing. Sergio Montico (FCA-UNR), por el asesoramiento en lo concerniente a la temática edafológica.

REFERENCIAS

Acutis, M. y Donatelli, M. (2003). SOILPAR 2.00: software to estimate soil hydrological parameters and functions. Short communication. *Europ. J. Agronomy*, 18, 373-377.

Alexandris, S., Stricevic, R. y Petkovic, S. (2008). Comparative analysis of reference evapotranspiration from the surface of rainfed grass in central Serbia, calculated by six empirical

methods against the Penman-Monteith formula. *European Water*, 21/22, 17-28.

Almorox, J., Hontoria, C. y Benito, M. (2008). Comparación de algunos métodos de estimación de la evapotranspiración en Uruguay. *Ingeniería Química Uruguay*, 33, 4-9.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO Publicación Serie Riego y Drenaje 56. Roma, Italy: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Bianchi, A. R. y Cravero, S. A. C. (2010). *Atlas Climático Digital de la República Argentina*. Estación Experimental Agropecuaria Salta, Centro Regional Salta Jujuy. Salta, Argentina: INTA.

Blarasin, M., Cabrera, A. y Degiovanni, S. (2000). *Hidrogeología regional: el agua subterránea como recurso fundamental del sur de la provincia de Córdoba, Argentina*. Ponencia presentada en el I Congreso Mundial Integrado de Aguas Subterráneas, XI de la Asociación Brasileira de Aguas Subterráneas (ABAS) y V de la Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el desarrollo (ALHSUD). Fortaleza, Brasil.

Cravero, S. A. C., Bianchi, C. L., Elena, H. J. y Bianchi, A. R. (2017). *Clima de la Argentina Mapas digitales mensuales de precipitaciones y precipitación menos evapotranspiración potencial: adenda del Atlas Climático digital de la República Argentina*. Salta: INTA.

Fisher, D. K. y Pringle III, H. C. (2013). Evaluation of alternative methods for estimating reference evapotranspiration. *Agricultural Sciences*, 4(8A), 51-60.

Forestieri, C., Navarro, R., Ruggeri, P., Martín, S., Salama, V. y Policardo, G. (2013). *Implementación de medidas no estructurales en la cuenca del arroyo Ludueña - Ley 13.246*. Ponencia presentada en el XXIV Congreso Nacional del Agua, San Juan, Argentina.

GeoINTA. (2013). *Suelos de la República Argentina. Escala: 1:500 000*. Visor GeoINTA. Disponible en: <http://visor.geointa.inta.gob.ar/>

- Gong, L., Xu, C., Chen, D., Halldin, S. y Chen, Y. D. (2006). Sensitivity of the Penman–Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of Hydrology*, 329, 620-629.
- Hargreaves, G. H. y Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2), 96-99.
- Hawkins, R. H., Ward, T. J., Woodward, D. E. y Van Mullem, J. A. (2009). *Curve Number Hydrology: State of the Practice*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Howard, K. W. F. y Lloyd, J. W. (1979). The sensitivity of parameters in the Penman evaporation equations and direct recharge balance. *Journal of Hydrology*, 41, 329-344.
- Huang, M., Gallichand, J., Wang, Z. y Goulet, M. (2006). A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China. *Hydrol. Process*, 20, 579-589.
- INTA-MAG. (1981). *Mapa de suelos de la Provincia de Santa Fe. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria* (Tomo 1). Rafaela y Castelar: Autores.
- INTA. (1974-1988). *Colección: Cartas de Suelos de la República Argentina. Escala 1:50000*. Buenos Aires, Rafaela y Córdoba: Autor.
- INTA. (1990). *Atlas de Suelos de la República Argentina escala 1:500000 y 1:1000000*. Buenos Aires: Autor.
- INTA-Aeroterra SA. (1995). *Atlas de Suelos de la República Argentina*. [CD Rom]. Buenos Aires: Fundación ArgenINTA.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. y Rubel, F. (2006). World Map of Köppen-Geiger Climate Classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15 (3), 259-263.
- Lu, J., Sun, G., McNulty, S. y Amatya, D. M. (2005). A Comparison of Six Potential Evapotranspiration Methods for Regional Use in the Southeastern United States. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 41(3), 621-633.
- Luque, J. A., Paoloni, J. D. y Bonorino, G. A. (1979). *Estudio Hidrológico e hidrogeológico de la cuenca del río Sauce Grande*. Serie Hidrológica N° 3. Departamento de Ciencias Agrarias y Departamento de Ciencias Naturales. Universidad Nacional del Sur. 64 pp.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970). River Flow Forecasting through Conceptual Model. Part 1-A Discussion of Principles. *Journal of hydrology*, 10: 282-290.
- Ocampo, D., Rivas, R. y Schirmbeck, J. (2009). *Aptitud de diferentes métodos de estimación de la evapotranspiración: aplicación en una zona de clima templado. Aportes de la Hidrología al conocimiento de los recursos hídricos*. Ponencia presentada en el VI Congreso Argentino de Hidrogeología, Santa Rosa, La Pampa, Argentina.
- Ocampo, D. y Rivas, R. (2010). *Comparación de métodos de estimación de la evapotranspiración a escala local en zonas de clima húmedo y árido*. Ponencia presentada en el I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Azul, Buenos Aires, Argentina.
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032), 120-145.
- Polare, M. H. (2019). *Comportamiento del sistema acuífero en la cuenca inferior del río Carcarañá. Provincias de Santa Fe y Córdoba, República Argentina*. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.
- Priestley, C. H. y Taylor, R. J. (1972). On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 100, 81-92.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., and Saxton, K.E. (1982). Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE* 25:1316-1320.
- Riccardi, G., Zimmermann, E., Basile, P., Stenta, H., Scuderi, C., García, M. y Rentería, J. (2008). El modelado de escurrimiento superficial en cuencas del sur de la provincia de Santa Fe. En G. Riccardi, P. Basile, E. Zimmermann, H. Stenta, C. Scuderi, J. Rentería, y M. García (Eds.), *Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura* (pp. 3-20). Rosario: UNR Editora.
- Ritzema, H. P. (2006). *Drainage Principles and Applications*. Publication 16 (3ª Ed.). Wageningen: ILRI (International Institute for Land Reclamation and Improvement).
- Rohli, R. V. y Anthony J. Vega, A. J. (2015). *Climatology* (3ª Ed.). Burlington, MA: Jones & Bartlett Learning.
- Rubel, F., y Kottek, M. (2010). Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorologische Zeitschrift*, 19(2), 135-141.
- Sánchez Martínez, M. y Carvacho Bart, L. (2011). Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la

- Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 50, 171-186.
- Scuderi, C., Stenta, H., Riccardi, G., Zimmermann, E., Basile, P., García, M. y Rentería, J. (2008). Uso de imágenes satelitales y SIG en la generación de mapas de CN y evaluación de la agregación espacial de este parámetro mediante modelación. En G. Riccardi, P. Basile, E. Zimmermann, H. Stenta, C. Scuderi, J. Rentería, y M. García (Eds.), *Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura* (pp. 77-95). Rosario: UNR Editora.
- Scozzafava, M. y Tallini, M. (2001). Net Infiltration in the Gran Sasso Massif of central Italy using the Thornthwaite water budget and curve-number method. *Hydrogeology Journal*, 9(5), 461-475.
- Soriano Soto, M. D., Pons Marti, V., García-España Soriano, L. y Llinares Palacios, J. (2012). *Comparación de los valores obtenidos en zonas contrastadas climáticamente en la península ibérica utilizando diferentes modelos para el cálculo de la evapotranspiración*. En Asociación Española de Climatología (Ed.), Ponencia presentada en el VIII Congreso Internacional "Cambio Climático. Extremos e impactos" (pp. 651-658), Salamanca, España.
- Tabari, H., Grismer, M. E. and Trajkovic, S. (2013). Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrig. Sci.* 31, 107-117.
- Thornthwaite, C. W. (1948) An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1),55-94.
- Thornthwaite, C. W. y Mather, J. R. (1957). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publ. Climatol.*, 10(3), 1-127.
- Turc, L. (1961) Water requirements assessment of irrigation, potential evapotranspiration: Simplified and updated climatic formula. *Annales Agronomiques*, 12, 13-49.
- USDA-NRCS. (2002). Chapter 8: Land Use and Treatment Classes. In USDA-NRCS, *National Engineering Handbook, title 210-VI. Part 630 Hydrology*. Washington, DC: Authors.
- USDA-NRCS. (2004). Chapter 9: Hydrologic Soil-Cover Complexes. In USDA-NRCS, *National Engineering Handbook, title 210-VI. Part 630 Hydrology*. Washington, DC: Authors.
- USDA-NRCS. (2009). Chapter 7: Hydrologic Soil Groups. In USDA-NRCS, *National Engineering Handbook, title 210-VI. Part 630 Hydrology*. Washington, DC: Authors.
- Venencio, M. del V. (2007). *La Recarga Natural al Acuífero Libre y su Vinculación con la Variabilidad Climática Regional*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Westenbroek, S. M., Kelson, V. A., Dripps, W. R., Hunt, R. J. y Bradbury, K. R. (2010). *SWB – A modified Thornthwaite Soil Water Balance code for estimating ground-water recharge*. (USGS Techniques and Methods 6-A31). Reston, VA: USGS.
- Woodward, D. E., Hawkins, R. H., Jiang, R., Hjelmfelt, A.T., y Van Mullem, J. A. (2003). *Runoff Curve Number method - Examination of the initial abstraction ratio*. En ASCE (Ed.), Ponencia presentada en el World Water and Environmental Resources Congress 2003, Philadelphia, USA.
- Xu, C. Y. y Singh, V. P. (2002). Cross Comparison of Empirical Equations for Calculating Potential Evapotranspiration with Data from Switzerland. *Water Resources Management*, 16(3), 197-219.
- Yoder, R. E., Odhiambo, L. O. y Wright, W. C. (2005). Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid southeast United States. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(2), 197-202.

Tipo de Publicación: ARTÍCULO.

Trabajo recibido el 25/09/2021 y aprobado para su publicación el 18/11/2021.

COMO CITAR

Polare, M. H. y Vives, L. S. (2021). Cuantificación de la recarga al acuífero en el sector inferior de la cuenca el Río Carcarañá. *Cuadernos del CURIHAM*. 27, 69-84. DOI: <https://doi.org/10.35305/curiham.v27i.171>

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

AFECTACIÓN AMBIENTAL POR LAS DESCARGAS DIRECTAS DE LAS AGUAS RESIDUALES SOBRE FUENTES HÍDRICAS: CASO DE ESTUDIO TONA SANTANDER

ENVIRONMENTAL IMPACT OF DIRECT WASTEWATER DISCHARGES ON WATER SOURCES: CASE STUDY TONA SANTANDER

Nelson Andrey Navas Gallo^(*) y Constanza Silva Jaimes

Unidades Tecnológicas de Santander, Bucaramanga, Colombia.

^(*)e_mail: ingnavasg14@gmail.com

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue evaluar la afectación al medio biótico, abiótico y demográfico causado por la generación y descarga de las aguas residuales domésticas sin un adecuado tratamiento sobre fuentes hídricas. Se realizaron análisis de los parámetros DQO, DBO₅, Sólidos Suspendidos Totales y Aceites y Grasas, en el vertimiento para conocer el cumplimiento de la normatividad Ambiental vigente Resolución 0631 de 2015, de igual forma se halló el índice de biodegradabilidad, donde se demostró que es de carácter poco biodegradable. Finalmente se realizó una identificación y evaluación de impactos ambientales de los componentes del ambiente respecto a las actividades cotidianas que se realizan en el municipio, y de esta forma se determinó la magnitud y afectación sobre los recursos ambientales del municipio de Tona Santander.

Palabras clave: agua residual, impacto ambiental, vertimiento.

ABSTRACT

The objective of the present study was to evaluate the affectation of biotic, abiotic and demographic environment caused by the generation and discharge of domestic wastewater without adequate treatment on water sources. Analysis of the parameters COD, BOD, Total Suspended Solids, Dissolved Oxygen, Oils and Fats were carried out in the discharge. This was carried out to check compliance with the current Environmental regulations Resolution 0631 of 2015, in the same way the biodegradability index was investigated, where it was shown to be poorly biodegradable. Finally, an identification and evaluation of environmental impacts of the components of the environment with respect to the daily activities carried out in the municipality was carried out, and in this way the magnitude and impact on the environmental resources of the municipality of Tona Santander were determined.

Keywords: Wastewater, Environmental Impact, water source.

INTRODUCCIÓN

Comenzando en la antigüedad el ser humano, ha venido realizando prácticas relativas a la generación de aguas residuales, desde sus inicios las diferentes sociedades desarrollaban sistemas de canales para recoger flujos de aguas y posteriormente, efectuaban diversas técnicas que la mejoraban de acuerdo a su necesidad. La primera instalación de saneamiento, fue el pozo ciego o pozo negro que apareció en Babilonia hacia 4000 a.C. la cual fue una simple excavación en el suelo donde depositaban los excrementos que se sistematizó a otras localidades del imperio y zonas rurales. (UNESCO, 2017).

El avance técnico y tecnológico que ha desarrollado el hombre, por décadas, se ha visto reflejado en el deterioro del ambiente, especialmente las fuentes hídricas, generando cambios en la calidad de vida, es así que en la década de los setenta, los sistemas socioeconómicos y políticos que lideraron prácticas impositivas a nivel mundial, iniciaron a preocuparse por la problemática que estaban generando a la sociedad, al sobreponer lo económico sobre el factor ambiental, de esta forma se fue implementando la importancia de estudiar las afectaciones que se generan al ambiente por las diferentes actividades industriales y residenciales. (Rodríguez et al., 2011).

Aun así, el recurso hídrico ha generado una solidaridad mundial a todos los niveles, sin distinción de raza, religión y cultura, pues con ello, se trata de preservar la vida como un derecho fundamental, apareciendo infinidad de grupos defensores del medio ambiente, que buscan generar conciencia en los diferentes actores sociales, políticos, académicos y comunales, surgiendo propuestas legislativas en pro de las metodologías de educación ambiental, desarrollo sostenible, tecnologías limpias, y buen aprovechamiento de los recursos naturales, que le permitieron a la sociedad, interactuar entre un proyecto y el medio ambiente a la hora de realizar cualquier actividad, interponiendo la normatividad vigente que rige cada territorio.

Todos los procesos y procedimientos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, están ligados a la capacidad de cobertura que poseen las mismas en cada ente territorial, logrando eliminar gran parte de la carga contaminante que produce la comunidad de cada localidad, en Colombia existen Plantas de Tratamiento de Agua Residual, pero no son suficientes para los más de mil cien (1100) municipios que posee, de igual forma las existentes,

en un alto porcentaje no son eficientes y eficaces en su actividad principal, otro efecto es el aumento de población comparado con la cobertura limitada de las plantas existentes en el ámbito regional y nacional, las cuales realizan las descargas directas sobre fuentes hídricas, impactando directamente los recursos acuáticos como lo son: los ríos, lagos, quebradas y manantiales, los cuales desembocan en el mar u océano, e indirectamente impactando en la biota acuática y en la biodiversidad de los diferentes ecosistemas presentes. (Lizarazo y Orjuela, 2013).

En la actualidad el recurso hídrico demanda gran cantidad de consumo por el incremento de la población, pero en muchas oportunidades el agua presenta alteración en sus propiedades naturales por parte de la diversidad de actividades que ejecuta el hombre para su sustento, haciendo necesario la protección y preservación de este recurso, partiendo de este problema se busca generar conciencia para que se aumente el desarrollo de proyectos, donde se analice la afectación a las fuentes hídricas por las descargas de las aguas residuales sin tratamientos óptimos.

De igual forma la identificación y evaluación de impactos ambientales generados por el funcionamiento de diferentes actividades económicas que se realizan en los municipios es necesaria, estas actividades pueden alterar la calidad del agua directa o indirectamente, por lo cual se ve la necesidad que los entes gubernamentales desarrollen metodologías o proyectos, para conocer el grado de magnitud y afectación de cada uno de los factores ambientales los cuales comprenden elementos bióticos, abióticos y socioculturales que frecuentemente son alterados.

METODOLOGÍA

Características de la zona de estudio.

El estudio se desarrolló sobre la fuente hídrica Rio Tona, en el Departamento de Santander Colombia, el cual se encuentra localizado aproximadamente a 19 kilómetros de la ciudad de Bucaramanga capital del Departamento. La zona se encuentra ubicada sobre los 1100 metros a nivel del mar, con una temperatura comprendida entre los 13 y 19 grados centígrados, y una precipitación anual de 695 milímetros (Ramírez, 2016).

El monitoreo se ejecutó dando cumplimiento a los

requisitos y protocolos contenidos en el instructivo para la toma de aguas residuales del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales; es necesario aclarar que para ejecutar los análisis referentes a la caracterización fisicoquímica, se realizó con un laboratorio acreditado, finalmente la revisión normativa se realizó conforme a lo establecido en la Resolución 631 de 2015 para cargas Correspondientes iguales o menores a 625.00 kg/día. (IDEAM, 2007).

Se realizaron muestras puntuales al vertimiento principal del municipio en diferentes tiempos, los rangos de tiempo fueron de (2) horas; durante un lapso de doce (12) horas en total, mezclas proporcionalmente al caudal el cual se halló por el método Volumétrico. La captación de cada muestra tuvo un volumen de 500 mililitros, con la finalidad de elaborar una muestra compuesta, las cuales fueron dispuestas en un recipiente, con hielo a temperaturas entre un rango de 2 a 8 grados centígrados, garantizando la mínima contaminación o variación en sus características naturales.

Los parámetros ejecutados fueron pH (Standars methods 4500 H+B), DQO (Reflejo cerrado-colorimétrico Standars methods 5220 D), Oxígeno disuelto (Electrodo de membrana, standard methods 4500 – O G), DBO₅ (Incubación a 5 días-electrodo de membrana, standard methods 5210 B, 4500 – O G), Solidos Suspendidos Totales (Gravimétrico – Secado A 103 - 105°C, standard methods 2540 D), Grasas y Aceites (Extracción Soxhlet standard methods 5520 D).

Para elaborar la línea base ambiental se adquirió información primaria a través de visitas de campo en la zona perímetro de estudio, donde se analizó y se identificó los diferentes recursos, y las actividades cotidianas que se realizan en el municipio que generan alguna clase de impacto al ambiente. La información secundaria se basó en el Esquema de Ordenamiento Territorial, Plan de Desarrollo Regional.

La identificación de los impactos se realizó a través del método matricial, el cual establece la interacción en cada uno de los componentes (Aire, Agua, Suelo, Paisaje, Flora, Fauna, Económico y Cultural), los cuales son afectados por las actividades que se realizan en la zona de estudio, en cada celda donde se generó una interacción se trazó una equis (x) indicando de esta forma que

allí se encontraba un impacto negativo o positivo.

La evaluación de impactos ambientales se realizó a través del método de Leopold. El cual es un método indirecto que califica las interacciones entre el proyecto y el ambiente. La matriz contiene dobles entradas en las columnas se ubicaron las actividades que se realizan en la zona de estudio, y en las filas los componentes ambientales, con la información de las interacciones que se generan entre los componentes ambientales y las actividades de la zona de estudio, se procedió a calificar cada interacción a través de tres criterios. (Arboleda, 2008):

Clase: Indica el tipo y signo del impacto positivo (+) o negativo (-).

Magnitud: Representa al grado o nivel de alteración que se genera en el factor ambiental por la ejecución de la actividad, se asignó valores numéricos comprendidos entre 1 y 10, donde 1 es la alteración mínima y 10 la alteración máxima.

Importancia: Analiza la relevancia que tiene factor ambiental en la zona de estudio, se asignó valores comprendidos entre 1 y 10, donde 1 es insignificante y 10 es severo.

Ejecutada la calificación se procedió a realizar la síntesis de los impactos ambientales obtenidos. Para realizar el análisis de la evaluación se halló la media, desviación estándar y Rango de la media, con lo cual se identificaron: las actividades que mayor número de impactos generan, los factores ambientales que se impactan, el número de impactos negativos y positivos, y la calificación numérica de cada uno de los impactos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximo permisibles de las aguas residuales domésticas, de las aguas industriales, comerciales o de servicios.

En la Tabla 1 se observa los resultados de la caracterización del vertimiento principal del municipio de Tona, los cuales se compararon con los valores límites para cargas menores o iguales a 625.00 Kg/día DBO₅ según artículo 8 de la Resolución 0631 del año 2015.

Tabla 1. Comparación análisis fisicoquímicos del vertimiento (Autoría propia.)

Análisis	Límites permisibles	Resultados	Unidades
pH	6.00-9.00	7.45	Unidades pH
DQO	180.00	129	mg O ₂ /L
DBO ₅	90.00	55	mg O ₂ /L
Sólidos Suspendidos Totales	100	28	mg/L
Grasas y Aceites	20	47	mg/L
Temperatura ARD	<40°C	24°C	°C

Se observa que el único parámetro que supera los límites máximos permisibles son las grasas y aceites las cuales según Romero (2009) se definen como “los compuestos de carbono, hidrogeno y oxígeno que flotan en el agua residual, que interfieren en la actividad biológica (...). Este aumento se puede presentar por la presencia de restaurantes, que aumentan su distribución de servicios por el número de turísticas que visitan al municipio, resaltando que el aumento de este parámetro proviene generalmente de mantequillas margarinas, aceites y carnes (Romero, 2009)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno se refiere a la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos en el momento de proliferar en el agua residual y alimentarse de la materia orgánica, en condiciones aerobias. Mientras que la Demanda Química de Oxígeno se usa para medir el oxígeno equivalente a la materia orgánica oxidable, es decir mide toda la materia orgánica del agua, la biodegradable y la no biodegradable. (Rojas, 2008)

Al analizar los valores de los parámetros anteriormente mencionados, no superan los máximos permisibles, pero al calcular el índice de biodegradabilidad y comparar con la Tabla 2. La cual relaciona la DBO₅/DQO, se demostró que el resultado es 0.42 por lo cual se puede afirmar que es poco biodegradable

Tabla 2. Carácter de Biodegradabilidad del Agua Residual (Ardila et al., 2016)

DBO ₅ /DQO	Carácter
>0.8	Muy biodegradable
0.7 - 0.8	Biodegradable
0.3 – 0.7	Poco Biodegradable
< 0.3	No Biodegradable

El oxígeno disuelto es uno de los parámetros fundamentales para conocer la calidad del agua, el valor de la muestra corresponde a 1.02 mg/L, este valor se encuentra por debajo de los valores básicos de oxígeno establecidos para aguas normales naturales, las cuales, de acuerdo a Ardila et al., (2016), deben estar en un rango comprendido entre 7.0 y 8.0 mg/L, lo cual indica una alteración o contaminación alta.

Identificación y Evaluación de Impactos Ambientales.

Se realizó una caracterización para conocer las actividades principales del municipio, las cuales contribuyen al aumento de las aguas residuales y a la afectación de la zona de la fuente hídrica. Las actividades identificadas son: Turismo, Fabricación de lácteos, cría y levante de pollos, producción piscícola, actividades de siembra y producción de cultivos de café, cacao, frijol, producción bovina y porcícola.

En la Tabla 3 se plasma las interacciones existentes entre las actividades y los factores componentes ambientales en la zona de estudio.

En la Tabla 4 se presentan los resultados del número de interacciones y síntesis de las actividades que se realizan en el municipio en donde se detalla que las interacciones positivas son 15 y 83 negativas, en la Ilustración 1 se observa que las actividades relacionadas con la siembra de cultivos, generación de aguas residuales, producción porcícola, bovina y piscícola son las actividades que mayor número de impactos negativos genera al ambiente. Con referencia a las interacciones positivas se halló 15 las cuales se encuentran uniformemente distribuidas en las diferentes actividades.

La síntesis de las actividades demuestra que todas son de tipo negativo, donde la desviación estándar corresponde a 114.53, con un rango entre -129 y -506, demostrando

de esta forma que las actividades que más interfieren en la afectación del ambiente son: la generación de aguas residuales del municipio las cuales proceden de las diferentes viviendas, comercios e instituciones; de igual forma se demuestra que los diferentes cultivos que se llevan en la región como lo son café, cacao entre otros representan una amenaza para el ambiente por la aplicación de diferentes insecticidas, que indirectamente por medio de la escorrentía puede llegar a generar afectaciones al recurso hídrico y suelo.

Tabla 3. Identificación de impactos Ambientales (Autoría propia)

Factor Ambiental	Actividades	1	2	3	4	5	6	7	8
Agua	Disminución del recurso hídrico	x		x		x	x		x
	Contaminación del agua	x	x	x	x	x	x	x	x
	Alteración parámetros fisicoquímicos del agua	x		x			x		x
	Cambio uso del agua		x		x	x	x	x	x
Aire	Deterioro de la Calidad del Aire	x	x		x	x	x	x	x
	Generación de Olores Ofensivos	x		x	x	x	x		x
	Generación de ruido			x			x		
Suelo	Contaminación del suelo	x		x	x				x
	Erosión					x	x	x	x
	Alteración fisicoquímica del suelo				x	x	x	x	x
Paisaje	Alteración del paisaje	x			x	x	x	x	x
	Modificación de hábitats	x				x	x	x	x
Fauna	Migración de especies	x	x			x	x	x	x
	Fragmentación de hábitats	x	x		x	x	x	x	x
Flora	Disminución de la cobertura vegetal	x	x		x	x	x	x	x
	Extinción de especies vegetales endémicas	x							
Social	Generación de empleo	x	x	x	x	x	x	x	x
	Incremento de ingresos en la población local		x	x	x	x	x	x	x
	Adaptación cultural		x						

Referencias: 1. Generación de aguas Residuales; 2. Actividades de Turismo; 3. Fabricación de lácteos; 4. Cría y levante de pollos (avicultura); 5. Producción porcícola (porcicultura); 6. Siembra y producción de café, cacao, frijol; 7. Producción bovina (Ganadería); 8. Producción piscícola (piscicultura)

Tabla 4. Síntesis Actividades Zona de estudio (Autoría propia)

Actividades identificadas en la zona objeto de estudio	Interacciones negativas (-)	Interacciones positivas (+)	Síntesis negativas (-)	Síntesis positivas (+)
Generación de aguas residuales	12	1	506	0
Actividades de Siembra y producción de café, cacao, frijol	14	2	401	0
Producción porcícola	12	2	337	0
Producción piscícola	14	2	300	0
Producción bovina	10	2	239	0
Cría y levante de pollos	8	2	231	0
Turismo	7	2	182	0
Fabricación de lácteos	6	2	129	0
TOTAL	83	15	2325	0

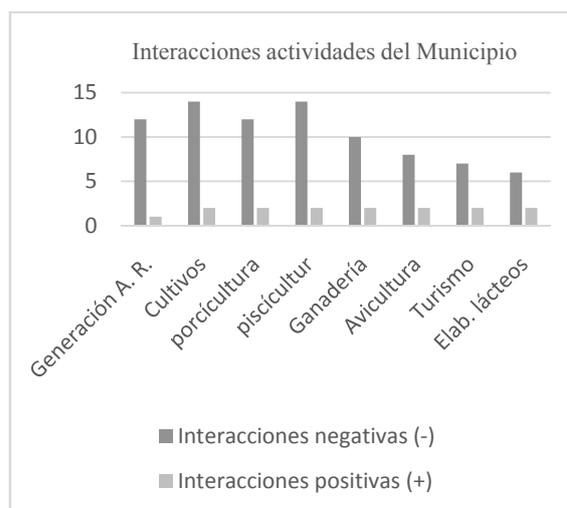


Ilustración 1. Interacciones por Actividad (Elaboración propia).

En la Tabla 5 se plasma la afectación por componentes ambientales donde se determinó que el componente que presenta mayor número de interacciones es el recurso agua con un total de 23 interacciones negativas, seguido del recurso aire y suelo. Se evidenció que el factor económico presentó 15 interacciones, lo que representa 15 impactos de clase positiva.

Se determinó que el factor ambiental que mayor número de impactos negativos presenta es el agua,

precedido del recurso suelo y fauna, por lo cual se hace necesario intervenir a través de la aplicación de fichas de manejo de protección, donde plasmen programas para mitigar y/o prevenir los impactos. Es importante detallar que el factor económico es el único que representa impactos positivos por el incremento de ingresos en la población del municipio.

Tabla 5. Síntesis Factores Ambientales (Elaboración propia).

Componente ambiental	Interacciones negativas (-)	Interacciones positivas (+)	Síntesis negativas (-)	Síntesis positivas (+)
Agua	23	0	861	0
Suelo	13	0	488	0
Fauna	13	0	408	0
Aire	15	0	324	0
Paisaje	11	0	276	0
Flora	7	0	208	0
Cultural	1	0	12	0
Económico	0	15	0	252
Σ	83	15	2577	252

CONCLUSIONES

El índice de biodegradabilidad del vertimiento analizado, se calificó como poco biodegradable, lo cual demuestra que se deben realizar tratamientos eficientes antes de ser vertidos sobre la fuente hídrica, para evitar alteración tanto en el recurso hídrico como en la biota acuática, suelo, aire, al igual que en la calidad de vida de los habitantes del municipio.

El total de parámetros fisicoquímicos no se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles reglamentados en la Resolución 0631 del año 2015, por lo cual es necesario que las autoridades ambientales realicen un seguimiento semestral de acuerdo a la normatividad vigente, para implementar medidas que contribuyan al cumplimiento de la Resolución en materia de vertimientos.

A través de la evaluación de impactos ambientales realizada respecto con las actividades cotidianas que se realizan en el municipio, se concluyó que los

recursos agua, aire, suelo y fauna son los más afectados.

Los resultados obtenidos del presente estudio muestran la importancia para que las autoridades municipales y ambientales competentes desarrollen estudios ambientales que evalúen el estado de actual de los recursos ambientales en el municipio, y de esta forma implementen medidas para minimizar, corregir y/o compensar los impactos generados sobre el medio.

REFERENCIAS

- Arboleda, J. (2008). *Manual para la evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras o actividades EIA*. Medellín. Obtenido de <https://bit.ly/2OZikJt>
- Ardila, A. N., Arriola, E., Reyes, J., Berrio, E., y Fuentes, G. (2016). Mineralización De Etilenglicol Por Foto-Fenton Asistido Con Ferrioxalato. *Rev. Int. Contam. Ambie*, 32(2), 213-226.
- IDEAM. (2007). *Toma de muestras de aguas residuales*. Bogotá D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Obtenido de <https://bit.ly/3g6KCh7>
- Lizarazo, J. y Orjuela, M. (2013). *Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia*. Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://bit.ly/2BDKU06>
- Ramírez Aldana, C. L. (2016). *Todas y todos construimos futuro: Plan de Desarrollo 2016-2019*. Tona: Alcaldía Tona. Obtenido de <https://bit.ly/3jKgc6E>
- Rodríguez, A., Martínez, M., Martínez, I., Fundora, H., y Guzmán, T. (2011). Desarrollo tecnológico, impacto sobre el medio ambiente y la salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 49(2):308-319.
- Romero, J. A. (2009). *Tratamiento de las Aguas Residuales*. Bogotá: Lemoine Editores.
- UNESCO. (2017). *Aguas residuales el recurso desaprovechado*. París: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Obtenido de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247647>

Tipo de Publicación: NOTA TÉCNICA.

Santander *Cuadernos del CURIHAM*, 27, 85-91.
DOI: <https://doi.org/10.35305/curiham.v27i.163>

Trabajo recibido el 09/09/2020 y aprobado para su publicación el 15/01/2021.

COMO CITAR

Navas Gallo, N. A. y Constanza Silva Jaimes, C. (2021). Afectación ambiental por las descargas directas de las aguas residuales sobre fuentes hídricas: Caso de estudio Tona

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

INSTRUCCIONES PARA AUTORES

INTRODUCCION

La Revista CUADERNOS DEL CURIHAM es una publicación 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, gráficos, 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, gráficos, 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, gráficos, 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, gráficos, 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) 6ª 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

