



Organización  
de las Naciones Unidas  
para la Educación,  
la Ciencia y la Cultura

Programa  
Hidrológico  
Internacional

# Aqua-LAC

ISSN 1688-2873

**1**

**VOL. 11  
MARZO 2019**

*Revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe  
Journal of the International Hydrological Programme for Latin America and Caribbean*





Publicado en el 2019 por el Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

*Published in 2019 by the International Hydrological Programme (IHP) of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)*

ISSN 1688-2881  
© UNESCO 2019

Fotografía de portada: © Alfonso Gutiérrez

Lugar: Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental de la Universidad de Talca, Chile.

Debido a la naturaleza intergubernamental de la UNESCO, la Organización se reserva los derechos de notificar en todas las publicaciones de Aqua-LAC que “Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figuran no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO, y no comprometen a la Organización”.

*Due to the intergovernmental nature of UNESCO, the organization reserves the right to state in all Aqua-LAC publications that “The designations employed and the presentation of material throughout the journal do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of UNESCO concerning the legal status of any country, territory, city or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries. The authors are responsible for the facts and opinions expressed therein, which are not necessarily those of UNESCO and do not commit the Organization”.*

Programa Hidrológico Internacional  
para América Latina y el Caribe (PHI-LAC)  
Oficina Regional de Ciencia para América  
Latina y el Caribe  
UNESCO

Dr. Luis P. Piera 1992, 2° piso  
11200 Montevideo, Uruguay  
Tel.: + 598 2 413 20 75  
Fax: + 598 2 413 20 94  
aqualac@unesco.org

Centro de Investigaciones del Agua  
Campus Universitario Cerro de las Campanas  
Facultad de Ingeniería, UAQ  
76010 Querétaro, México  
aqualac@uaq.mx

[www.unesco.org/new/es/office-in-montevideo/natural-sciences/water-ihp-lac/revista-aqualac/](http://www.unesco.org/new/es/office-in-montevideo/natural-sciences/water-ihp-lac/revista-aqualac/)

---

---

**CONSEJO DIRECTIVO / BOARD OF DIRECTORS**

**MARÍA CONCEPCIÓN DONOSO**

International Hydrological Programme IHP-UNESCO  
Institute of Water and the Environment, INWE  
Florida International University

**BLANCA JIMÉNEZ**

Comisión Nacional del Agua, Conagua, México

**EDUARDO PLANOS**

Instituto de Meteorología, Cuba

**EVENS EMMANUEL**

Université Quisqueya, Haití

**JUAN CARLOS BERTONI**

Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

**LUCILA CANDELA**

Universidad de Cataluña-UPC, Barcelona, España

**VIRGINIA GARCÍA ACOSTA**

Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS), México

**ROBERTO PIZZARO**

Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental, CTHA  
Universidad de Talca, Chile

**WILL LOGAN**

Centro Internacional para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (ICIWarm), USA

**MIGUEL DORIA**

Programa Hidrológico Internacional, Hidrólogo Regional para América Latina y el Caribe de la UNESCO

---

---

## CONSEJO EDITORIAL

**Marilia Carvalho de Melo**

Universidad Libre; Pereira, Risaralda, Colombia

**Waldo Lavado-Casimiro**

Facultad de Meteorología, Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú

**Henrique Marinho Leite Chaves**

Faculdade de Tecnologia-EFL pós-graduação e Universidade de Brasília, Brasil

**Manuel Fernando Luna Lemus**

Escuela de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos, Guatemala

**Ninell Janett Dedios Mimbela**

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI, Perú

**Poliopro Fortunato Martínez Austria**

Universidad de las Américas Puebla Escuela de Ingeniería, México

**Lilian del Castillo Laborde**

Facultad de Derecho de la Universidad de Buenos Aires, Argentina

**Mauro Nalesso**

Water & Sanitation Division Inter-American Development Bank, USA

**Evens Emmanuel**

Université Quisqueya, Haiti

**Marta del Carmen Paris**

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Argentina

**Pablo A. Garcia-Chevesich**

University of Arizona, USA

**Jorge Víctor Pilar**

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, Chaco, Argentina

**Fernanda Julia Gaspari**

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata, Argentina

**Diego Alejandro Pérez Giraldo**

Universidad Libre de Colombia

**Hugo G. Hidalgo**

Centro de Investigaciones Geofísicas. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica

**Mauricio Pinto**

Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina

**Lili Ilieva**

Senior Analyst, ECo Ltd.

**Denilson Teixeira**

Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Brasil.

---



---

**STAFF EDITORIAL / EDITORIAL STAFF**

**M. Alfonso Gutiérrez López**

Editor en Jefe / *Editor in Chief*  
Facultad de Ingeniería, UAQ, México

**Miguel Doria**

Editor Ejecutivo / *Executive Editor*  
Editor Asociado Inglés

**José Alejandro Vargas Baecheler**

Editor Asociado Español  
Universidad de Concepción, Chile

**Henrique Marinho Leite Chaves**

Editor Asociado Portugués  
Universidad de Brasilia, Brasil

**Evens Emmanuel**

Editor Asociado Francés  
Université Quisqueya, Haití

**Luis Avilés Ríos**

Responsable de Indexación

**Clara Cremona**

Asistente de Edición

**Ivonne Monserrat Cruz Paz**

Asistente de Indexación

**Jacqueline Gómez Martínez**

Asistente de Arbitraje

**Sheyla Pineda Cornejo**

Asistente de Arbitraje

---

---

## EDITORIAL

Ante los desafíos de la octava fase del Programa Hidrológico Internacional PHI-VIII (2014-2021) seguridad hídrica: “respuestas a los desafíos locales, regionales y mundiales”; en este año de decimo aniversario damos la bienvenida a un nuevo Consejo Editorial. No sin antes agradecer a los anteriores miembros de nuestro Consejo, colaboradores, colegas y sobre todo amigos. Muchas gracias por su brillante e invaluable labor durante estos diez años de Aqua-LAC.

El agua, problema universal si se aprecia desde quienes no la tienen o padecen por ella. En este marco de gestión hídrica, cuidado ambiental, cambio climático, conflictos por el agua, inundaciones, sequías y un sinfín de situaciones que complican la seguridad hídrica; una de las respuestas de nuestra región ha sido crear y mantener viva una revista científica con la participación de esta gran familia que somos el Programa Hidrológico Internacional, para Latinoamérica y el Caribe PHI-LAC.

Diez años de Aqua-LAC, una década en donde hemos vivido cuatro Foros Mundiales del Agua, Conferencias sobre Cambio Climático, Reuniones de Coordinadores de Programas, Reuniones de Representantes y Puntos Focales de países. Todos estos eventos han enriquecido esta década de trabajo, investigación, acuerdos y colaboración conjunta por el bien común que representa el agua.

Tiene frente a usted estimado lector, el testimonio de un trabajo coordinado y enriquecido por cada uno de los países de nuestra querida región LAC. En estos diez años hemos estudiado e investigado exhaustivamente los conceptos fundamentales para lograr una verdadera seguridad hídrica. Hemos reflexionado sobre agua y género, cultura del agua y se han propuesto acciones sociales, así como apoyo a las propuestas técnicas y científicas. Enhorabuena y felicidades a todos nuestros colaboradores por estos años. Aqua-LAC seguirá siendo un testimonio vivo de un esfuerzo colectivo impregnado de pensamientos profundos por una verdadera gestión del agua.

**María Concepción Donoso**

Directora de la División de Ciencias a. i.  
Programa Hidrológico Internacional PHI-UNESCO

## EDITORIAL

*Faced with the challenges of the eighth phase: Water security: responses to local, regional and global challenges, strategic plan, IHP-VIII (2014-2021); in this tenth anniversary we welcome a new Editorial Board. We would like to thank the previous members of our Board, collaborators, colleagues and especially friends. Thank you very much for your admirable and valuable work through these ten years of Aqua-LAC.*

*Water is a universal problem, through the perspective of those who lack of or suffer from it. Within this framework of water management, environmental conservation, climate change, conflicts about water, floods, droughts, and, a host of other situations that complicate water security; one of the contributions of our region has been to create and keep alive a scientific journal with the participation of this great family that we are the International Hydrological Programme for Latin America and the Caribbean (IHP-LAC).*

*Ten years of Aqua-LAC, a decade in which we have participated in four World Water Forums, Conferences on Climate Change, Meetings of Programme Coordinators, Meetings of Country representatives and Focal Points. All these events have enriched this decade of work, research, agreements and joint collaboration for a common good which water represents.*

*You have in front of you, dear reader, the testimony of coordinated and enriched work by each of the countries of our beloved LAC region. In these ten years, we have studied and exhaustively researched the fundamental concepts leading genuine water security. We have studied water and gender, water culture, and proposed social actions to support technical and scientific proposals.*

*Congratulations and greetings to all our collaborators for these years. Aqua-LAC will continue to be a testimony of a collective effort inspired by deep thoughts for true water conservation.*

**María Concepción Donoso**

Director of the Division of Water Sciences a. i.  
International Hydrological Programme IHP-UNESCO

---

---

### In memoriam Guido Soto



En noviembre del año pasado la comunidad del agua de América Latina y el Caribe perdió a un gran colega, el Ing. chileno Guido Soto. Ingeniero forestal graduado en la Universidad de Chile en 1967. Fue fundador y primer Director Regional de la Corporación Nacional Forestal en la Región de Coquimbo, Chile (1972-1990). En la década de los 80, junto al Hidrólogo Regional de UNESCO, Ing. Christiaan Gischler, promovió el proyecto Regional Mayor Sobre Uso y Conservación de Recursos Hídricos en América Latina y el Caribe que se constituyó como articulador de importantes iniciativas, como fue la captación de aguas a partir de neblinas costeras con incidencia regional y mundial. Fue promotor del establecimiento del Centro categoría II de la UNESCO para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe, desempeñándose como su Director Ejecutivo (2002-2013) y también como Punto Focal Nacional de la Convención para Combatir la Desertificación y la Sequía (UNCCD). Además, participó en varios proyectos relacionados con la gestión y protección de los recursos naturales en zonas áridas, así como en actividades de extensión y desarrollo rural. En su vida profesional se destaca el compromiso por posicionar la temática de la desertificación y las zonas áridas en la agenda del agua, su trabajo por la restauración de los ecosistemas, generando redes para trabajar en equipo, motivando a sus colegas, en especial a los jóvenes profesionales. A través de CAZALAC, Guido tuvo un estrecho vínculo con el Programa Hidrológico Internacional y con la familia del agua de la UNESCO. En su gestión como Director del Centro, trabajó arduamente por su puesta en marcha y consolidación como institución referente en torno a la gestión de los recursos hídricos en América Latina y el Caribe, contribuyendo a la formación de una importante red internacional de Centros bajo los auspicios de la UNESCO. Asimismo, desarrolló considerables contribuciones al conocimiento de la región a través del liderazgo de estudios y proyectos entre los que cabe mencionar el mapa de zonas áridas y semiáridas de América Latina y el Caribe (2010) y el desarrollo de atlas de sequías para varios países, así como el desarrollo de una metodología para su elaboración (2010). Como legado de su trabajo, CAZALAC ha desarrollado numerosas iniciativas locales, nacionales e internacionales en diversas líneas: gestión integrada de recursos hídricos, manejo de riesgo climático, caudales ambientales, aumento de la oferta hídrica, eficiencia de uso del agua, agua y energía, entre otros. Además, contribuyó en la coordinación, en conjunto con la Dirección General de Aguas de Chile, de la formación de la Mesa Regional del Agua, así como de la implementación de proyectos de desalación y desarrollo de modelos hidrológicos para las tres principales cuencas de la región de Coquimbo y para la cuenca del río Huasco y en la implementación de proyectos de manejo de cuencas con actividades mineras. Desde la Revista Científica Aqua-LAC tuvimos el privilegio de contar con su colaboración en reiteradas ocasiones, tanto como revisor de diversos artículos científicos como con su apoyo académico y profesional desde los inicios de esta iniciativa, impulsando la importancia de generar un espacio de difusión para el conocimiento científico en temas de agua para la región. Tras la triste noticia de su fallecimiento el pasado 11 de noviembre de 2018, recordamos hoy a Guido como un trabajador incansable y profesional ejemplar que ha señalado un camino a transitar, pero por sobre todas sus virtudes le recordaremos por su calidad humana, su trato afectuoso, su sentido del humor y motivación contagiosa.

---



---

## CONTENIDO / CONTENTS

El internet de las cosas como herramienta para enfrentar la sequía provocada por el cambio climático en la producción de uva para pisco <i>The internet of things as a tool to confront the drought caused by climate change in the grape production for pisco</i> .....	1
Modelación hidrológica para la gestión del riesgo de inundaciones en subcuencas tributarias al río Uruguay <i>Hydrological modeling for the managment of flood risk in tributary sub-basins of the Uruguay river</i> .....	17
Calibración del modelo hidrológico SWAT para una cuenca de la región serrana de Córdoba (Argentina) <i>Calibration of the SWAT hydrological model for a basin in the mountain region of Córdoba (Argentina)</i> .....	34
Automatización de cálculos, referenciando eventos meteorológicos en imágenes satelitales infrarrojas <i>Automation of referencing calculations of meteorological events in infrared satellite images</i> ...	54
Modelos de gestión, conflictos y mediación en cuencas hidrográficas: los casos de España y Brasil y su aplicabilidad a Chile <i>Models of management, conflict and mediation in hydrographic basins: the cases of Spain and Brazil and their applicability to Chile</i> .....	66
Metodología para el acoplamiento de estimaciones de precipitación basadas en imágenes satelitales con registros pluviométricos de resolución temporal de 15 minutos. <i>Methodology for matching precipitation estimates based on satellite images with 15-minute temporal resolution rainfall records</i> .....	77
Plataforma de Información Geográfica del Centro Internacional de Hidroinformática <i>Geographic Information Platform of the International Hydroinformatics Center</i> .....	93
Programa CSED-TRANSVEL para cuantificar transporte de sedimentos en cauces <i>CSED-TRANSVEL program to quantify transport of sediments in channels</i> .....	101

---

## El internet de las cosas como herramienta para enfrentar la sequía provocada por el cambio climático en la producción de uva para pisco

*The internet of things as a tool to confront the drought caused by climate change in the grape production for pisco*

Rodrigo H. Callejas <sup>1\*</sup>, Rolando Saavedra <sup>2</sup>, Oscar Seguel <sup>1</sup>, Chris Bustamante <sup>2</sup>, David Camilla <sup>2</sup>

Recibido: 26/06/2018  
Aceptado: 29/01/2019

\*Autor de correspondencia

### Resumen

Según la UNESCO, cerca de una quinta parte de la población mundial habita en áreas que enfrentan escasez de agua, y otro cuarto de la población mundial, enfrenta recortes en el suministro de este recurso por insuficiencia de infraestructura para abastecerse de agua de los ríos y acuíferos. Por estas razones, es de suma importancia la implementación de programas que apunten a la protección del medio ambiente natural, la conservación de los recursos hídricos y su eficiente gestión. En las temporadas 2016 y 2017, el equipo de trabajo del Centro Regional de Estudios Agronómicos de la Universidad de Chile, desarrolló una estrategia para optimizar el tiempo y frecuencia de riego con información objetiva y específica de cada predio, utilizando modernas tecnologías para la monitorización del contenido de agua del suelo, tales como sondas de lectura continua y discontinua, telemetría y plataforma *on line* de gestión *Dropcontrol* para el control de riego en tiempo real. Además, se complementó con el uso de sondas de lectura discontinua en calicata, el uso de la cámara de presión para el seguimiento del estatus hídrico de la planta y el acompañamiento permanente a los productores por parte de técnicos especialistas, a través de la transferencia tecnológica. Se logró una reducción promedio del gasto hídrico en un 21%, con máximas de hasta un 50% de ahorro del recurso, incrementando el uso eficiente del agua de riego en conjunto con una disminución proporcional en el gasto energético. Se destaca la formación de una red de monitorización y de trabajo asociativo permanente, fortaleciendo la capacitación de los agricultores y el equipo técnico de la cooperativa, quienes se encuentran mejor preparados para enfrentar posibles problemas de disponibilidad hídrica, la estimación de las necesidades reales por parte de la vid pisquera y la identificación de las distintas situaciones de mal manejo en el riego que podrían provocar alteraciones en el estado general de sus cultivos y su productividad.

**Palabras clave:** Sonda de capacitancia, FDR, sequía, uva para pisco.

### Abstract

According to the UNESCO, about one fifth of the world's population lives in areas with water scarcity, and another quarter of the world's population face supply restrictions of this resource due to insufficient infrastructure to supply water from rivers and aquifers. For these reasons, it is very important to implement programs that aim to protect the natural environment, the conservation of water resources and their efficient management. In the 2016 and 2017 seasons, the work team of the Regional Center for Agronomic Studies of the University of Chile, developed a strategy to optimize the time and frequency of irrigation with objective and specific information of each farm, using modern technologies for the monitoring of soil water content, such as probes continuous and discontinuous reading, telemetric transmission and Dropcontrol management platform for irrigation control in real time. In addition, it was complemented by the use of probes with discontinuous readings in pits, the use of the pressure chamber for monitoring the water status of the plant and permanent accompaniment to the farmers by specialized technicians, through technology transference. An average reduction in water expenditure was achieved by 21%, with maximums of up to 50% of resource saving, increasing the efficient use of the resource together with a proportional decrease in energy expenditure. The formation of a technological network and permanent associative work is emphasized, the training to the farmers and the technical team of the cooperative was strengthened, who are better prepared to face possible problems of water availability, to estimate the real needs of the pisco vine and the recognition of different situations of poor management in irrigation that could cause alterations in the general state of their crops and their productivity.

**Keywords:** Capacitance probes, FDR, drought, grape for pisco.

1 Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Centro Regional de Estudios Agronómicos, UCHILECREA. Santa Rosa 11315, La Pintana, Santiago, Chile. rcalleja@uchile.cl

2 Centro Regional de Estudios Agronómicos UCHILECREA

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

El pisco chileno es un aguardiente con denominación de origen amparada en la Ley N° 18.455 y producido mediante la destilación del vino de algunas variedades de vid (*Vitis vinifera*), en las regiones desérticas de Atacama y Coquimbo (Almazán, 2007). El 84% de los productores poseen menos de 5 ha bajo producción (INE, 2007) y un gran número de ellos se encuentran asociados a la Cooperativa Agrícola Pisquera Elqui Ltda (CAPEL). Uno de los principales problemas es la progresiva escasez de agua en sus zonas productivas (figura 1) (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, 2015), la que fue muy grave entre los años 2010 y 2015, por lo que la región ha sido catalogada como la más afectada por la mega-sequía presente en Chile (Orellana, 2017). Informes de la Sociedad Agrícola del Norte y la Federación Gremial Nacional de Productores de Frutas de Chile, determinaron pérdidas por US\$ 1.000 millones y aproximadamente 40 mil puestos de trabajo (SAN y Fedrefruta, 2015). Adicionalmente, para el caso de la uva pisquera, no existe certeza de sus requerimientos hídricos en las condiciones de la Región de Coquimbo, con limitaciones de suelo y manejos culturales de baja tecnología (Ferreira *et al.*, 2010).

En esta región, la superficie de uva para pisco alcanza un total de 8.053 ha (ODEPA, 2017), las que se distribuyen en tres valles transversales conocidos como Elqui, Limarí y Choapa. De acuerdo a Ayala, Cabrera y asociados (2003), Choapa es el valle con la menor eficiencia de uso de agua de riego en la región, equivalente a un 37%, estimándose que la demanda anual de agua por la actividad agrícola asciende a 70 millones de m<sup>3</sup> y se proyecta para el año 2030, un incremento a 120 millones de m<sup>3</sup> anuales (Ayala, Cabrera y asociados, 2007), acentuándose la diferencia entre la disponibilidad hídrica de la cuenca y la demanda por este recurso. Frente a esta problemática, la cooperativa CAPEL solicitó al Centro Regional de Estudios Agronómicos de la Universidad de Chile desarrollar y poner en práctica su paquete tecnológico para la gestión del riego en la uva pisquera (Callejas *et al.*, 2014a), pero adaptado a

las fortalezas del trabajo asociativo que permiten las cooperativas. Sin embargo, la generación de una estrategia para enfrentar las consecuencias del cambio climático no estuvo libre de cuestionamientos, dado el gran desafío de integrar las últimas tecnologías para el control del riego en el sistema productivo de pequeños agricultores, muchas veces no considerados por no poseer la formación necesaria o creer que este tipo de sistemas son caros y no están a su alcance. Por otro lado y bajo el supuesto de lograr el objetivo, se estimó que la implementación de la moderna estrategia basado en el concepto de la internet de las cosas, incentivaría a un menor flujo de jóvenes desde el mundo rural a la ciudad y permitiría la diferenciación del pisco de la cooperativa, por los esfuerzos de implementar un manejo sustentable de los viñedos.

### 1.2 Objetivo

El objetivo de este trabajo fue desarrollar e implementar, para pequeños agricultores asociados a una cooperativa, un paquete tecnológico basado en el internet de las cosas destinado a la gestión del riego y que permitiera incrementar la eficiencia en el uso del recurso hídrico en la producción de uva destinada a la elaboración de pisco. Los objetivos específicos fueron: 1) Desarrollar un paquete tecnológico de gestión del riego de acuerdo a las condiciones edafoclimáticas, productivas y características de los productores de la zona, 2) Cuantificar el ahorro del recurso hídrico, evaluando el incremento en la eficiencia del uso del agua de riego y 3) Capacitar al equipo técnico de la cooperativa, asegurando la transferencia del paquete tecnológico y la sustentabilidad en el tiempo.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

La intervención se realizó en la Provincia del Choapa, Región de Coquimbo (figura 1), ubicada entre los 31° 40' y 32° 15' de latitud sur y entre 71° 15' y 70° 15' longitud oeste y a una altitud media de 510 msnm. Se consideró una superficie de intervención de 75 ha de vides para la producción de pisco, pertenecientes a productores de la cooperativa CAPEL, de un potencial total equivalente a 900 ha.



El principal cauce de la cuenca del Choapa es el río Choapa que tiene una extensión de 148.828 m<sup>2</sup> y un caudal medio anual en la estación Choapa Cuncumén de 9,6 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, el que recibe aportes de los ríos Cuncumén, Manque, Chalinga e Illapel (MOP, 2003). Según la Junta de Vigilancia del Río Choapa (JVRCH, 2013), la superficie de ésta cuenca destinada para la agricultura de riego corresponde al 1,4% (15.000 ha) del total de la superficie (1.060.000 ha). La comuna de Salamanca posee una superficie cultivada estimada de 3.436 ha, siendo en su mayoría destinada a viñas, parronales viníferos y frutales (Consortio Cuenca Ingenieros Consultores Ltda. y Maren Consultores Ltda., 2004). La superficie plantada en el Valle del Choapa asciende a 1.370 ha (SAG, 2012), de las cuales aproximadamente 900 ha pertenecen a los más de 300 productores de la cooperativa CAPEL ubicados en este valle, en su mayoría pequeños productores.

En esta zona existen 92 comunidades de agua con una longitud de canales de 660 km y aproximadamente 3.500 usuarios (JVRCH, 2013). La Dirección General de Agua (DGA) menciona que en términos de capacidad de almacenamiento hídrico, el Embalse Corrales es la principal obra de regulación en la cuenca, con una capacidad de almacenamiento de 50 millones de m<sup>3</sup>, constatándose en los años 2011,

2012 y 2013 un total de 25, 22 y 19 millones de m<sup>3</sup>, respectivamente. La situación más crítica tuvo lugar en el año 2015 entrando en la época invernal, donde solo había 2,5 millones de m<sup>3</sup> acumulados. En el año 2016, el embalse logró nuevamente su nivel máximo debido al aumento de los eventos de lluvias y nieve en la alta cordillera, situación favorable que se ha mantenido hasta la fecha, contabilizándose en abril del 2017 un 91% de su capacidad total. Por otra parte, el embalse El Bato contiene a la fecha un 94% de su capacidad total, que equivale a solamente 25,5 millones de m<sup>3</sup> (DGA, 2017).

Respecto al clima, se clasifica como estepa cálida con precipitaciones invernales, sequedad en el aire y ausencia de nubosidad, la cual se incrementa a medida que aumenta la proximidad a la costa. Posee una temperatura media anual promedio de 14°C y un promedio de precipitaciones de 130 mm anuales, con un período seco de 8 a 9 meses (MOP, 2004).

Los suelos corresponden a rellenos aluviales en posición de terraza, mayoritariamente clasificados como Aridisoles, con texturas medias a gruesas en las terrazas bajas y un incremento de arcilla en profundidad en las terrazas altas, con pendientes variables, desde menos de 3% hasta valores entre 15 a 20% (Luzio *et al.*, 2010).

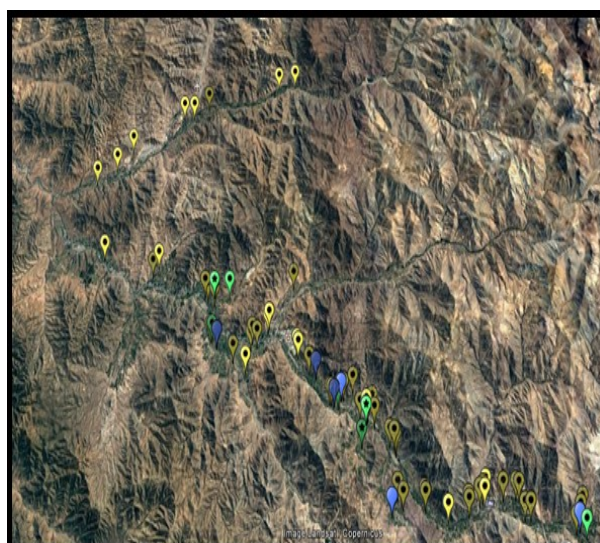
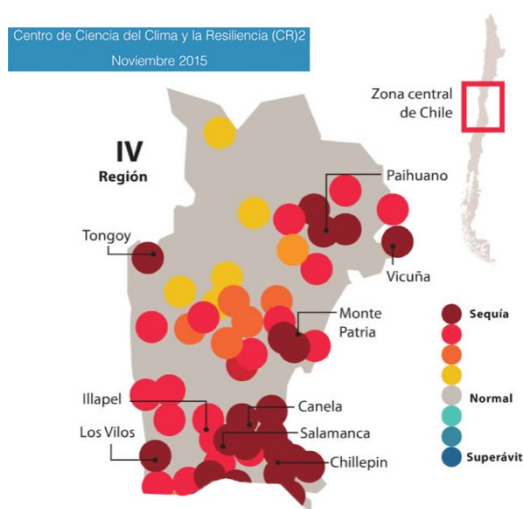


Figura 1. Izquierda: Condición de sequía en la IV Región, del lugar donde se desarrolló el proyecto Salamanca. Derecha: Emplazamiento de unidades de control dentro del Valle del Choapa; sondas de capacitancia de medición continua (verde), discontinua (amarillo) y estaciones meteorológicas (azul)

### 3. METODOLOGÍA

Las tecnologías que se integran en el paquete tecnológico para optimizar el riego y las metodologías de instalación, se detallan en Callejas *et al.*, (2014 a y b). Unidades de control del riego de lectura continua y uso de telemetría. Se instalaron a través del Valle del Choapa (figura 1 derecha), 15 unidades de monitorización utilizando dispositivos con tecnología *Frequency Domain Reflectometry (FDR) (Drill & Drop, Sentek Sensor Technologies MR)* conformadas por 6 sensores ubicados cada 10 cm, permitiendo evaluar 60 cm de profundidad de suelo (figuras 2, A). Las sondas de lectura continua (cada 15 minutos), se ubicaron en la sobrehilera a 30 cm del tronco de las vides, administrada por telemetría en una plataforma on line de gestión del riego (*Dropcontrol, Wiseconn MR*). Para esto, se montaron nodos *gateway* (concentrador y transmisor de datos) y nodos transmisores en un poste por sobre el parrón, a una altura de entre 4 a 8 m (figura 2, B). Se usaron antenas direccionales de largo alcance si la visión entre nodos se presentó con interrupciones o la distancia, entre las antenas, fue mayor a un kilómetro. Los criterios a considerar para definir el lugar de instalación fueron la productividad de los cuarteles y el tipo de suelo predominante, seleccionando el sector que representa la expresión vegetativa del viñedo. Las Líneas de Gestión o indicadores de referencia para el uso de las sondas de capacitancia, requeridas para determinar el tiempo y la frecuencia de riego, se definieron de acuerdo a Callejas *et al.*, (2014b). El primer componente es la capacidad de campo sonda (CCs), obtenida después de un riego profuso (mínimo 250 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> para riego por goteo) o lluvia abundante (superior a 50 mm), siendo dependiente de las características físicas del suelo. En este caso, se definieron aprovechando las lluvias invernales, considerando 1 día después de la lluvia para las texturas gruesas, 2 días para texturas medias y entre 3 a 4 días para texturas finas, esperando que se produjera el drenaje natural y se estabilizara el contenido de agua del suelo. El punto de recarga o punto que marca el “déficit admisible”, corresponde al momento en que hay que volver a regar, evitando provocar problemas

fisiológicos y disminución del potencial productivo de las plantas (Callejas *et al.*, 2013).

Unidades de control ampliado y de lectura discontinua o eventuales. Las unidades descritas anteriormente se complementaron con la instalación de 50 unidades de lectura discontinua, conformadas por un tubo de acceso de PVC (Arregui y Quemada, 2006) y el uso del equipo *Diviner 2000 (Sentek Sensor Technologies MR)* (Callejas *et al.*, 2014b). El tubo de acceso se instaló en la sobre hilera, a 30 cm del tronco de la planta de acuerdo a la experiencia del equipo de trabajo (figura 3, B).

Evaluaciones en calicata. Para la validación de la información obtenida con las sondas, se realizaron evaluaciones del contenido de agua del suelo y su distribución lateral, utilizando calicatas (figura 3 A) y el equipo TDR100 (*Spectrum Technologies, Inc. MR*).

Condición hídrica de las plantas. En forma paralela y sobre todo para validar las Líneas de Gestión, se realizaron evaluaciones del estado hídrico de las plantas con 4 repeticiones, utilizando la cámara de presión tipo Bomba de *Scholander* modelo *Pump up (PMS Instrument Company MR)* (figura 3, C). El potencial hídrico xilemático se evaluó de acuerdo a Navarrete, (2012) y Gálvez *et al.*, (2014).

Estaciones meteorológicas. Se contempló la instalación de una red de estaciones meteorológicas (*Davis, Vantage Pro2 MR*) (figuras 2C y figura 1), obteniéndose los registros de evapotranspiración potencial del sector (ET0).

Evaluaciones. Las principales evaluaciones fueron: a) descripción de los suelos utilizando calicatas, b) presencia de raíces en la zona de mojamiento de los sistemas de riego, para validar la ubicación de las sondas de capacitancia, c) volumen de agua de riego anual en m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, d) costo de la energía eléctrica ocupada para regar, e) contenido de agua en calicata (TRD100), f) evolución del contenido del agua en el suelo (sondas), g) potencial hídrico xilemático, h) producción por hectárea y i) calidad de la uva, cuando se requirió.

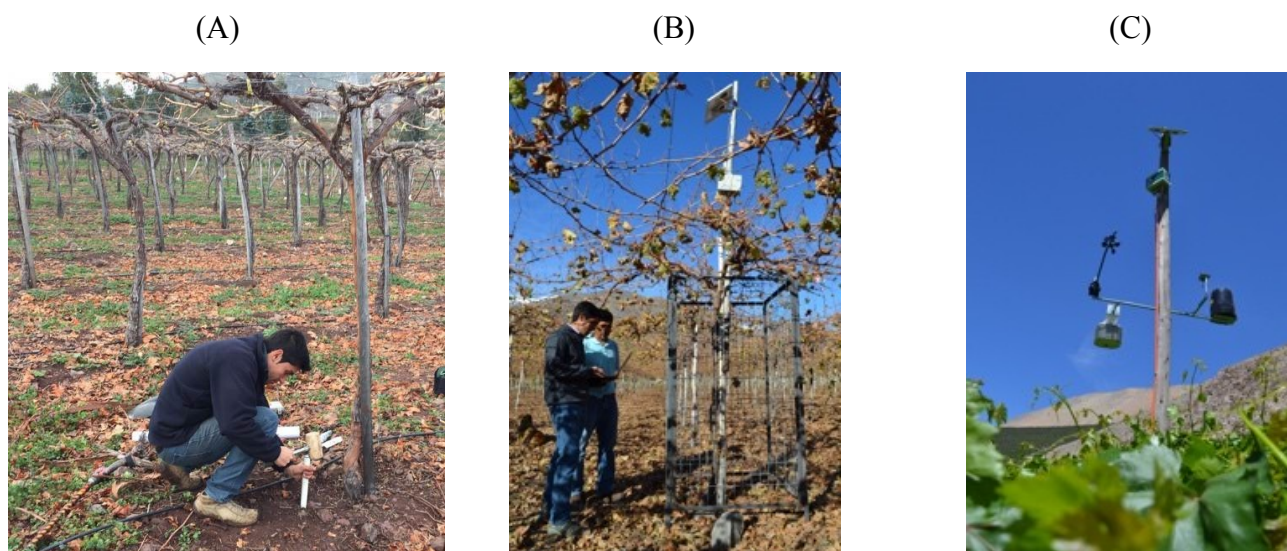


Figura 2. Instalación de sonda *FDR Drill & Drop* (A), telemetría (B) y estación meteorológica (C)



Figura 3. Calicata para la descripción morfológica y prospección del contenido del agua del suelo con TDR100 (A). Instalación de tubo de acceso para *Diviner 2000* (B). Seguimiento del estado hídrico de la planta a través de la evaluación del potencial hídrico xilemático (C)

#### 4. RESULTADOS

Los resultados que se presentarán a continuación, fueron logrados gracias al trabajo en conjunto con el equipo técnico de la cooperativa y el compromiso adquirido por los productores de uva pisquera. Se realizaron 5 reuniones generales de motivación y capacitación en el uso de tecnologías basadas en el internet de las cosas. Esto se fortaleció con 10 reuniones, a modo de días de campo masivos, y de a lo menos 20 visitas por año en forma

personalizada a cada productor, principalmente entre primavera y verano. Se hace hincapié en mencionar estas actividades, dado que a diferencia de las investigaciones clásicas en pequeñas unidades de estudio (grupo de plantas), la intervención de cuencas, y sobre todo cuando el público objetivo son pequeños agricultores, requiere de un trabajo de socialización y de adopción de la tecnología que se quiere instalar, de manera de asegurar su sustentabilidad en el tiempo.



#### 4.1 Diagnóstico de la situación técnica y productiva

La producción promedio de los miembros de la cooperativa suscritos al proyecto fue de 26.500 kg ha<sup>-1</sup> en la vendimia 2015/16, rendimiento de nivel medio considerando el potencial productivo de la principal variedad plantada en el Valle, Pedro Jiménez, equivalente a 50.000 kg ha<sup>-1</sup> (CEAZA e INIA, 2010). Respecto al manejo hídrico, un 62% de los cooperados cuenta con riego tecnificado y de esa proporción, un 29% utiliza bomba eléctrica y un 33% utiliza el riego gravitacional. El 38% restante utiliza riego tradicional, principalmente por surco bajo la condición de turnos, del cual el 70% tiene disponibilidad del recurso hídrico una vez por semana y el 30% restante, cada 15 o 20 días. Previo al inicio del estudio, el volumen promedio de agua utilizada para riego era de 10.240 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, con valores máximos de 36.600 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Los productores con goteo promediaron 8.090 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, un 42% menos del agua utilizada por el sistema tradicional por surcos. Respecto a las horas anuales ocupadas para regar, el sistema por surcos promedió 132 horas, mientras que el tecnificado 440 horas al año. La diferencia se debe a la menor oportunidad de riego de los no tecnificados (cada 7 días, incluso cada 15-20 días), pero con mayores volúmenes nominales por hora. Respecto a la eficiencia de uso del recurso hídrico, se detectó un promedio de 4,18

kg de uva por m<sup>3</sup> de agua, con un 43% más de eficiencia que cuando se regó por goteo (4,70 kg/m<sup>3</sup>) en comparación con el riego por surco (3,30 kg/m<sup>3</sup>). Respecto a los manejos de suelo realizados en los viñedos, el 48% efectuaba aplicaciones regulares de materia orgánica, ya sea estiércol, compost o incorporación de restos de poda. Esta tendencia también se repite para el laboreo mecánico del suelo.

#### 4.2 Condición edafoclimática

Las temperaturas máximas y mínimas para el mes más cálido (enero) fueron de 25 y 14°C, respectivamente, y para el mes menos cálido (julio), estos valores corresponden a 17 y 6°C, respectivamente. Las precipitaciones no fueron tan abundantes y se mantuvieron los períodos de sequía, tal como lo señalaba Cade-Idepe, (2004). De acuerdo a la información entregada por el equipo técnico de la cooperativa, la precipitación media osciló en torno a los 185 mm anuales, concentrada en el invierno, meses de junio y julio, con un aumento a partir de abril y declinación en agosto. Existen eventos excepcionales de lluvia en septiembre o noviembre, que van acompañados con el aumento de las temperaturas hacia la época estival. La tabla 1 explica la situación crítica de las temporadas 2013/14 y 2014/15, con un déficit de hasta un 50% de precipitaciones. En la temporada 2015/16 hubo una recuperación de las precipitaciones.

Tabla 1. Precipitaciones anuales registradas en las principales zonas productivas

<b>Año</b>	<b>Illapel (mm)</b>	<b>Salamanca (mm)</b>
2011	191,2	Sin dato
2012	77,5	Sin dato
2013	90,5	97
2014	112,0	126
2015	221,0	248

Adaptados de: <http://www.agroclima.cl/>, <http://www.ceazamet.cl>

Respecto a los tipos de suelo, son del orden de los Aridisoles y aptitud frutal variable

(Consorcio Cuenca Ingenieros Consultores Ltda. y Maren Consultores Ltda., 2004), donde

predominan las clases texturales francas (36% de los suelos) y franco arenosas (37%) y en menor proporción, aquellas con mayor contenido de arcilla (26%). Como patrón frecuente, los suelos cercanos a cursos de agua son delgados, pedregosos y de textura gruesa, correspondiente a menos del 5%, capacidad de uso II y aptitud frutal B. Características análogas poseen los suelos ubicado en las laderas, con mayores pendientes (hasta 30%), lo que genera riesgos de erosión, limitando los suelos a clase de capacidad de uso VI y sin aptitud frutal, sin embargo, dadas las condiciones climáticas igualmente se realizan actividades agrícolas (Casanova *et al.*, 2013). Por su parte, los suelos

ubicados en las terrazas altas son profundos, de texturas arcillosas. Las pendientes son variables, lo que define distintos riesgos de erosión, con capacidad de uso que varía en las categorías III, IV y VI, en tanto la aptitud frutal va de la C a la E.

En la figura 4 se presenta la evapotranspiración potencial y la temperatura media de la temporada 2016/2017, de dos localidades del sector de trabajo. Chillepín corresponde a la zona de Salamanca, presentando cerca de un 20% más de ET<sub>0</sub> que Illapel. Esta información es muy importante en la definición de las Líneas de Gestión y ajustes de las estrategias de riego.

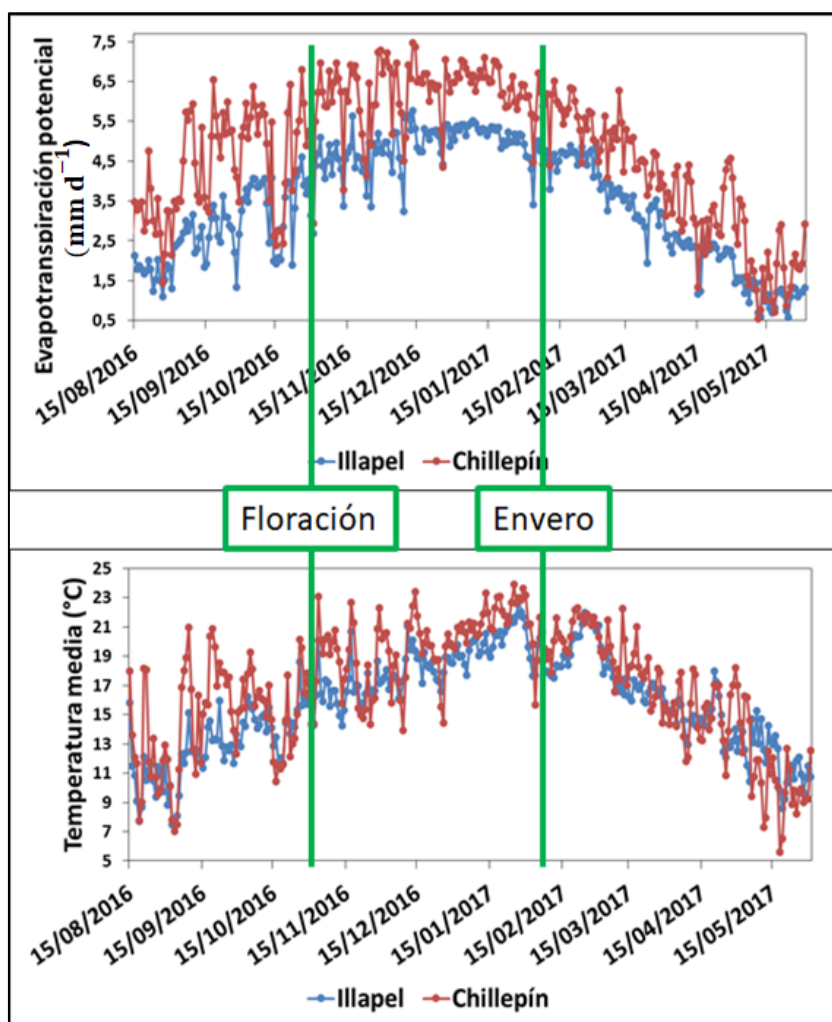


Figura 4. Evapotranspiración potencial (superior) y temperatura media (inferior) en dos localidades de trabajo durante la temporada 2016/2017

### 4.3 Control del contenido de agua del suelo

Para cada unidad de monitorización con sonda, se pudo definir la CCs (figura 5A) y el punto de recarga (figura 5B), una vez estabilizada la variabilidad de las evaluaciones del equipo por efecto de la instalación. Con esta información y el uso del gráfico “sumado”, fue factible determinar la frecuencia de riego. Posteriormente y analizando el comportamiento

individual de cada sensor (gráfico “apilado”), se pudo obtener el tiempo de riego de cada productor, evitando la pérdida excesiva de agua de riego por percolación profunda (Callejas *et al.*, 2013). En resumen, las sondas de todos los sitios quedaron funcionando y en línea, mostrando buena actividad del sistema radical en relación a la ET0 diaria del lugar, tal como se muestra en la figura 5B.

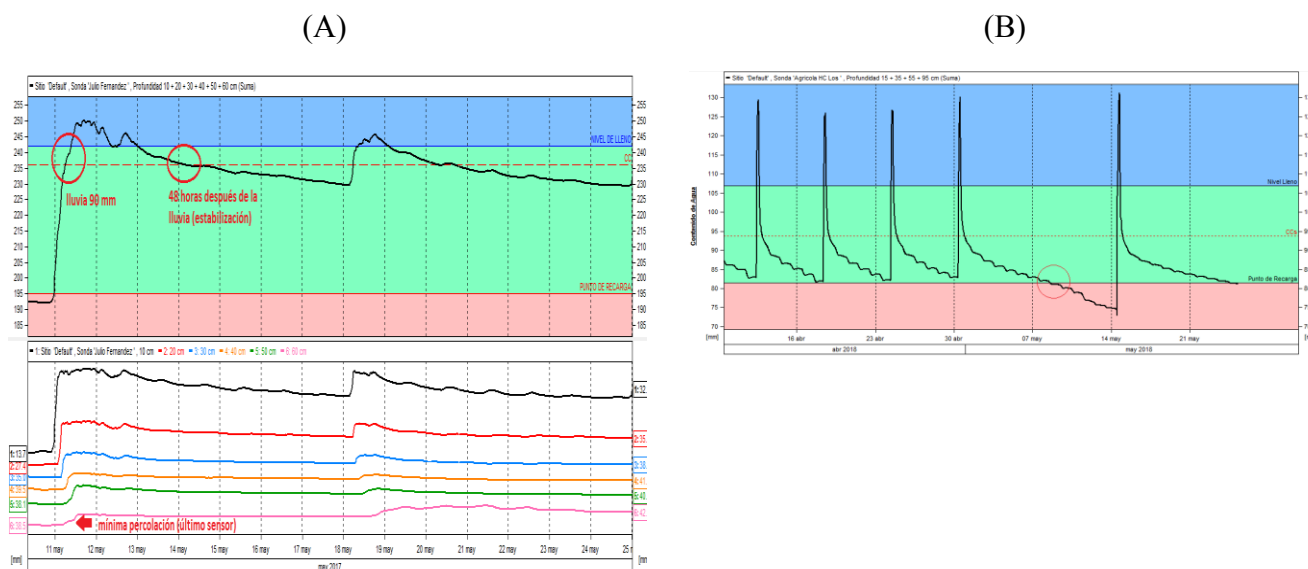


Figura 5. Establecimiento de la capacidad de campo según sonda (A)  
Establecimiento de punto de recarga según sonda (B)

Para la estimación de los tiempos de riego de los usuarios con *Diviner 2000*, se realizaron evaluaciones antes y después del riego, corroborando una óptima condición hídrica del bulbo húmedo y evitando la percolación profunda. Los criterios de riego para cada caso fueron corroborados a través de las evaluaciones en calicata usando el equipo TDR100, generando una prospección del bulbo húmedo, sobre todo el desplazamiento lateral del agua de riego. A modo de ejemplo, se muestra en la figura 6A un suelo franco arenoso de la zona de estudio con 1,2% materia orgánica, quedando de manifiesto que el mojamiento generado por los goteros era insuficientes para lograr un adecuado búlbo húmedo, formándose una zona seca con escaso desarrollo de raíces. En estos casos, se recomendó incrementar los volúmenes de

aplicación de materia orgánica para permitir una mejor abertura de la zona de mojamiento del gotero e incrementar la capacidad de retención. Otro ejemplo se puede observar en la figura 6B, en un suelo franco arcilloso con un contenido de materia orgánica equivalente al 3%, donde se aprecia una adecuada distribución del agua en forma lateral y en profundidad, con una zona central con un alto contenido de agua de riego.

Si bien los equipos de lectura continua, son una potente herramienta de trabajo, la experiencia deja de manifiesto que las evaluaciones en calicata con equipos TDR100 son fundamentales para ir conociendo y registrando en los estudios, el comportamiento del agua en su interacción con el sistema de riego, la condición química del suelo, las plantas y la demanda atmosférica (Callejas *et al.*, 2014b).

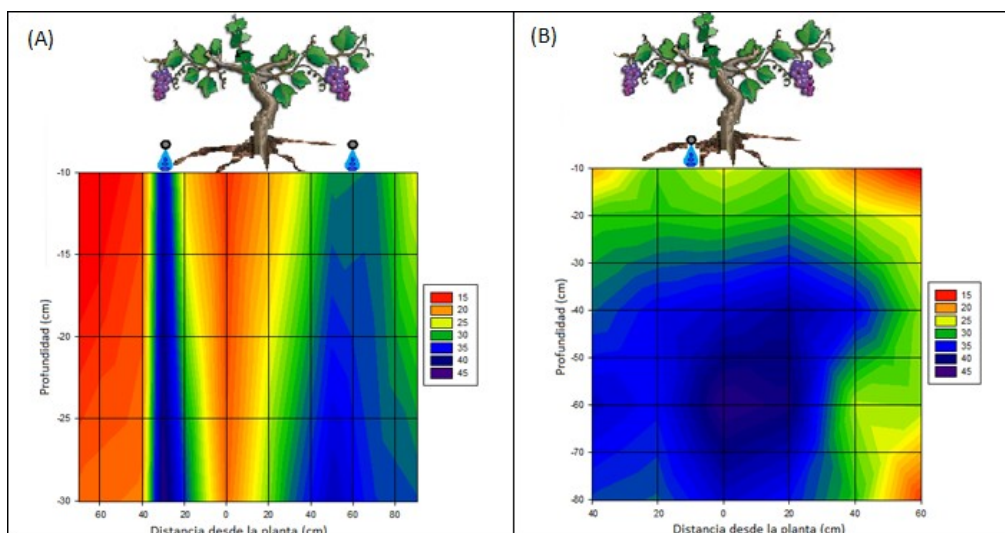


Figura 6. Contenido volumétrico de agua del suelo evaluado con equipo TDR100 en calicata. A: Suelo franco arenoso (2 líneas de riego, goteros de 2,3 L h<sup>-1</sup> de descarga). B: Suelo franco arcilloso (1 línea de riego, goteros de 4 L h<sup>-1</sup> de descarga). A cada lado del gráfico se muestra una escala (15 a 45%) indicando el contenido volumétrico de agua en el suelo

#### 4.4 Control del estado hídrico de las plantas

La evaluación del potencial hídrico xilemático tuvo el propósito de validar el establecimiento de las Líneas de Gestión del Riego, asegurando la adecuada condición hídrica de las vides regadas a punto de recarga según las sondas de capacitancia. En términos generales, los valores promedios del potencial hídrico xilemático variaron entre -0,5 a -0,85 MPa, tal como se muestra para un grupo de productores del estudio (figura 7, productores A, B, C, caso 1 y 2) e

incluso durante el periodo de mayor demanda atmosférica en verano (enero-febrero), valores que se interpretan como adecuados según Williams y Trout, (2005), Patakas *et al.*, (2005), Williams y Baeza, (2007) y Gálvez *et al.*, (2014). Una excepción la presentó el productor D, cuyos volúmenes de agua fueron insuficientes para suplir la demanda de la temporada, sumado a las restrictivas condiciones del suelo (50 cm de profundidad en pendiente y estrata dura que dificulta buen drenaje), lo que generaban un escaso desarrollo de las raíces.

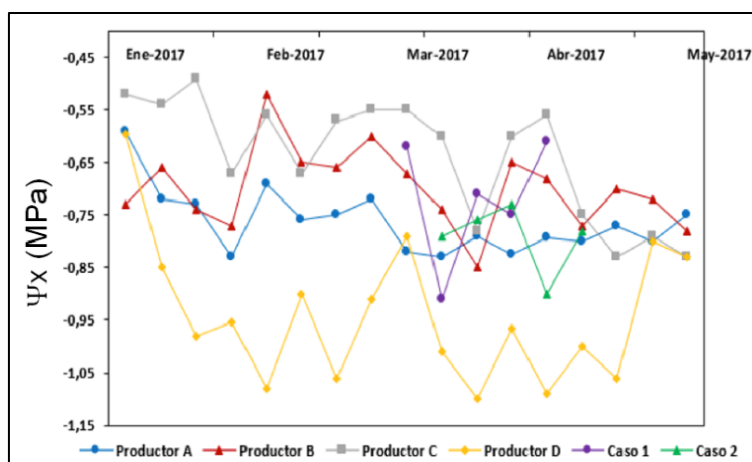


Figura 7. Seguimiento del potencial hídrico xilemático (MPa) en 6 productores del proyecto. Las evaluaciones se ejecutaron hasta la fecha de cosecha



#### 4.5 Descripción de la estrategia de riego resultante

La estrategia de riego, fruto de la integración de todas las tecnologías antes mencionadas que involucraron el sistema suelo, planta y atmósfera, se describe a continuación: 1) Durante el período de salida de invierno y pre-brotación, correspondiente a las primeras semanas de septiembre, se suministró un riego abundante ( $250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) debido a las bajas precipitaciones invernales, buscando tener un adecuado contenido de agua de riego en el bulbo de mojamiento al momento de brotar. Obviamente, en años de altas precipitaciones invernales, este riego no es necesario. Posteriormente, principalmente en la última semana de septiembre, se comenzó a organizar el programa de riego de la temporada. 2) Brotación a floración: la necesidad fue mínima y pudo suplirse con el agua de lluvia o aquella almacenada en el suelo durante el invierno. La demanda hídrica aumentó acorde al crecimiento del brote y el desarrollo de las hojas adultas, estimándose que el volumen promedio de agua utilizada correspondió a un 10% del total. 3) Floración a pinta o envero: el follaje se desarrolló en su totalidad y las temperaturas más altas se registraron en los meses diciembre-enero, por lo que la demanda hídrica fue máxima. Este es el periodo más sensible desde el punto de vista del riego en la producción (Ferreira *et al.*, 2010). El volumen de agua utilizado en promedio ascendió al 53% del total. 4) Pinta a cosecha: las condiciones ambientales que favorecen la evapotranspiración fueron paulatinamente disminuyendo a medida que se acercaba el otoño, implementándose una reducción en los riegos para alcanzar una correcta madurez de la fruta (Williams, 2000; Grimes y Williams, 1990). El volumen de agua utilizada fue en promedio 37% del total.

## 5. DISCUSIÓN

### 5.1 Ahorro hídrico y eficiencia en el uso del agua

Se logró un ahorro promedio de un 21%, equivalente a  $2.150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  respecto de la línea base obtenida en los diagnósticos. Por separado se constató que el riego tecnificado disminuyó un 23% y el riego por surco un 19%, evidenciando la mayor eficiencia y control de los volúmenes de agua de riego en el tecnificado (figura 8).

Respecto a la eficiencia de uso del agua de riego, se logró un aumento significativo del 45% equivalente a 1,34 kg más de fruta por  $\text{m}^3$  de agua utilizada u 80 litros menos por kg de fruta producida, acercándose a los valores estimados por Osorio y Poblete, (2013) para las zonas de alta productividad equivalente a 330 litros por kg de fruta. El riego tecnificado es el sistema que muestra mayor eficiencia con 6,23 kg de fruta por  $\text{m}^3$  de agua y un incremento del 33% respecto a la temporada diagnóstico, mientras que el riego por surco logró una eficiencia de 4,37 kg de fruta por  $\text{m}^3$  de agua con un aumento del 27% (figura 8). La mayor eficiencia puede ser explicada por:

a) Productores que normalmente comenzaban a regar en el mes de septiembre de cada año, con brotes de 5 a 10 cm y con excedentes de agua de lluvia almacenada de suelo, lo iniciaron de acuerdo a la información de las sondas (cerca a la floración), lo que significó iniciar el riego más de un mes después de lo tradicional (figura 9A) y sin generar estrés en las plantas por exceso de agua en el suelo.

b) Ajuste de la frecuencia y tiempo de riego durante la temporada, lo que guardó relación con los cambios en la necesidad hídrica de la planta en relación a la demanda atmosférica y las características del suelo (figura 9B). Esto permitió riegos menos frecuentes y de menor volumen, evitando la percolación profunda más allá de la zona poblada de raíces.

c) Riego controlado hacia el final de la temporada, entorno al periodo de cosecha, tal como lo muestra la figura 10, lo que permitió adelantar el proceso de maduración de la fruta y la cosecha.

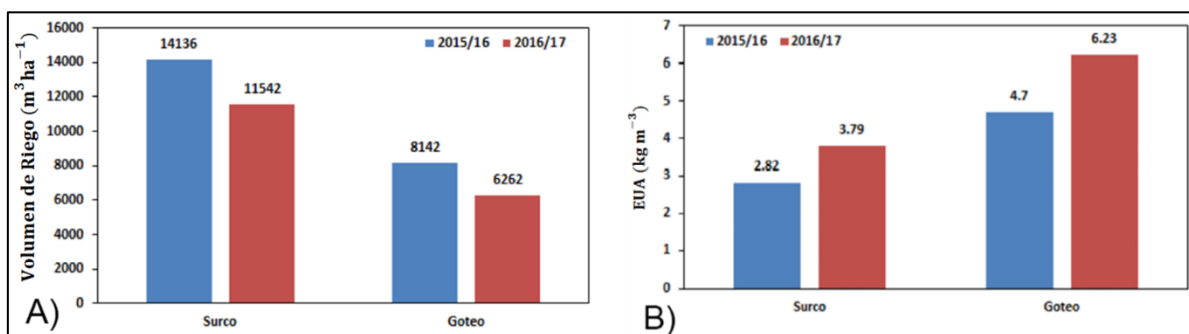


Figura 8. Comparación del ahorro del recurso hídrico en  $m^3 ha^{-1}$  (izquierda) y de la eficiencia del uso de agua, EUA, en  $kg m^{-3}$  (derecha), entre los dos sistemas de riego, surco y goteo

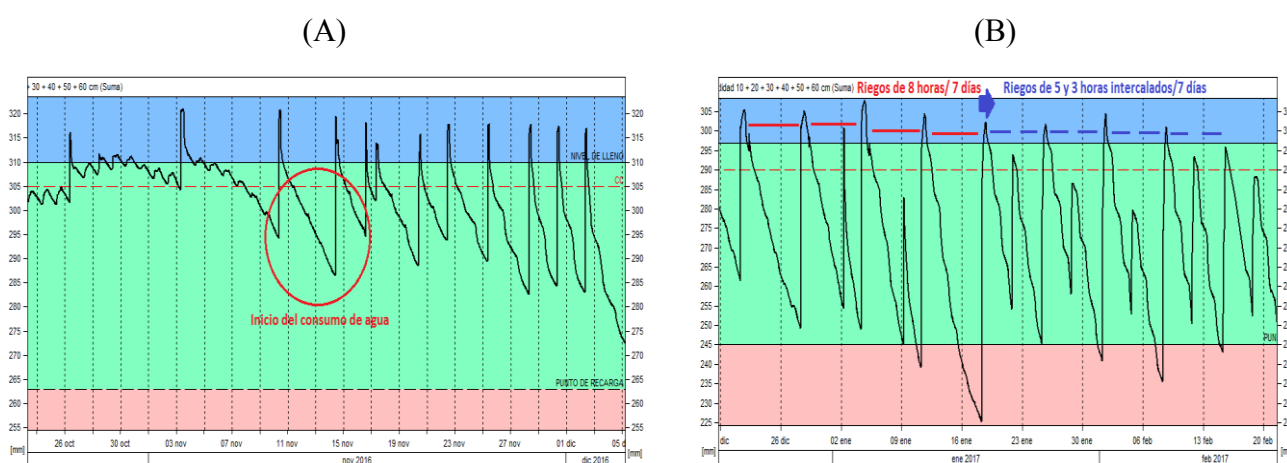


Figura 9. A: Inicio del consumo de agua por las vides, evaluado como el déficit diario del contenido de agua en el suelo a partir del mes de noviembre (círculo rojo). B: Ejemplo de la expresión gráfica del comportamiento del contenido de agua de suelo manejado con sondas (Irrimax<sup>MR</sup>)

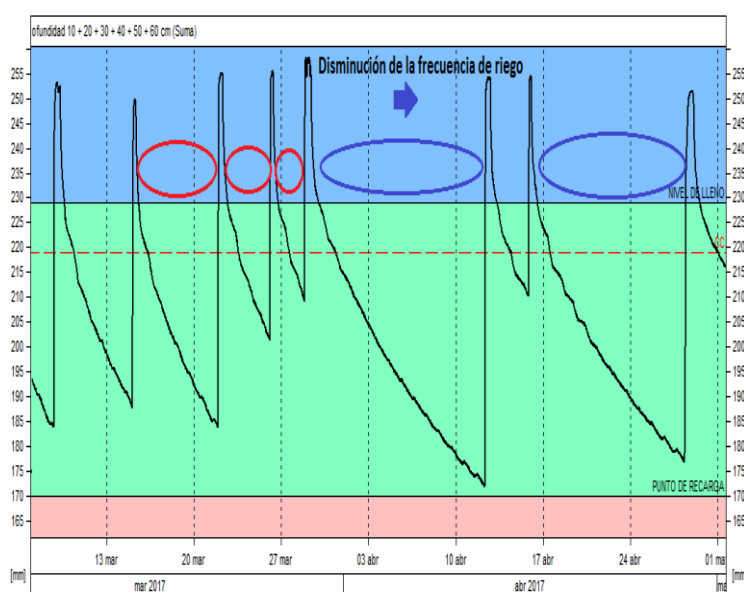


Figura 10. Reducción de la frecuencia de riego hacia el final de la temporada, de acuerdo a la necesidad hídrica de la planta

Estos resultados dejan de manifiesto que para enfrentar la sequía, el complemento entre el paquete tecnológico para el control y gestión del riego, unido al riego tecnificado, es lo que permitiría los mejores resultados en el camino del ahorro del recurso hídrico. En la figura 11, se muestra que para lograr un mayor EUA, es fundamental trabajar en paralelo tanto en el incremento de los rendimientos, o potencial productivo de los viñedos, así como la implementación de técnicas que permitan un riego eficiente.

### 5.2 Ahorro energético

Para el caso del riego tecnificado, se relaciona con dos factores de gasto, las horas de riego y los kilowatts de energía eléctrica utilizados para mover el agua a los goteros. En la figura 12, Goteo, se muestra la relación del volumen de agua utilizada y el gasto energético en la temporada 2016/17. Para los 24 productores que utilizan bomba de riego, se estimó una disminución del 20% en los kW ha-1, equivalentes a 60-90 US\$ ha-1 de acuerdo a la tarifa de la empresa eléctrica. En relación al riego por surco (figura 12, Surco), se obtuvo una reducción promedio del 19% lo que correspondió a un total de 75 horas de trabajo, generando una disminución de 10 jornadas hombres lo que se traduce en un ahorro de US\$ 241 por hectárea, considerando el valor promedio de una jornada equivalente a US\$ 24,2 por día.

### 5.3 Validación de la estrategia de riego

El mayor EUA se logró principalmente por un importante ahorro de agua de riego, sin embargo, siempre hemos planteado que la validación comercial de los paquetes tecnológicos pasan por un incremento de los rendimientos y/o la calidad del producto. En la figura 13, se muestran los resultados de seis productores a los cuales, adicionalmente a las sondas, se les realizó un seguimiento complementario del potencial xilemático con la Bomba de *Scholander*. Se pudo constatar que los rendimientos, a pesar de la reducción de los volúmenes de riego, se mantuvieron dentro del promedio histórico o se incrementaron, validando la estrategia aplicada.

Es importante mencionar que las comparaciones se realizaron respecto de los años 2013/2014 y 2014/2015, debido a que en la temporada 2015/2016 se produjo un fuerte ataque de oidio en las vides (*Uncinulo necator*) y botrytis (*Botrytis cinerea*) al final de la temporada, producto de una fuerte lluvia (53,6 mm) previo a la cosecha.

En general, el incremento de los rendimientos osciló entre un 2 y un 28%, con excepción del productor B, cuya variedad Moscatel Rosada presenta en esta zona seca reiteradamente problemas de cuajadura. Respecto a los volúmenes de agua utilizados, se redujeron entre un 13 y un 33% respecto de la temporada de diagnóstico, siendo más notorio en los productores con riego tradicional (productores A y C) respecto de los otros con riego tecnificado. Un comentario particular se rescata del productor D que, por restricciones de disponibilidad hídricas, utilizaba tradicionalmente solamente 3.200 m<sup>3</sup> ha-1. Las evaluaciones del potencial xilemático evidenciaron los valores más negativos de todo el grupo (menor a -1 Mpa; figura 7), dejando de manifiesto que con este volumen de agua de riego no se alcanza una adecuada condición hídrica de las plantas, situación que estaría explicando los menores rendimientos que anualmente obtiene en su viñedo.

Para un sub sector de los casos 1 y 2, se utilizó, adicionalmente a las sondas, el potencial hídrico xilemático en el período cercano a cosecha, para restringir aún más el aporte de agua de riego, pero en forma controlada. En estos casos y manteniendo un potencial hídrico menor o igual a -0,95 MPa o riegos aproximados cada 15 días, se favoreció la acumulación de los grados alcohólicos probable (GAP), se adelantó la cosecha y en paralelo, permitió disminuir los riesgos de enfrentarse con lluvias al inicio del otoño.

Finalmente, bajo una mirada macro y enfrentando el futuro, esta información permite realizar importantes proyecciones respecto al agua de riego en relación al cultivo de las vides para pisco. Considerando, hipotéticamente, que las 900 ha de los productores de la cooperativa de la zona de estudio implementan esta

tecnología, y todos invierten en riego tecnificado, se estima un ahorro anual de 3.741.948 m<sup>3</sup> de agua dulce al año. Aún más importante, si se consideran las 15.000 ha cultivables de la cuenca y un ahorro de solamente 2.150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, promedio obtenido en este estudio y sin cambio del sistema de riego,

arrojaría un volumen de 32.250.000 m<sup>3</sup> anuales, equivalente a 1,3 veces el embalse El Bato y casi un 65% del embalse Corrales, dejando de manifiesto lo importante del uso de la tecnología bajo el concepto del internet de las cosas, cuando se requiere enfrentar el cambio climático y períodos drásticos de sequía.

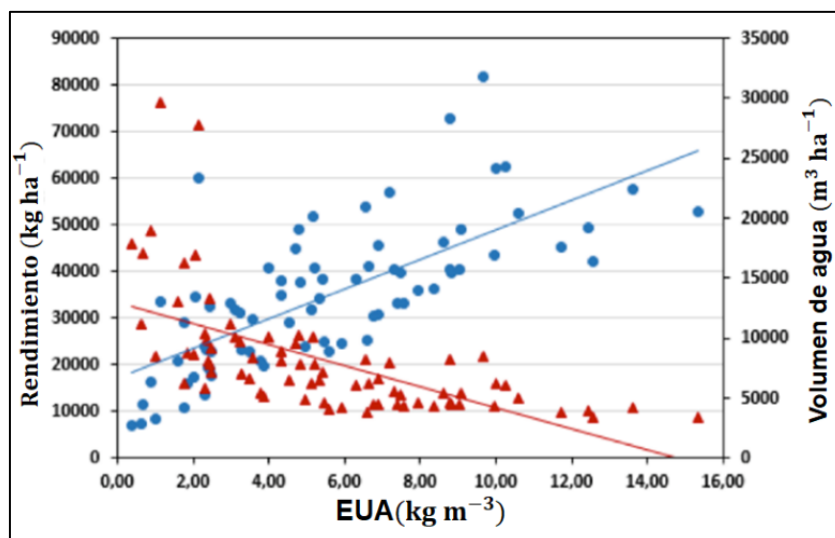


Figura 11. Rendimientos de uva en kg ha<sup>-1</sup> (azul) y volumen de agua de riego en m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (rojo), para los distintos valores de EUA

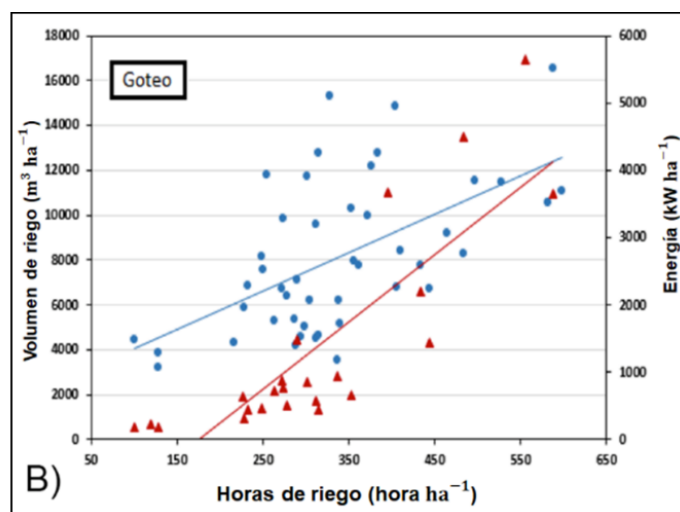
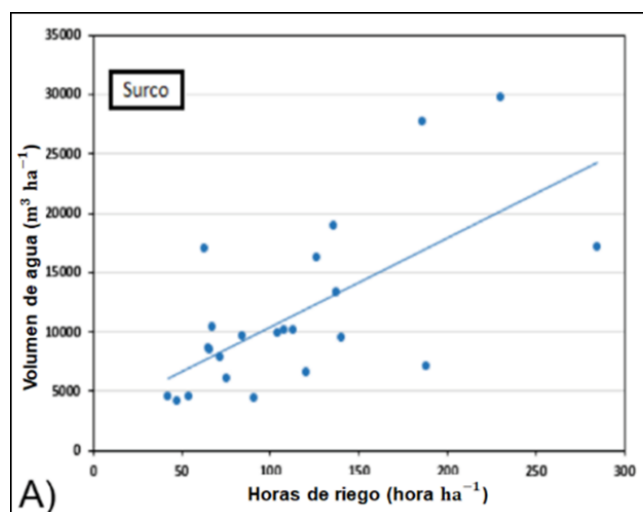


Figura 12. Horas de riego y su relación con el volumen de agua aplicado para cada sistema, surco (izquierda) y goteo (derecha). En el sistema tecnificado, se incluye la energía requerida para operar las bombas



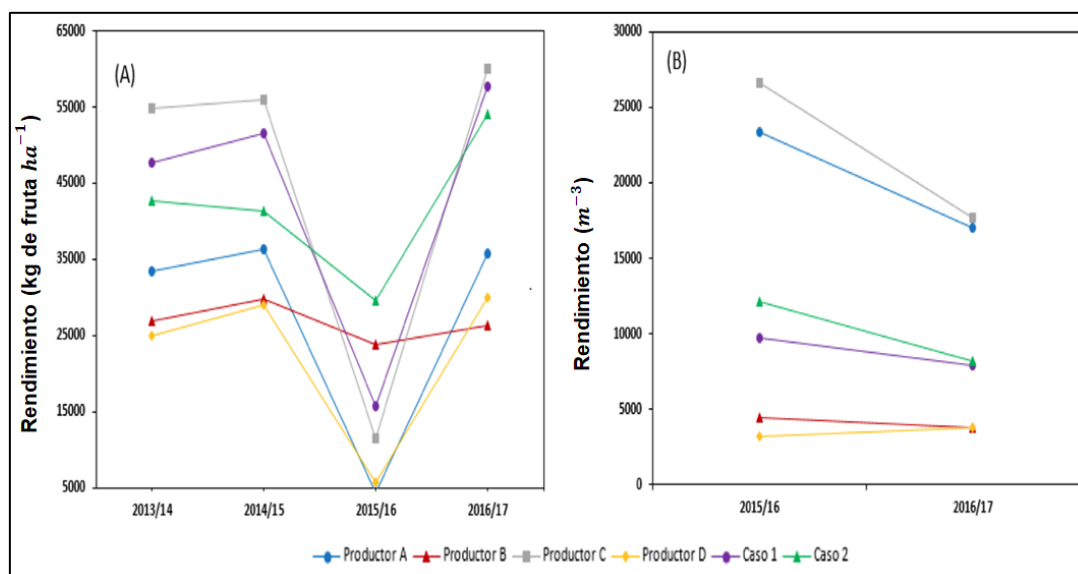


Figura 13. Rendimientos alcanzados en las últimas 4 temporadas (A) y volúmenes de agua usados en dos temporadas para los 6 productores (B)

## 6. CONCLUSIONES

Se implementó una moderna estrategia para la gestión del riego en uvas destinadas a la producción de pisco, basado en el uso de nuevas tecnologías y bajo el concepto de internet de las cosas.

Se demostró la factibilidad técnica del uso del paquete tecnológico para pequeños productores, asociados en la cooperativa CAPEL y apoyados por su equipo técnico.

Se logró un ahorro del 21 % del agua de riego sin afectar negativamente el potencial productivo de los viñedos, sino por el contrario, en la mayoría de los casos se incrementó. Se estimó un ahorro anual de 161.300 m<sup>3</sup> de agua de riego, considerando las 75 ha implicadas directamente en el estudio.

El paquete tecnológico permite un significativo aumento de la EUA (45%), valorándose el esfuerzo de la cooperativa Capel para enfrentar

el cambio climático y la mega sequía que afecta la zona centro norte de Chile.

El equipo técnico de la cooperativa quedó capacitado para mantener en el tiempo la transferencia tecnológica y el funcionamiento de la red de monitorización, tanto de las sondas de capacitancia como la información obtenida desde las estaciones meteorológicas.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Gobierno y Consejo Regional de Coquimbo (BIP 30404130-0), por haber financiado este proyecto a través del Fondo de Innovación para la Competitividad. A los productores que apoyaron en todo momento la correcta ejecución de las actividades comprometidas, al equipo técnico de la cooperativa CAPEL y a los profesionales de UCHILECREA.

## REFERENCIAS

- Almazán, V. (2007). *Protección internacional de la denominación de origen pisco chileno*. Memoria de Prueba para optar al grado de Licenciado en Ciencias Jurídicas y Sociales. Universidad de Chile. Escuela de Derecho, Departamento de Derecho Internacional. Santiago, Chile, 206 p.
- Ayala, Cabrera y asociados Ltda. AC Ingenieros Consultores Ltda. (2003). Informe final. *Diagnostico actual del riego y drenaje en Chile y su proyección*. Resumen ejecutivo: Diagnóstico del riego y drenaje en la IV Región. Comisión Nacional de Riego (CNR). Gobierno de Chile.
- Ayala, Cabrera y asociados Ltda. AC Ingenieros Consultores Ltda. (2007). Ministerio de obras públicas. Dirección General de Aguas (DGA). *Estimaciones de demanda de agua y proyecciones futuras. Zona I Norte, Regiones I a IV*. Informe final.
- Arregui, L., Quemada, M. (2006). Drainage and nitrate leaching in a crop rotation under different N-fertilizer strategies: application of capacitance probes. *Plant Soil* 288: 57-69.
- Cade-Idepe, Consultores en Ingeniería. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Choapa*. Gobierno de Chile. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas (DGA).
- Callejas R., Navarrete, J., Maximiliano, R. (2013). *Líneas de gestión del riego: umbrales para interpretar los datos de humedad del suelo registrados por sondas de capacitancia*. 17 p. (enero 21, 2018): [http://www.agren.cl/antumapu\\_profesional/articulos/7/Lineas\\_de\\_gestion\\_para\\_el\\_riego.pdf](http://www.agren.cl/antumapu_profesional/articulos/7/Lineas_de_gestion_para_el_riego.pdf).
- Callejas R., Vera, J., Rioseco, M., Prohens, F., Osorio, H., Pino, P., Navarrete, J., Gálvez, R. (2014a). Generación e integración de tecnologías destinada al ahorro de agua de riego en dos regiones productoras de fruta en Chile. *Aqua-LAC* Vol. 6(2), pp. 71-83.
- Callejas, R., Vera, J., Kremer, C. (2014b). *Riego de precisión en frutales con sensores de suelo*. Serie Ciencias Agronómicas n° 28, Universidad de Chile. 112 p.
- Casanova, M., Salzar, O., Seguel, O., Luzio, W. (2013). *The soils of Chile*. Publisher: Springer Netherlands. 183 p.
- CEAZA (Centro de estudios avanzados en zonas áridas) e INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias). (2010). *Zonificación del territorio de la denominación de origen Pisco*. La Serena, Chile.
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. (2015). *Informe a la Nación. La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro*. 26 p. (mayo 5, 2018) <http://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2015/11/informe-megasequia-cr21.pdf>.
- Consorcio Cuenca Ingenieros Consultores Ltda. y Maren Consultores Ltda. (2004). Comisión nacional de riego. *Diagnóstico base de los embalses el Bato y Corrales, IV Región*.
- DGA (Dirección General de Aguas), División de hidrología. (2017). *Pronóstico de caudales de deshielo temporada de riego 2017-2018*. División general de aguas. Santiago. 19 p.
- Ferreira, R., Sellés, G., Burgos, L., Villagra, P., Sepúlveda, P., Lemus, G. (2010). *Manejo del riego en frutales en condiciones de restricción hídrica 2010*. Boletín INIA N°214. Instituto de investigaciones agropecuarias. 100 p.
- Gálvez R., Callejas, R., Reginato, G., Peppi, M. (2014). Irrigation schedule on table grapes by stem water potential and vapor pressure deficit allows to optimize water use. *Ciência Téc. Vitiv.* 29(2) 60-70.
- Grimes, D., Williams, L. (1990). Irrigation effects on plant water relations and productivity of Thompson Seedless grapevines. *Cropscience*. 30: 255-260.
- INE (Instituto Nacional de Estadísticas). (2007). *Censo agrícola y forestal 2007*. (enero 10, 2018) [www.ine.cl/estadisticas/censos/censo-agropecuario-y-forestal-2007](http://www.ine.cl/estadisticas/censos/censo-agropecuario-y-forestal-2007).

- JVRCH (Junta de Vigilancia del Río Choapa). (2013). *Cuenca del Río Choapa: Situación actual, perspectivas y propuestas*. La Serena, Chile.
- Luzio, W., Casanova, M., Seguel, O. (2010). *Suelos de Chile*. Universidad de Chile. 338 p.
- MOP (Ministerio de Obras Públicas), Dirección General de Aguas. (2004). *Cuenca del Río Choapa: Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad*. Santiago, Chile. 131p.
- MOP (Ministerio de Obras Públicas), Dirección General de Aguas, Chile. (20039). *Información Hídrica de las Cuencas Priorizadas, Fichas Temáticas*. [Santiago, Chile]: MOP. 5p. (abril 3, 2017) [http://www.mop.cl/Prensa/Documents/05\\_Rio\\_Choapa.pdf](http://www.mop.cl/Prensa/Documents/05_Rio_Choapa.pdf)
- Navarrete, J. (2012). *Efecto de distintos criterios de riego sobre variables fisiológicas y parámetros productivos de uva de mesa (Vitis vinifera L.) variedad Red Globe*. Tesis de Magíster. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile, 73 p.
- ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias). (2017). *Vides superficie y producción*. 02/07/2018. (junio 2, 2017) [http://www.odepa.cl/wpcontent/uploads/2017/02/Vides\\_superficie\\_y\\_produccion.xls](http://www.odepa.cl/wpcontent/uploads/2017/02/Vides_superficie_y_produccion.xls).
- Orellana, D. (2017). *Análisis de los efectos de una mega-sequía sobre la generación hidroeléctrica en Chile*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Santiago: Universidad de Chile, 68 p.
- Osorio, A. Poblete, R. (2013). *Huella hídrica en uva pisquera*. Instituto de investigaciones agropecuarias: determinación de la huella del agua y estrategias de manejo de recursos hídricos. Serie Actas INIA N°50. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Intihuasi, La Serena, Chile.
- Patakas, A., Noitsakis, B., Chouzouri, A. (2005). Optimization of irrigation water use in grapevines using the relationship between transpiration and plant water status. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106, 253- 259.
- SAG (Servicio Agrícola y Ganadero). (2012). *Catastro vitícola nacional*. Ministerio de Agricultura. División de protección agrícola y forestal. Sub departamento de viñas y vinos, inocuidad y biotecnología sección viñas y vinos.
- SAN (Sociedad Agrícola del Norte) y FEDEFRUTA (Federación Gremial Nacional de Productores de Fruta de Chile). (2015). *Sector frutícola en Coquimbo pierde US\$1.000 millones por sequía*. (diciembre 10, 2017) <http://www.pulso.cl/empresas-mercados/sector-fruticola-en-coquimbo-pierde-us1-000-millones-por-sequia/>.
- Williams, L. (2000). *Grapevine water relations*. p. 121–126. In: Christensen, L.P. (ed.). *Raisin production manual*. Publication n° 3393. Univ. California, Oakland, C.A.
- Williams, L., Trout, T. (2005). Relationships among vine-and soil-based measures of water status in a Thompson Seedless vineyard in response high-frequency drip irrigation. *American Journal of Enology and Viticulture*, 56 (4): 357-366.
- Williams, L., Baeza, P. (2007). Relations among ambient temperature and vapor pressure deficit and leaf and stem water potentials of fully irrigated, field-grown grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 58 (2): 173-181.

## Modelación hidrológica para la gestión del riesgo de inundaciones en subcuencas tributarias al río Uruguay

*Hydrological modeling for the management of flood risk in tributary sub-basins of the Uruguay river*

Vanessa Erasun <sup>1\*</sup>, Gonzalo Sapriza <sup>1</sup>, Nicolás Failache <sup>1</sup>, Pablo Gamazo <sup>1</sup>  
Alejandro Arcelus <sup>2</sup>, Alejandro Nardin <sup>2</sup>

Recibido: 23/07/2018

Aceptado: 08/02/2019

\*Autor de correspondencia

### Resumen

Frecuentemente los habitantes de los centros poblados ubicados próximos a las márgenes del río Uruguay, se ven perjudicados por eventos de inundaciones; los que ocasionan innumerables daños económicos, sanitarios e inclusive riesgo de vida. Los Sistemas de Alerta Temprana de Inundaciones (SATI), son herramientas que contribuyen a la reducción de riesgos y permiten a las comunidades y servicios de emergencia coordinar con antelación los trabajos de mitigación, ante los efectos adversos de estos eventos. Los modelos hidrológicos utilizados en los SATI son una herramienta fundamental para realizar los pronósticos, dado que permiten simular la dinámica de las crecidas, obtener sus valores límites, y sus probabilidades de ocurrencia. En este trabajo se presentan los resultados del desarrollo de un modelo hidrológico de tipo continuo, con una escala de tiempo diaria, semi-distribuido espacialmente, calibrado y validado para subcuencas tributarias al río Uruguay, aguas abajo de la represa Salto Grande. Dicho modelo, implementado en las subcuencas Yuquerí y Gualaguaychú en Argentina y Daymán y Queguay en Uruguay, contribuirá a un SATI que será administrado en conjunto por la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (CTM-SG) y la Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU). Mediante la aplicación de calibración multi-objetivo los resultados, tanto para el periodo de calibración y validación, de las cuencas Daymán y Queguay presentaron muy buenos ajustes, seguidas de Gualaguaychú, en la que se obtuvieron buenos resultados. En estas cuencas, el modelo hidrológico demostró buena capacidad predictiva con habilidad para reproducir las diferentes componentes del hidrograma (picos, recesiones, estiaje). La cuenca Yuquerí presentó un ajuste insuficiente, fuertemente condicionado a la calidad de los datos observados de caudal. Por último, se pudo identificar la influencia notoria del río Uruguay en varias de las estaciones de aforo, requiriendo, en algunos casos, descartar datos de caudal derivado de curvas de aforo cuando el río Uruguay superaba cierta cota.

**Palabras clave:** Río Uruguay, Modelación Hidrológica, Sistema Alerta Temprana.

### Abstract

*The inhabitants of population centers located next to the margins of the Uruguay River are frequently affected by flood events. These events cause significant economic damage, affect the health of the population and even put lives in danger. Flood Warning Systems (FWS) are tools that contribute to the reduction of risks and allow communities and emergency services to coordinate in advance the works of mitigation, before the adverse effects of these events. The hydrological models used in the FWS are a fundamental tool to carry out the forecasts, since they allow knowing the dynamics of the floods, the flooding level limits and their probabilities of occurrence. In this paper we present the results of the development of a continuous hydrological model for tributary sub-basins to the Uruguay River, downstream of the Salto Grande dam. The model has a daily time scale, is spatially semi-distributed and has been calibrated and validated for the Yuquerí and Gualaguaychú sub-basins in Argentina, and the Daymán and Queguay sub-basins in Uruguay. The model will contribute to a FWS that will be administered jointly by the technical international organisms Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (CTM-SG) and Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU). Through the application of multi-objective calibration, the results for calibration and validation period at Daymán and Queguay basins presented very good adjustments, followed by the Gualaguaychú basin, in which good results were obtained. In these basins, the hydrological model demonstrated good predictive capacity with the ability to reproduce the different components of the hydrograph (peaks, recessions, low flows). The Yuquerí basin presented an insufficient adjustment, strongly conditioned by the quality of the observed flow data. Finally, it was possible to identify the notorious influence of the Uruguay River in several of the gauging stations, requiring, in some cases, discarding flow data derived from rating curves, when the Uruguay River exceeded a certain level.*

**Keywords:** Uruguay River, Hydrological Modeling, Flood Warning Systems.

1 Departamento del Agua, Centro Universitario Regional Litoral Norte, Universidad de la República, Salto, Uruguay. verasun@unorte.edu.uy; gsapriza@unorte.edu.uy; nicofail@gmail.com; gamazo@unorte.edu.uy

2 Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU), Paysandú, Uruguay. arcelus@caru.org.uy ; anardin@caru.org.uy



## 1. INTRODUCCIÓN

Se ha constatado a nivel internacional que las inundaciones son uno de los eventos que profundizan e incrementan los perjuicios socioeconómicos en las poblaciones y actividades agroindustriales que se ubican en zonas vulnerables. Sobre la población, trae aparejado agravantes tales como: desplazamientos, propagación de enfermedades y pérdidas materiales entre otros. Según la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2011), en la última década del siglo XX, alrededor de 1.500 millones de personas fueron afectadas por crecidas.

En particular, en el tramo del río Uruguay comprendido entre la represa de Salto Grande (SG) y su desembocadura en el Río de la Plata, se han registrado 7 eventos de inundación en los últimos 20 años (comunicación personal con el Centro Coordinador de Emergencias Departamentales (CECOED) en Salto, Uruguay). La concientización y la sensibilidad ante esta problemática, hacen necesaria la búsqueda e implementación de herramientas para una anticipada gestión de estos eventos, por ello, se han identificado dos tipos de soluciones: aquellas que implican la construcción de obras civiles de prevención, y aquellas que refieren a políticas de gestión, como son los Sistemas de Alerta Temprana de Inundaciones (SATI).

La solución ante estos eventos ha sido diferenciada a ambos márgenes. Por su lado, Argentina ha optado por soluciones estructurales, particularmente la construcción de defensas en las principales ciudades afectadas (Concordia y Concepción del Uruguay). En tanto en la margen uruguaya, la solución ha sido de tipo no estructural con la conformación del Sistema Nacional de Emergencia, que coordina múltiples organizaciones cuando se producen inundaciones.

Actualmente no existe un SATI para el río Uruguay, aguas abajo de la represa de SG. Si bien, la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (CTM-SG), posee un sistema operativo para el pronóstico de aportes al embalse, implementado en el sistema Delft-FEWS (Werner *et al.*, 2013), el mismo realiza pronósticos para el río Uruguay aguas arriba de

SG. De forma de extenderlo hacia aguas abajo, la Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU) en conjunto con la CTM-SG han firmado un acuerdo de colaboración para el desarrollo de un SATI.

Un componente fundamental de estos sistemas son los modelos hidrológicos e hidrodinámicos. Estos modelos, en base a una serie de datos de entrada (precipitaciones, aportes, condiciones de contorno, etc.) permiten calcular los niveles de crecida de un río. Pueden ser de tipo estocásticos (Georgakakos, 1986), basados en redes neuronales (Campolo *et al.*, 1999), y/o con base física (Moore *et al.*, 2007). Los estocásticos y los basados en redes neuronales, relacionan de forma estadística las precipitaciones y niveles en un río para determinar los pronósticos. Si bien estos modelos son muy eficientes en tiempo de cálculo, tienen poco poder predictivo bajo condiciones de no estacionariedad. En tanto los modelos con base física aplican los principios de conservación de masa y cantidad de movimiento para representar los procesos hidrológicos de transformación lluvia en escorrentía y tránsito que controlan la dinámica de las inundaciones. Existen varios ejemplos en la región de este tipo de sistemas con modelos de base física, en el río Yi (Silveira *et al.*, 2015) y en el río Gualaguay (Bianchi y Goniadzki, 2012) en Argentina.

En este sentido, para la predicción de niveles en el río Uruguay aguas abajo de SG, un modelo hidrológico e hidrodinámico, debería incluir: i) condiciones de contorno aguas arriba, definido por los aportes de la represa de SG, ii) aportes laterales de todas las cuencas tributarias, iii) tránsito hidrodinámico a través del cauce principal y planicie de inundación, y iv) condiciones de contorno aguas abajo definidas por el nivel del Río de la Plata.

El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de la componente (ii) referida a la simulación hidrológica para la estimación de los aportes laterales de las cuencas tributarias al río Uruguay. Para ello se desarrolló un modelo hidrológico de tipo continuo, con una escala de tiempo diaria, semi-distribuido espacialmente, calibrado y validado para 4 cuencas piloto: Yuquerí y Gualaguaychú en Argentina, Daymán y Queguay en Uruguay.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Área de estudio

Se consideró un total de 4 cuencas (figura 1-a). La delimitación espacial de las subcuencas (figura 1-b), se realizó identificando estaciones de aforo provenientes de la Dirección Nacional

de Aguas (DINAGUA) en Uruguay, y de la Base de Datos Hidrológica Integrada (BDHI) en Argentina. Esta delimitación, juntamente con la definición de las redes de drenaje y direcciones de flujo, se hizo utilizando los datos disponibles de Modelos Digitales de Terreno (MDT) de HydroSHEDS (Lehner y Grill, 2013).

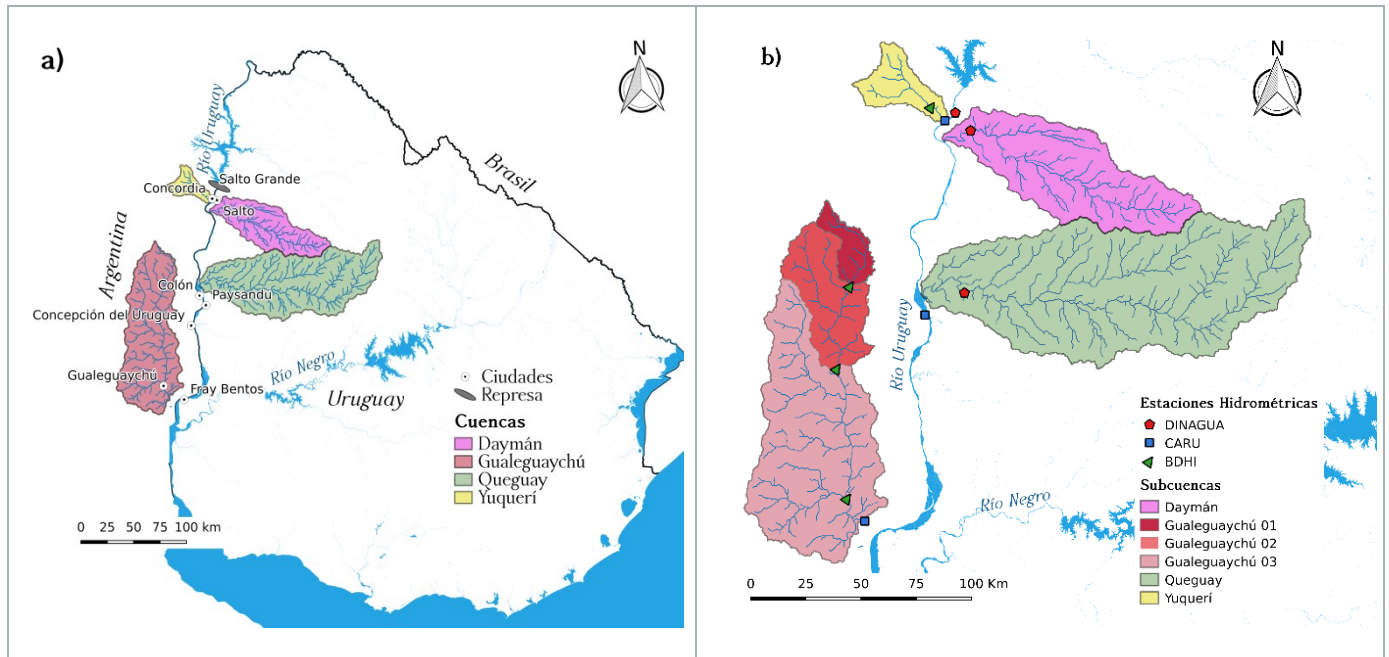


Figura 1. En el gráfico de la izquierda (a) se presentan las cuencas de estudio. En el gráfico de la derecha (b) se presentan las estaciones limnigráficas de medición de niveles del río Uruguay, y las subcuencas delimitadas en función de las estaciones de aforo

Utilizando el MDT, se determinaron para las subcuencas características morfológicas (ver tabla 1) como longitud del cauce principal (LCP), pendiente media de la cuenca (PMC), pendiente media del cauce principal (PMCP) y se estimó el tiempo de concentración (TC) mediante Kirpich (1940). A partir de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay escala 1:1.000.000, del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP, 1976), se determinaron los suelos predominantes en las cuencas. Se observó que eran en su mayoría suelos superficiales, con baja capacidad de almacenamiento. En el territorio argentino, a partir del Atlas de Suelos de la República Argentina (INTA, 1990), se observó que los suelos eran en general profundos y bien drenados.

Según el Mapa de Cobertura del Suelo de Uruguay (SIT – MVOTMA, 2011) en las cuencas Daymán y Queguay, el campo natural (uso pastoril) ocupa la mayor parte de la superficie. Al suroeste de la cuenca Queguay se observa que predomina la plantación forestal. Las áreas cultivadas también se hacen presentes en ambas cuencas, pero en menor proporción. A partir del Mapa de Cobertura del Suelo de la República Argentina escala 1:500.000 (INTA - <https://inta.gov.ar/>) se observa, que en las cuencas Gualaguaychú y Yuquerí predominan los cultivos agrícolas en secano; y en menor medida, las áreas destinadas a la forestación de bosques.

En función de los distintos grupos de suelo CONEAT (Molfino y Califra, 2001), se determinó el agua disponible (AD) promedio en las cuencas del margen izquierdo del río

Uruguay, en Daymán fue de 77 mm, y en Queguay de 70 mm. El AD está definido como la diferencia entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP). Para

las cuencas argentinas no fue posible la estimación del AD, ya que no existía información disponible.

Tabla 1. Características morfológicas de las subcuencas

Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	LCP (km)	PMC (%)	PMCP (%)	TC (horas)
Daymán	3.194	134,0	1,10	0,11	16,4
Queguay	7.882	238,0	1,43	0,12	23,0
Yuquerí	634	41,8	0,80	0,09	7,6
Gualeguaychú -01	470	48,4	0,48	0,05	10,0
Gualeguaychú-02	1.558	63,7	0,53	0,03	12,2
Gualeguaychú-03	4.305	100,6	0,63	0,02	16,3

## 2.2 Datos hidrometeorológicos

Se recopiló información hidrometeorológica de base para determinar las precipitaciones por cuenca, las evapotranspiraciones potenciales, y niveles y caudales de los cursos de agua estudiados y del río Uruguay.

### 2.2.1 Precipitación

Para generar las precipitaciones promedio por cuenca se realizó un análisis de la calidad de los datos. Para ello, se identificaron estaciones patrón en diferentes zonas, las mismas fueron seleccionadas en base a su reducido o nulo número de días faltantes, a la ausencia de valores fuera de rango y a su consistencia en la variabilidad inter e intra-anual (periodos secos y húmedos).

Las estaciones con datos faltantes, fueron completadas calculando el valor mediante ponderación por el inverso de la distancia al cuadrado entre los pluviómetros en un radio de búsqueda menor a los 65 km de distancia.

Una vez realizado este procedimiento, con las estaciones finales se determinaron las series diarias de precipitaciones medias de las subcuencas, generadas a partir de una ponderación por área, utilizando los polígonos de Thiessen (figura 2).

### 2.2.2 Evapotranspiración potencial

La serie de evapotranspiración potencial utilizada para las cuencas Daymán y Queguay, fue la estimada mediante el método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), brindada por las estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA)-Salto Grande e INIA-Tacuarembó respectivamente. En las cuencas argentinas, se pretendió utilizar las series perteneciente al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), pero las mismas cuentan con registros de datos a partir del año 2012, y poseen períodos con datos faltantes. Frente a esta situación, se utilizó la estación INIA-Salto Grande para ambas cuencas.

### 2.2.3 Niveles y caudales

Se utilizaron 3 estaciones limnigráficas provenientes de DINAGUA y CARU para el río Uruguay (ver figura 1-b), para identificar la afectación de éste en los niveles de los ríos tributarios estudiados. En Daymán, se observó que los niveles en la estación de aforo N° 140, estaban afectados por el río Uruguay (figura 3) cuando éste se encontraba a una cota de 10,7 m (cero Wharton) en el puerto de Concordia. Por tanto, los caudales que fueron obtenidos de las curvas de aforo no eran válidos para esos períodos, los cuales finalmente no fueron considerados.

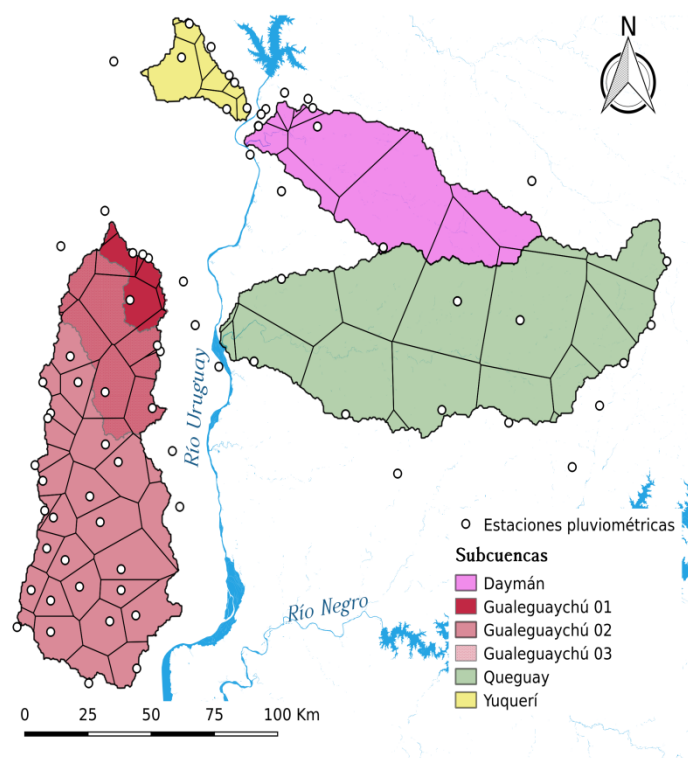


Figura 2. Estaciones hidrometeorológicas recopiladas para las cuencas de estudio, junto con los polígonos de Thiessen generados

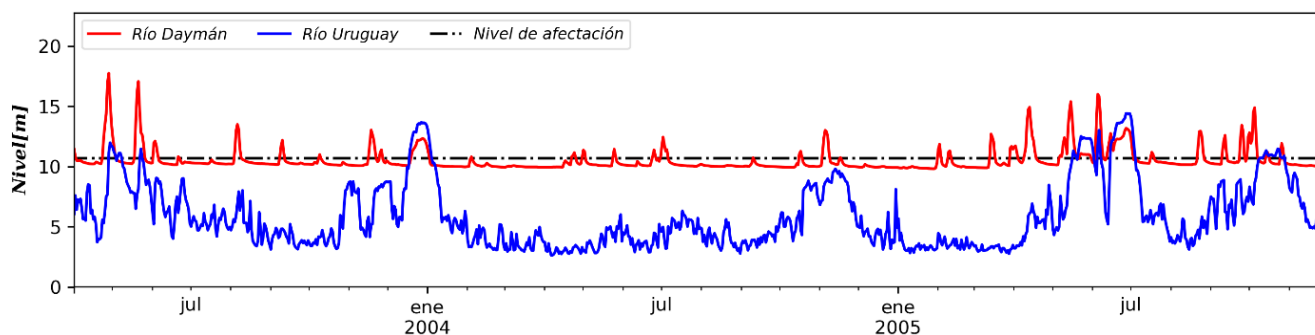


Figura 3. Niveles en el río Uruguay (en azul) en el puerto de Concordia, en el río Daymán (en rojo) en la estación de aforo y nivel del río Uruguay a partir del cual se considera afectación de niveles en el río Daymán (en negro)

En Queguay, no se identificó que los niveles en la estación de aforo N° 141 estuvieran afectados por el remanso del río Uruguay. Cabe destacar que los valores más cercanos de niveles observados en el río Uruguay, procedentes de la CARU (Colón, Entre Ríos), se encontraban aguas abajo de dicha estación de aforo.

En Yuquerí, también se observó la gran afectación del río Uruguay sobre los niveles en

la estación de aforo y por tanto, en los valores finales de caudales. Se identificó en 12,9 m (cero Wharton) la cota en el puerto de Concordia sobre la cual los niveles en la estación de aforo eran afectados por el remanso del río Uruguay (ver figura 4). No se consideraron para este estudio los niveles en el río Yuquerí superiores a la mencionada cota. A su vez, en el lugar en donde se registran los niveles del río Yuquerí, no sólo existe una importante afectación por los eventos



de crecida del río Uruguay, sino que también se constataron variaciones temporales en el tamaño y ubicación de islotes o dunas. Por tanto, es de esperar que la sección donde se realizan las mediciones de nivel sufra continuos cambios. Estos factores contribuyen a que se genere una gran incertidumbre en la relación caudal-tirante para el período observado.

Para las subcuencas Gualeguaychú-01 y Gualeguaychú-02, se determinó la relación anual entre el caudal (Q) y la precipitación (P). Como se observa en la figura 5, la subcuenca Gualeguaychú-01, cuya estación de aforo es la N°3031, presentó valores Q/P mayores a 0,6 e incluso a 1 (para el período 1998-2003). Esto implicaría que más del 60% de la precipitación se transformaría en escorrentía y/o que exista un aporte significativo de agua subterránea o un

trasvase de otras cuencas. Esto no es razonable considerando la relación Q/P de la subcuenca Gualeguaychú-02, cuya estación de aforo es la N°3030. Por tanto, estos períodos no fueron considerados para la calibración y validación de las subcuencas.

En la cuenca Gualeguaychú-03 se determinó el coeficiente de correlación entre los niveles del río Gualeguaychú en la estación de aforo N°3062, y los niveles del río Uruguay en la boca de Gualeguaychú (sin compatibilizar los cerros de referencia). Se obtuvo un coeficiente  $R^2=0,86$ ; esto implica que las variaciones de niveles en la estación de aforo de Gualeguaychú son explicadas en su mayoría por las variaciones de niveles del río Uruguay. Por tanto, no se realizó la calibración de esta subcuenca.

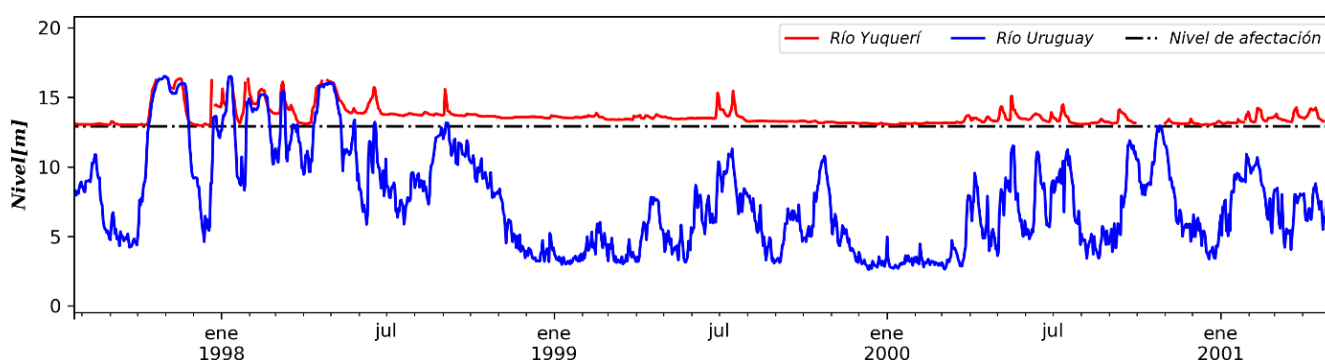


Figura 4. Niveles en el río Uruguay (en azul) en el puerto de Concordia, en el río Yuquerí (en rojo) en la estación de aforo y nivel del río Uruguay a partir del cual se considera afectación de niveles en el río Yuquerí (en negro)

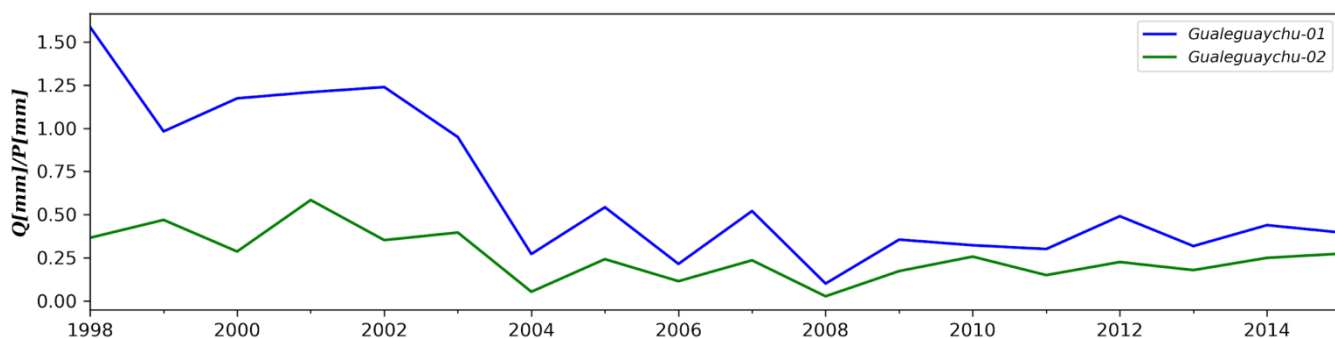


Figura 5. Relación anual Q/P para las subcuencas Gualeguaychú-01 y 02

### 2.3 Modelo Hidrológico

Para llevar a cabo un modelo de simulación continua, con un paso de tiempo diario, se utilizó el programa HEC-HMS (sigla en inglés de *Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System*), versión 4.2 (HEC, 2000); dentro de éste se utilizó el algoritmo SMA-HMS (*Soil Moisture Accounting*), desarrollado por Bennett (1998). Este algoritmo representa la cuenca mediante un conjunto de depósitos donde se simulan los siguientes procesos hidrológicos: intercepción en la cobertura vegetal; retención superficial; balance de agua en suelo y en dos acuíferos, uno superficial, y otro más profundo. El primer nivel de almacenamiento representa la parte de precipitación que no alcanza la superficie del terreno porque es interceptada por la vegetación. El siguiente depósito representa el volumen de agua retenido en las irregularidades del terreno. El siguiente nivel, constituye el almacenamiento en el suelo, para el cual se distinguen dos zonas: *Upper zone*, donde el suelo es capaz de perder agua por evapotranspiración o percolación y *Tension zone*, la parte del suelo que pierde agua exclusivamente por evapotranspiración. Esta subdivisión del suelo representa la distribución de la humedad, en donde se trata de diferenciar la existencia de agua libre y de agua capilar en el interior del mismo. HMS distingue dos depósitos subterráneos para reproducir el almacenamiento en acuíferos: el primero de ellos más superficial, para representar el flujo hipodérmico; y el segundo más profundo, para representar el flujo base.

Se utilizó el método del hidrograma unitario de Clark, para representar de forma agregada el tránsito en la cuenca, que incluye los procesos de traslación y la atenuación. La traslación a través de la cuenca se realiza mediante una función lineal aplicando el método de las isócronas área-tiempo. Mientras que la atenuación se realiza mediante un reservorio lineal, que se supone se ubica a la salida de la cuenca. Para esto es necesario dos parámetros: el tiempo de concentración y el coeficiente de almacenamiento del reservorio lineal (Feldman, 2000).

Para determinar el hidrograma de flujo subterráneo, se utilizó el método de reservorios lineales que se usa en conjunto con el modelo SMA. Este modelo de flujo base, simula el almacenamiento y movimiento del flujo subsuperficial como reservorios lineales. Finalmente, el hidrograma de caudales resultante de la cuenca es la suma de los hidrogramas superficial y de flujo subterráneo. En la cuenca Gualaguaychú, se implementó un modelo semi-distribuido. El tránsito de dicho modelo se realizó con Muskingum-Cunge (Cunge, 1969), método que contempla la difusión de la onda a medida que viaja a través del canal, y es utilizado para tener la capacidad de predecir la atenuación de la onda del hidrograma. Los parámetros de este modelo son determinados a partir de las características morfológicas e hidráulicas del curso; entre ellas, la rugosidad de Manning en el lecho del canal (NL) y en la planicie de inundación (NP), así como también por la pendiente y longitud del cauce.

#### 2.3.1 Parámetros del modelo

Para representar todo el modelo se necesitaron 5 condiciones iniciales y 17 parámetros, que se detallan en la tabla 2. Los primeros 13 parámetros corresponden al SMA; los 2 siguientes, al modelo de Clark; los penúltimos 2, al modelo del reservorio lineal; y los últimos 2, al tránsito de Muskingum-Cunge.

De los 13 parámetros del SMA, 11 fueron calibrados. El porcentaje de zona impermeable de la cuenca *Impervious* se tomó como 0 por ser cuencas naturales. La capacidad de almacenamiento en la zona de tensión del suelo (CAZTS) tampoco fue calibrada, se ajustó su valor en la etapa de calibración manual en base a las cartas de agua disponible (Uruguay) y tipo de suelo (Argentina). Las condiciones iniciales representan las variables de estado de cada uno de los reservorios considerados en el modelo SMA y son expresadas como porcentajes respecto a las capacidades máximas de cada reservorio. Ninguna condición inicial fue calibrada. Se tomaron los datos de lluvia y caudal en un período de aproximadamente 4 meses antes de la calibración, dando así al

programa un período de calentamiento para que se ajusten las condiciones iniciales y no influyan en los resultados al inicio de la calibración. Análogamente, se realizó el mismo procedimiento en la validación.

En la tabla 3 se presenta el rango de variación de los parámetros que fueron adaptados a la región de estudio, en base a las características morfológicas (pendiente, densidad de drenaje) y fisiográficas de las cuencas (suelos, geología).

Tabla 2. Parámetros calibrables de los modelos

Nombre HMS	Descripción y Unidad	Nombre
<i>Canopy Storage</i>	Cap. de almacenamiento por intercepción de vegetación (mm)	INTVEG
<i>Surface Storage</i>	Cap. de almacenamiento por retención en depresiones (mm)	CADSUP
<i>Max. Infiltration</i>	Máxima cap. de infiltración en el suelo (mm/h)	MCIS
<i>Impervious</i>	Impermeabilidad (%)	
<i>Soil Storage</i>	Cap. de almacenamiento del suelo (mm)	CAS
<i>Tension Storage</i>	Cap. de almacenamiento en zona de tensión del suelo (mm)	CAZTS
<i>Soil Percolation</i>	Máxima cap. de percolación del suelo (mm/h)	MCPS
<i>GW1 Storage</i>	Cap. de almacenamiento depósito subterráneo 1 (mm)	CADS1
<i>GW1 Percolation</i>	Máxima cap. de percolación depósito subterráneo 1 (mm)	MCPDS1
<i>GW1 Coefficient</i>	Coef. de almacenamiento depósito subterráneo 1 (h)	TADS1
<i>GW2 Storage</i>	Cap. de almacenamiento depósito subterráneo 2 (mm)	CADS2
<i>GW2 Percolation</i>	Máxima cap. de percolación depósito subterráneo 2 (mm/h)	MCPDS2
<i>GW2 Coefficient</i>	Coef. de almacenamiento del depósito subterráneo 2 (h)	TADS2
<i>Time of concentration</i>	Tiempo de concentración (h)	TC
<i>Storage Coefficient</i>	Coeficiente de almacenamiento (h)	SC
<i>GW 1 Coefficient</i>	Tiempo de respuesta del depósito subterráneo 1 (h)	GW1C
<i>GW 2 Coefficient</i>	Tiempo de respuesta del depósito subterráneo 2 (h)	GW2C
<i>Manning's n</i>	Rugosidad de Manning en el lecho del canal	NL
<i>Left-Right Manning's n</i>	Rugosidad de Manning en la planicie de inundación	NP

#### 2.4 Calibración y validación

La calibración del modelo tuvo como objetivo estimar aquellos parámetros efectivos del modelo que no pueden ser medidos de forma directa en la escala de cuenca en la que se encuentran definidos. Se realizó comparando los hidrogramas de caudales simulados con los observados en todas las cuencas aforadas.

La validación del modelo, permite evaluar si los parámetros obtenidos durante el proceso de calibración son válidos para otras series de tiempo. En la validación se utilizó un período de datos independiente, no empleado en la calibración.

La calibración se realizó en dos etapas. La primera fue de tipo manual (prueba y error), con el objetivo de evaluar la influencia de cada parámetro en el hidrograma de salida del modelo

y en las funciones objetivos utilizados. Posteriormente, se aplicó calibración multi-objetivo (Gupta *et al.*, 1998) y se utilizó el código de Borg, que implementa una serie de algoritmos genéticos (Hadka y Reed, 2013), para su calibración automática. Al aplicar algoritmos multi-objetivos, se generan dos grupos de soluciones: (i) soluciones no dominadas, serán mejores en una o más funciones objetivos, pero peores en otras funciones comparadas a todas las restantes; y (ii) soluciones dominadas, que considerando todos las funciones objetivos definidas, son peores que las otras. El conjunto de las soluciones no dominadas son el resultado

final del problema multi-objetivo. Dicho conjunto forma una región de Pareto (Gupta *et al.*, 1998) con las soluciones (parámetros calibrados). Los algoritmos genéticos se encargan de buscar los parámetros – soluciones- para definir la región de Pareto.

Para definir la bondad del ajuste, se utilizaron tres funciones objetivos: el coeficiente de eficiencia de Nash - Sutcliffe (NS) (Nash y Sutcliffe, 1970), el logaritmo de NS (LogNS) estimada a partir de transformar los caudales simulados y observados a logarítmico, y el porcentaje de error absoluto en el volumen (PEAV), tabla 4.

Tabla 3. Rango de los parámetros

Nombre	Daymán	Queguay	Gualeguaychú-01	Gualeguaychú-02	Yuquerí
INTVEG	0,0 – 3,0	-	0,0 – 3,5	0,0 – 3,5	3,0 – 8,0
CADSUP	0,0 – 5,0	-	0,05 – 3,5	2,0 – 5,0	4,0 – 20,0
MCIS	0,005 – 4,0	0,5 – 4,5	0,5 – 2,5	1,0 – 5,0	1,0 – 8,0
CAS	85,0 – 150,0	100,0 – 160,0	80,0 – 150,0	80,0 – 190,0	100,0 – 250,0
MCPS	0,005 – 3,5	0,05 – 2,5	0,05 – 1,5	0,1 – 1,5	0,05 – 2,0
CADS1	10,0 – 700,0	50,0 – 200,0	50,0 – 250	50,0 – 250,0	20,0 – 150,0
MCPDS1	0,001 – 2,0	0,05 – 1,5	0,05 – 1,5	0,05 – 1,5	0,05 – 1,5
TADS1	2,0 – 300,0	20,0 – 100,0	20,0 – 150,0	20,0 – 150,0	20,0 – 140,0
CADS2	10,0 – 500,0	10,0 – 150,0	10,0 – 250,0	10,0 – 250,0	25,0 – 200,0
MCPDS2	0,0001 - 1,0	0,001 – 1,0	0,00009 – 0,8	0,0001 – 0,8	0,001 – 0,8
TADS2	400,0 – 1200,0	50,0 – 500,0	50,0 - 1500	50,0 – 1500,0	500,0 – 1650,0
TC	18,0 – 35,0	15,0 – 60,0	5,0 – 20,0	10,0 – 30,0	5,0 – 15,0
SC	25,0 – 38,0	30,0 – 90,0	10,0 – 30,0	15,0 – 35,0	10,0 – 24,0
GW1C	10,0 – 50,0	30,0 – 80,0	10,0 – 300,0	20,0 – 200,0	10,0 – 200,0
GW2C	350,0 – 800,0	50,0 – 700,0	50,0 – 1700,0	50,0 – 1700,0	200,0 – 1800,0
NL	-	-	-	0,02 – 0,08	-
NP	-	-	-	0,03 – 0,1	-

Tabla 4. Funciones objetivo utilizadas

NS	LogNS	PEAV
$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$	$LogNS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{sim,i}) - \log(Q_i))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(Q_i) - \log(\bar{Q}_i))^2}$	$PEAV = \frac{\sum_{i=1}^n  Q_{sim,i} - Q_i }{\sum_{i=1}^n Q_i} * 100$

El uso de calibración multi-objetivo permite ajustar las diferentes partes de hidrograma (fase creciente, caudal máximo, recesión y flujo base) a través de las funciones objetivos utilizadas.

Esto está atribuido a que los parámetros que controlan los diferentes procesos (partes del hidrograma), tienen una influencia mayor/menor según qué función objetivo sea utilizada. Por ejemplo, los parámetros que controlan la respuesta rápida y caudales máximos, tendrán una sensibilidad mayor respecto al NS pero no así al LogNS. Y por el contrario, los parámetros que controlan las recesiones y el flujo base serán insensibles respecto al NS, pero muy sensibles al LogNS.

En el caso del PEAV, permite evaluar el sesgo absoluto del volumen. Según Finger (2011), el

efecto que tiene el criterio de Nash (escalar o logarítmico) sobre la simulación es de “desplazar verticalmente” hacia arriba o hacia abajo toda la serie, mientras que el error en el volumen permite “desplazar horizontalmente” la serie.

Según la clasificación de Molnar (2011), valores de NS y LogNS menores a 0,2 implica que el ajuste es insuficiente, entre 0,2 y 0,4 es satisfactorio, entre 0,4 y 0,6 es bueno, entre 0,6 y 0,8 es muy bueno, si es mayor a 0,8 es excelente, y un valor cercano a uno representa el ajuste perfecto.

El periodo seleccionado para la calibración y validación de cada una de las subcuencas se presenta en la tabla 5. En la etapa de calibración se realizaron 30.000 iteraciones para cada una de las subcuencas.

Tabla 5. Períodos de calibración y validación de las subcuencas

Subcuenca	Calibración	Validación
Daymán	15 Abr 2000 – 09 Jul 2009	01 Ene 2010 – 23 Set 2015
Queguay	01 Ene 2000 – 09 Jul 2009	01 Ene 2010 – 10 Jul 2015
Guauguaychú-01	15 Abr 2010 – 07 Ene 2015	01 Ene 2006 – 31 Dic 2007
Guauguaychú-02	01 Ene 2010 – 07 Ene 2015	01 Ene 2006 – 31 Dic 2007
Yuquerí	15 Abr 2000 – 09 Jul 2009	01 Ene 2010 – 09 Jul 2014

### 3. RESULTADOS

En las figuras 6, 7, 8, 9 y 10 se muestran un sub-período de los caudales observados y simulados para el periodo de calibración y validación en las cuencas estudiadas.

En la figura 11 se presentan los frentes de Pareto para las 3 funciones objetivos definidas tanto para la calibración como para la validación para las cuencas de Daymán, Guauguaychú y Queguay.

En esta figura se comparan el NS vs. LogNS, LogNS vs. PEAV y PEAV vs. NS respectivamente.



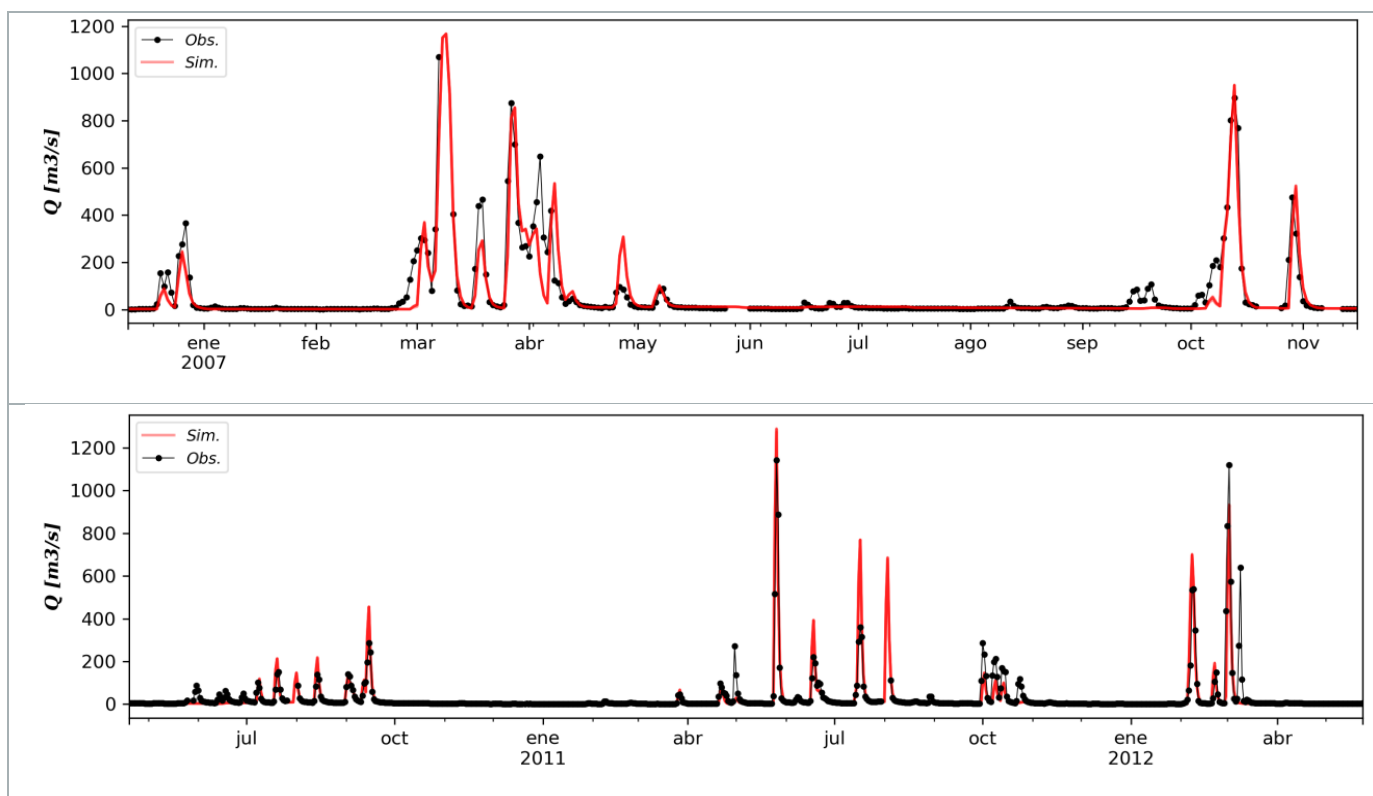


Figura 6. Caudales observados y simulados en Daymán para un subperíodo de calibración (arriba) y validación (abajo)

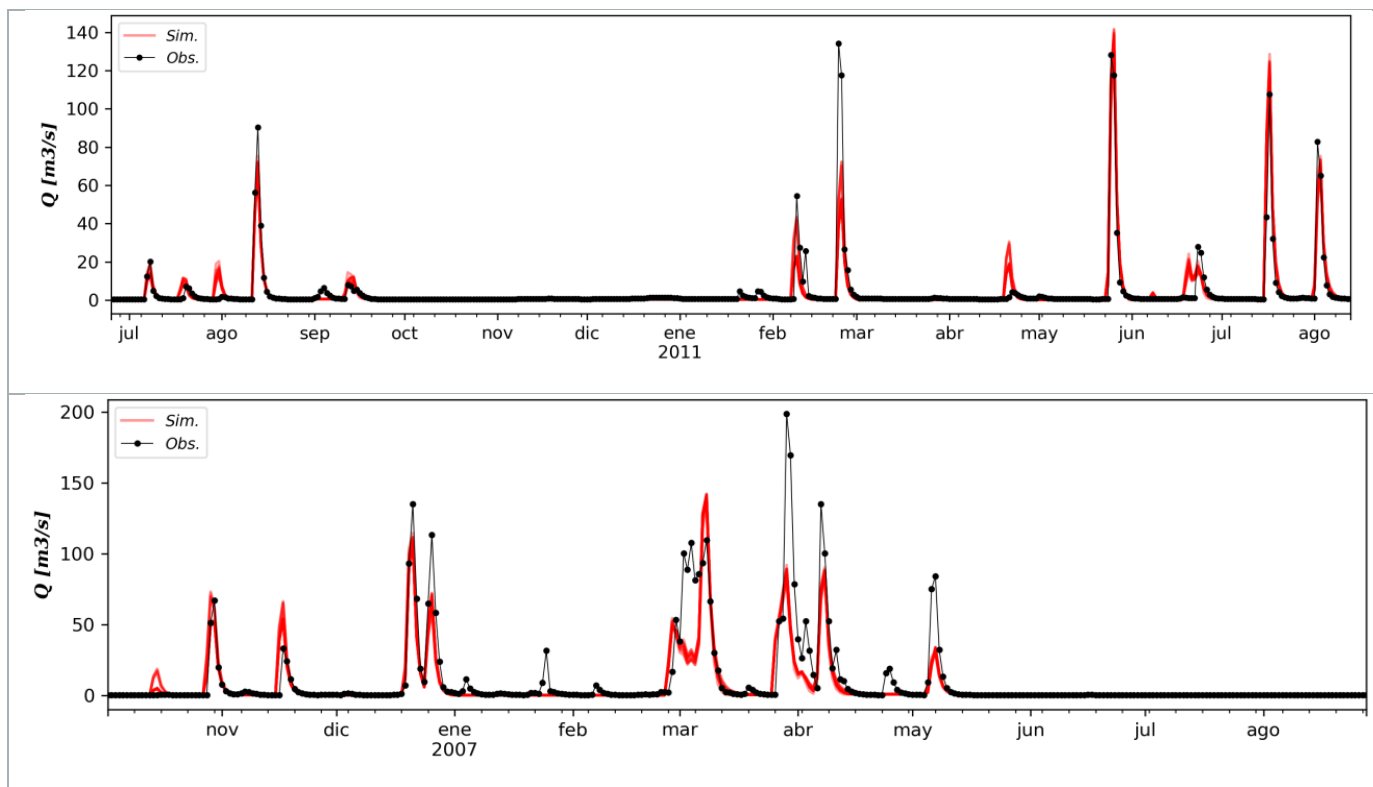


Figura 7. Caudales observados y simulados en Gualeguaychú-01 para un subperíodo de calibración (arriba) y validación (abajo)

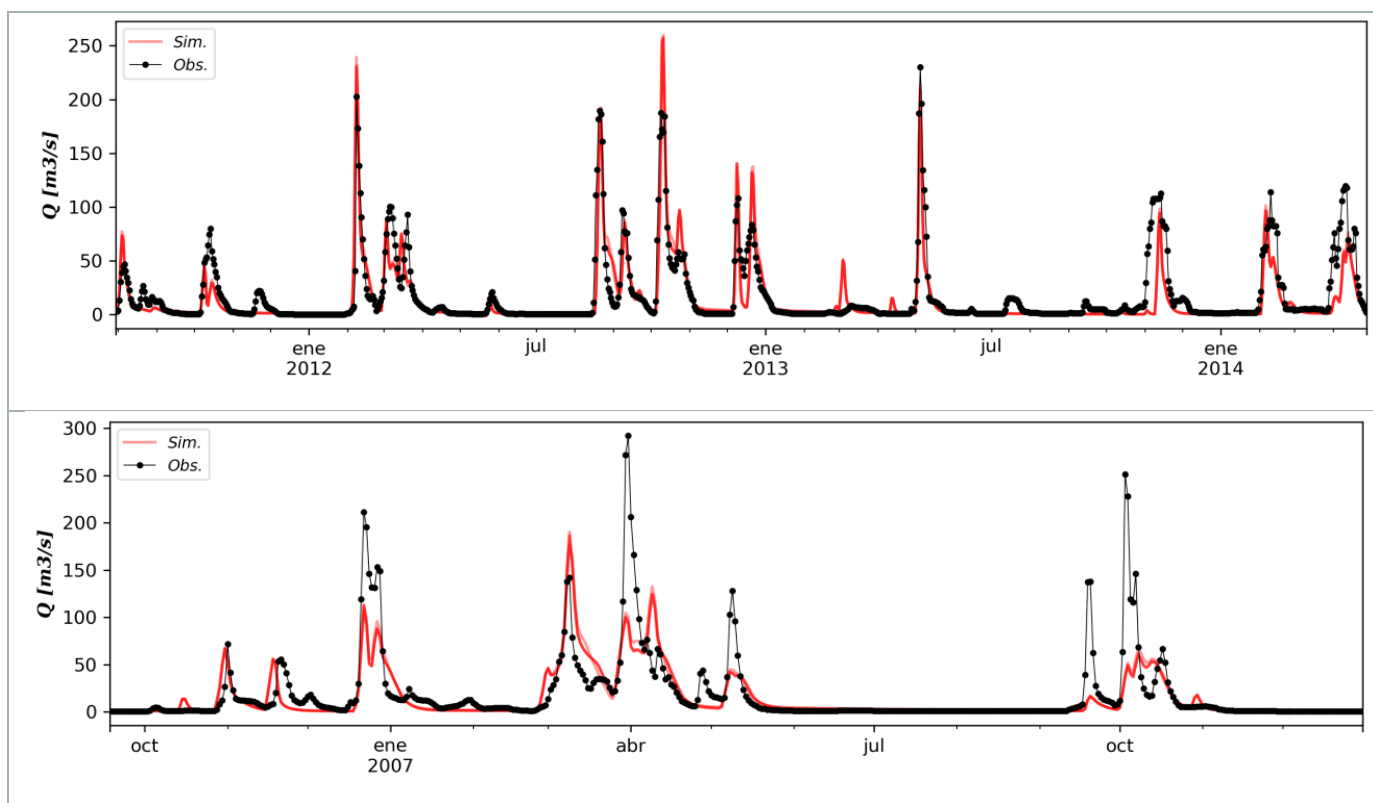


Figura 8. Caudales observados y simulados en Gualeguaychú-02 para un subperíodo de calibración (arriba) y validación (abajo)

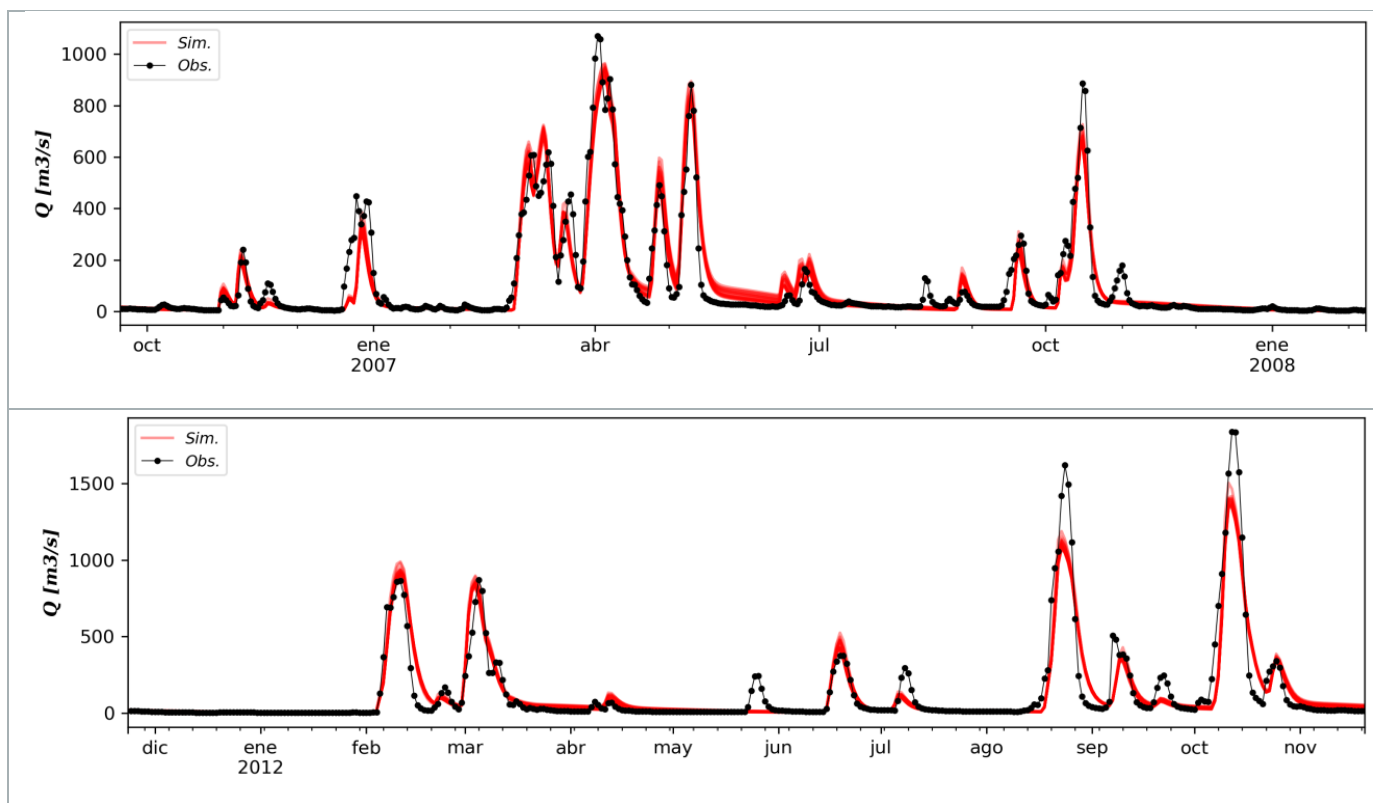


Figura 9. Caudales observados y simulados en Queguay para un subperíodo de calibración (arriba) y validación (abajo)

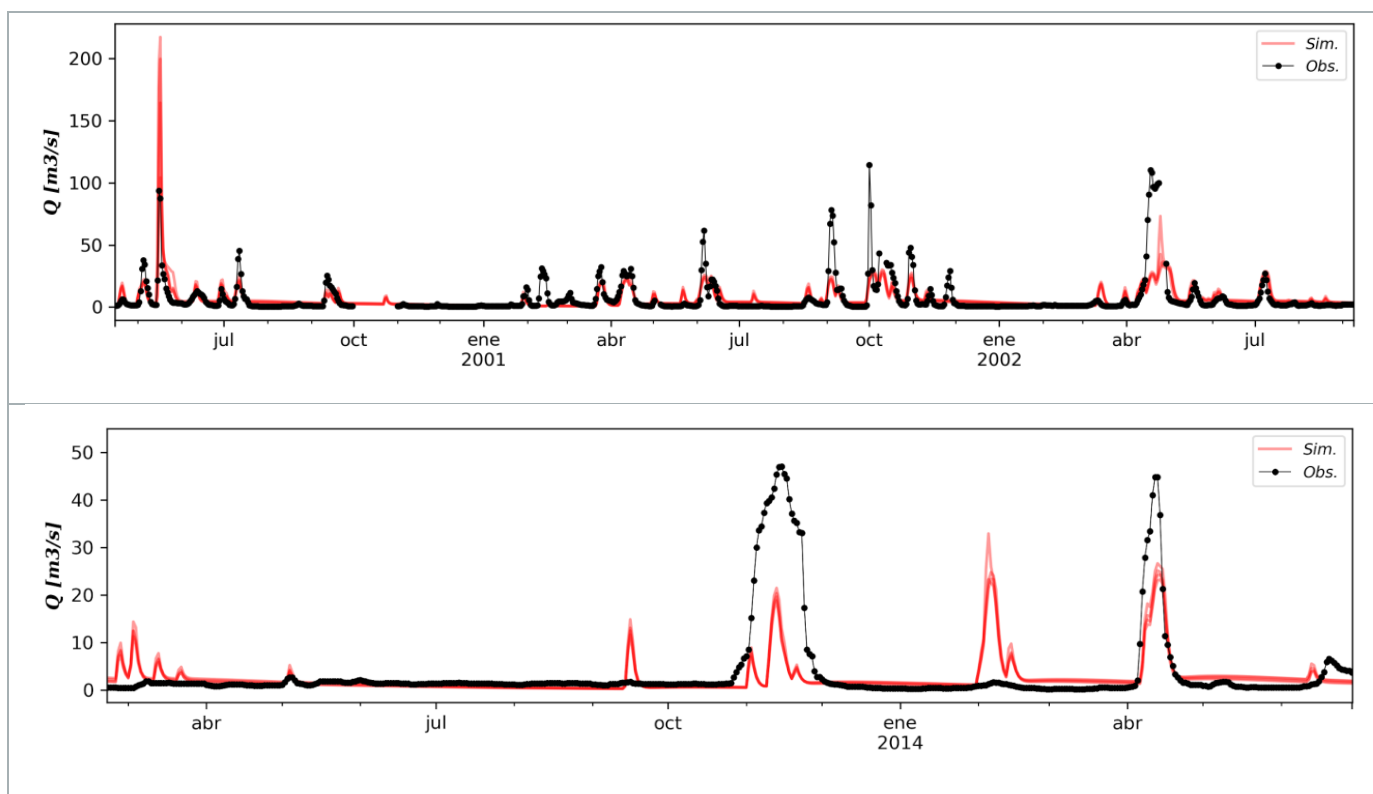


Figura 10. Caudales observados y simulados en Yuquerí para un subperíodo de calibración (arriba) y validación (abajo)

#### 4. DISCUSIÓN

En Daymán se observa que la variación en el NS es despreciable, por lo tanto, no se producirán efectos contrapuestos con LogNS y PEAV respectivamente; esto podría estar atribuido a que la cuenca presenta una rápida respuesta (fase creciente y recesión) en los eventos de crecida y a un flujo base reducido, con una respuesta más moderada temporalmente. En el segundo caso, se compara LogNS vs PEAV, donde sí se aprecia un leve efecto contrapuesto; una mejora en el ajuste de LogNS (flujo base), implica un peor ajuste en el PEAV, y viceversa. Este comportamiento en la función LogNS está atribuido específicamente a la variación en el parámetro MCPDS1 (figura 13), descrito anteriormente.

En Gualeguaychú-01 se observa que la variación en el NS, en general, produce efectos contrapuestos con LogNS; pero no se observan tendencias de efectos contrapuestos entre el

PEAV vs. NS; mejoras en el PEAV implican mejoras en el NS. En LogNS vs PEAV, sí se aprecia un leve efecto contrapuesto. Una mejora en el ajuste de LogNS (mejor aproximación del flujo base), implica un peor ajuste en el PEAV, y viceversa. Para el período de validación se observa una desmejora (en general) en los ajustes de las funciones objetivos.

En Gualeguaychú-02 se refleja en la etapa de calibración, que las funciones objetivos presentan el mismo comportamiento de Daymán; producto del comportamiento monótono de los parámetros en las diferentes evaluaciones (figura 13). Para el período de validación, en general, se observa una desmejora en los ajustes de las funciones objetivos respecto a la calibración.

En Queguay se observa que la variación en el NS es despreciable, por lo tanto, no se producirán efectos contrapuestos con LogNS y PEAV respectivamente. Esto podría estar atribuido a que la cuenca presenta una rápida respuesta en

los eventos de crecida; y a un flujo base reducido, con una respuesta más moderada temporalmente. En la comparación del LogNS vs. PEAV, sí se aprecia un leve efecto contrapuesto. Para el período de validación se mantienen las mismas tendencias. En general, se observa una mejora en los ajustes de las funciones objetivos respecto a la calibración. En la figura 12 se presentan los frentes de Pareto para las tres funciones objetivos utilizadas en la calibración y validación respectivamente de la cuenca del Yuquerí. Tanto en la calibración como en la validación, no se aprecian tendencias claras. En ambas instancias no se obtuvieron buenos resultados. Esto puede deberse a la mala calidad de los datos observados, atribuidos a la sección variable que presenta la estación de

aforo mencionado anteriormente. Se observa una desmejora en los ajustes de las funciones objetivos respecto a la calibración.

En la figura 13 se muestra la combinación de los parámetros (normalizados entre 0 y 1, correspondiente al rango establecido en la tabla 3) obtenidos para cada solución de la región de Pareto para las cuatro cuencas (Daymán, Gualaguaychú-01, Gualaguaychú-02 y Queguay). Se puede observar que para las cuencas que presentan un mayor efecto contrapuesto en los frentes Pareto (ej. Queguay y Gualaguaychú-01) existe una menor claridad en identificar de los parámetros calibrados, dentro del rango definido de variación (CADS2 en la cuenca Queguay).

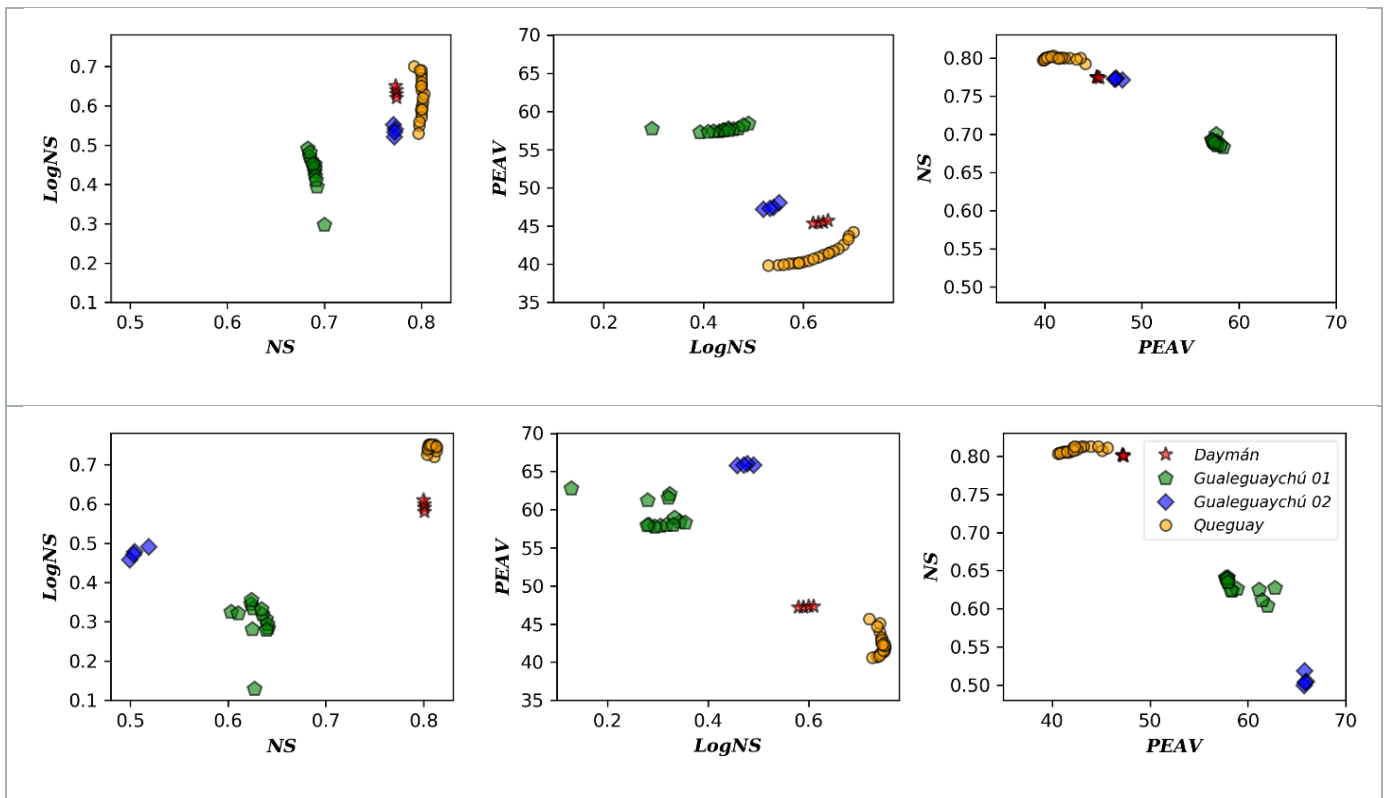


Figura 11. Frentes de Pareto para las cuencas Daymán, Queguay, Gualaguaychú 01 y 02 para los periodos de calibración (arriba) y validación (abajo)

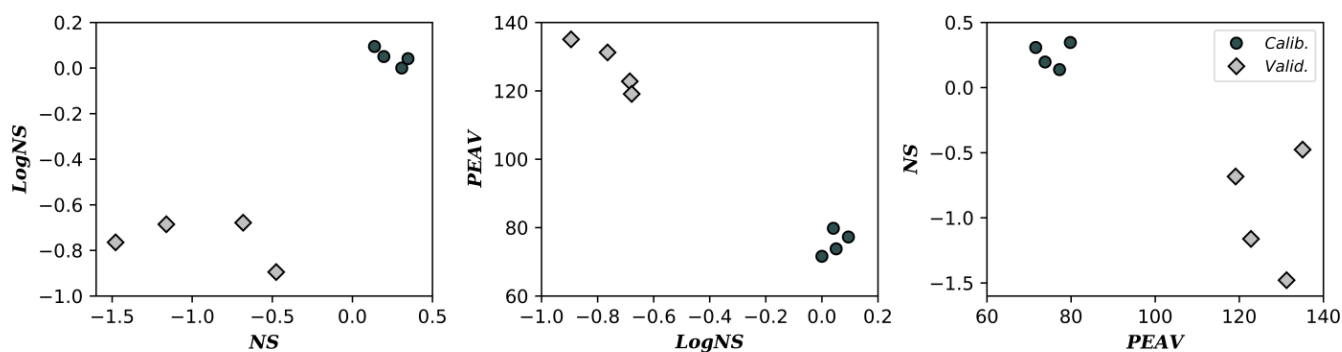


Figura 12. Frentes de Pareto para la cuenca Yuquerí para el periodo de calibración y validación

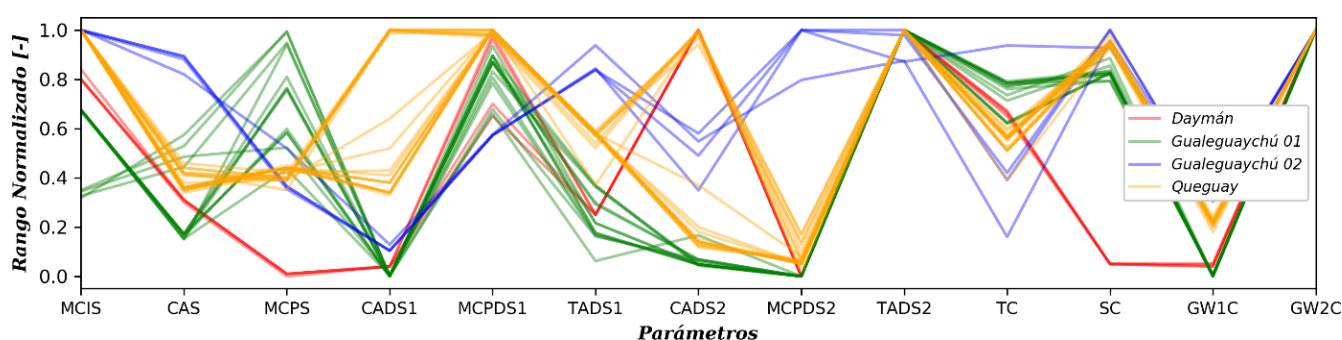


Figura 13. Variación de los parámetros normalizados entre [0,1] para las cuencas calibradas

## 5. CONCLUSIONES

En general los resultados obtenidos para las cuencas simuladas fueron muy buenos incluso excelentes, tanto para el periodo de calibración, como de validación, según el criterio de Molnar (2011), a excepción de la cuenca Yuquerí, donde la calidad de los datos utilizados era deficiente.

Los resultados obtenidos en Daymán, fueron “muy buenos” en la etapa de calibración, y “excelente” en la validación. Se observó en la calibración, que para algunos períodos se obtuvieron subestimaciones de los caudales máximos.

En las subcuencas Gualeguaychú-01 y Gualeguaychú-02 fue necesario considerar un modelo semi-distribuido espacialmente, modelando el tránsito con el modelo Muskingum-Cunge, y de esta manera poder

contemplar los efectos del almacenamiento (identificados en el cauce principal del río Gualeguaychú), que produce efectos de laminación en los hidrogramas. El ajuste, según el criterio mencionado anteriormente, en la calibración fue “muy bueno”, pero se observó una desmejora en la etapa de validación (calificación “bueno”).

En la estación de aforo N° 141 del río Queguay no se observó la influencia del río Uruguay. El ajuste en las etapas de calibración y validación, fue “excelente” (NS en el rango de 0,8 y LogNS en el rango de 0,7).

El modelo desarrollado permitió simular apropiadamente las diferentes componentes de flujo (flujo superficial, hipodérmico y flujo base) para un paso de tiempo diario.



Reconociendo la incertidumbre existente en los datos disponibles de precipitaciones e hidrogramas de caudales, fue posible calibrar y validar (para su aplicación en tiempo real) cuencas afluentes al río Uruguay, con un paso de tiempo diario.

Sin embargo, para las estaciones de aforo afectadas por remansos del río Uruguay, dado que no existen registros continuos de velocidades medias del curso, sería recomendable la instalación de equipos ADCP (sigla en inglés de Acoustic Doppler Current Profiler) con capacidad para medir en forma continua niveles y perfiles de velocidades en la sección de aforo. De esta forma, se podrían contemplar los efectos de remanso realizando las curvas de ajuste en base a las velocidades, niveles y caudales aforados.

Se identificó que la distribución de pluviómetros y estaciones meteorológicas es bastante dispersa, sobre todo para las cuencas Queguay y Daymán. En las cuencas argentinas, si bien la distribución es mejor, la calidad de los datos es un tanto deficiente. Para la puesta en funcionamiento del SATI sería necesaria la instalación de una red

meteorológica y telemétrica para el monitoreo de las cuencas, con una resolución temporal mayor a la actual (frecuencia horaria, preferiblemente).

Por último, sería de gran importancia para el SATI del río Uruguay, poder identificar y cuantificar cuáles son las principales fuentes de incertidumbre que afectan la estimación de niveles. Las principales causas podrían estar atribuidas a los aportes de Salto Grande, a condiciones de contorno aguas abajo (río de la Plata, descarga del río Paraná), lluvias, curvas de aforo, parámetros, modelos hidrológicos e hidrodinámicos utilizados, entre otros.

### AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU) por haber financiado este proyecto. A la Dirección Nacional de Agua (DINAGUA) y al Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET) por la información brindada. Las opiniones y conceptos expresados en este artículo no reflejan la posición oficial de la CARU.

### REFERENCIAS

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO*. Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.
- Bennett, T. (1998). *Development and application of a continuous soil moisture accounting algorithm for the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)*. Doctoral dissertation, University of California, Davis, USA.
- Bianchi, J., Goniadzki, D. (2012). *Modelación hidrológica de la cuenca del río Gualeguay para pronóstico y alerta hidrológico utilizando información de sensores remotos de microondas*. 1er Encuentro de Formadores en Investigación en Recursos Hídricos. 14 y 15 de junio, Ezeiza, Bs. As., Argentina.
- Campolo, M., Andreussi, P., Soldati, A. (1999), River flood forecasting with a neural network model, *Water Resources Resources*. 35(4), 1191–1197, doi: 10.1029/1998WR900086.
- Cunge, J. (1969). On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). *Journal of Hydraulic Research*. 7(2), 205-230.
- Feldman, A. (2000). Hydrologic Modeling System Technical Reference Manual, (March).
- Finger, D. (2011). *Calibration of Hydrological Models*. Hydrological Processes and Modelling, SS 2011. Swiss Federal Research Institute WSL. Switzerland.

- Georgakakos, K. (1986). A generalized stochastic hydrometeorological model for flood and flash-flood forecasting: 1. Formulation, *Water Resources Resources*. 22(13), 2083–2095, doi: 10.1029/WR022i013p02083.
- Gupta, H., Sorooshian, S., Yapo, P. (1998). Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resources Research*. 34(4), 751-763.
- Hadka, D., Reed, P. (2013). Borg: An auto-adaptive many-objective evolutionary computing framework. *Evolutionary computation*, 21(2), 231-259.
- HEC (2000). *Hydrologic Modeling System*: Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- INTA (1990). *Atlas de Suelos de la República Argentina*, E 1:500.000 y 1:1.000.000. SAGyP, INTA CIRN-Proyecto PNUD ARG 85/019.
- Kirpich, Z. (1940). *Time of concentration of small agricultural watersheds*. Civil Engineering, 10(6), 362.
- Lehner, B., Grill, G. (2013). Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems. *Hydrological Processes*. 27(15), 2171-2186.
- MGAP, Dirección de Suelos y Aguas (1976). *Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000*. Montevideo, Uruguay
- Molfino, J., Califra, A. (2001). *Agua disponible en las tierras del Uruguay*: Segunda aproximación. Montevideo: MGAP. 12p.
- Molnar, P. (2011). *Calibration*. Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.
- Moore, R. (2007). The PDM rainfall-runoff model. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11(1), 483-499.
- Nash, J., Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I. A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Silveira, L., Chreties, C., Crisci, M., Usera, G., Alonso, J. (2015). *Sistema de alerta temprana para previsión de avenidas en la ciudad de Durazno*. Innotec, (10 ene-dic), 56-63.
- SIT-MVOTMA (2011). *Sistema de Información Territorial MVOTMA*. 02/09/2017. <http://sit.mvotma.gub.uy/shapefiles.htm>
- Werner, M., Schellekens, J., Gijsbers, P., van Dijk, M., van den Akker, O., Heynert, K. (2013). *The Delft-FEWS flow forecasting system*. Environmental Modelling & Software, 40, 65-77.
- WMO (2011). *Manual on flood forecasting and warning*. Ginebra: WMO 1072. ISBN 978-92-63-11072-5.

## Calibración del modelo hidrológico SWAT para una cuenca de la región serrana de Córdoba (Argentina)

*Calibration of the SWAT hydrological model for a basin in the mountain region of Córdoba (Argentina)*

Juan F. Weber<sup>1\*</sup>, Santiago Baigorri Ocampo<sup>1</sup>

Recibido: 23/07/2018

Aceptado: 23/04/2019

\*Autor de correspondencia

### Resumen

En el marco de un proyecto de investigación cuyo objetivo es cuantificar, a través del modelado hidrológico, el impacto hidrológico a largo plazo de los incendios forestales en cuencas de la región serrana de la provincia de Córdoba (Argentina) se presentan los resultados preliminares de la simulación continua de una cuenca representativa de la región con el ampliamente difundido modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). La cuenca seleccionada, la del río grande en Ume Pay (tributario del río Tercero) cuenta con el registro simultáneo de precipitaciones y caudales diarios más extenso de la provincia, lo que la hace el mejor caso de estudio para la aplicación y calibración de un modelo hidrológico continuo en territorio cordobés. El modelo preliminar toma sus parámetros de la base de datos de parámetros de SWAT. Los resultados fueron contrastados con los caudales diarios observados, mostrándose un buen desempeño del modelo. A partir de estos resultados se detectaron nueve parámetros de mayor relevancia en la calidad del ajuste, relacionados a los procesos de: escurrimiento superficial, evapotranspiración, y escurrimiento subterráneo. Esta conclusión servirá como punto de partida para la futura calibración del modelo.

**Palabras clave:** Modelos hidrológicos, SWAT, simulación hidrológica continua.

### Abstract

*The preliminary results of the continuous simulation of a basin representative of the mountain region of Córdoba are presented. This simulation was carried out with the widely spread SWAT model (Soil and Water Assessment Tool). This work is developed within the framework of a research project whose objective is to quantify, through hydrological modeling, the long-term hydrological impact of forest fires in basins of the mountain region of the province of Córdoba (Argentina). The selected basin, Rio Grande in Ume Pay (tributary of the Tercero river) has the simultaneous record of precipitations and daily flows more extensive of the province, which makes it the best case of study for the application and calibration of a continuous hydrological model in the territory of Córdoba. The preliminary model takes its parameters from the SWAT parameter database. The results were contrasted with the observed daily flows, showing a good performance of the model. From these results, nine parameters of greater relevance in the quality of the adjustment were detected, related to the processes of: surface runoff, evapotranspiration, and underground runoff. This conclusion will serve as a starting point for the future calibration of the model.*

**Keywords:** hydrological models, SWAT, continuous hydrological simulation.

---

1 Laboratorio de Hidráulica, departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional. Argentina. Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina. Ciudad Universitaria CP X5016ZAA Córdoba, Argentina. [jweber@frc.utn.edu.ar](mailto:jweber@frc.utn.edu.ar)

## 1. INTRODUCCIÓN

Un modelo hidrológico, en términos generales, busca representar los diferentes procesos involucrados en la distribución de la lluvia y la generación de caudales en una determinada cuenca. Los modelos pueden ser físicos, donde se representan a escala las cuencas reales, o matemáticos, los cuales parten de ecuaciones empíricas o conceptuales para representar la respuesta de la unidad hidrológica bajo diferentes condiciones hidrometeorológicas. (Weber *et al.*, 2010).

En los últimos años, se dispone con suma facilidad a través de la Internet de software de licencia libre y/o gratuita para el modelado continuo, como es el Sistema de Modelación Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, conocido como HEC-HMS (HEC, 2006). El aumento en el poder de cómputo de las modernas computadoras ha permitido ampliar el uso de los modelos hidrológicos distribuidos. Entre los continuos, merece especial atención SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*).

SWAT (Arnold *et al.*, 2012) es un modelo a escala de cuenca, desarrollado por el Dr. Jeff Arnold del Servicio de Investigación Agrícola de los Estados Unidos (ARS). SWAT fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo sobre el agua, los sedimentos y los rendimientos químicos para la agricultura en grandes cuencas complejas con diferentes tipos y usos del suelo y condiciones de manejo durante largos períodos de tiempo. Para satisfacer este objetivo, el modelo es de base física: en lugar de incorporar ecuaciones de regresión para describir la relación entre las variables de entrada y salida, SWAT requiere información específica sobre el clima, las propiedades del suelo, la topografía, la vegetación y las prácticas de manejo de la tierra que se aplican en la cuenca (Neitsch *et al.*, 2011).

La región semiárida central del país, a la cual pertenece gran parte del sector serrano y noroeste de la Provincia de Córdoba, se caracteriza por la relativa escasez del recurso hídrico. Este hecho, sumado al crecimiento

demográfico de las últimas décadas y al aumento de la dotación de agua por habitante, genera la necesidad de tener conocimiento pleno de los procesos hidrológicos dominantes, buscando no sólo representar el comportamiento en aquellos períodos con precipitaciones, responsables de las grandes crecidas, sino también en los períodos de estiaje.

El río Grande es uno de los tributarios del río Tercero (o Ctalamochita) (figura 1). Tiene sus nacientes en la vertiente oriental de la Sierra de los Comechingones, en altitudes superiores a los 2000 msnm. Aporta su caudal al aprovechamiento hidroeléctrico Cerro Pelado. Esta cuenca ha sido monitoreada a lo largo de décadas por la ex empresa Agua y Energía Eléctrica S.E. En particular, existen registros de caudales medios diarios en el río Grande, antes de su ingreso al embalse Cerro Pelado (en Ume Pay) desde el año 1957. Esto lo transforma en el registro de caudales medios diarios más extenso que se haya recopilado en esta provincia. En conjunto con esta estación, existen siete estaciones pluviométricas en la cuenca (o en su vecindad) con registros extensos, el menor de ellos de 22 años. Esta información es de acceso público a través del Sistema Nacional de Información Hídrica mantenido por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. La disponibilidad de esta información hace de la cuenca del río Grande en Ume Pay el mejor caso de estudio para la aplicación y calibración de un modelo hidrológico continuo en territorio cordobés. Sumado a esto, la amplia disponibilidad actual de productos de sensoramiento remoto (imágenes satelitales, modelos digitales de elevación, mapas de tipo y uso del suelo, etc.) sugieren el uso de un modelo hidrológico continuo y distribuido como SWAT con ese fin, en particular si se pretende estudiar la variabilidad de la respuesta hidrológica de la cuenca ante diversas alteraciones de la misma (incendios, forestación, etc.). Como resulta natural, el pre y posprocesamiento de esta información espacialmente distribuida se realizará a través de un Sistema de Información Geográfica (GIS) como QGIS (QGIS, 2013), el cual resulta aún más atractivo desde que se encuentra disponible QSWAT, una interfaz gráfica libre para SWAT basada en QGIS.



Figura 1. Ubicación de la Cuenca del río Grande en Ume Pay

Si bien este grupo de trabajo ha comenzado a estudiar el impacto de los incendios forestales en la hidrología de eventos en las cuencas serranas (Weber *et al.*, 2013) aún no se ha avanzado en la evaluación de ese impacto a largo plazo, esto es, en la hidrología de los procesos continuos. En septiembre de 2013 (dentro del periodo de registros disponibles en la cuenca del río Grande) se registraron severos incendios forestales, cuyo impacto hidrológico debería evidenciarse en la posterior serie de caudales. Resulta atractivo evaluar estos procesos a partir de la disponibilidad de un modelo hidrológico distribuido y continuo calibrado para una cuenca serrana.

Como objetivo de este trabajo, se propone evaluar preliminarmente el desempeño del modelo SWAT aplicado a la cuenca del río Grande, identificando sus parámetros significativos, como paso inicial hacia una posterior etapa de calibración y validación del mismo.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Modelo hidrológico

*Soil and Water Assessment Tool* (Herramienta de asesoramiento en suelo y agua) es un modelo hidrológico de base física, simula el ciclo

hidrológico mediante los distintos procesos que lo componen (figura 2). Modela al ciclo hidrológico tanto a través del flujo superficial en la cuenca como en el flujo unidimensional en el cauce principal y sus tributarios. Además, permite simular procesos de calidad del agua.

El modelo SWAT en escala temporal se clasifica como continuo, ya que permite simular los procesos del ciclo hidrológico en periodos largos (meses o años). Permite además la distribución espacial de la información en zonas de menor tamaño a la cuenca. Inicialmente es posible dividir a la cuenca en subcuencas, esto permite diferenciar zonas dentro de la cuenca con distintas características. La información dentro de cada subcuenca es organizada mediante grupos de HRU (Unidades de Respuesta Hidrológica), estas son subdivisiones de menor tamaño a la subcuenca. Las HRU se clasifican y luego se aglutinan entre iguales, esto para caracterizar mejor a la subcuenca y lograr diferenciar zonas diferentes dentro de esta. El modelo simula los distintos procesos del ciclo hidrológico en cada HRU. Además, el modelo organiza la información de cada subcuenca por clima, agua subterránea, vías de escurrimiento y drenaje de la subcuenca (Neitsch *et al.*, 2011).

La simulación del ciclo hidrológico se efectúa mediante un balance entre los procesos representados. Esta es la base del modelo para



simular otros procesos físicos y químicos, los cuales se ven afectados por el constante movimiento del ciclo hidrológico. En fase de terreno se mencionan: arrastre de sedimentos, de pesticidas, nutrientes y bacteria. Para la fase en

conducción se mencionan: descargas y transporte de pesticidas, bacterias, nutrientes, etc.; esto en las vías principales de cada subcuenca o el cauce principal de la cuenca completa.

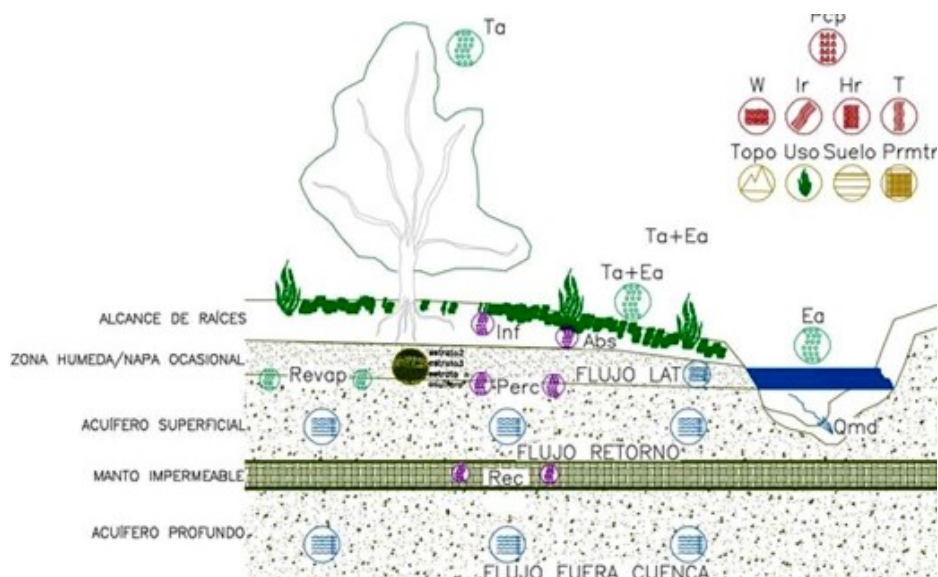


Figura 2. Procesos del ciclo hidrológico en SWAT (adaptado de Neitsch *et al.*, 2011)

## 2.2 Caso de estudio

La cuenca del río Grande está ubicada en la provincia de Córdoba, dentro del departamento Calamuchita ubicado al Sur-Oeste de la ciudad de Córdoba (figura 1). Dentro de la cuenca se encuentran las localidades de Villa Yacanto, El Durazno, Los Vallecitos y en proximidades se encuentra Lutti. La superficie de la cuenca es de 592,7 km<sup>2</sup>, su perímetro es de aproximadamente 175,5 km, el coeficiente de compacidad o Índice de Gravelius de  $Kc= 2,02$ , la mayor elevación alcanzada en la cuenca es de 2699 msnm y la menor es de 813 msnm. El centroide de la cuenca se encuentra en los 32,225° de latitud Sur y los 64,847° de longitud Oeste dentro de las Sierras de los Comechingones.

Esta cuenca aporta su caudal en forma directa a la represa hidroeléctrica Río Grande, la cual lleva su nombre debido al cauce principal de la cuenca de estudio.

El río Grande nace en las alturas dentro de la cuenca homónima, al mismo aportan el río El Durazno y el río de las Letanías, los cuales son de régimen permanente, estos a su vez se

encuentran alimentados por otros arroyos más pequeños. La cuenca hidrográfica del río Grande ha sido definida estableciendo como punto de cierre el aforo en la estación “Ume Pay”, esta es una estación medidora de niveles de agua en el cauce por medio de un limnógrafo. Luego estos niveles son convertidos en caudales mediante curvas altura-caudal (h-Q).

### Caracterización geológica.

La cuenca Río Grande se encuentra sobre la formación geológica Sierra de Comechingones, según Radice *et al.*, (2012) este complejo metamórfico está compuesto principalmente por metatexitas y diatexitas, de manera subordinada aparecen cuerpos de gneises biotíticos granatíferos, anfibolitas, filonitas, pequeños bancos de mármoles y cuerpos pegmatíticos graníticos. Por otro lado, según ACA-INTA, (2003) la cuenca se encuentra ubicada dentro de la denominada Sierra Grande, ubicada al Oeste de la Sierra Chica. Esta sierra constituye una amplia faja de Norte a Sur, compuesta por un complejo sistema litológico. En las partes de baja altura predomina el complejo metamórfico

(filitas, esquistos, gneis, anfibolitas y calizas) y en la parte central, más alta, dominan rocas graníticas de gran altura (cerro Champaquí 2790 msnm y los Gigantes 2374 msnm).

La cuenca se encuentra sobre la vertiente oriental de esta formación, la cual es amplia y está constituida por una serie de escalones de falla. En este costado oriental la alteración del complejo metamórfico es profunda, debido a una mayor presencia de humedad y de planos de esquistosidad subverticales que favorecen a la penetración del agua entre láminas (meteorización profunda).

En zonas altas graníticas, de mayor humedad, los suelos son someros, de texturas finas, con buenos contenidos de materia orgánica, y alto porcentaje de roca expuesta. Además, existen zonas denominadas “Pampas”, tales como la de Achala (2000 msnm) y otras menores con cobertura eólica loésica más reciente y suelos profundos como las de Yacanto.

#### *Caracterización hidrográfica*

El río Grande nace en la cuenca homónima a partir de la confluencia de los ríos de El Manzano, El Durazno y las Letanias, luego desemboca en el embalse río Grande o también conocido como Cerro Pelado (figura 3). Su curso continúa a través del embalse Arroyo Corto, luego de este continúa en forma de cauce regulado hasta llegar al embalse Rio Tercero. A continuación de este último, aguas abajo, se encuentra el embalse compensador Piedras Moras desde donde surge el Río Tercero o Ctlamochita. Esta cuenca está constituida por tres subcuencas principales y dos de menor tamaño.

#### *Caracterización climática*

El clima en la provincia de Córdoba está caracterizado en su totalidad como templado, dada la pequeña diferencia de duración entre el día más largo en verano y el más corto en invierno. Por otro lado, el posicionamiento del cordón serrano hace a la circulación de las masas de aire en el sentido NE-SO, por lo que se desplazan frentes fríos o cálidos del Sudoeste al Noreste y viceversa, esto genera abundantes precipitaciones en los meses más cálidos (ACA-

INTA, 2003). Las mayores precipitaciones en la cuenca se dan a en las zonas de mayor altitud (Oeste), disminuyendo hacia las zonas de menor altura (Este), lo que pone de manifiesto la existencia de un proceso orográfico en el área. La precipitación media anual-areal en la cuenca es de 1178 mm, para el periodo de registro entre los años 1993 a 2007 y 2008 a 2015.

#### *Caracterización de la vegetación*

La vegetación autóctona de la zona está vinculada al clima regido por alturas relativas. En una secuencia altitudinal se puede considerar que hasta los 1200 msnm domina el bosque serrano, luego un estrato intermedio (romerillal) que puede estar ausente y a mayores alturas el pastizal-gramineal, o césped de altura y bosquesillos de tabaquillo en quebradas escarpadas y protegidas (ACA-INTA, 2003).

Por otro lado, en cuanto a la vegetación no autóctona, debido a la esquistosidad y gran presencia de humedad se han observado hasta 5,00 m de alteración, originando suelos con contactos paralíticos favorables a la penetración de raíces de coníferas y otros árboles adaptados climáticamente.

#### *Información hidrológica*

Las precipitaciones se obtuvieron a través de la página web de la Subsecretaría de Recursos Hídricos, perteneciente a la Secretaría de Obras Públicas de la Nación, desde su Base de Datos Hidrológica Integrada (BDHI). Estos datos fueron analizados para evaluar la coincidencia de periodos de registro entre estaciones, a los fines de obtener una amplia cobertura dentro de la zona de estudio, en conjunto con la información de caudales. La cuenca del río Grande cuenta con siete estaciones pluviométricas, de las cuales cuatro están ubicadas dentro la misma, mientras que las tres restantes se encuentran próximas a los límites de la cuenca (figura 3).

Al igual que los datos de precipitaciones, los registros de caudales fueron descargados del BDHI de la Secretaría de Recursos Hídricos. La estación de aforo “Ume Pay” se encuentra aguas abajo de la unión del río Grande con el Durazno (figura 3). El dato registrado es el nivel de agua, el cual es medido por un limnígrafo. Las alturas

registradas son transformadas en caudales mediante curvas h-Q obtenidas del aforo de la sección del cauce. Las curvas h-Q han sido corregidas año a año por la Secretaria de Recursos Hídricos, además se cuenta con curvas diferentes de acuerdo si el caudal es de estiaje o crecida. La estación Ume Pay ha registrado datos de caudales desde el año 1957 hasta la actualidad. Se analizó la calidad de la transformación h-Q, descartando periodos de calidad dudosa.

#### Información climática

Los datos climáticos correspondientes a: temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento, fueron extraídos del sitio web del National Center for Environmental Prediction's (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)

(Saha *et al.*, 2010). La información está disponible en forma ininterrumpida a partir del año 1979 en una malla regular que, para la cuenca en estudio, dio lugar a cuatro estaciones a considerar.

#### Información satelital

La determinación de los distintos usos del suelo (cobertura vegetal) de la cuenca se realizó indirectamente a través del uso de imágenes satelitales. Para esto se utilizaron imágenes LandSat correspondientes a las misiones: 4-5 TM, 7 ETM y 8 OLI/TIRS.

#### Información topográfica

La topografía fue descrita por medio de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Esta información fue obtenida de la Misión SRTM (Farr *et al.*, 2007).

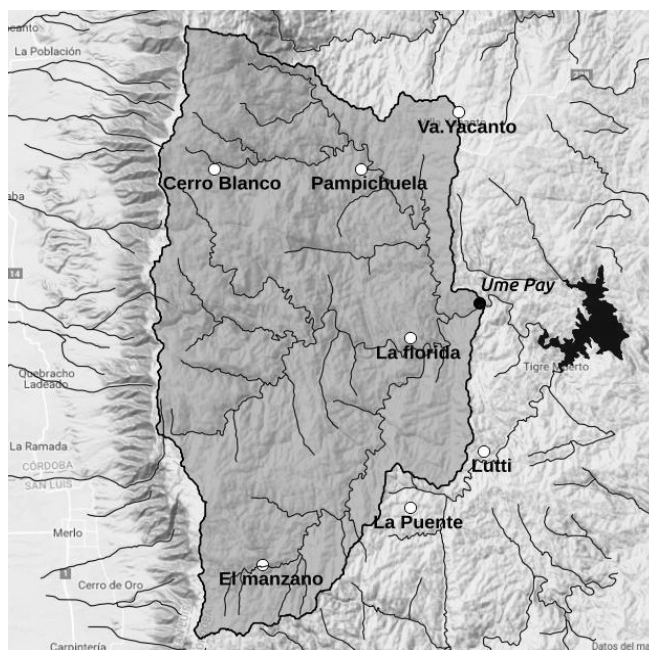


Figura 3. Cuenca del río Grande en Ume Pay: ubicación de estaciones pluviométricas y limnimétrica

### 3. DESARROLLO

#### 3.1 Procesamiento de la información

La información topográfica antes descrita fue re proyectada y recortada al área de interés mediante el Sistema de Información Geográfica QGIS (QGIS, 2013). Los caudales medios

diarios publicados en la BDHI fueron recalculados y verificados previo a su uso, a los fines de evaluar la calidad y correspondencia con el dato publicado.

Se generaron mapas de cobertura vegetal (uso de suelo) a partir de la estimación del índice de vegetación normalizado (NDVI) con la

información satelital antes descripta. En la figura 4 pueden observarse estos mapas para las cuatro estaciones del año. A partir de este, y de información de campo, se identificaron las siguientes clases: roca expuesta, pajonal bajo, monte, pajonal alto, bosque autóctono, bosque de pinos.

Los mapas de tipo de suelo han sido elaborados con base en la información obtenida de las Cartas de Suelos del INTA, elaboradas en este caso para la provincia de Córdoba (ACA-INTA, 2003). Los suelos de la cuenca del río Grande han sido clasificados en su gran mayoría como Clase VII, de grandes limitaciones para su uso y en especial el cultivo. Generalmente está destinado a campos naturales de pastoreo o para bosques y refugio de la fauna existente. Son suelos con excesivo drenaje causado por una textura arenosa que acentúa la limitación

climática de la zona. Entre ellos se encuentran: udorthentes líticos, hapludoles líticos y paralíticos, hapludoles énticos y roca.

A partir del análisis de superposición temporal de los registros pluviométricos y de caudales disponibles, se identificó un periodo común comprendido entre enero de 1993 y julio de 2014, con un faltante comprendido entre diciembre de 2007 y noviembre de 2008; y con cierta incertidumbre acerca de la calidad de los caudales del periodo enero de 1993 a septiembre de 2003. Por todo ello, se decidió tomar como futuro periodo de calibración del modelo el comprendido entre 9/2003 a 11/2007, tomando como periodo de precalentamiento (*warm-up*) 1/1998 a 9/2003, y como futuro periodo de validación 1/2011 a 7/2014 (con un *warm-up* de 12/2008 a 12/2010).

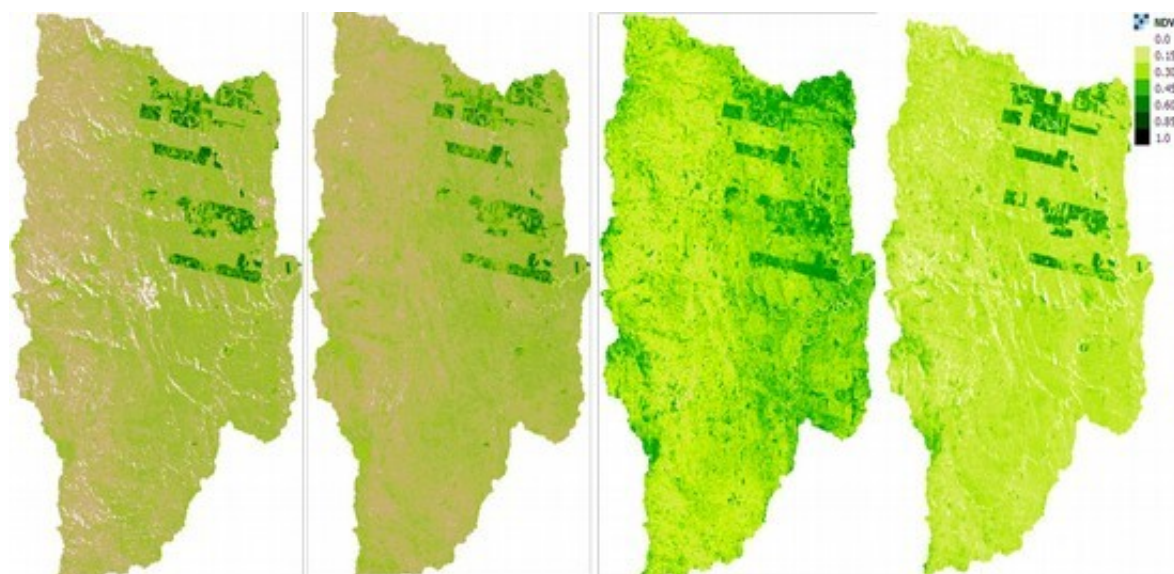


Figura 4. Mapas de NDVI para las estaciones (de izquierda a derecha, invierno, primavera, verano y otoño)

### 3.2 Aplicación preliminar del modelo SWAT

La implementación se realizó a través de la interfaz QSWAT, que permite la integración del modelo con el Sistema de Información Geográfica libre QGIS.

La aplicación de QSWAT exige el cumplimiento de los siguientes pasos:

#### *Definición de cuenca y subcuencas*

Se realizó a través de la herramienta TauDEM incluida en el paquete QSWAT y con base en la información del SRTM antes descripta. Para la

definición de las subcuencas se estableció un área umbral de 500 ha, generando 67 subcuencas (figura 5). Dado que QSWAT exige un valor medio (areal) de precipitación por subcuenca, se aplicó el método de interpolación basada en distancia para la estimación de los valores mencionados con base en los registros y localización de las estaciones pluviométricas reales.

#### *Definición de las HRU*

La unidad de cálculo hidrológico de SWAT es la Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU). Surgen de la intersección de mapas categóricos de: uso del suelo o cobertura vegetal, subcuenca a la que pertenecen, tipo de suelo, pendientes del terreno, caracterización de la vía de drenaje. El proceso generó 1911 HRUs (29 por subcuenca en promedio).

#### *Definición del modelo hidrológico y elección preliminar de los parámetros*

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial (PET) se seleccionó el método de Hargreaves (1975). Como método de pérdidas se utilizó el CN-SCS, con una actualización del

valor de CN con base en los valores calculados de la PET. Cabe destacar que QSWAT incorpora una base de datos con valores por defecto de los parámetros que, en caso de no contar con información de calibración, y mediante una adecuada elección, permiten realizar la simulación. En este trabajo se han utilizado estos parámetros para evaluar el desempeño preliminar del modelo.

#### *Simulación preliminar*

Una vez modificados los parámetros preliminares y actualizados en la base de datos de parámetros de SWAT, se procede a definir las condiciones de simulación del modelo. La corrida o simulación del modelo generado se hace desde el programa SWATEditor, es aquí donde se ponen en funcionamiento los motores de cálculo de SWAT. Como periodo de simulación se incluyó a los periodos de Warm Up y de Calibración, antes definidos. La simulación fue a paso diario. Como periodo de Warm Up se consideraron cinco años previos a la fecha de inicio del periodo de calibración. Como variables de salida se solicitaron todas las calculadas por SWAT, tanto de los procesos del ciclo hidrológico como las complementarias.

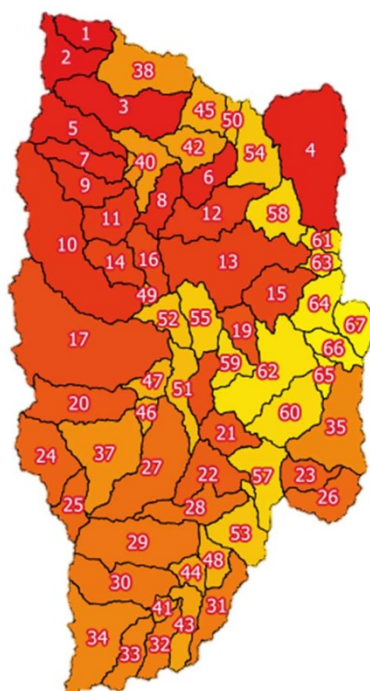


Figura 5. Subcuencas identificadas por la herramienta TauDEM del paquete QSWAT



### 3.3 Resultados de la simulación preliminar

La simulación preliminar permitió obtener entre las variables de salida los caudales medios diarios del río Grande, los que fueron comparados con los registrados por la estación Ume Pay. El resultado de la comparación de hidrogramas permitió determinar que SWAT

realizó una buena representación de los caudales medios diarios generados por la cuenca, esto se pudo observar mediante una simple comparación gráfica y por los indicadores estadísticos NSE (eficiencia de Nash-Sutcliffe) y  $R^2$  (coeficiente de determinación de Pearson) (ecuaciones 1 y 2), quienes arrojaron valores de 0,70 y 0,84 respectivamente.

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_i - Q_i^c)^2}{\sum(Q_i - \bar{Q})^2} \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{\sigma(Q_i, Q_i^c)}{\sigma(Q_i) \cdot \sigma(Q_i^c)} \quad (2)$$

En estas expresiones  $Q_i$  representan los valores observados del caudal medio diario, y  $Q_i^c$  esos mismos valores estimados por SWAT;  $\bar{Q}$  la media de los caudales observados,  $\sigma(x)$  el desvío estándar de la variable  $x$ , y  $\sigma(x,y)$  la covarianza entre las variables  $x$  e  $y$ . Entre las variables hidrológicas distribuidas que pueden obtenerse como resultado de la ejecución de SWAT, pueden listarse: evapotranspiración real, evapotranspiración potencial, contenido de humedad del suelo, percolación, escorrentía superficial, entre otras. Cabe destacar que estos mapas en realidad representan una variable de entidades discretas, ya que en realidad SWAT arroja un resultado único (homogéneo) por cada HRU, y por tanto, se asimilará más a una variable continua (como lo es en su naturaleza) a medida que aumente el número de HRUs, y por lo tanto, el costo computacional de la solución.

### 3.4 Identificación de parámetros relevantes

Mediante un procedimiento de pre-ajuste manual univariado sobre un conjunto de 12 parámetros inicialmente seleccionados, fue posible detectar aquellos parámetros que mayor contribución reflejaron a la mejora de los estadísticos de ajuste (ecuaciones 1 y 2).

A partir de estos resultados se detectaron nueve parámetros de mayor relevancia en la calidad del ajuste, relacionados a los procesos de: escurrimiento superficial, evapotranspiración, y escurrimiento subterráneo:

#### Proceso de Escurrimiento superficial

- CN II (ad.) Numero CN método SCS en condición de humedad II

#### Proceso de Evapotranspiración (ET)

- EPCO (ad.) Factor de compensación de la absorción de agua de la vegetación
- ESCO (ad.) Factor de compensación de la demanda de ET en estratos superiores
- GW\_REVAP (ad.) Coeficiente de proceso Revap
- REVAPMIN (mm) Valor umbral proceso Revap

#### Proceso de Escurrimiento profundo

- GWQMIN (mm) Valor umbral de aporte a caudal base
- GW\_SPYLD (ad.) Coeficiente de rendimiento del acuífero
- GW\_DELAY (días) Tiempo de demora de recarga del acuífero
- ALPHA\_BF (días) Constante de recesión del caudal base

### 3.4 Procedimiento de calibración

El modelo fue calibrado utilizando el programa computacional SWAT-CUP (*Calibration and Uncertainty Programs*), el cual pertenece a la familia de programas de SWAT. Las técnicas y

lineamientos para la correcta calibración están descritas en el manual de uso del programa (Abbaspour, 2015).

El calibrador cuenta con cinco programas de calibración diferentes: SUFI2, PSO, GLUE, ParaSol y MCMC. Para este trabajo se utilizó SUFI en su versión 2.0 (*Sequential Uncertainty Fitting*). De acuerdo a Abbaspour (2015) en SUFI-2 la incertidumbre en los parámetros, expresada como rangos, incluye a todos las fuentes de incertidumbres tales como: la incertidumbre en las variables de entrada (por ejemplo los datos de precipitaciones), el modelo conceptual, los parámetros y los datos medidos. La propagación de las incertidumbres en los parámetros conduce a incertidumbres en las variables de salida del modelo (por ejemplo los caudales medios diarios), que se expresan como distribuciones de probabilidad del 95% de certeza. Estas se calculan dentro del 2,5% y 97,5% del acumulado usando el muestreo de hipercubo latino. Esto se conoce como la incertidumbre de predicción del 95% o 95PPU. Estos 95PPUs son los resultados del modelo en un enfoque de calibración estocástica. Es importante darse cuenta de que no se dispone de una sola señal que represente la salida del modelo, sino más bien una envolvente de buenas soluciones expresadas por el 95PPU, generadas por ciertos rangos de parámetros.

El proceso puede conceptualizarse como sigue: un único valor de parámetro conduce a una única respuesta del modelo, mientras que la propagación de la incertidumbre en un parámetro conduce a 95PPU. A medida que aumenta la incertidumbre de los parámetros, la incertidumbre en las variables de salida también aumenta (no necesariamente en forma lineal). Por lo tanto, SUFI-2 comienza asumiendo una incertidumbre de parámetros grande, de modo que los datos medidos inicialmente caen dentro del 95PPU, luego disminuye este rango de incertidumbre paso a paso mientras se monitorea el factor p y el factor r. El factor p indica el porcentaje de valores de la variable observada que se encuentran dentro de los resultados del 95PPU, mientras que el factor r es el espesor de la banda de 95PPU que envuelve a la variable observada. Luego, paso a paso, los rangos de parámetros previos se actualizan calculando la

matriz de sensibilidad (equivalente al Jacobiano) y el equivalente de una matriz Hessiana, seguido del cálculo de la matriz de covarianza, intervalos de confianza del 95% de los parámetros y la matriz de correlación. Los parámetros se actualizan de tal manera que los nuevos rangos son siempre más pequeños que los rangos anteriores y se centran en la mejor simulación. Si bien la solución es un rango de valores, esto otorga cierta flexibilidad de aplicación de los parámetros obtenidos para diferentes casos o escenarios.

La calibración está conformada por al menos cuatro etapas bien definidas: evaluación de la sensibilidad de parámetros e incidencia en los resultados, selección de funciones objetivo, procedimientos de optimización de parámetros y control de indicadores de eficiencia para re-optimizar. La evaluación de la sensibilidad de parámetros se verifica cuantitativa y cualitativamente. La cuantificación de la incidencia en los resultados del modelo tiene que ver con el alcance numérico de estos parámetros para con las variables de salida, lo que se visualiza teóricamente mediante las ecuaciones que representan a los procesos descritos y empíricamente desde los resultados. Mientras que su incidencia cualitativa se ve representada no sólo en el efecto que tiene sobre la eficiencia del modelo, la cual puede ser mayor o menor de acuerdo a la variable (o variables) de salida afectada por dicho parámetro, sino en qué periodos de la simulación tiene mayor injerencia.

Según Krause *et al.*, (2005), a veces los usuarios desestiman la calibración de un parámetro por visualizar una baja sensibilidad en los resultados, cuando en realidad puede ocurrir una incorrecta selección de la función objetivo para su optimización. Esto se debe a que los diversos criterios de eficiencia (o funciones objetivo) son más o menos sensibles en determinados periodos de la simulación de variables, por ejemplo: la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) se muestra más sensible para calibrar parámetros vinculados a los caudales pico, pasando por alto aquellos vinculados al caudal base, mientras que el coeficiente de determinación  $R^2$  o la NSE modificada son más adecuados para optimizar parámetros relacionados al caudal base.

Con base en lo anterior, para este trabajo, la serie de caudales observados fue considerada tanto en sus caudales pico como en los caudales base, aplicando distintas funciones objetivo para calibrar parámetros vinculados a uno u otro. Para el proceso de optimización, el modelo se corrió 300 veces por cada parámetro o grupo de parámetros, variando su valor dentro de un rango de valores pre-establecido. Luego de una primera iteración de 300 simulaciones, se evaluó gráfica y estadísticamente la influencia y el cambio en la eficiencia del modelo, controlando los factores  $p$  y  $r$  vistos previamente. Se tomaron tres iteraciones para cada parámetro o grupo. El control de indicadores de eficiencia al finalizar cada iteración es fundamental para evaluar la evolución del desempeño del modelo, además deben ser controlados los factores  $p$  y  $r$ , donde se verifica que los datos observados se encuentren dentro del 95PPU. Los indicadores de eficiencia con los que cuenta SWAT-CUP son:  $R^2$ , NSE,  $wR^2$ , NSE modificado, entre otros. Estos han sido elegidos dados los estudios realizados por Krause *et al.*, (2005), donde se sugiere que el indicador  $R^2$  puede otorgar una buena evaluación para periodos de caudales de estiaje, mientras que el NSE lo hace para periodos de caudales de crecida; además explica que indicadores como  $wR^2$  y NSE modificado evalúan mejor el desempeño de modelos para periodos tanto de estiaje como de crecida. Luego de evaluar si el modelo mejora su desempeño se elige un nuevo rango de parámetros para la próxima iteración, mientras que si empeora se debe evaluar el rango establecido inicialmente.

En caso observarse mejoras se itera sobre un mismo parámetro hasta tres veces, luego se mantienen invariables los restantes y se prosigue con otro parámetro o grupo.

El procedimiento anterior se repite hasta terminar tres iteraciones con el nuevo parámetro o grupo, luego se itera una vez más el parámetro o grupo que permaneció invariable, a los efectos de controlar si no hubo un cambio o efecto de estos últimos calibrados en el que se conservó primero. Esta regla de calibración se repite para todos los parámetros o grupo a calibrar.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Parámetros calibrados

Los parámetros significativos fueron optimizados mediante el programa SWAT-CUP, estos fueron agrupados para su calibración como se indicó en el apartado “Identificación de parámetros relevantes”. La calibración del parámetro CN (AMC II) se realizó utilizando la función objetivo NSE, esto mostró una mejora en la interpretación del modelo de los caudales de crecida. Por supuesto la optimización de estos parámetros con dicha función objetivo produjo una disminución en la calidad de reproducción de los caudales base o de estiaje. Para esto fue de utilidad separar al hidrograma en caudal base y de escurrimiento directo, por lo que la función objetivo le da igual peso e importancia a ambos al momento de calibrar los parámetros. Esto mostró una mejora en los caudales de salida del modelo, sin embargo, el cambio en el CN repercute en la infiltración, lo que modifica en cierta forma al caudal base. El parámetro CN (AMC II) es una condición inicial de la simulación; luego este parámetro se va ajustando por el modelo durante los cambios de humedad diarios que experimenta la cuenca, por lo que se ve relacionado con los parámetros que determinan la evapotranspiración. Considerando esto, se observaron además las modificaciones en su calibración frente a la calibración de los parámetros del proceso de evapotranspiración. Los valores resultantes del CN se resumen en la tabla 1, en función del uso y tipo de suelo de la cuenca.

Los parámetros que rigen la evapotranspiración al momento de su calibración, permitieron al modelo mejorar la interpretación de caudal base y por consiguiente de estiaje, a diferencia de lo ocurrido con el parámetro CN (AMC II). Estos fueron calibrados con la función objetivo  $R^2$  dada su relación con el acuífero superficial para cubrir cierto déficit en la demanda de agua por evapotranspiración, dado que repercute en la regulación del acuífero y por consiguiente tanto en el caudal base como en los de estiaje de la cuenca.

Tabla 1. Parámetro CN (AMC II) calibrado en función del tipo y uso del suelo

Tipo de suelo	Uso del suelo (cobertura vegetal)					
	SWRN (Zonas estériles)	WWGR (pajonal bajo)	FESC (monte)	WETL (Pajonal alto)	MESQ (árbol autóctono)	PINE (pino)
EOLI (B)	65,7	42,7	40	54,9	58	49,1
MJEN (B)	66,7	59,3	54,3	42,9	83,4	58
MJLI (C)	74,5	58,7	78	91,1	76,6	53
ROCA (D)	77,7	84,1	82	79,9	-	-

Los parámetros EPCO y ESCO son factores que regulan la toma de agua desde el acuífero para cubrir déficit en la demanda de agua. El primer factor habilita al modelo a tomar agua de estratos más profundos, para cubrir la demanda de agua de la vegetación para su desarrollo. El segundo factor, según su valor adoptado, habilita también al modelo a tomar agua de estratos más profundos, pero para cubrir la demanda de agua por evapotranspiración de estratos superficiales.

Por otro lado, el parámetro GW\_REVAP determina cuánta es el agua a reponer en la zona capilar desde el acuífero superficial, cuando existe una deficiencia para cubrir la demanda de agua por evapotranspiración y la toma directa de

la vegetación que tiene acceso al acuífero superficial por la gran extensión de sus raíces.

Este último parámetro está vinculado al REVAPMIN, que es un parámetro umbral vinculado a los procesos del acuífero superficial, este regula a partir de qué nivel alcanzado de agua por el acuífero comienza a cubrir las demandas del proceso de REVAP.

En la tablas 2 y 3 se presentan los valores obtenidos de la calibración de parámetros vinculados al proceso de evapotranspiración. Los parámetros ESCO, GW\_REVAP y REVAPMIN fueron calibrados en función del uso del suelo (tabla 2), mientras que el parámetro ESCO fue calibrado en función del tipo del suelo (tabla 3).

Tabla 2. Parámetros EPCO, GW\_REVAP y REVAPMIN calibrados en función del uso del suelo

	EPCO	GW_REVAP	REVAPMIN (mm)
valor inicial	0,9	0,02	800
SWRN (Zonas estériles)	0,81	0,148	594,86
WWGR (pajonal bajo)	0,83	0,042	941,18
FESC (monte)	0,6	0,054	798,41
WETL (Pajonal alto)	0,57	0	739,56
MESQ (árbol autóctono)	0,91	0,098	653,38
PINE (pino)	0,32	0,076	886,55

Tabla 3. Parámetro ESCO calibrado en función del tipo del suelo

	ESCO
Valor inicial	0,9
EOLI (B)	0,81
MJEN (B)	0,91
MJLI (C)	0,75
ROCA (D)	0,7

## 5. DISCUSIÓN

Los parámetros que regulan los procesos dentro del acuífero superficial fueron calibrados mediante la función objetivo  $R^2$ , la cual demostró un buen desempeño al lograr que el modelo interprete los caudales de estiaje. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 4.

Entre estos parámetros se encuentra GWQMIN, este es un valor umbral que indica cuánto aporta el acuífero superficial al caudal base de la cuenca. Este parámetro se calibró respecto a los distintos tipos de suelo, asumiendo que sus características edafológicas varían según la formación geológica subyacente, esto hace que el comportamiento del acuífero y su constitución también varíen.

Dentro del mismo grupo está el parámetro GW\_SPYLD, este es un coeficiente de rendimiento específico del acuífero superficial, el cual relaciona el volumen de agua que drena por gravedad con respecto al volumen total de la formación rocosa permeable o porosa. Luego el parámetro GW\_DELAY indica el tiempo de drenaje de las formaciones geológicas, el mismo es aplicado para determinar la recarga del acuífero en un día determinado, siempre que exista percolación desde los estratos del perfil de suelo. Por último, aparece el parámetro ALPHA\_BF medido en días, el cual utiliza SWAT para determinar los caudales de aporte del acuífero superficial hacia el cauce principal de la cuenca. Como puede verse en la tabla 4, los últimos dos parámetros fueron ajustados con un valor global para toda la cuenca.

Tabla 4. Parámetros GWQMIN (mm), GW\_SPYLD, GW\_DELAY (días) y ALPHA\_BF (días) calibrados en función del tipo de suelo

	GWQMIN (mm)	GW_SPYLD	GW_DELAY (días)	ALPHA_BF (días)
Valor inicial	500	0,003	31,00	0,016
EOLI (B)	387,6	0,016		
MJEN (B)	392,88	0,013		
MJLI (C)	398,77	0,03	4,75	0,012
ROCA (D)	532,07	0,02		

### 5.1 Calidad del ajuste

A medida que se fueron calibrando estos parámetros se fueron registrando las mejoras observadas en el desempeño del modelo. Cada iteración conduce a una toma de decisión del usuario, por esto es conveniente evaluar diversos

indicadores estadísticos, los resultados gráficos comparativos y los mencionados factores  $p$  y  $r$ . Los indicadores de eficiencia utilizados fueron:  $R^2$ , NSE,  $wR^2$ , NSE modificado.

La toma de decisión del usuario implica ir ajustando el intervalo de búsqueda en el proceso

de calibración, convergiendo en valores aceptables de eficiencia del modelo. En la tabla 5 se detalla la evolución de los estadísticos de la

bondad del ajuste en el proceso de calibración, a lo largo de las iteraciones univariadas manuales realizadas.

Tabla 5. Evolución de los estadísticos de la bondad del ajuste en el proceso de calibración

Parámetros	Iteración	F. Objetivo	p-factor	r-factor	R <sup>2</sup>	NSE	wR <sup>2</sup>	MNSE
CN II	1	NSE	0,36	0,26	0,71	0,71	0,53	0,57
	2	NSE	0,3	0,14	0,72	0,72	0,55	0,57
	3	NSE	0,27	0,12	0,72	0,72	0,56	0,57
Suelo	1	R2	0,66	0,3	0,72	0,7	0,62	0,56
	2	R2	0,66	0,29	0,72	0,7	0,63	0,55
	3	R2	0,48	0,25	0,71	0,71	0,59	0,56
CN II	1	NSE	0,28	0,2	0,73	0,71	0,63	0,56
	1	R2	0,32	0,15	0,72	0,71	0,58	0,55
	2	R2	0,29	0,13	0,72	0,71	0,57	0,56
ET	3	R2	0,28	0,11	0,72	0,71	0,57	0,56
	1	NSE	0,27	0,14	0,73	0,71	0,62	0,56
	1	R2	0,29	0,11	0,73	0,72	0,58	0,57
Suelo	1	R2	0,51	0,22	0,73	0,72	0,59	0,57

La grafica comparativa de hidrogramas observados y simulados se muestra en la figura 6. Esta fue obtenida luego de calibrar y cargar en el modelo todos los parámetros seleccionados, donde se puede observar un buen desempeño del modelo, respaldado numéricamente por los indicadores de eficiencia de la tabla 5.

En la figura 7 se observa el detalle del año hidrológico 2004-2005, con el eje de los caudales en escala logarítmica, apreciándose con mayor detalle los comportamientos en crecidas y en estiajes.

El modelo logra interpretar con algunas dificultades los picos, generalmente subestimándolos; en el caso de los caudales de estiaje, se observa una cierta dispersión, aunque se presentan con frecuencia periodos en los cuales el modelo subestima estos caudales. Esta subestimación se observa durante todo el periodo, salvo en el año hidrológico 2006 a

2007, donde se logra una adecuada representación aunque al final se ve bien marcado un excesivo drenaje en el modelo.

Con los caudales observados y simulados se construyó una gráfica de dispersión, en la que se puede observar la calidad de representación del modelo. En abscisas se colocaron los caudales observados y en ordenadas los simulados, ubicando la recta identidad como referencia para observar la tendencia del conjunto de puntos.

Como se puede observar en la figura 8 la recta de regresión por mínimos cuadrados se encuentra por debajo de la recta identidad, con lo cual se evidencia que el modelo subestima los valores de caudales medios diarios, lo que se observa además en las figuras 6 y 7. En la figura 9 (equivalente a la figura 8 pero en escala logarítmica) se aprecia con mayor detalle este comportamiento para los caudales de estiaje.



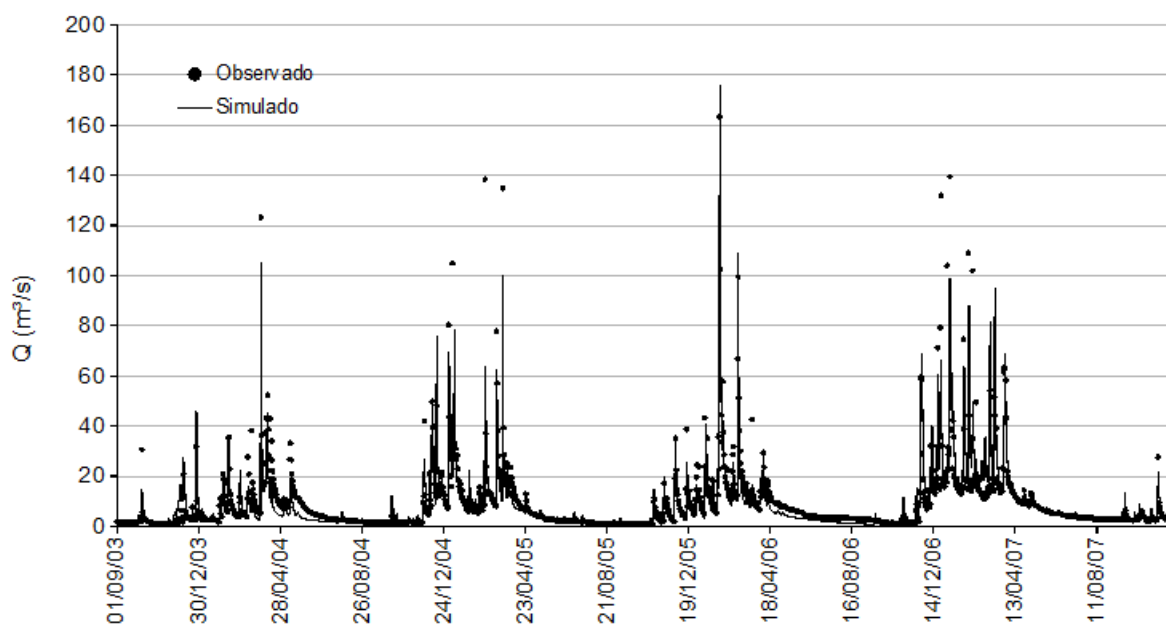


Figura 6. Hidrograma observado y simulado por SWAT con los parámetros calibrados

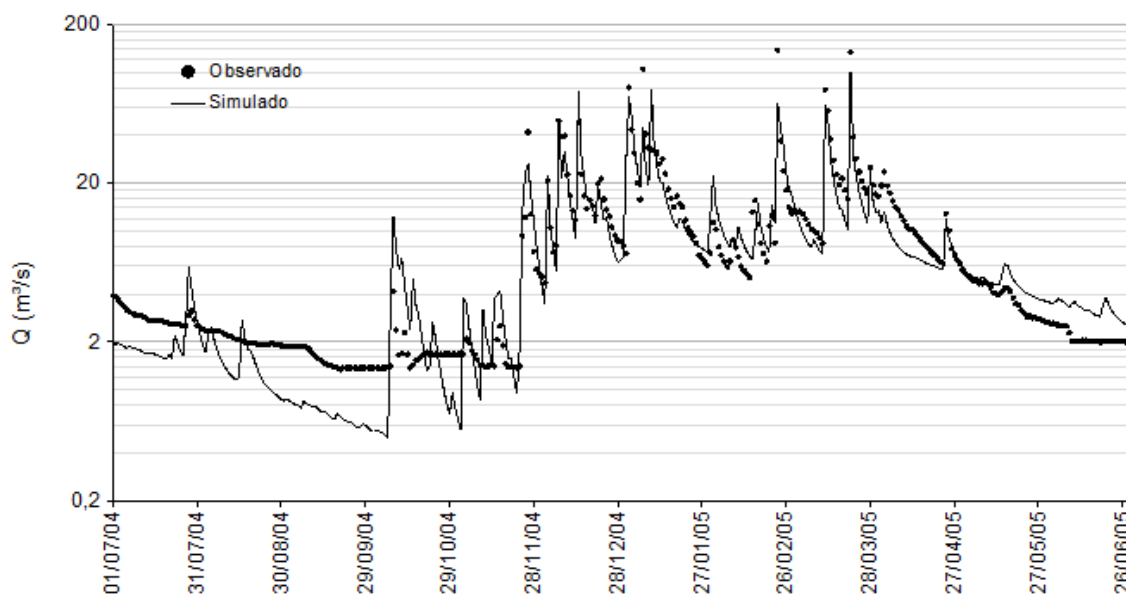


Figura 7. Un detalle de la Figura 6 para el año hidrológico 2004-2005, con los caudales en escala logarítmica

Esto último se puede apreciar en la figura 10, que muestra un histograma de frecuencias relativas de los errores porcentuales de los caudales medios diarios simulados frente a los

observados. Se observa que la distribución de frecuencias está sesgada a izquierda, lo que muestra que la subestimación de caudales por parte del modelo es la situación más frecuente.

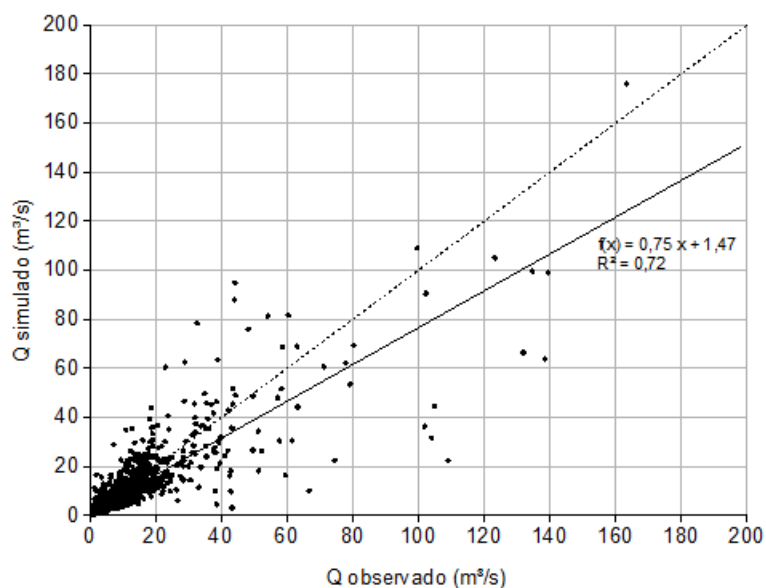


Figura 8. Caudales simulados versus caudales observados, junto con la recta identidad (línea de trazos) y la recta de regresión por mínimos cuadrados (línea continua), su ecuación y el coeficiente de determinación del ajuste

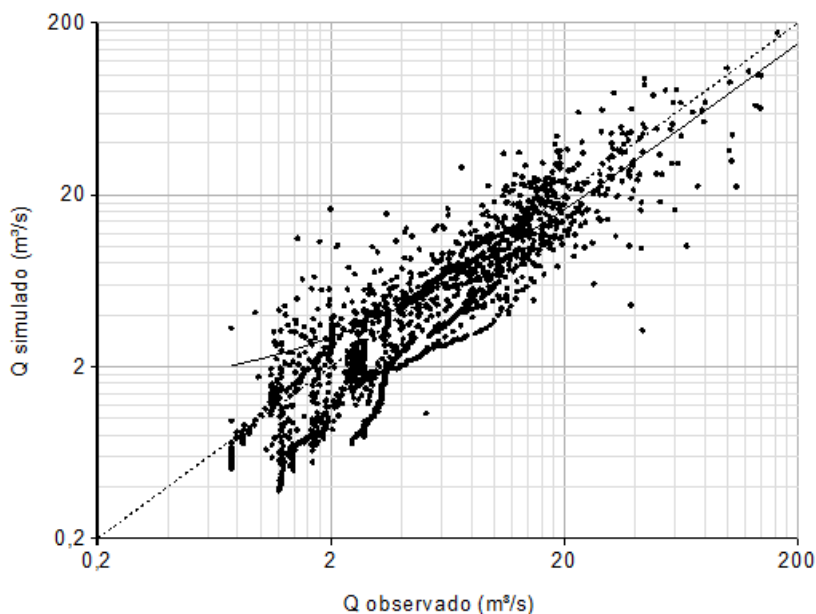


Figura 9. La información de la figura 8, en escala logarítmica

En la figura 11 se presenta el gráfico de dispersión de la figura 9, pero incluyendo los límites inferior y superior del intervalo de confianza dado por el algoritmo de calibración Sufi2. Se observa que más del 50% de los pares

(Q observado; Q calibrado) caen dentro del intervalo de confianza mencionado. Los indicadores de eficiencia evaluados dieron lugar a los siguientes resultados:  $R^2$ : 0,73; NSE: 0,72;  $wR^2$ : 0,59 y NSE modificado: 0,57.

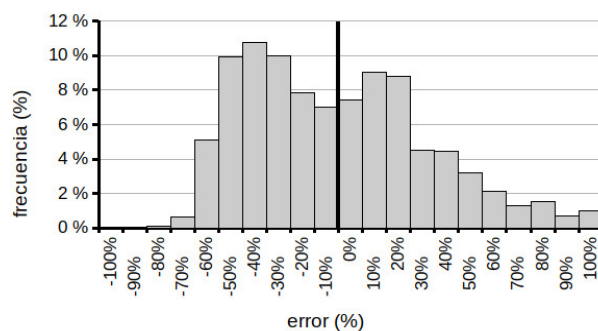


Figura 10. Histograma de frecuencias relativas de errores porcentuales

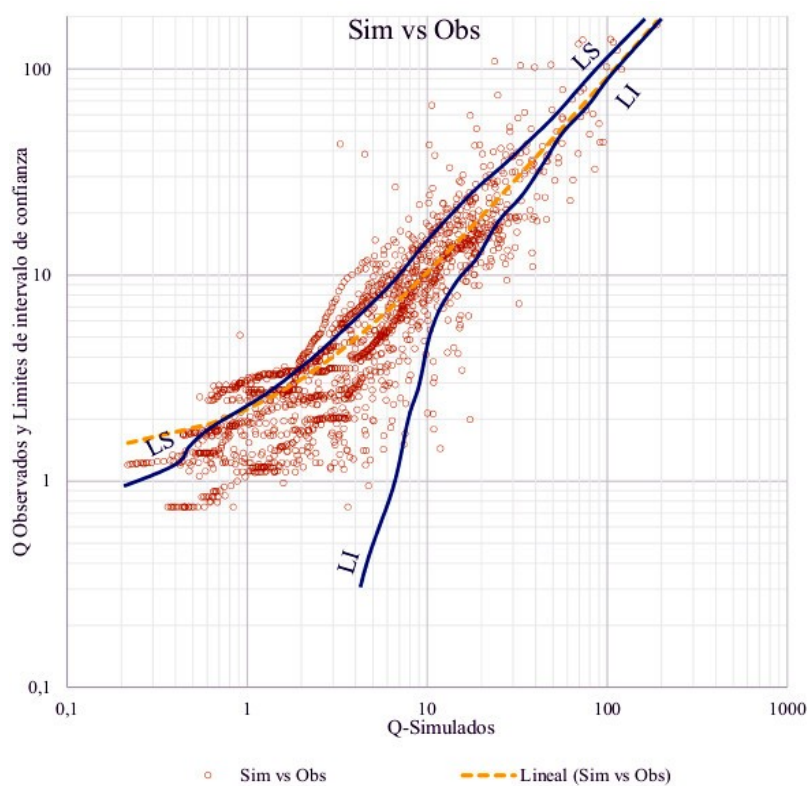


Figura 11.- Caudales simulados versus caudales observados, e intervalo de confianza de la calibración con el algoritmo Sufi2

## 6. CONCLUSIONES

Ha sido posible implementar el modelo SWAT en una cuenca de la región serrana de la provincia de Córdoba, recurriendo a las mejores fuentes de información disponibles en los distintos aspectos involucrados. Además, ha sido posible identificar periodos de precalentamiento, calibración y validación que se consideran adecuados para el desarrollo de las investigaciones propuestas. Con base en los

valores de indicadores de eficiencia como  $R^2$  (0,73) y NSE (0,72), se caracteriza al modelo como muy bueno, mientras que para los indicadores  $wR^2$  (0,59) y NSE modificado (0,57) se lo puede caracterizar como un buen modelo. Los parámetros calibrados serán de gran utilidad para extraer múltiples resultados que describan el comportamiento hidrológico de la cuenca de río Grande. Todo esto se puede realizar puesto que el desempeño del modelo ha sido favorable luego del proceso de calibración, incluyendo

información local de aquellos procesos que han sido adecuadamente observados (precipitaciones, caudales, etc.). La gran cantidad de procesos modelados por SWAT genera a la vez un gran número de variables de salida del modelo (no sólo valores de caudales medios diarios, respuesta directa de la cuenca) de las cuales es

interesante conocer su comportamiento, sobre todo de aquellas que no han sido medidas directamente en la cuenca o se desconoce totalmente su comportamiento. Entre ellas se pueden citar, la evapotranspiración potencial y real (figura 12), el aporte del flujo subterráneo al flujo base, la intercepción vegetal, etc.

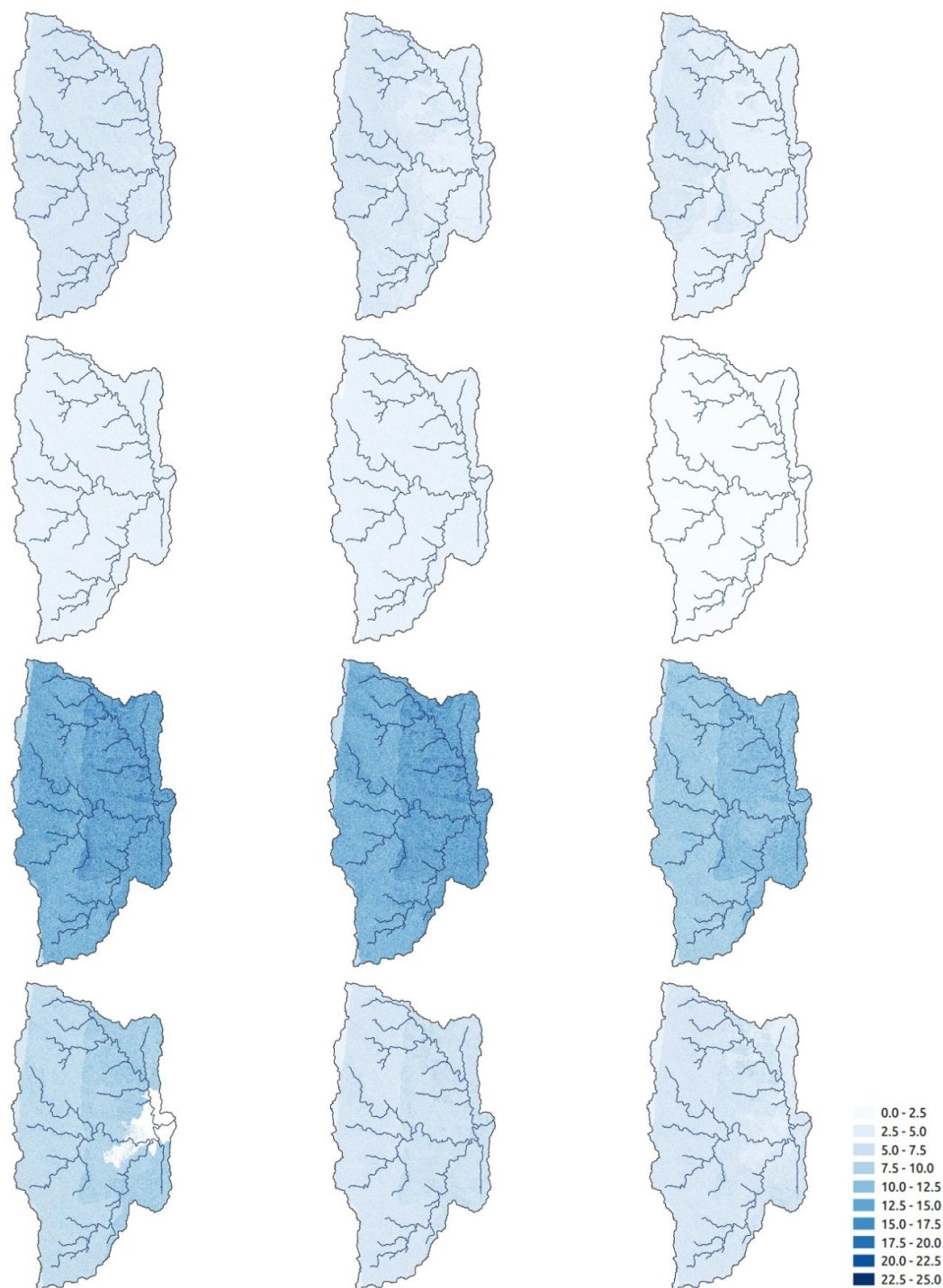


Figura 12. Evapotranspiración real diaria (mm) promedio mensual en el año hidrológico 2005-2006 (de julio/05 a junio/06, de izquierda a derecha y de arriba a abajo) calculados por SWAT. Se superpone la red de drenaje para mayor claridad

Sin embargo estos resultados deben ser interpretados considerando el nivel de incertidumbre propagado durante todo el proceso de modelación, desde el origen y procesamiento de los datos disponibles hasta la construcción del modelo y su calibración. En este sentido, caber recordar que, debido a la restricción de información disponible, la calibración llevada a cabo, por medio de una sola variable de salida (caudal medio diario) en un solo punto de la cuenca (sección de cierre) no difiere significativamente de lo que podría realizarse con un modelo concentrado.

Como trabajos futuros se prevé la validación del modelo contra los datos reservados en el periodo 1/2011 – 7/2014 (con un warm-up de 12/2008 a 12/2010), donde se verificará el comportamiento del modelo en la representación de los procesos hidrológicos de la cuenca considerada. En una

futura etapa de explotación del modelo, se espera evaluar, por medio de él, el impacto de diversos escenarios (ocurrencia de incendios forestales, alteración de la cobertura vegetal -forestación, deforestación-) en la respuesta hidrológica de la cuenca.

Se considera que los resultados logrados son alentadores, tratándose de la calibración de un modelo de simulación continua a paso diario, con las limitaciones en cantidad y calidad de información existente.

## AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional por el financiamiento recibido a través del proyecto UTN 4779.

## REFERENCIAS

- Abbaspour, K. (2015). *SWAT-CUP Calibration and Uncertainty Programs*. [https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual\\_swatcup.pdf](https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf).
- ACA-INTA, Agencia Córdoba Ambiente SE e Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (2003). *Estación Experimental Agropecuaria Manfredi*. Recursos Naturales de la provincia de Córdoba. Los suelos. Nivel de reconocimiento. Escala 1:50000. Córdoba.
- Arnold, J., Moriasi, D., Gassman, P., Abbaspour, K., White, M., Srinivasan, R., Kannan, N. (2012). SWAT: Model use calibration and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508.
- Farr, T., Rosen, P., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2). doi: 10.1029/2005rg000183
- Hargreaves, G. (1975). Moisture availability and crop production. *Transactions of the ASAE*, 18(5), 980-984.
- HEC Hydrologic modeling system HEC-HMS. (2006.). *User's manual (Version 3.1.0)*. Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers.
- Krause, P., Boyle, D., Base, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, (5) pp. 89-97.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Williams, J. (2011). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. Texas Water Resources Institute.
- QGIS, (2013). *Development Team QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>
- Radice, S., Arangue, J., Fagiano, M., y Pinotti, L. (2012). Análisis petrológico estructural del basamento encajonante del Batolito Cerro Áspero, Sierra de Comechingones, Córdoba. *Serie Correlación Geológica*, 28(2) 9-22.

- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.L., Wu, X., Wang, J. et al. 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8) 1015-1057 doi:10.1175/2010BAMS3001.1.
- Weber, J., Dasso, C., Jorquera, E. (2010). Desarrollo y calibración de un modelo hidrológico de simulación mixta. *Mecánica Computacional*. Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Buenos Aires. Vol. XXIX (39) 4013-4037
- Weber, J. Stehli, P., Jorquera, E. (2013). *Modelación matemática del impacto hidrológico de incendios en una cuenca de las sierras de Córdoba*. Primer Congreso Iberoamericano de protección, gestión, eficiencia, reciclado y reúso del agua-CIPGER, mayo 2013, Córdoba, Argentina.



## Automatización de cálculos, referenciando eventos meteorológicos en imágenes satelitales infrarrojas

*Automation of referencing calculations of meteorological events in infrared satellite images.*

Josué de Jesús Trejo-Alonso<sup>1</sup>, Juan Pablo Molina-Aguilar<sup>1\*</sup>

Recibido: 10/03/2019

Aceptado: 27/04/2019

\*Autor de correspondencia

### Resumen

El presente trabajo desarrolló una herramienta informática que permitió referenciar en imágenes satelitales captadas por el satélite GOES-13 la ubicación geográfica de eventos meteorológicos en el territorio de la República Mexicana empleando una rutina en lenguaje R que facilitó hacer el tratamiento digital desde su proyección nativa decodificándola por píxeles mediante una escala digital para evaluar la técnica hidrostimador para el pronóstico de la intensidad de lluvia posibilitando el acoplamiento espacial de información mediante una aplicación Web de fácil acceso limitado a las dimensiones cobertura territorial y características de la imagen al referenciar estaciones meteorológicas o infraestructuras hidráulicas para acoplar temporalmente de los registros terrestres respecto del pronóstico satelital y visualizar la evolución geométrica con la implementación de procesos automatizados para desarrollar cálculos hidrológicos logrando caracterizarlos, analizarlos y comprenderlos dando la posibilidad de establecer pronósticos de mayor certidumbre.

**Palabras clave:** Teledetección, Proyección GEOS, pixel, coordenadas geográficas, hidrostimador, paqueterías.

### Abstract

*The present work developed a computer tool that allowed referencing in satellite images captured by the GOES-13 satellite the geographical location of meteorological events on the Mexican Republic through a R language routine that allowed digital processing from its native projection by decoding it by pixels using a digital scale that allows applying the hydro-estimator technique to forecast the intensity of rain allowing the spatial coupling of information through an easily accessible Web application limited to the territorial coverage dimensions and characteristics of the image making it possible to reference meteorological stations or hydraulic infrastructures to temporarily couple terrestrial records with respect to the satellite forecast and visualize the geometric evolution with the implementation of automated processes to develop hydrological calculations allows to characterize, analyze and understand them giving the possibility of establishing predictions of greater certainty.*

**Keywords:** remote sensing, GEOS projection, pixel, geographical coordinates, hydroestimator, packages.

## 1. INTRODUCCIÓN

Una herramienta útil para llevar a cabo el análisis de fenómenos meteorológicos es a través de mapas, los cuales se definen cuando se realiza la proyección de información en un plano físico o digital (Lapaine y Usery, 2014). En muchos de los casos estas proyecciones de datos se lleva a cabo sobre una esfera o bien un elipsoide y posteriormente se trasfiere a una superficie cuya característica trascendental son sus ángulos, distancias y superficies medidas proporcionales a las dimensiones de la Tierra. Su observación es el objeto de estudio de la teledetección. Inicialmente se aplicó a fotografías aéreas y en el presente considera el proceso de obtención de la imagen, tratamiento y aplicación particular, en donde las plataformas espaciales son las de mayor utilización (Chuvieco, 1995). El auge tecnológico en satélites ha permitido ampliar la obtención de información y recolectarla de manera continua, mediante lecturas de radiación electromagnética a través de sensores. La altura orbital capta una imagen panorámica de una amplia superficie terrestre en una sola toma, al registrar las longitudes de onda de los cuerpos o materias (Rodríguez y Arredondo, 2005). En la actualidad se cuenta con satélites Ambientales Geostacionarios Operacionales conocidos como GOES, desarrollados y operados por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del espacio y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (Goodman *et al.*, 2012). Los satélites orbitan la tierra rotando a la misma velocidad manteniendo una posición fija de observación a una altura de 36,000 km con cero grados de inclinación respecto del ecuador. Estos satélites cubren aproximadamente el 43% de la superficie terrestre (Peredo, 2004). Los sensores instalados en los satélites utilizan una gama de colores que van desde el verde hasta el rojo y el componente infrarrojo (IR) no visible para el ser humano que registran longitudes de onda, del blanco al negro. Con una amplia gama de tonos grises intermedios, adicionándole el color azul se obtiene el verde, el verde se asigna al rojo y el rojo para el infrarrojo, generándose entonces una imagen en falso o verdadero color (Rodríguez y Arredondo, 2005). Una imagen satelital (por ejemplo figura 1) corresponde al registro de energía electromagnética en forma electrónica conformada por pixeles que muestran el brillo de

la superficie terrestre o bien las formaciones nubosas mediante una malla (*raster*). Los valores digitales de los pixeles van de 0 a 255 para una resolución de 8 bits, con lo cual la rasterización contará con un número de filas y de columnas. El número total de pixeles será el producto de dichos renglones y columnas (Ormeño, 2006). Las imágenes satelitales IR del satélite GOES-13 cuentan con la proyección GEOS cuyo argumento es la longitud subsatelital ( $\lambda D$ ) en grados. El uso de la proyección estacionaria normalizada detalla la vista de un satélite localizado sobre el plano del ecuador. Es necesario realizar una transformación en función de la geometría idealizada de la tierra; tomando en cuenta la distancia desde el satélite hasta el centro de la tierra ( $h$ ) que son 42,164 km. Sin embargo dicha idealización se basa en un elipsoide perfecto con ecuador de radio 6378.169 km y un polo de radio 6356.5838 km (CGMS, 1999). La proyección WGS84 define los valores de los parámetros en la proyección. De lo anterior es claro que para utilizar imágenes satelitales en un plano cartesiano es necesario realizar una proyección matemática de la imagen. Por esta razón, el objetivo del presente trabajo es desarrollar una aplicación computacional que permita sistematizar la proyección de imágenes GOES a coordenadas geográficas. Esta aplicación permitirá desarrollar la cartografía de distintos fenómenos meteorológicos, en particular la intensidad de precipitación (a través de la técnica del hidroestimador).

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Imágenes satelitales

Las imágenes en formato digital infrarrojo del satélite GOES-13 son captadas con proyección WGS84 y guardadas en formato .PCX sin tratamiento identificándolas con la fecha y hora las cuales registran eventos meteorológicos en una ventana con límites superior  $36.4768^\circ$ , inferior  $14.1118^\circ$ , izquierda  $-122.2590^\circ$  y derecha  $-79.0817^\circ$  constituida por 1280 y 817 pixeles de longitud y latitud respectivamente con valor de brillo en el rango 0 a 255 en concordancia con el nivel digital captado por el sensor.

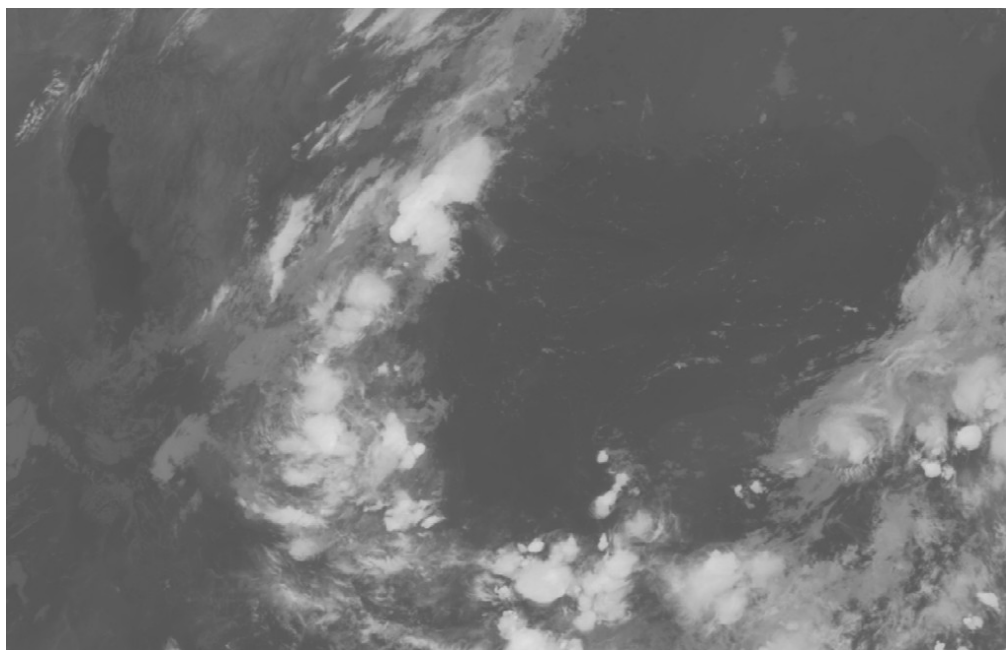


Figura 1. Imagen satelital captada el 26 de septiembre de 2017 a las 03:45 a.m. con nubosidad sobre el estado de Querétaro que originó una intensa tormenta causante de fuertes inundaciones

## 2.2 Técnica del hidroestimador

El tratamiento aplicado a las imágenes GOES se realiza mediante el algoritmo de la técnica del hidroestimador, el cual surgió de observaciones en el centro de las planicies americanas. Se utilizaron mediciones históricas de precipitación registradas en radares superficiales y temperaturas del tope de la nube, captadas en imágenes satelitales del periodo mayo a junio en 1995. El ajuste que se estableció con estas mediciones fue una regresión exponencial mediante un riguroso análisis estadístico

(Scofield y Kuligowski, 2003). Posteriormente se realizaron correcciones numéricas dando lugar al Autoestimador, que considera la humedad, el crecimiento y gradiente de temperatura en el tope de las nubes (Vicente *et al.*, 1998).

En la ecuación (1)  $R$  representa la intensidad de precipitación estimada en mm/h,  $T$  es la temperatura del tope de las nubes en grados °K en función de las condiciones  $T = 418 - B$ ;  $B > 176$  y  $T = 330 - (B/2)$ ;  $B \leq 176$  considerando que  $B$  es el nivel digital del brillo del pixel (adimensional).

$$R = 1.1183 * 10^{11} e^{-0.036382T^{1.2}} \quad (1)$$

## 2.3 Transformación de proyecciones

La relación existente entre las coordenadas de una imagen y las coordenadas geográficas se establece mediante la concatenación de dos funciones  $f, f^{-1}$  y  $g, g^{-1}$  para cada dirección, en las cuales los valores de  $Lon, Lat, x, y$  son números reales, mientras que  $l, c$  son números enteros. Las funciones  $f, f^{-1}$  son no lineales y

definidas por la proyección geográfica, mientras que las funciones de escalamiento  $g, g^{-1}$  son no lineales. Existen dentro de la propia imagen los factores  $CFAC, LFAC$  y las compensaciones  $COFF, LOFF$  los cuales son proporcionados en el registro de navegación de cada imagen. La figura 2 muestra la relación entre las coordenadas geográficas y las coordenadas  $x, y$  de una imagen satelital.

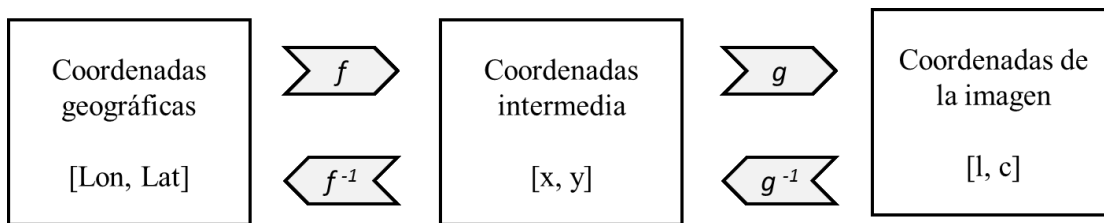


Figura 2. Relación entre coordenadas geográficas y de una imagen satelital

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = f \begin{pmatrix} Lon \\ Lat \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} Lon \\ Lat \end{bmatrix} = f^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} c \\ l \end{bmatrix} = g \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = f^{-1} \begin{pmatrix} c \\ l \end{pmatrix} \quad (5)$$

Mediante los planos de referencia cartesianos  $e_1, e_2, e_3$  con origen en el centro de la tierra.  $e_3$  representa puntos en la dirección norte, mientras que  $e_1$  representa los puntos con dirección al

meridiano de Greenwich. Por su parte  $s_1, s_2, s_3$  representan la posición del satélite. En concordancia  $s_3$  apunta al norte mientras que  $s_1$  lo hace al centro terrestre (ver figura 3).

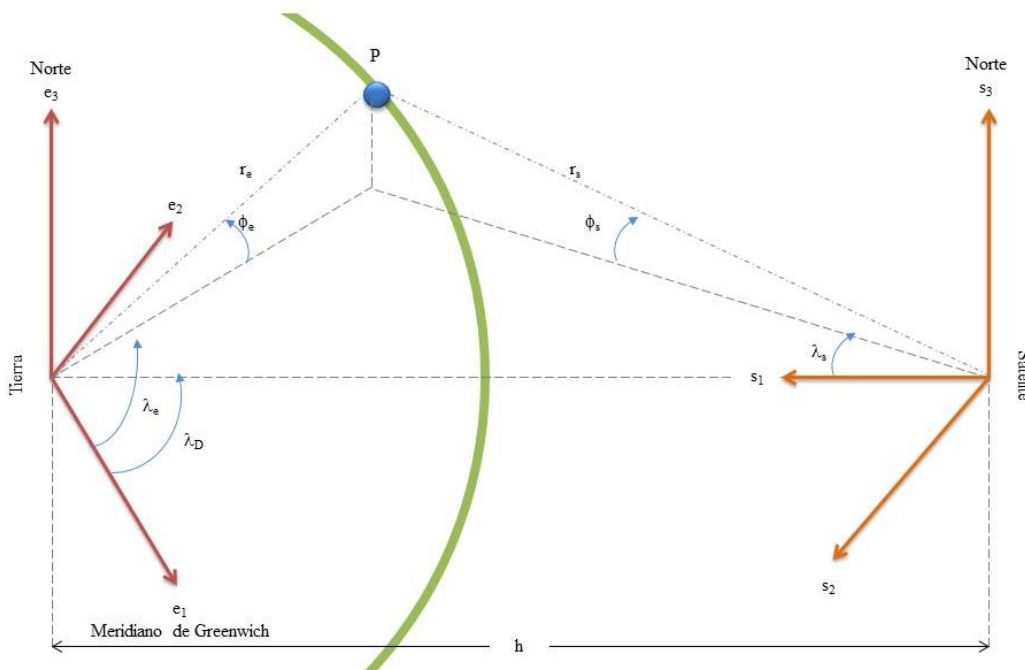


Figura 3. Plano de coordenadas para la proyección GEOS (Adaptado de CGMS, 2013)

Como ya se mencionó la tierra puede representarse mediante un elipsoide rotacional achatado representado por las ecuaciones 6 y 7. En la figura 3  $r_e$  es el vector al punto  $P$  sobre la superficie terrestre, medido desde el centro de la tierra; mientras que  $\lambda_e$  y  $\phi_e$  son la longitud y

latitud geocéntrica respectivamente. Estas variables describen la posición y su transformación a coordenadas geográficas  $Lon, Lat$  y la distancia, se realiza mediante las expresiones 8, 9 y 10.

$$\frac{e_1^2 + e_2^2}{r_{eq}^2} + \frac{e_3^2}{r_{pol}^2} = 1 \quad (6)$$

$$\frac{e_1^2 + e_2^2}{(6378.169)^2} + \frac{e_3^2}{(6356.5838)^2} = 1 \quad (7)$$

$$Lon = \lambda_e \quad (8)$$

$$Lat = \arctan \left[ \left( \frac{r_{eq}^2}{r_{pol}^2} \right) \tan(\phi_e) \right] \quad (9)$$

$$r_e = \frac{r_{pol}}{\sqrt{1 - \left( 1 - \frac{r_{pol}^2}{r_{eq}^2} \right) \cos^2(\phi_e)}} \quad (10)$$

El vector de distancia  $r_s$  medido desde el satélite al mismo punto  $P$  sobre la superficie terrestre, se puede expresar utilizando su plano de referencia. Se utilizan sus componentes cartesianos en

función de distancia entre el satélite y el centro de la tierra  $h$  y la longitud subsatelital de referencia  $\lambda_e$ .

$$\hat{r}_s = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (h - r_e) \cos(\phi_e) \cos(\lambda_e - \lambda_D) \\ -r_e \cos(\phi_e) \sin(\lambda_e - \lambda_D) \\ r_e \sin(\phi_e) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Utilizando las ecuaciones (8) a (11) se pueden obtener los ángulos de exploración utilizados por el satélite. De tal manera que se pueden realizar proyecciones en ambos sentidos hacia adelante o bien hacia atrás. En el caso de la primera proyección se requiere de seis variables, dos de

ellas definidas por las ecuaciones (14) y (15). Estas ecuaciones son auxiliares en la definición de las cuatro variables restantes; ecuaciones (16) a (19). Finalmente, con estos resultados se puede aplicar la ecuación (20).

$$\lambda_s = \arctan \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \quad (12)$$

$$\phi_s = \arcsin \left[ \frac{r_3}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2}} \right] \quad (13)$$

$$c_{lat} = \arctan(0.993243 \tan(Lat)) \quad (14)$$

$$r_0 = \frac{6356.5838}{\sqrt{1 - 0.00675701 \cos^2(c_{lat})}} \quad (15)$$

$$r_1 = (42164 - r_0) \cos(c_{lat}) \cos(Lon - lon) \quad (16)$$

$$r_2 = -r_0 \cos(c_{lat}) \sin(Lon - lon) \quad (17)$$

$$r_3 = r_0 \sin(c_{lat}) \quad (18)$$

$$r_n = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan \left( \frac{-r_2}{r_1} \right) \\ \arctan \left( \frac{-r_3}{r_n} \right) \end{bmatrix} \quad (20)$$

La segunda proyección también requiere de dos variables auxiliares, ecuaciones (21) y (22) que

definen las cuatro restantes, ecuaciones (13) a (26) para poder aplicar la ecuación (27):

$$s_d = \sqrt{(42164 \cos(x) \cos(y))^2 - 1737122264 * (\cos^2(y) + 1.006739501 \sin^2(y))} \quad (21)$$

$$s_n = \frac{42164 \cos(x) \cos(y) - s_d}{\cos^2(y) + 1.006739501 \sin^2(y)} \quad (22)$$

$$s_1 = 42164 - s_n \cos(x) \cos(y) \quad (23)$$

$$s_2 = s_n \sin(x) \cos(y) \quad (24)$$

$$s_3 = -s_n \sin(y) \quad (25)$$

$$s_{xy} = \sqrt{s_1^2 + s_2^2} \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} Lon \\ Lat \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan \left( \frac{s_2}{s_1} \right) + lon \\ \arctan \left( 1.006739501 \frac{s_3}{s_{xy}} \right) \end{bmatrix} \quad (27)$$



### 3. IMPLEMENTACIÓN WEB

R es un programa de licencia libre para estadística computacional y gráficas (R Core Team, 2016). Debido a su popularidad y eficiencia, se ha extendido en aplicaciones a otras áreas de la ciencia. Además, para el desarrollo de la aplicación Web se utilizó el paquete ‘shiny’ (Chang *et al.*, 2016). Todos estos paquetes fueron diseñados especialmente para R y también están protegidos bajo la licencia de

software libre. La figura 4 muestra la pantalla de la aplicación Web que fue programada en R. Este programa transforma latitud y longitud geográfica a posición X y Y de pixel en proyección GEOS de una imagen IR. Como se observa, se ingresan en las primeras dos casillas las coordenadas geográficas del sitio de interés, mientras que en las dos casillas restantes se define el tamaño de la imagen satelital en pixeles. De esta forma se establece la relación de pixeles de posición en la parte superior derecha.

Figura 4. Aplicación Web para transformar latitud y longitud geográfica a posición X y Y de pixel en proyección GEOS de una imagen IR

El código implementado en la transformación de coordenadas se hizo usando los paquetes ‘sp’ (Pebesma y Bivand, 2005; Bivand *et al.*, 2013) y ‘rgdal’ (Bivand *et al.*, 2016) del programa R. Estos paquetes resuelven las ecuaciones presentadas en la sección 2.3. Estos paquetes poseen también un variado conjunto de tareas

para el tratamiento de datos geoespaciales. Se expone a continuación el código escrito en R, con el cual se generó la aplicación que permite transformar de coordenadas Latitud/Longitud, a pixeles de la imagen del satélite, empleando una proyección GEOS.

```
library (shiny)
library (sp)
library (rgdal)
LongLat2XY<-function(Long,Lat,xi,yi)
ui<-fluidpage(
  headerPanel("Bienvenido al programa para transformer Long/Lat a XY"),
  sidebarPanel(
    numericInput("Longitud", label = h3 ("Longitud (ej. -100.2591)"), value = -100.2591),
    hr()
    fluidRow(column(3,verbatimTextOutput("Longitud"))),
    numericInput("Latitud", label = h3 ("Latitud (ej. 28.4718)"), value = 28.4718),
    hr()
  )
)
```

```

fluidRow(column(3,verbatimTextOutput("Latitud"))),
numericInput("xi", label = h3 ("Píxeles en X (ej. 1280)"), value = 1280),
hr()
fluidRow(column(3,verbatimTextOutput("Píxeles en X"))),
numericInput("yi", label = h3 ("Píxeles en Y (ej. 817)"), value = 817),
hr()
fluidRow(column(3,verbatimTextOutput("Píxeles en Y")))
),
mainPanel(
tableOutput (outputId="x")
)
)
Server<-function(input,output)
shinyApp(ui=ui,server=server)

```

Dentro de R la librería ‘shiny’ es la que permite desarrollar esta herramienta, uniendo así el programa de transformación de coordenadas con una interfaz amigable. Así, ‘shiny’ queda definida por dos componentes principales, ‘ui’ y ‘server’.

En el primero de ellos se describen los detalles y el formato de la aplicación, tales como los menús, los botones y las cajas (el usuario introduce la información). El segundo componente detalla la conexión entre el servidor y el programa, y los parámetros de salida, ya sea que se requiera una imagen, una tabla o un solo valor.

Cabe mencionar que la librería ‘shiny’ tiene un servidor con todos los paquetes de R ya cargados, esto para que no exista incompatibilidad entre las funciones programadas y las aplicaciones Web creadas. Además, las aplicaciones tienen un tiempo limitado de uso generando un costo extra si se quiere que el programa tenga un uso ilimitado.

Respecto al código mostrado, primero se construyó una función que realizara la transformación de coordenadas y después conecta dicha función con los datos que ingresa el usuario.

El código está hecho para transformar coordenadas una a una, pero se puede adaptar fácilmente para aceptar una tabla de valores.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Utilizando los datos de la Red de Monitoreo de precipitaciones extremas del estado de Querétaro (RedCIAQ) [www.redciaq.uaq.mx](http://www.redciaq.uaq.mx) se vinculan todas las posiciones de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA) de esta Red (figura 5). De esta forma, se obtiene para cada estación su respectivo pixel en la imagen satelital GOES como se muestra en la tabla 1.

Una vez identificados los píxeles, se aplica la ecuación 1 para cambiar el formato nativo de la imagen con tonalidades de negro al blanco, por una imagen con una escala de siete colores de intensidad de precipitación pronosticada (a partir del nivel digital del brillo en el pixel). Como ya se comentó, es de interés particular los 34 píxeles que representan las condiciones sobre el estado de Querétaro, sin embargo la técnica del Hidroestimador aplicada a la imagen completa de la república mexicana; permite observar de forma completa y precisa la evolución de las tormentas y fenómenos que afectan todo el territorio mexicano.

Para ejemplificar la versatilidad de este procedimiento, a continuación se muestra la evolución de una tormenta sobre el estado de Querétaro. La tormenta que ocurrió del 24 al 26 de septiembre de 2017, ocasionó una fuerte precipitación con inundaciones considerables y graves daños materiales en la zona metropolitana de la ciudad de Santiago de Querétaro.

En la figura 6 se aprecia el desarrollo de la tormenta durante el día, con horario (a) 23:45, el día 25 con horarios (b) 02:45, (c) 05:45, (d) 08:45, (e) 11:45, (f) 14:45, (g) 17:45, (h) 20:45, (i) 23:45 y el día 26 con horarios (j) 02:45, (k) 05:45, (l) 08:45, (m) 11:45, (n) 14:45, (o) 17:45.

El uso de las paqueterías “shiny”, “sp” y “rgdal” permitieron un manejo eficiente de los parámetros asociados con la resolución de las imágenes satelitales.

De esta forma, la correlación entre las coordenadas geográficas de un sitio de interés y los pixeles correspondiente en la proyección GEOS se establece de manera simple y exacta.

Asimismo, el desarrollo de la aplicación Web contribuye en un manejo amigable de imágenes

GOES, con la característica principal de poder realizar la transformación para distintos tamaños de imágenes. Esta transformación a pixeles se realiza dentro del marco geográfico mencionado, proyectando la longitud y la latitud geocéntrica.

En la tabla 1, se referenciaron las 34 Estaciones Meteorológicas Automáticas que componen la RedCIAQ.

Esta sistematización permite visualizar el desarrollo de un fenómeno sobre una región específica en el territorio nacional. También puede establecerse el acoplamiento de la información superficial respecto de la satelital, monitorear cuencas hidrológicas, vasos en presas, monitorear caudales para generación de energía eléctrica, o conocer la evolución de presas rompepicos.

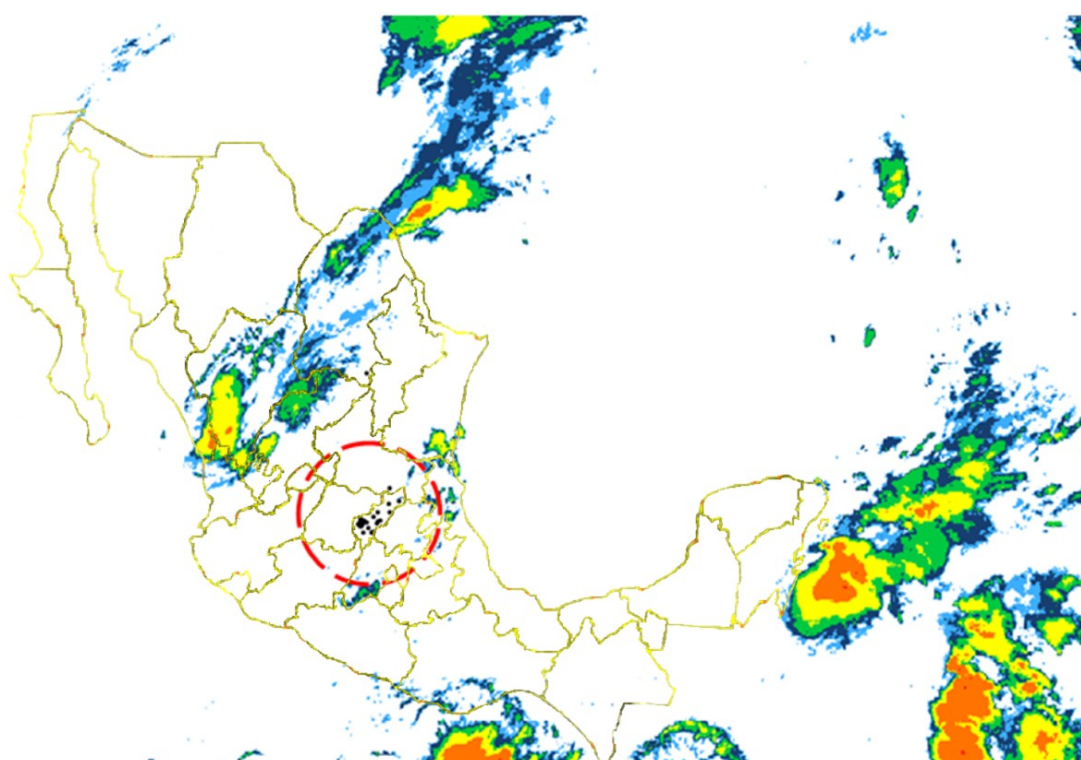
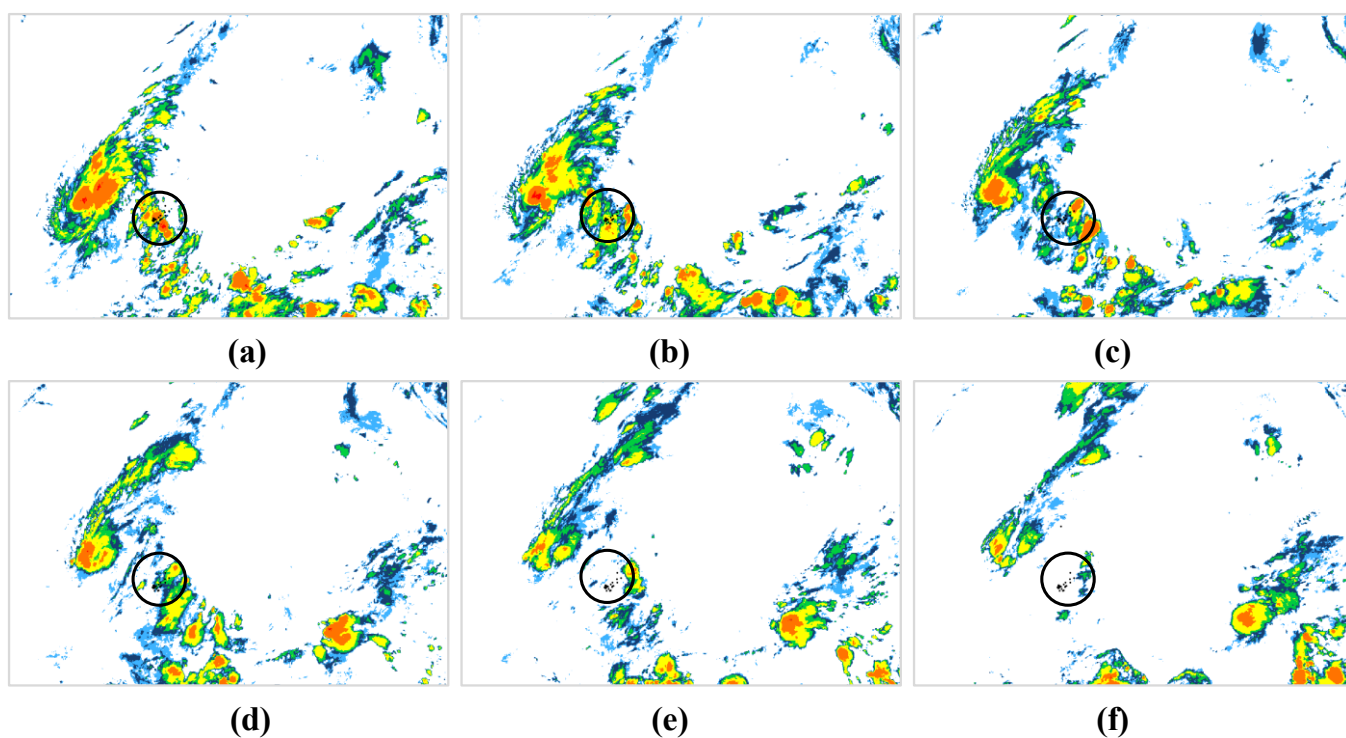


Figura 5. Pixeles que corresponden a las estaciones de la RedCIAQ en la imagen satelital IR con tratamiento en función de la intensidad de lluvia pronosticada

Tabla 1. Ubicación geográfica de las EMA de la RedCIAQ y su pixel en las imágenes satelitales

Nombre	Long	Lat	X	Y	Nombre	Long	Lat	X	Y
Chulavista	-100.47	20.63	419	265	Ezequiel Montes	-99.90	20.67	424	255
Belén	-100.41	20.65	422	266	Huimilpan	-100.27	20.37	466	289
Real del Parque	-100.40	20.61	421	264	Landa Matamoros	-99.32	21.18	430	260
Candiles	-100.40	20.55	421	262	Pedro Escobedo	-100.14	20.50	434	255
Cimatario	-100.38	20.56	422	262	San Joaquín	-100.01	20.38	436	256
Centro Histórico	-100.39	20.59	422	264	San Juan del Rio	-99.97	20.39	440	265
Milenio III	-100.35	20.59	423	264	Tequisquiapan	-99.91	20.61	441	267
San Gil	-100.44	20.70	421	268	Tolimán	-99.93	20.90	441	277
El Refugio	-100.35	20.65	424	266	Viñedos	-100.49	20.61	418	264
COTAS Amazcala	-100.34	20.71	425	268	El Esparrago	-100.01	20.38	434	255
Cerro de Campanas	-100.41	20.59	421	263	Santa Rosa Jáuregui	-100.45	20.74	421	270
Amealco de Bonfil	-100.14	20.19	428	427	Unión de Ejidos	-100.23	20.65	428	266
Pinal de Amoles	-99.63	21.14	454	286	Joaquín Herrera	-99.57	20.92	455	277
Arroyo Seco	-99.69	21.55	455	303	Juriquilla	-100.45	20.72	421	269
Cadereyta Montes	-99.81	20.70	444	268	UAQ Aeropuerto	-100.37	20.62	423	265
Colón	-100.05	20.78	436	272	Pasteur y 57	-100.38	20.58	422	263
Corregidora	-100.43	20.55	441	267	CICATA QRO IPN	-100.37	20.57	422	263



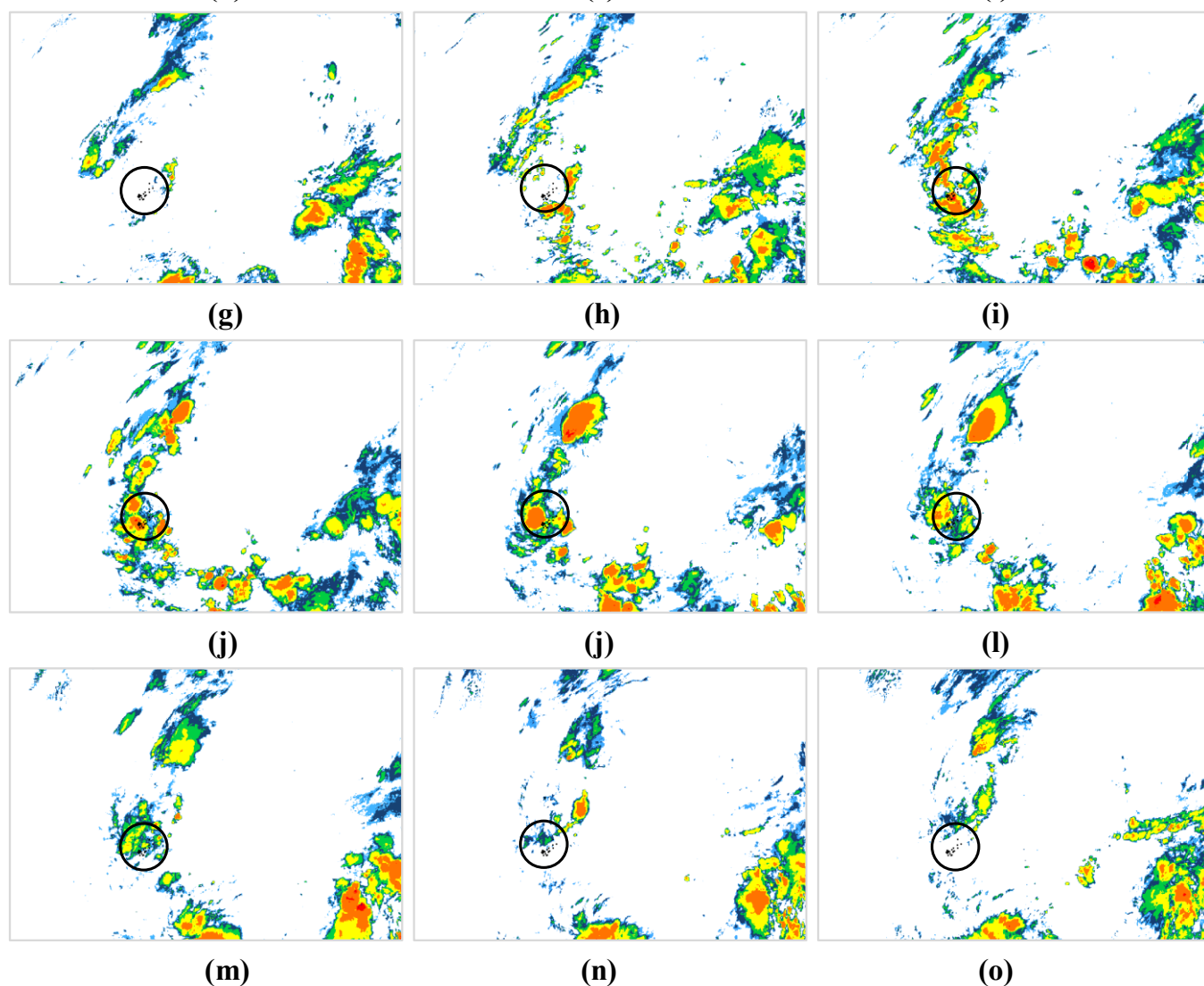


Figura 6. Evolución de la tormenta del 24 al 26 de septiembre de 2017 sobre Querétaro

## 5. CONCLUSIONES

Esta sistematización de cálculos geocéntricos permite a los sectores académicos y de investigación, contar con una herramienta sencilla para el monitoreo y estudio de fenómenos meteorológicos en zonas de interés; siempre y cuando se cuente con imágenes del tipo GOES. Asimismo, esta herramienta permite proyectar imágenes satelitales de cualquier dimensión. Esta herramienta aplicada a la gestión de recursos hídricos, puede ayudar en la operación y mantenimiento de infraestructura hidráulica, así como fundamentar programas de prevención social generando alertas en tiempo real y estableciendo escenarios para la

mitigación de daños producto de precipitaciones extremas e inundaciones. Se pueden incorporar paqueterías a la lectura secuencial de imágenes para generar una estadística descriptiva de su evolución geométrica. También se pueden incorporar modelos de predicción acordes a las características del territorio que se estudia.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Sistema Meteorológico Nacional de México (SMN) por el acceso a las imágenes satelitales digitales, a través de su Departamento de Percepción Remota.



## REFERENCIAS

- Bivand, R., Pebesma, E., Gómez-Rubio, V. (2013). *Applied spatial analysis with R*. Second edition. Springer. NY.
- Bivand, R., Keitt, T., Rowlingson, B. (2016). *rgdal: Bindings for the Geospatial Data Abstraction Library*. R package version 1.1-10.
- Chang, W., Cheng, J., Allaire, J., Xie, Y., McPherson, J. (2016). *Shiny: Web Application Framework for R*. Obtenido de R package version 0.14.1
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial 2da. edición*. Rialp, S.A. Madrid. 449 p.
- CGMS, (1999). Coordination Group for Meteorological Satellites. *LRIT/HRIT Global Specification*. En: [https://www.cgms-info.org/documents/pdf\\_cgms\\_03.pdf](https://www.cgms-info.org/documents/pdf_cgms_03.pdf)
- Goodman, S., Gurka, J., De Maria, M., Scmit, T., Mostek, A., Jedlovec, G., Reynolds, R. (2012). The GOES-R proving ground: accelerating user readiness for the next-generation geostationary environmental satellite system. *Bulletin American Meteorology society*, 1029-1040. Doi: 10.1175/BAMS-D-11-00175.1
- Lapaine, M., Usery, L. (2014). Chap. 9. *Map projections and reference systems*, 1-14. En F. Ormeling, y B. Rysted (eds.). *The World of maps*. International Cartographic Association.
- Ormeño, V. (2006). *Teledetección Fundamental 3a. edición*. Madrid, España. 344 p.
- Pebesma, E., Bivand, R. (2005). *Classes and methods for spatial data in R*. En: <http://cran.r-project.org/doc/Rnews>
- Peredo, A. (2004). *Software para análisis del presupuesto de enlace para comunicaciones vía satélite*. Tesis de Licenciatura, Universidad de las Américas Puebla, Cholula, Puebla, México. En: [catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/peredo\\_a\\_s/](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/peredo_a_s/)
- R Core Team. (2016). *R: A language and environment for statistical computing*. Obtenido de The R Project for Statistical Computing: <https://www.R-project.org/>
- Rodríguez, C., Arredondo, B. (2005). *Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA, aplicado en estudios de ingeniería civil*. Trabajo de grado. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. 230 p.
- Scofield, R., Kuligowski, R. (2003). Status and Outlook of Operational Satellite Precipitation Algorithms for Extreme – Precipitation Events. *Weather and Forecasting* (18) 1037-1051. Doi: 10.1175/1520-0434(2003)018<1037:SAOOOS>2.0.CO;2
- Vicente, G., Scofield, R., Menzel, P. (1998). The Operational GOES Infrared Rainfall Estimation Technique. *Bulletin of the American Meteorological Society* (79) 1883-1898. doi: 10.1175/1520-0477(1998)079<1883:TOGIRE>2.0.CO;2



## Modelos de gestión, conflictos y mediación en cuencas hidrográficas: los casos de España y Brasil y su aplicabilidad a Chile

*Models of management, conflict and mediation in hydrographic basins: the cases of Spain and Brazil and their applicability to Chile*

Silvia Basualto\*<sup>1</sup>, Javier del Valle<sup>2</sup>, María Victoria Gil<sup>3</sup>, Ricardo Figueroa<sup>1,4</sup>, Oscar Parra<sup>1</sup>, Antonio González<sup>3</sup>, Alejandra Stehr<sup>1</sup>

Recibido: 07/08/2018

Aceptado: 19/02/2019

\*Autor de correspondencia

### Resumen

Se analizan los modelos de gestión del agua y la utilidad de la mediación ambiental en los casos de conflictividad sobre los recursos hídricos de España y Brasil y su aplicabilidad a Chile. Se parte de la experiencia de España, que establece las cuencas hidrográficas como las bases territoriales de la administración. En España, se crean en 1926 por Real Decreto las Confederaciones Sindicales Hidrográficas, instituciones adscritas al Ministerio de Fomento para “el aprovechamiento intensivo, máximo de los recursos hidráulicos de las cuencas de nuestros grandes ríos”, que establece las cuencas hidrográficas como las bases territoriales de la administración. La trasposición de la Directiva Marco del Agua conservó la Demarcación Hidrográfica como base territorial de gestión, incorporando la participación social activa e integra de los implicados como principio crucial para la gestión sostenible. Brasil y Chile están entre los 14 países del mundo con más disponibilidad de agua. Sin embargo, ambos tienen problemas de escasez relativa. En Chile la gestión responde a la demanda, y las zonas de mayor oferta de recursos hídricos no coinciden con las áreas de mayor población y actividad económica. Ambos países muestran enfoques de gestión diferentes, siendo el brasileño más afín al europeo al definir la cuenca hidrográfica como unidad de gestión. Los principales resultados obtenidos son: 1. El agua es vital, pero su compleja gestión suele desembocar en conflictos socioambientales y económicos entre diferentes actores; 2. Posibilitar procesos participativos eficientes requiere estrategias que incentiven el interés en la información y compromiso de los implicados en la búsqueda de la mejor resolución de los conflictos. 3. Se propone la Mediación Ambiental como una estrategia adecuada para la resolución de conflictos en torno al agua.

**Palabras clave:** Gestión del agua, conflictos sociambientales, mediación ambiental.

### Abstract

*Water management models and utility of environmental mediation for cases of conflicts associated with water resources in Spain and Brazil, as well as their applicability in Chile are analyzed. It is based on the Spanish experience, which establishes hydrographic basins as territorial bases of the administration. In Spain, the Royal Syndical Hydrographic Confederations were created in 1926 by Royal Decree, institutions attached to the Ministry of Development for the "intensive, maximum use of the hydraulic resources of the basins of our great rivers", which establishes the watersheds as the territorial bases of the administration. The transposition of the Water Framework Directive conserved the Hydrographic Demarcation as a territorial management base, incorporating the active and integral social participation of those involved as a crucial principle for sustainable management. Brazil and Chile are among the 14 countries in the world with more water availability. Although both have problems of relative scarcity. In Chile, the management corresponds to the demand and the area with greater range of water resources available doesn't coincide with the densely populated areas and economic activity. Both countries present different management approaches, being the Brazilian one more similar to the European one to define the hydrographic basin as a management unit. The main obtained results are: 1. Water is vital, but its complex management usually leads to socio-environmental and economic conflicts between different actors; 2. Enabling efficient participative processes requires strategies which encourage the interest on information and the involved people's commitment in the search of the best resolution of any conflicts. 3. Environmental Mediation is proposed as an adequate strategy for the resolution of historical conflicts around the water management.*

**Keywords:** Water management, social conflicts, environmental mediation.

- 
- 1 Universidad de Concepción, Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile. sbasualto@udec.cl; oparra@udec.cl; astehr@udec.cl  
 2 Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, España. delvalle@unizar.es  
 3 Universidad de Córdoba, España. bv2gicem@uco.es; ajgbarrios@gmail.com  
 4 Universidad de Concepción, Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería, Chile. rfiguero@udec.cl

## **1. INTRODUCCIÓN**

La cuenca hidrográfica al ser la unidad natural de distribución del agua en la superficie terrestre, representa el ámbito físico-natural que asociado al recurso agua, tiene relevancia determinante en la conformación del ambiente y principalmente de todo desarrollo humano. El agua ocupa un lugar privilegiado en la base de la pirámide ambiental. En ese sentido, la cuenca hidrográfica es funcional al resto del territorio como el elemento vital de la naturaleza, la sociedad y la economía, dado el especial rol que desempeñan las cuencas dentro del ciclo hidrológico de capturar, concentrar y distribuir la oferta del agua precipitada.

El recurso hídrico fluye desde la cabecera de la cuenca y desemboca en el mar o en otro cuerpo de agua, por lo cual conecta la cuenca de principio a fin. Esto implica que todas las actividades o sucesos que tengan impacto en la cuenca podrán influenciar o repercutir aguas abajo. En la actualidad, son cada vez más habituales los conflictos por el sobreuso o usos no autorizados de determinados cursos y cuerpos de agua, lo que alerta de la necesidad de emplear y hacer extensivo el criterio de aptitud o disponibilidad hídrica, en términos de cantidad y calidad como un condicionante muy relevante de las actividades productivas y calidad de vida de un territorio.

El objetivo del presente trabajo es analizar los modelos de gestión y la utilidad de la mediación ambiental en los casos de conflictividad sobre los recursos hídricos partiendo de los ejemplos de España y Brasil y su aplicabilidad a Chile.

## **2. METODOLOGÍA**

Se analizan tres casos de gestión del agua partiendo de la experiencia de España, donde se establecen las cuencas hidrográficas como las bases territoriales de la administración. Por otro lado, se compara con países latinoamericanos como Brasil y Chile que están entre los 14 países del mundo con más disponibilidad de agua. Sin embargo, ambos tienen problemas de escasez relativa. Poseen políticas y normas ambientales, pero con enfoques de gestión diferentes, siendo

el brasileño más afín al europeo al definir la cuenca hidrográfica como unidad de gestión, aunque no incluya algunos aspectos conceptuales de gestión integrada del recurso hídrico del modelo español o DMA. Por otro lado, Chile no considera la gestión de cuenca como base de sus políticas hídricas y las zonas de mayor oferta de recursos hídricos no coinciden con las áreas de mayor población y actividad económica.

## **3. RESULTADOS**

### *3.1 Gestión de los recursos hídricos en España*

La gestión de los recursos hídricos en España ha pasado por diferentes etapas a lo largo de la historia reciente. Se identifican tres períodos distintos: una primera etapa, a principios del siglo XX, centrada en el aprovechamiento de los caudales para propósitos básicos, usos agrícolas, energía hidroeléctrica y abastecimientos para la población; una segunda etapa de desarrollo importante de la energía hidráulica que permitía atender a más de un objetivo; y una última etapa, a partir de los años sesenta, en la cual la conciencia ambiental y los impactos sociales asociados a las políticas hidráulicas empiezan a tomar protagonismo (White, 1998). Es en esta época, cuando aumenta la consciencia de la gestión integral y se incorpora paulatinamente la gestión de las aguas subterráneas, iniciando las primeras investigaciones por el interés de determinados acuíferos para la agricultura.

También esto motivó la importancia creciente de las aguas subterráneas para el abastecimiento a muchas poblaciones, en especial aquellas localizadas en territorios calcáreos y algunos otros. En estas zonas, los acuíferos y acuitardos suponen importantes reservas para estos fines, debiendo ser adecuadamente gestionadas para evitar la sobreexplotación, polución y/o contaminación por intrusión marina. La autorización de aprovechamientos de aguas subterráneas la concede el Organismo de la Confederación de la Cuenca Hidrográfica, mientras que el alumbramiento de las aguas para realizar la ejecución correcta y verificación del alumbramiento y su uso autorizado, está en manos de otros departamentos administrativos

(ej. técnicas de sondeo son competencias en la Ley y Reglamento de Minas), generándose un cierto descontrol y una necesidad de implantar contadores volumétricos a las autorizaciones otorgadas.

Esta evolución de la gestión está muy relacionada con el grado de desarrollo que han alcanzado los recursos hídricos, es decir, el volumen de recurso aprovechado en relación con el volumen de recursos hídricos de la naturaleza (Sánchez-Martínez *et al.*, 2011). El modelo español es el resultado de una prolongada evolución que se inició en 1926 con la creación de las Confederaciones Hidrográficas (CH). La primera característica de este modelo es la separación entre los usos del agua multisectoriales e individuales (tales como suministro de agua municipal, riego, generación hidroeléctrica, uso industrial, minero, recreativo, etc.). Las CH están a cargo de los asuntos multisectoriales, mientras que cada sector ha creado su propia institución para gestionar los usos del agua, como es el caso de los agricultores que integran las Comunidades de regantes. Otra característica, es que el agua se percibe como un recurso que debe protegerse y gestionarse y no simplemente utilizarse. La Ley de Aguas actual asigna la gestión de recursos hídricos a la Administración general del estado, bajo una autoridad en el plano nacional, el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, a través de la Dirección General del Agua (DGA) y las CH, como autoridades de cuencas.

La DGA es responsable, entre otras cosas, de elaborar el Plan Hidrológico Nacional (García y Gaviria, 2008). Las CH son entidades de derecho público con personalidad jurídica propia, separada del Estado y con plena autonomía funcional, entre las cuales se incluyen el asignar concesiones de agua y otras actividades administrativas respecto al agua; el estudio, diseño, construcción y operación de la infraestructura de uso multi-sectorial del agua; la planificación hidrológica; y el establecimiento de tarifas por el uso de agua, en las que se reflejan los diferentes costos incurridos, en función de criterios de uso racional del agua, distribución equitativa de responsabilidades y beneficios

entre los diferentes usuarios de agua y el grado de auto-financiación de los servicios.

Los principios generales de gestión del agua en España establecidos en la Ley de Aguas de 1985 consideran este recurso como un bien de dominio público, y a la cuenca hidrográfica como unidad básica de gestión y planificación, la cual se considera indivisible. No obstante, la Ley tenía que conciliar el hecho de que los límites de las cuencas hidrográficas, unidad de gestión y planificación de las aguas, no coincidían con los límites político-administrativos de las Comunidades Autónomas. Con esta finalidad instituyó dos tipos de cuencas: las intracomunitarias, cuyo territorio pertenecía a una sola Comunidad Autónoma y serían competencia exclusiva de dicha Comunidad y las intercomunitarias, cuyo territorio se extiende por más de una Comunidad Autónoma, gestionadas por el Estado mediante las Confederaciones Hidrográficas (Sánchez-Martínez *et al.*, 2011).

La Ley de Aguas de 1985 declaró públicas todas las aguas, sean superficiales o subterráneas renovables, como bienes integrantes del dominio público del Estado, su asignación y uso requiere previa concesión administrativa. Los particulares solo adquieren el derecho de aprovechamiento, no la propiedad del agua, salvo los derechos adquiridos al amparo de la legislación anterior que la Ley respeta. Los municipios tienen competencias en el abastecimiento urbano, alcantarillado y depuración de agua urbanas. No obstante, aunque la gestión de estos servicios es una competencia de los municipios, va íntimamente ligada a las competencias autonómicas y estatales de aguas y medio ambiente; se hace necesario, por tanto, la colaboración entre las distintas administraciones. Los municipios prestan este servicio directamente, en régimen de mancomunidad o a través de empresas públicas, mixtas o privadas en régimen de concesión (Sánchez-Martínez *et al.*, 2011).

El sector privado también realiza una función importante en la gestión del agua como usuario final. Las Comunidades de Regantes, consideradas en España como Corporaciones de Derecho Público con participación activa en las Asambleas de las Confederaciones

Hidrográficas, gestionan la distribución, reparto y mantenimiento de las redes que llevan el agua desde los canales principales y secundarios hasta la parcela de cada uno de sus miembros. Las Comunidades de Regantes de base pueden estar agrupadas en Comunidades Generales de Usuarios en la que intervienen también, en algunos casos, usuarios urbanos e industriales. Para las posibles situaciones conflictivas estas comunidades tienen Tribunales y Jurados de Riego.

Las dificultades de la gestión se centran principalmente en la gobernanza del agua, pues se detecta una pérdida de identidad de los organismos de cuenca ante la presión de las Comunidades Autónomas, que reclaman la fragmentación y segregación de las cuencas intercomunitarias, y atraer para sí la legislación, gestión y administración del agua en todo su ámbito territorial, por encima de la unidad de cuenca (Berga, 2010).

En el marco europeo, la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE (DMA) fijó un marco normativo obligatorio estableciendo objetivos medioambientales para todas las masas de aguas: continentales, de transición y costeras. Considera que el agua no es un bien comercial como los demás, sino un patrimonio que hay que proteger, defender y tratar como tal. La gestión del agua adquiere tras la DMA una extraordinaria complejidad y exige profundas reformas de los Derechos nacionales y, lo que es más importante, obliga a modificar arraigados hábitos y asumir una nueva cultura del agua.

Para España que presenta un régimen hidrológico muy irregular y con escasos recursos hídricos, la gestión integrada del agua es un factor clave: el uso de recursos no convencionales como desalación y aguas residuales depuradas, la gestión conjunta de aguas superficiales y subterráneas, así como aspectos de su cantidad y calidad, el desarrollo de las obras hidráulicas de regulación y conducción de caudales, el uso de tecnologías eficientes de ahorro de agua y la gestión planificada de los hechos extremos como las sequías e inundaciones (Sánchez-Martínez *et al.*, 2011).

La marcada diferencia de recursos hídricos entre las zonas de clima atlántico de la Península Ibérica con las de clima mediterráneo, más seco y de precipitaciones no regulares, ha exigido una histórica, compleja y en permanente actualización de las estrategias de regulación de las aguas. Por otra parte, hay que tener en cuenta que la gestión del agua también está influida por determinados aspectos regulatorios, producto del Estado de las Autonomías que compone el Estado Español, y que, en ocasiones, ha sido detonante de claros conflictos sociales y ambientales. Esta realidad, a veces recrudecida por signos políticos fuertemente enfrentados por la perspectiva de las estructuras y regulaciones del bien compartido entre territorios implicados en trasvases de aguas, ha sido fuente generadora de estos conflictos, especialmente cuando la propia disputa ha sido utilizada como rédito político. Entre los trasvases más destacados que se caracterizan por su impacto mediático social, institucional y político destacan los de los ríos Tajo-Segura, y la regulación del Ebro, además de algunos embalses que resultaron polémicos en España (MMA, 2000).

### *3.2 Modelos de gestión del agua en Brasil*

La institucionalización de la gestión del agua en Brasil tiene como el primer hito histórico, la creación en 1920 de la Comisión de Estudios de las Fuerzas Hidráulicas, como parte del Ministerio de Agricultura, Industria y Comercio. Esto deja ver que en los países latinoamericanos, la preocupación por la gestión del agua ha nacido de la mano de la preocupación por garantizar la oferta hídrica para los sectores productivos (Magalhães, 2007). Sin embargo, el primer marco de acción para la gestión del agua en Brasil surgió a partir del Código de las Aguas en 1937. Este código fue innovador para su época al incluir temas como la prohibición de la contaminación del agua; posibilidad de pagar por el uso del agua y los vertidos; prioridad del agua para consumo humano; concesiones administrativas para las aguas públicas; y, declaración de todas las aguas como de dominio público estatal o municipal y de algunos privados. No obstante, este código se centró demasiado en impulsar el desarrollo del sector hidroenergético, lo que imposibilitó que se

convirtiera en una verdadera herramienta de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (Barth *et al.*, 1987; Granziera, 2001). La preponderancia del sector energético en la gestión del agua se materializó en la creación del Consejo Nacional de Agua y Energía Eléctrica en 1939 y del Departamento Nacional de Aguas y Energía Eléctrica (DNAEE) en 1968. Además, la prioridad dada al sector energético fue acompañada por un fortalecimiento en la agenda nacional del sector de agua y saneamiento, con la creación en 1940 del Departamento Nacional de Obras y Saneamiento y en 1971 de compañías estatales proveedoras de estos servicios en todos los estados del país.

La segunda etapa de la gestión del agua en Brasil tiene lugar en los años 70, estuvo marcada por una visión sectorial, que priorizó inversiones gubernamentales realizadas en cada uno de los sectores usuarios del agua, con énfasis en agua potable, saneamiento básico y generación de hidro-energía. La principal crítica a esta fase, es que no se realizó una planificación integral en las cuencas, obteniendo como resultado el mantenimiento de los conflictos por el uso del agua entre los diversos sectores (Borsoi y Torres, 2010). En 1978 se crea la Comisión Especial de Estudios Integrados de Cuencas Hidrográficas dando origen al primer órgano institucional relacionado con las cuencas que tenía como funciones la clasificación de las aguas del país, el estudio de uso racional de las aguas federales y hacer compatible la gestión del agua y ambiental del país.

El tercer hito relevante de la gestión del agua en Brasil, fue la creación de la Secretaria Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos, donde la gestión del agua sufre cambios fundamentales, ya que se considera recurso económico de dominio público de la Unión y los estados, la cual debe ser gestionada a partir de una política integrada de los cuerpos hídricos, teniendo a la cuenca como unidad básica (Pereira y Ferreira, 2008).

La Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) de 1997 es un cambio fundamental, orientado a poner en práctica las disposiciones propuestas por la Constitución Federal. Su importancia radica en que se modernizó la

gestión del agua haciendo uso de normas e instrumentos dando importancia a la participación de los usuarios y la sociedad civil en la gestión para buscar legitimidad y adopción real de las políticas y puso como prioridad considerar los usos múltiples del agua restándole importancia al sector energético en la gestión del agua (Borsoi y Torres, 2010).

A nivel local, la PNRH creó una instancia de gestión del agua muy importante: los comités de cuencas hidrográficas, que tienen como funciones básicas la aprobación de los planes del agua y de los cobros por el uso, la fijación del valor de estos cobros y la intermediación en caso de conflictos entre usuarios. Los comités están conformados por representantes del gobierno federal, estatal y municipal y de los usuarios y de la sociedad civil. En caso de las cuencas localizadas en el Estado de Sao Paulo, el más populoso del país, la conformación de los comités es diferente: hay el mismo número de representantes del gobierno estatal, del gobierno municipal y de los representantes de la sociedad civil (Rojas *et al.*, 2013).

### *3.3 Modelos de gestión del agua en Chile*

El territorio continental de Chile (4.300 km de longitud) posee una variedad de climas, geología, ecosistemas, vegetación y patrones de uso del suelo. Asimismo, los abundantes recursos hídricos se distribuyen de manera muy desigual en el país. La demanda de agua suele ser superior a la oferta en el norte árido, donde se desarrollan la mayoría de las actividades mineras que hacen un uso intensivo del agua y, cada vez más, en las zonas del centro del país, en las que se concentran la producción agrícola y la población. Una tercera parte del agua extraída para satisfacer la demanda pública se pierde en el proceso de distribución, debido a la inadecuada infraestructura.

El carácter unitario del Estado de Chile, implica que en todo su territorio se mantiene la unidad del ordenamiento jurídico. Sin embargo, el territorio se divide en regiones, consagrándose en términos imperativos la descentralización y la desconcentración. La administración territorial del Estado, implica distinguir cuatro niveles jerárquicos: nacional, regional, provincial y

comunal. El nivel nacional está bajo la directiva del Poder Ejecutivo, Presidente de la República y ministerios, encargados de dictar las políticas y normas legales que regirán en todas las materias y para todo el territorio del país. De este nivel emanan las leyes y las políticas nacionales que inciden en la organización del territorio nacional.

Sin embargo, esta realidad pasa a un nivel secundario cuando se refiere a una escala

regional, ya que los mayores PIB en el país se originan en gran parte en las regiones con la menor oferta hídrica (tabla 1). En otras palabras, los mejores escenarios económicos se originan con un amplio costo ambiental, lo cual no favorece ciertamente el desarrollo sostenible, y menos la armonía entre las dimensiones socio-cultural, económica y ambiental. Sin dudas, esto ha generado y generará aún más los conflictos a corto y mediano plazo asociados a los recursos hídricos.

Tabla 1. PIB y demanda al consumo hídrico regional en Chile

Región	m <sup>3</sup> /Habitante/año	PIB (US\$)/habitante
II	52	37.131
I	854	21.295
III	208	16.030
RM	525	12.992
XII	1.959.036	10.207
VI	6.829	9.583
V	801	8.689
IV	1.020	8.440
XI	2.995.535	8.178
VIII	21.556	7.169
VII	23.978	6.313
XV	854	5.847
XIV	136.207	5.789
X	136.207	5.539
IX	49.273	4.234

Fuente: Banco Mundial (2011)

Por otro lado, la gestión del Agua en Chile descansa en el Código de Agua, el cual data en sus orígenes a 1855 (código civil), con influencia hispánica que considera el uso común y colectivo. Mientras que en 1951 se genera el primer código de aguas, el cual distingue entre usos públicos y privado, pero permite al estado controlar los derechos como recuperar los

mismos. Sin embargo, el sentido guarda relación con el uso y no con el territorio. A una serie de modificaciones, las más importante fue impuesta por el Gobierno Militar en el Código de Aguas de 1981, el cual define los recursos hídricos como “bienes nacionales de uso público”, pero define los derechos de aprovechamiento de aguas (DAA) a petición de los usuarios, sin costo



alguno, de por vida (son heredables) y se concedían sin especificar el uso que se debía hacer del agua o alguna gestión eficiente de la misma. Los DAA son independientes de los títulos de propiedad sobre las tierras, se pueden negociar libremente y la administración está bajo la administración la Dirección General de Aguas (DGA), que pertenece al Ministerio de Obras Públicas. Esta situación en su conjunto, ha propiciado la especulación y el acaparamiento de dichos derechos, disminuyendo los recursos hídricos disponibles para la asignación.

La reforma del Código de Aguas efectuada en 2005, facultó a la DGA a restringir el consumo de aguas subterráneas a fin de preservar la capacidad de recarga de los acuíferos y fijar caudales ecológicos mínimos para los derechos de aprovechamiento asignados recientemente. También introdujo una “patente sobre el no uso” de los derechos de aprovechamiento, que grava los derechos de aprovechamiento de agua que no se utilicen. Esto último resultó contraproducente, ya que incentivó el uso de derechos hasta ahora no utilizados y reactivó los mercados de aguas con más fuerza. Por ejemplo, compañías hidroeléctricas tendieron a retener sus DAA a fin de impedir el ingreso de nuevos jugadores en el mercado eléctrico (Valenzuela, *et al.*, 2013). Pero, en términos generales, se ha reducido la especulación y el acaparamiento de derechos, lo que liberó recursos para un mayor número de usuarios potenciales y, a su vez, di lugar a una asignación más equitativa (OCDE, 2015). No obstante, persiste la histórica sobreasignación y concentración de derechos, al igual que ciertas ineficiencias del mercado y la información. Lo que ha impulsado una serie de movimientos sociales que exigen que el estado recupere el control de los derechos y se apueste por una gestión de cuencas. En este sentido, desde 2011 se han propuesto varias enmiendas al Código de Aguas, que exigen la temporalidad de los nuevos DDA (con una vigencia máxima de 30 años) y que no menoscaben la capacidad de recuperación de los sistemas de agua dulce. Además, estipulan usos prioritarios como el consumo humano y el saneamiento, y en situaciones excepcionales, en el caso de derechos otorgados previamente; introducen disposiciones relativas a la extinción y la caducidad de los derechos no utilizados; y

refuerzan las restricciones que limitan los derechos de los usuarios en aras del interés público (por ejemplo, en casos de sequía). Estas medidas coinciden con las recomendaciones del estudio de la OCDE sobre asignaciones de recursos hídricos (OCDE, 2015).

Las dificultades y conflictos de la gestión del agua en Chile derivan, entre otras razones, de la compartimentación sectorial excesiva y la falta de planificación territorial integrada. Al respecto, resulta clara la contribución que puede aportar el ordenamiento y la planificación territorial desde la perspectiva de armonizar los componentes socio-cultural, económicos y ambientales. La visión de cuenca puede ser para ello, pero requiere integrar aspectos que van sobre la administración DDA y se sobrepasa cuando los se superan estos límites geográficos como los proyectos de trasvases asociados a conceptos erróneos de excedencia.

La gobernanza del agua es compleja e incompleta. Hay varias instituciones responsables de la asignación, la calidad y la contaminación del agua, la reglamentación de los servicios de agua, el riego y los ecosistemas hídricos (Parra *et al.*, 2009, Basualto *et al.*, 2009). A pesar de la adopción de algunas iniciativas políticas de alto nivel como la Estrategia Nacional de Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas, propuesta en 2008, Chile no ha avanzado mayormente en la adopción de una gestión integrada de los recursos hídricos; de hecho, no existen instituciones que se ocupen de las cuencas fluviales, ni un sistema de planificación sobre la calidad de las aguas de esas cuencas. No hay gestión integral del agua superficial ni de las aguas subterráneas que como sería lógico. Esta división de funciones crea considerables problemas de gobernanza y coordinación, y dificulta la formulación de una política coherente e integrada que aborde los equilibrios en la gestión del agua, que relacione el desarrollo económico, urbano, de infraestructura y las políticas sectoriales con aspectos de cantidad y calidad de agua, conservación de la biodiversidad y de los servicios ecosistémicos que ofrecen los sistemas fluviales. Las dos evaluaciones ambientales efectuadas por la OCDE (2015), el área más

criticada y más mal evaluada ha sido la relativa a la gestión de los recursos hídricos y de manera especial a la débil información científica que se tienen de estos recursos y ecosistemas (Parra *et al.*, 2009a, Parra *et al.*, 2009b, Retamal *et al.*, 2013).

#### **4. DISCUSIÓN**

En los casos revisados de Brasil y España, es posible ver que las iniciativas que se han desarrollado, tienen elementos en común que no se presentan en la experiencia chilena. De ellos, el más importante se refiere a la característica del agua como un bien del Estado, que no se entrega a perpetuidad. Vinculado a esto se encuentra la priorización de uso en las cuencas, que en el caso de Chile el agua es resignada por el mercado en función del uso económicamente más rentable, sobre el uso ambiental como legítimo en los cuerpos legales.

En Chile, las mayores carencias en la institucionalidad están relacionadas principalmente con la falta de un ente regulador a nivel de cuenca, que sea capaz de administrar los recursos hídricos desde una perspectiva local, que tenga la capacidad de generar las instancias necesarias de participación para generar una visión común de todos los usuarios de la cuenca, que permitan orientar la resolución de conflictos en torno al agua, una distribución equitativa a los distintos usos considerando las dimensiones ambientales y sociales, aspectos ausentes en la legislación actual del agua.

Asimismo, se destaca la descentralización de las estrategias de Brasil y España, lo que estaría fuertemente relacionado con procesos de participación ciudadana, los cuales se consideran esenciales para el desarrollo local e integrado en la gestión del agua.

Aun partiendo de los éxitos parciales conseguidos para garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos de los estados miembros de la Unión Europea, la DMA pone de manifiesto que la consecución de este reto sigue precisando nuevas técnicas de intervención para alcanzar el ejercicio eficiente de la participación pública. Después de años de su implantación, la DMA no ha logrado alcanzar los objetivos de restauración propuestos y no ofrece una metodología para materializar el proceso participativo en la planificación hidrológica, dejándolo a criterio de las Confederaciones Hidrográficas el protocolo del proceso. Es por ello que la Mediación Ambiental se presenta como una estrategia viable para el ejercicio de la participación fundamentada en el diálogo activo y la implicación del conjunto de protagonistas relacionados con la gestión del agua (social, económica, ambiental, administrativa y política). Este procedimiento aporta mecanismos para transparentar los intereses comunes y propiciar cauces para superar las controversias y conflictos surgidos en el proceso, tanto en las comunidades locales, como a nivel de toma de decisiones en la gestión integral de las masas de agua de las cuencas hidrográficas de diversos territorios y realidades locales y nacionales.

En países como Chile y Brasil, donde la oferta hídrica es importante, la gestión del agua es una prioridad, porque las cifras vienen demostrando que la dotación de agua ha disminuido de forma creciente generando conflictos por el acceso al recurso. En Brasil se ha definido la cuenca, como la unidad territorial para desarrollar la Gestión Integrada del Recurso, la participación de la comunidad en la gestión del agua está garantizada formalmente a través de su representación en el Comité de Cuencas y la política nacional de recurso hídrico dispone un marco institucional de gestores y actores de la GIRH en el país (tabla 2).

Tabla 2. Comparación de Gestión de Recursos Hídricos entre España, Brasil y Chile

	<b>España</b>	<b>Brasil</b>	<b>Chile</b>
Definición Unidad Territorial GIRH	Es la Cuenca hidrográfica	Es la Cuenca hidrográfica	La cuenca hidrográfica no está descrita en el Código de Aguas, se realiza a través de la división política-administrativa.
Organización de la comunidad para participar en la gestión del agua	Organismos de Cuenca	Representatividad y legalidad en los Comités de Cuenca	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Juntas de Vigilancia, para cauces naturales pero que no representan a todos los usuarios.</li> <li>– Asociación de canalistas y Comunidades de agua, para tomar las aguas de una fuente artificial y repartirlas entre los titulares de derechos.</li> <li>– Comunidades de obras de drenaje, para aprovechar obras de drenaje en beneficio común</li> </ul>
Instrumentos regulatorios, económicos, de control y penalización	Organismos de Cuenca, guardería fluvial, tasas.	Comités de cuenca y cobro por el uso del agua	Ministerio del Medio Ambiente trabaja en instrumentos regulatorios como las normas de calidad secundarias y de emisión
Mecanismos técnicos de planificación y flujo de información	Planes hidrológicos de cuencas, Plan Hidrológico Nacional.	Planes de Cuenca Hidrográfica, Planes Estatales, Plan Nacional de Recursos Hídricos, Sistemas de Información sobre recursos hídricos.	24 Instituciones involucradas en la fiscalización y control del Recurso Hídrico
Marco Institucional, gestores y actores	Ley de Aguas y de la DMA con el Reglamento de la Planificación Hidrológica, aprobado por Real Decreto 907/2007	Política Nacional de Recursos Hídricos y Políticas Estatales de recursos hídricos	Código de Aguas Política Nacional de Recursos Hídricos
Gestión del Agua	Descentralizada, con Organismos de Cuenca intercomunitarios e intracomunitarios.	Descentralizada, existen disposiciones nacionales, pero cada estado puede implementar sus propias normas	Centralizada, el manejo de los recursos hídricos están basados en criterios de mercado.

## 5. CONCLUSIONES

Debido a la larga trayectoria que posee España en la gestión integrada de cuencas hidrográficas, es útil conocer sus aciertos y debilidades, con el fin de no cometer los mismos errores y poder distinguir los aspectos técnicos que son aplicables a nuestra realidad. Diferenciar qué aspectos son asimilables, convierte el análisis comparado en una herramienta útil para aprender de la experiencia internacional. Algunos aspectos asimilables son: a) Disponibilidad heterogénea del recurso a lo largo del territorio; b) Expansión del área de regadío para la actividad agrícola; c) Crecimiento demográfico y aparición de nuevas demandas; d) Incorporación intensa de las aguas Subterráneas en la gestión integral de cuencas; e) Aumento en la frecuencia de eventos naturales como sequías e inundaciones y; f) No coincidencia entre límites político-administrativos con límites de cuenca.

Sin duda los conflictos aparecen en todos los modelos, la dispar disponibilidad del agua en España, la gran expansión de los regadíos y de otras nuevas demandas, muy similares a la situación de Chile. La irregularidad espacial y temporal en la distribución de los recursos hídricos hace que las presiones de las zonas de mayor escasez sean fuertes, especialmente en periodos de sequía en los que pueden peligrar las garantías, lo que constituye una fuente de tensiones.

Los numerosos conflictos en torno a la gestión del agua evidencian la complejidad para su

correcta gobernanza, independientemente de las políticas aplicadas por los estamentos gubernamentales de los tres países analizados en este trabajo. Intervenir en la gestión sostenible de los recursos hídricos sigue precisando, hoy más que nunca, nuevos enfoques. Los conflictos deben ser vistos como oportunidades para el cambio sociopolítico en beneficio de los recursos naturales vitales, en especial, en la gestión sostenible del agua, donde la participación pública para una gobernanza eficaz se convierte en la clave del éxito y donde la Mediación Ambiental puede ser una buena herramienta.

El procedimiento de Mediación Ambiental que proponemos para su aplicación en la gestión de conflictos en torno al agua, se fundamenta en la metodología de Investigación-Acción-Participación (IAP) que permite: a) analizar el conflicto desde una perspectiva holística de los factores complejos e influencia mediática que rivalizan en la gestión del agua; b) diseñar Planes de Acción específicos para el contexto, las particularidades del escenario en el que se gesta, la tipología y la evolucionan de los “conflictos del agua” (hechos desencadenantes, conjunto de implicados, dinámica de los impactos asociados, consecuencias locales para el desarrollo sostenible); c) Integrar al conjunto de implicados (intervención colectiva) para alcanzar una salida a la espiral del conflicto y alcanzar consenso social, político e institucional tanto en nuevos como en los conflictos históricos de la gestión del agua.

## REFERENCIAS

- BM, Banco Mundial. (2011). *Documento diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos*. <http://Documentos.Bancomundial.Org/Curated/Es/452181468216298391/Pdf/633920esw0span0le0grh0final0dr0rev-0doc.Pdf>
- Barth, F., Pompeu, C., Fill, H., Tucci, C., Kelman, J., Braga, B. (1987). *Fundamentos para gestão de recursos hídricos*. São Paulo: Nobel; ABRH. Coleção de Recursos Hídricos, ISBN: 85-213-0512-5, 518 p.
- Basualto, S., Parra, O., Acuña, A., Figueroa, R. Azócar, G. (2009). *Aspectos de la gestión del agua en Chile*. En Jacobi, P. y Sinisgalli, P. (Eds.). *Gobernanza del agua y de las políticas públicas en Latinoamérica y Europa*. Editorial Annablume (Sao Paulo, Brasil). Volumen I (85), 219 p.

- Berga, L. (2010). La Gobernanza del agua en España. *Revista de obras públicas*, (3507), 157, 7-20.
- Borsoi, Z., Torres, S. (2010). A política de recursos hídricos no Brasil. [www.bndes.ov.br/sitebndes/export/sites/default/bndes\\_pt/galerias/arquivos/conhecimento/revista/rev806.pdf](http://www.bndes.ov.br/sitebndes/export/sites/default/bndes_pt/galerias/arquivos/conhecimento/revista/rev806.pdf). Acceso en: 14 Dic. 2010.
- García, L., Gaviria, M. (2008). *Soluciones prácticas a los desafíos que plantea el agua: lecciones de la experiencia española*. The World Bank document No.51266, Washington, DC, USA.
- Granziera, M. (2001). *Direito de águas: disciplina jurídica das águas doces*. São Paulo: Atlas.
- MMA, Ministerio de Medio Ambiente. (2000). *Libro blanco del agua en España*. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica Ministerio de Medio Ambiente. ISBN 84-8320-128-3 Nipo: 310-00-009-3 Depósito Legal: M-36787-2000.
- Magalhães, A. (2007). *Indicadores ambientais e recursos hídricos: Realidade e perspectivas para o Brasil a partir da experiência francesa*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.
- OCDE, Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. (2015). *Environment at a glance indicators*, París, OCDE Publishing. Doi: 10.1787/9789264235199
- Parra O., Acuna, A, Basualto, S. (2009a). *La cuenca hidrográfica como unidad de estudio y gestión del territorio regional*. La cuenca hidrográfica del río Itata: Aportes científicos para su desarrollo sustentable. Editorial Universidad de Concepción, 13-26.
- Parra, O., Muñoz, M., Pérez, L. (2009b). *Gestión integrada de cuencas como base del ordenamiento territorial descentralizado*. En: Von Baer, H. (Ed.). *Pensando Chile desde sus regiones*. Editorial Universidad de la Frontera: Serie Au-Sinergia Regional (Temuco, Chile), 490-494.
- Pereira, D., Ferreira, R. (2008). *Ecocidadão*. São Paulo: Sma/Cea. Cadernos De Educação Ambiental.
- Retamal, M., Andreoli, A., Arumi, J., Rojas, J., Parra, O. (2013). Water governance and climate change: strengths and weaknesses of the current water management system in Chile: an internal analysis. *Interciencia*, 38(1), 8-16.
- Rojas, J., Pérez, M., Malheiros, T., Madera, C., Guimarães, M., Dos Santos, R. (2013). Análisis comparativo de modelos e instrumentos de gestión integrada del recurso hídrico en Suramérica: los casos de Brasil y Colombia. *Rev. Ambient.* Vol.8(1), 73-97. Doi:10.4136/Ambi-Agua.971
- Sánchez-Martínez, M., Rodríguez-Ferrero, N., Salas-Velasco, M. (2011). La gestión del agua en España. La uni-dad de Cuenca. *Revista de estudios regionales* (92) 199-220.
- Valenzuela C., Fuster, R., León, A. (2013). "Chile: ¿es eficaz la patente por no uso de derechos de aguas?", *Revista Cepal*, N° 109 (Lc/G.2556-P), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- White, G. (1998). Reflections on the 50 years international search for integrated water management. *Water Policy*, 1(1), 21-27.

## Acoplamiento de estimaciones de precipitación basadas en imágenes satelitales, con registros pluviométricos

*Coupling satellite image-based rainfall estimates with rainfall records*

Juan Pablo Molina-Aguilar\*<sup>1</sup>, Bruno Paz-Aviña<sup>1</sup>, Josué Elizondo-Gómez<sup>1</sup>,  
Miguel Ángel Sánchez Quijano<sup>2</sup>

Recibido: 29/04/2019

Aceptado: 16/05/2019

\*Autor de correspondencia

### Resumen

La estimación de precipitación en tiempo real a partir de imágenes satelitales digitales (ISD) es una metodología ampliamente utilizada por meteorólogos e hidrólogos, su aplicación sobre una región superficial es indirecta, en la cual las resoluciones temporal y espacial de la información definen la precisión, los resultados obtenidos deben validarse empleando registros de redes pluviométricas. La finalidad del presente trabajo es presentar una metodología de acoplamiento temporal y espacial (ATE), para información con resolución de 15 minutos. La información empleada corresponde a valores del nivel digital (ND) en los píxeles de las ISD captadas por el satélite GOES-13 durante el desarrollo del ciclón tropical (CT) Paul. Fueron utilizados los registros de las estaciones meteorológicas automáticas (EMA) localizadas en la región hidrológica 10 Sinaloa. La lectura y el tratamiento digital de las ISD se realizaron empleando el código *Fast Infrared Satellite Image Reader GOES 13 (FISIR-G13)* desarrollado en lenguaje R. Se obtuvieron lecturas en vecindades de 9 píxeles geográficamente referenciados, generando series temporales del ND, a partir de los cuales se estimó la precipitación empleando el Hidroestimador (HE). La estandarización permitió contrastar ambas fuentes de información, como resultado se identificaron combinaciones de píxeles para el ATE. La evaluación estadística empleando el coeficiente de correlación de la intensidad estimada respecto de la intensidad observada muestra un mejor desempeño de la metodología desarrollada respecto del HE. La metodología establece el acoplamiento temporal de los valores estimados de precipitación empleando ISD respecto de los valores registrados en la EMA, con valores del coeficiente de correlación cercanos a 1.

**Palabras clave:** Acoplamiento temporal, Hidroestimador, anisotropía, series temporales, ciclón tropical, estación meteorológica automática.

### Abstract

*The estimation of precipitation in real time from digital satellite images (DSI), is a methodology widely used by meteorologists and hydrologists, its application on a superficial region is indirect, in which the temporal and spatial resolutions of the information define the exactitude, the results obtained must be validated using rainfall network records. The purpose of this work is to present a methodology of temporal and spatial coupling (ATE), for information with a resolution of 15 minutes. The information used corresponds to digital level values (ND) in the DSI pixels captured by the GOES-13 satellite during the development of the tropical cyclone (CT) Paul. They were used the records of the automated meteorological stations (EMA) located in the hydrological region 10 Sinaloa. The digital reading and treatment of the DSI were performed using the Fast Infrared Satellite Image Reader GOES 13 (FISIR-G13) code developed in R language. Readings were obtained in neighborhoods of 9 geographically referenced pixels, generating ND time series, from which precipitation was estimated using the Hydro-Estimator (HE). The standardization allowed contrasting both sources of information, and as a result pixel combinations were identified for the ATE. The statistical evaluation using the correlation coefficient of the estimated intensity with respect to the observed intensity shows a better performance of the methodology developed with respect to HE. The methodology establishes the temporal coupling of the estimated precipitation values using ISD with correlation coefficient values closer to 1. This validates the homogenization between both measuring instruments.*

**Keywords:** Time coupling, Hydro-Estimator, anisotropy, time series, tropical cyclone, automatic meteorological station.

1 Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, División de Investigación y Posgrado, México. valnahaar@hotmail.com  
brunopaz57@gmail.com; elizondojosue46@gmail.com

2 Instituto Tecnológico de Chetumal, Facultad de Ingeniería, Quintana Roo, México. miguel.halo199611@gmail.com



## 1. INTRODUCCIÓN

Las precipitaciones se caracterizan por presentar una elevada variabilidad tiempo/espacio, para lo cual su medición representa un desafío importante en la actualidad. La medición empleando redes pluviométricas provee mediciones directas confiables y precisas, la incertidumbre de estas últimas se incrementa en regiones montañosas, áridas y semiáridas (Miao *et al.*, 2015; Chubb *et al.*, 2016).

La incorporación de ISD en el desarrollo de múltiples metodologías para las estimaciones de precipitación basadas en satélites (SPE por sus siglas en inglés) representan opciones para la estimación continua aplicables en distintas escalas temporales (Ballari *et al.*, 2016). Las ISD representan abundante información con alta resolución espacio-temporal, que registran los eventos meteorológicos en extensas regiones, particularmente zonas montañosas donde las redes de banda ancha difícilmente se instalan para adquirir información meteorológica (Shen *et al.*, 2018).

Las SPE representan una opción adicional a la medición puntual y discreta hecha por las redes de medición a partir de estaciones meteorológicas convencionales (EMC) o EMA. No obstante los resultados obtenidos mediante las SPE presentan aún errores considerables (Miao *et al.*, 2016; Satge *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2016).

Entre las SPE desarrolladas destacan: La Misión de Medición de Precipitaciones Tropicales (TRMM por sus siglas en inglés) mejoró los resultados en las regiones tropicales, para resultados diarios obtenidos con mediciones de pluviómetros en Sudamérica (Shen *et al.*, 2018); el Proyecto Climatológico Global de Precipitación (GPCP por sus siglas en inglés) fusionó el análisis de pluviómetros con múltiples SPE, a partir de ello se construyó una base de datos robusta de escala mensual en retículas de 2,5° de lado. El uso de dicha base empleando técnicas de inteligencia artificial permitió la Estimación de Precipitación a partir de Información Registrada Remotamente utilizando Redes Neuronales Artificiales (PERSIANN por sus siglas en inglés), mejorándose la resolución

temporal y espacial en escalas diarias (Ashouri *et al.*, 2015). Estos modelos mencionados son ampliamente utilizados y generan buenos resultados, sin embargo no logran una alta precisión en la resolución temporal de los datos que mejore el monitoreo de la precipitación.

Las SPE emplean retículas espaciales para corregir la falta de pluviómetros o su inadecuada distribución además de la elevada proporción de datos faltantes (Martens *et al.*, 2013). Distintos enfoques se han desarrollado para corregir el sesgo y mejorar la certidumbre de las SPE entre ellos: el método lineal, el método de escala de intensidad local, el método de transformación de potencia y el método de mapeo de cuantiles (Teutschbein y Seibert, 2013; Ajaaj *et al.*, 2015).

El presente trabajo muestra una propuesta metodológica para corregir el sesgo de la SPE empleando el HE respecto de los registros obtenidos en las EMA. Se consideró una resolución temporal de 15 minutos, utilizando una retícula de píxeles vecinos de valores de ND georreferenciados y estandarización para una posición geográfica específica. La metodología se fundamenta en conceptos geoestadísticos y la anisotropía de la información.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Ciclón tropical Paul

El CT Paul tuvo origen a partir de la perturbación tropical ubicada a 1065 km de Cabo San Lucas, B.C.S en el Suroeste de las costas de Jalisco y Colima (figura 1). Se desplazó con una velocidad de 24 km/h hacia el Oeste incrementándose gradualmente su fuerza. El día 15 de septiembre presentaba vientos máximos ( $V_{m\acute{a}x}$ ) de 120 km/h con rachas de 150 km/h. Al situarse a 670 km al Suroeste de Cabo San Lucas se convirtió en huracán categoría 3 según la escala Saffir-Simpson. Al ingresar en aguas frías, a 500 km de Cabo San Lucas, disminuyó a Huracán 2. Mantuvo la fuerza hasta el día 16 y al ubicarse a 70 km de la costa se degradó a categoría HI, modificando su trayectoria hacia el Norte con desplazamiento paralelo a la costa. Se degradó a tormenta tropical (TT) al ubicarse a 140 km hacia el Oeste-Suroeste de Loreto,

B.C.S. con  $V_{\text{máx}}$  de 110 km/h y rachas de 140 km/h. El día 17 se degradó en depresión tropical (DT) al recorrer aguas de menor temperatura. Finalmente al ubicarse a 25 km al Oeste-Suroeste de Punta Eugenia se convirtió en una baja presión remanente (Bravo, 2012). El CT Paul recorrió 1710 km en 96 h con velocidad promedio de 18 km/h. Pese a desarrollarse en

aguas abiertas del Océano Pacífico se aproximó a la Península de Baja California con fuertes vientos, alteraciones en el oleaje y afectación de las bandas nubosas sobre el territorio mexicano propiciando importantes precipitaciones en el occidente y el Noroeste. Berg (2013) reportó posición geográfica, velocidad de vientos y presión durante la evolución del CT (Tabla 1).

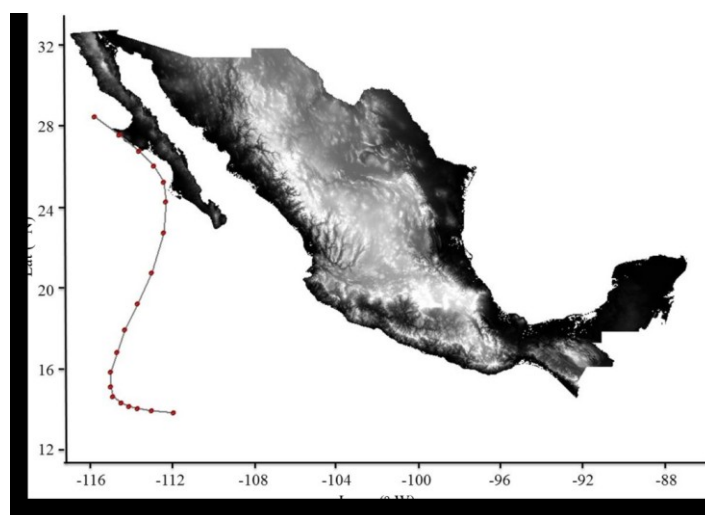


Figura 1. Trayectoria del ciclón tropical Paul

Tabla 1. Datos registrados del ciclón tropical Paul

Boletín	día	hora UTC	Lat (°N)	Lon (°W)	PB (mb)	VV (km/h)	Categoría
1	13	12:00	13,8	-112,0	1006,0	55,6	DT
2	13	18:00	13,9	-113,1	1005,0	64,8	TT
3	14	00:00	14,0	-113,8	1003,0	74,1	TT
4	14	06:00	14,1	-114,2	1001,0	83,3	TT
5	14	12:00	14,3	-114,6	1001,0	92,6	TT
6	14	18:00	14,6	-115,0	996,0	101,9	TT
7	15	00:00	15,1	-115,1	991,0	111,1	TT
8	15	06:00	15,8	-115,1	988,0	120,4	HI
9	15	12:00	16,8	-114,8	979,0	148,2	HI
10	15	18:00	17,9	-114,4	959,0	194,5	HIII
11	16	00:00	19,2	-113,8	960,0	185,2	HIII
12	16	06:00	20,7	-113,1	962,0	185,2	HIII
13	16	12:00	22,7	-112,5	971,0	157,4	HII
14	16	18:00	24,2	-114,4	982,0	129,6	HI
15	17	00:00	25,2	-112,5	988,0	101,9	TT
16	17	06:00	26,0	-113,0	990,0	74,1	Baja presión
17	17	12:00	26,7	-113,7	993,0	64,8	Baja presión
18	17	18:00	27,5	-114,7	995,0	64,8	Baja presión
19	18	00:00	28,4	-115,9	998,0	55,6	Baja presión
20	18	06:00					Disipación

## 2.2 Imágenes satelitales

En México el monitoreo de eventos meteorológicos y del clima en general, lo realiza el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Para dicha tarea utiliza información obtenida mediante teledetección en formato de ISD captadas mediante el satélite operacional ambiental geostacionario Este (GOES-13). El marco geográfico de las imágenes satelitales va de 14,1118° a 36,4768° de latitud Norte (Lat) y de -122,2590° a -79,0817° de longitud Oeste (Long).

El tamaño de cada ISD obtenida en canal infrarrojo (IR) está definido por 1280 pixeles de Long y 817 pixeles de Lat. Cada pixel adopta valores de brillo de 0 a 255, que corresponden a una resolución de 8 bits de acuerdo con su ND (Meza *et al.*, 2014). Son obtenidas en proyección

WGS84 y se les asigna una nomenclatura de 12 dígitos, aaaammddhhmm, que refiere a la fecha y hora de la toma (Gutiérrez-López y Arellano, 2010), su formato nativo es raw sin tratamiento digital y con extensión pcx (figura 2).

## 2.3 Estaciones Meteorológicas Automáticas

En México el SMN administra 187 EMA ubicadas en sitios estratégicos, las cuales monitorean permanentemente las condiciones meteorológicas del país. En el trabajo se consideraron siete EMA que registraron precipitación producto de la cobertura nubosa del CT Paul (tabla 2). Las EMA de estudio están ubicadas en la Región Hidrológica Sinaloa (RH10), las estaciones 1 a 4 en territorio del estado de Chihuahua, las estaciones 5 y 6 en el estado de Sinaloa y la estación 7 en el estado de Sonora (figura 3).

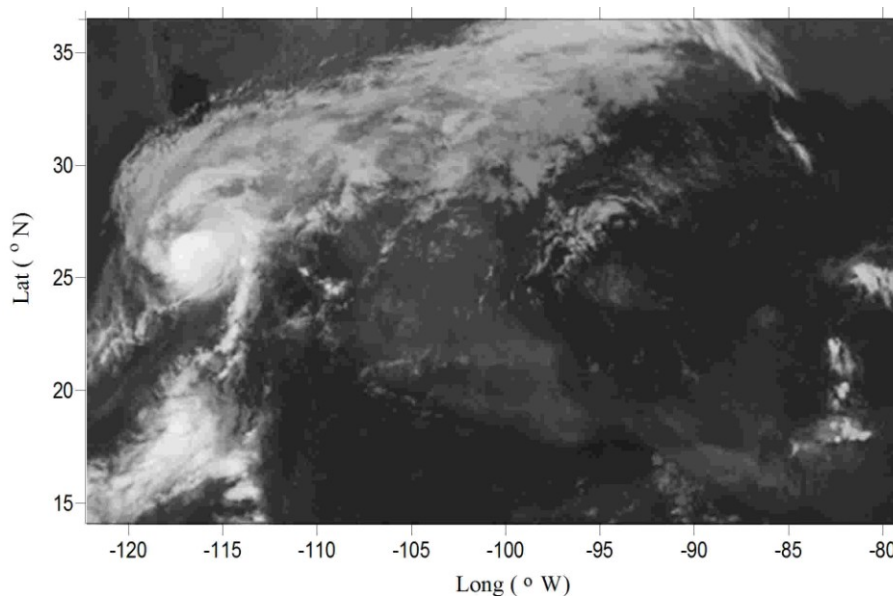


Figura 2. ISD 201210161345 del CT Paul

Tabla 2. EMA ubicadas en la zona de estudio

EMA	Nombre oficial	Lat (°N)	Long (°W)	Elevación (msnm)
1	Urique	27,216	-107,917	577
2	Chinipas	27,390	-108,536	431
3	Guachochi	26,813	-107,073	2390
4	Maguarichi	27,858	-107,994	1663
5	Obispo	24,251	-107,188	4
6	El Fuerte	26,411	-108,618	82
7	Álamos	27,022	-108,938	409

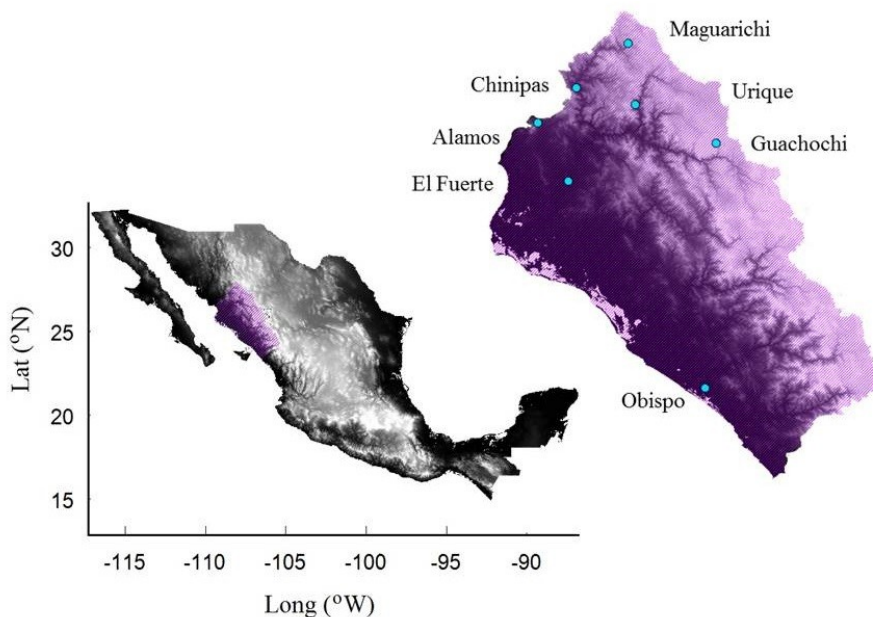


Figura 3. Ubicación de las EMA de estudio en la RH10

#### 2.4 Lectura de nivel digital

La lectura de ND en los píxeles de las ISD utilizando una escala de falso color, con un umbral mínimo para el valor digital 109 y máximo de 255, facilitó la realización del análisis visual de la información (Molina *et al.*,

2018a). Esto permite el estudio temporal y espacial de siete zonas de evolución geométrica durante un fenómeno meteorológico, en el caso de los ciclones tropicales (CT) auxilia en la rápida identificación de los núcleos tormentosos y el ojo del ciclón (figura 4).

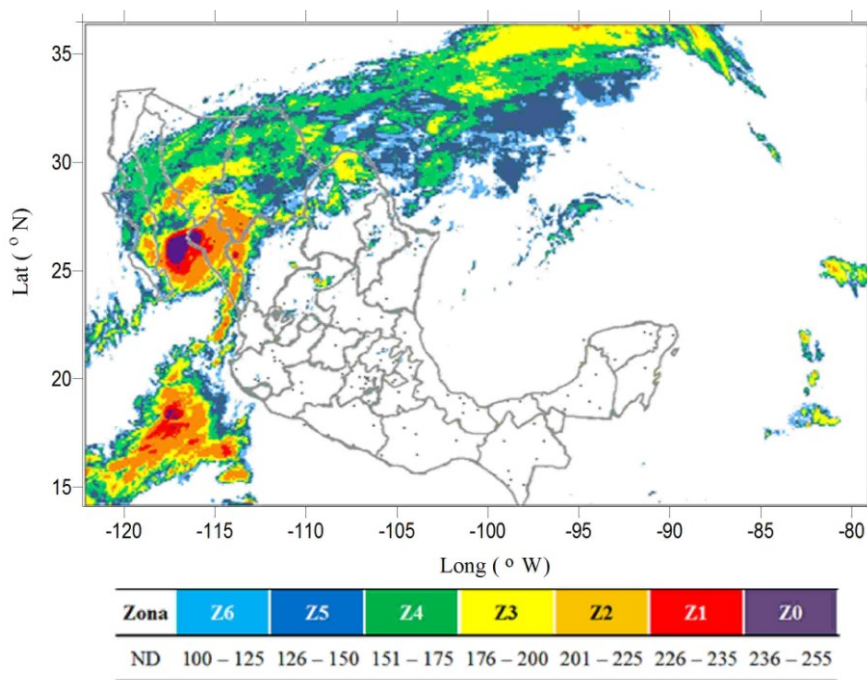


Figura 4. Imagen satelital 201210161345 del ciclón tropical Paul

La obtención de la magnitud del ND en los píxeles de las ISD, se llevó a cabo utilizando el script *Get\_info*® desarrollado en lenguaje *R* (Molina *et al.*, 2018b), la lectura se realiza de forma matricial considerando la posición geográfica de la EMA como pixel central (*P5*) para referenciar y obtener la lectura de los 8 píxeles vecinos, con lo cual se construye una matriz de análisis de 9 valores digitales (figura 5). Utilizando el valor de *P5* permanente de signo positivo se desarrollaron combinaciones en

12 grupos, generando en total 48 de combinaciones considerando un pixel previo y uno posterior a la ubicación (figura 6), asignándoles de manera alternada signo positivo y negativo. Este criterio es teniendo como base la geo-referenciación de la posición geográfica de la EMA respecto del pixel correspondiente en la ISD, de tal forma que sea permanente la relación entre ambas fuentes de información y se establece la incidencia de los píxeles vecinos en la estimación de la precipitación.

P1	P2	P3
P4	P5	P6
P7	P8	P9

Figura 5. Matriz de análisis para la precipitación del EMA

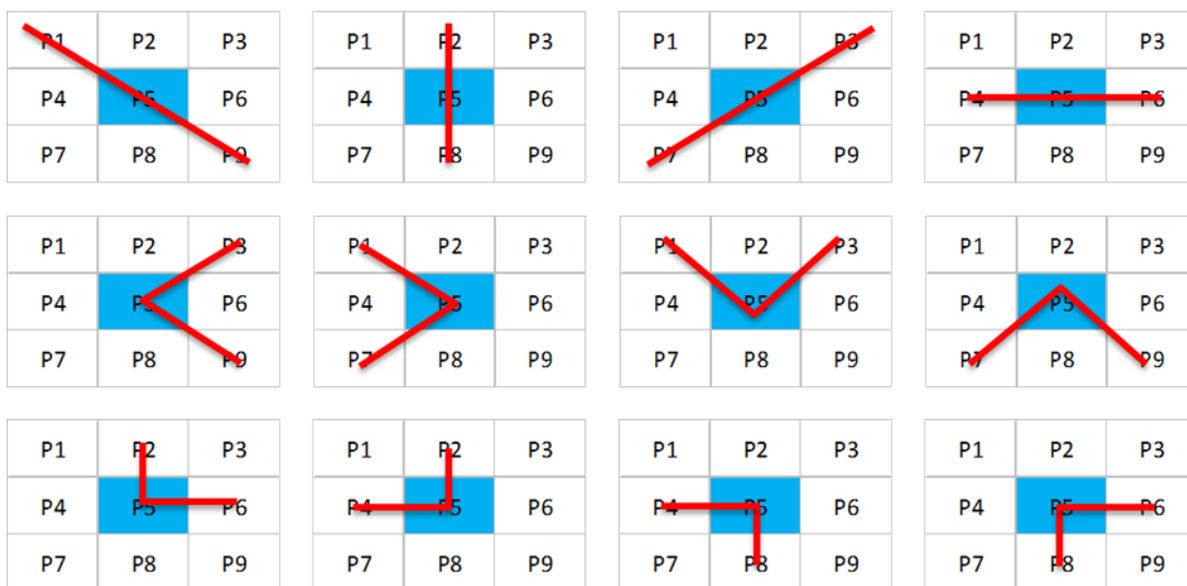


Figura 6. Grupos de píxeles de ND de la EMA

Se ejemplifican el primer grupo de combinaciones conformadas por los píxeles *P1* y

*P9* que definen una dirección diagonal descendente.

$$P_5 + P_1 + P_9 \tag{1}$$

$$P_5 - P_1 + P_9 \tag{2}$$

$$P_5 + P_1 - P_9 \tag{3}$$

$$P_5 - P_1 - P_9 \tag{4}$$

### 2.5 Homogenización de escalas temporales

Las ISD del GOES-13 tienen una resolución temporal de 15 min. Sin embargo, hay presencia de variación al momento en que los CT tienen direcciones francas hacia la plataforma continental. Por su parte el registro temporal de las EMA son datos promedio de lecturas registradas en cada una de las variables climatológicas en intervalos de 10 minutos. Para llevar a cabo la homogenización de ambas bases

de datos, se hizo una transformación de la precipitación registrada a 15 min, siendo posible contrastar directamente la información registrada en ISD durante el evento meteorológico (figura 7). Al llevar a cabo la transformación de resolución temporal se cumple que la lluvia acumulada ( $hp_{acum}$ ) se mantiene para el intervalo de estudio, aplicando la expresión para la precipitación media en la EMA ( $\overline{hp}$ ) en la resolución temporal original ( $\Delta t_{10}$ ) y la resolución temporal modificada ( $\Delta t_{15}$ ):

$$\sum_{i=1}^m (\overline{hp} * \Delta t_{10})_i = \sum_{j=1}^n (\overline{hp} * \Delta t_{15})_j \tag{5}$$

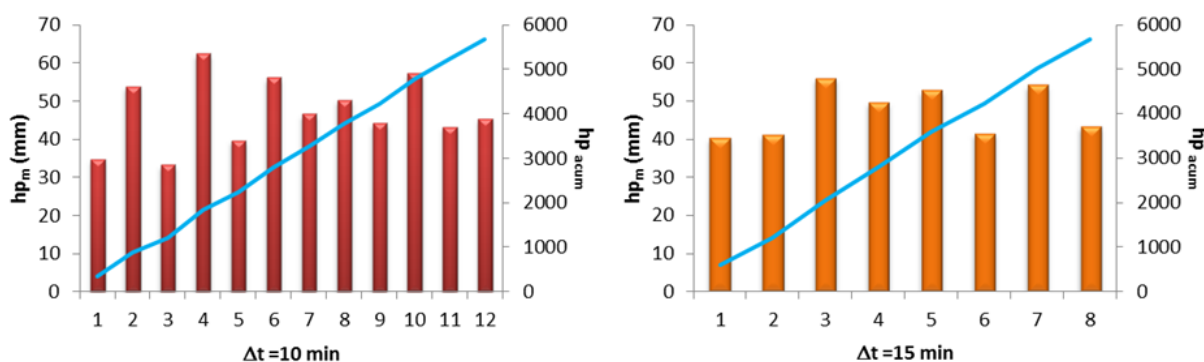


Figura 7. Transformación de la resolución temporal del registro en una EMA

### 2.6 Hidroestimador

La técnica Hidroestimador (HE) permite estimar precipitaciones empleando información satelital, desarrollada por Vicente *et al.* en 1998 en el Servicio Nacional Informático de Satélites Ambientales (NESDIS por sus siglas en inglés) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés). El

HE utiliza imágenes del GOES en banda infrarroja (IR) que cuentan con resolución espacial de 4 x 4 km, a partir de las cuales se puede aplicar la ley potencial (Ec. 6) obtenida mediante una regresión logarítmica a partir del análisis estadístico de lluvias instantáneas estimadas empleando un radar superficial y las temperaturas del tope de nube ( $T$ ):



$$R = 1.1183 \times 10^{11} \exp\left(-3.6382 \times 10^{-2} T^{1.2}\right) \quad (6)$$

En la ecuación 6  $R$  representa la tasa de lluvia estimada en mm/h,  $T$  es la temperatura del tope de las nubes en K que es función del brillo del pixel  $B$  en la imagen en ND. Se consideran dos condiciones a partir de un umbral en el nivel digital para su aplicación: para  $B > 176$  entonces  $T = 418 - B$ , para  $B \leq 176$  entonces  $T = 330 - (B/2)$ . La curva de regresión se corrigió inicialmente mediante los factores de humedad, gradiente de temperatura y tasa de crecimiento (Vicente *et al.*, 1998); además de los factores de orografía y paralaje (Vicente *et al.*, 2002).

### 2.7 Transformación de series temporales

Como primera etapa del proceso de acoplamiento se identifica el periodo oficial de monitoreo del CT Paul registrado en los boletines del SMN (tabla 1). A partir de ello se obtiene el registro pluviométrico de la EMA de

interés, del cual se define el intervalo de tiempo efectivo de lluvia registrado. Para dicho tiempo se definen la fecha y hora de las lecturas, con las cuales en el archivo de lecturas del ND se obtienen los valores de las nueve series temporales asociadas con los pixeles circundantes de la posición geográfica de la EMA.

Se obtuvieron la media y la desviación estándar de las diez series temporales definidas, con ello se normalizó y estandarizó cada uno de los elementos con sus parámetros respectivos. El proceso es una técnica multidisciplinar utilizada en el ajuste, adaptación y homologación de las mediciones, unificando los criterios de distintas fuentes cuando las variables no presentan las mismas unidades (García-Benítez y Adame-Martínez, 2017).

$$I_{\text{corregida}} = \frac{I_{a_i} - \bar{I}_a}{\rho_a} \quad (7)$$

En la ecuación 7  $I_{a_i}$  es cada dato de intensidad,  $\bar{I}_a$  es el valor medio de la intensidad y  $\rho_a$  es la desviación estándar de las intensidades del registro. A partir de lo cual se obtuvieron las 48 combinaciones mostradas (figura 4), seleccionándose aquella permite igualar o aproximar la serie de la EMA. Realizado el ATE se quita la estandarización y la normalización a los datos, con lo cual se contrasta la intensidad de la precipitación registrada en la superficie continental respecto de la intensidad de precipitación estimada utilizando la matriz de análisis.

### 2.8 Validación del acoplamiento temporal

Para llevar a cabo la comparación y la evaluación de la intensidad estimada empleando el HE y el método de acoplamiento temporal y espacial (ATE) propuesto, se emplearon los estadísticos puntuales: coeficiente de correlación ( $r$ ) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE).  $r$  establece el grado de asociación lineal existente entre la intensidad de precipitación acoplada ( $I_a$ ) y la intensidad de precipitación registrada ( $I_r$ ), considerando los valores medios de cada una de ellas ( $\bar{I}_a$ ) y ( $\bar{I}_r$ ) (Salio *et al.*, 2015; Hobouchian *et al.*, 2017). RMSE representa una medida del valor medio de los errores en las estimaciones para la intensidad (Su *et al.*, 2008; Hobouchian *et al.*, 2017).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (I_a - \bar{I}_a)(I_r - \bar{I}_r)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (I_a - \bar{I}_a)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (I_r - \bar{I}_r)^2}} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_a - I_r)^2}{N}} \quad (9)$$

### 3. RESULTADOS

Al situarse el CT Paul al Suroeste de la Península de Baja California durante el proceso de intensificación, alcanzó categoría III de acuerdo con la escala Saffir-Simpson, la formación nubosa se extendió principalmente en los estados de Sinaloa, Sonora y Chihuahua en el Norte de la República Mexicana. La magnitud de los ND de la nubosidad ocasionó lluvias de ligera a moderada intensidad para el periodo de

tiempo comprendido por el horario y fecha de los boletines.

Con la implementación del script “Get\_info”® se decodificó y llevó a cabo la lectura del ND en los pixeles que registraron el desarrollo y la evolución del CT Paul. Se aprecia en las ISD correspondientes a los boletines 11, 12, 13 y 14 emitidos por la NOAA el 16 de octubre de 2012 a las 00:00 a.m., 06:00 a.m., 12:00 p.m. y 18:00 p.m. respectivamente (figura 8).

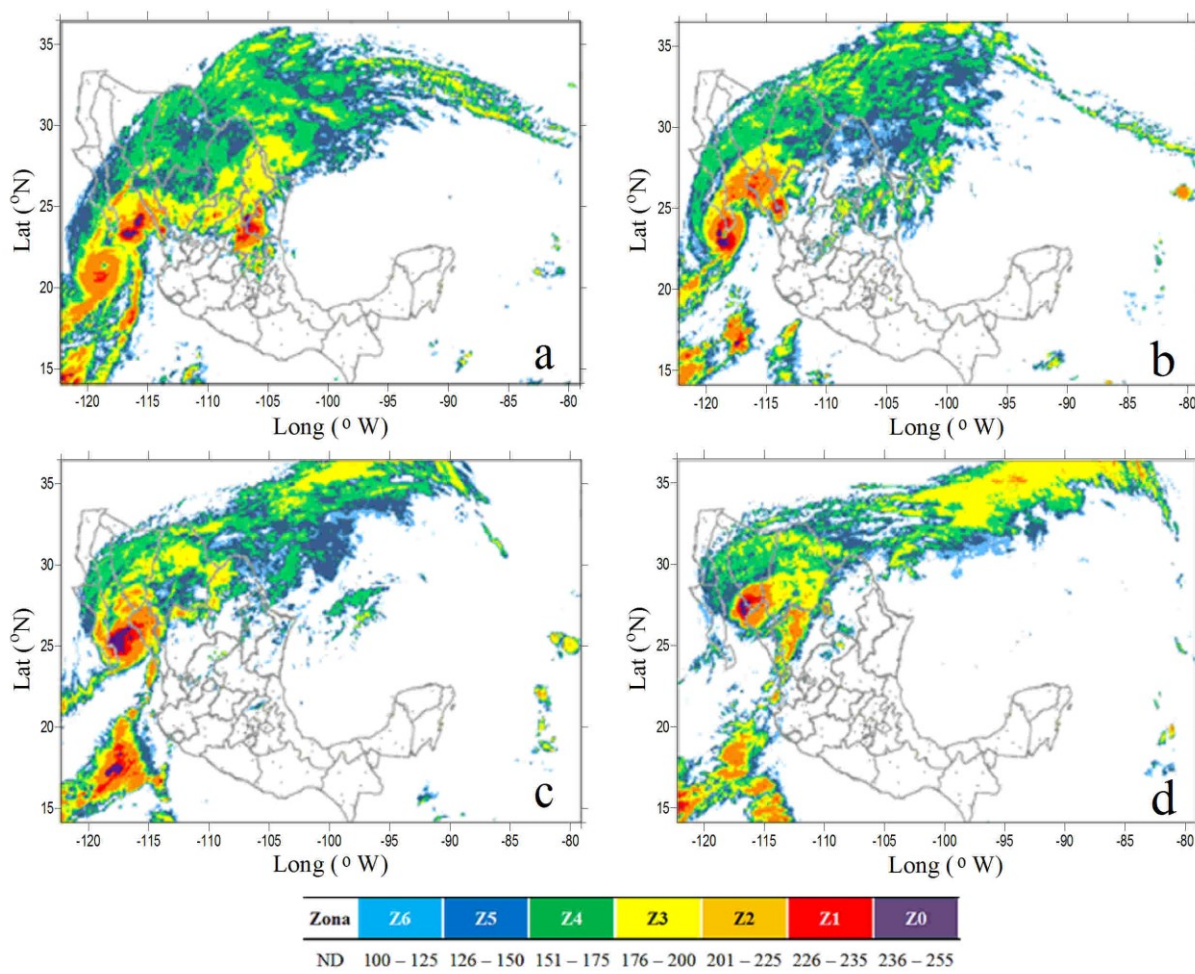


Figura 8. Boletines 11 (a), 12 (b), 13 (c) y 14 (d) emitidos por la NOAA

Se identificó el registro de la precipitación producto del evento meteorológico en la EMA Urique desde las 6:45 am del día 12 de octubre hasta las 15:45 pm del mismo día, cuya intensidad osciló de 3,0 a 5,0 mm /h con un máximo de 8.37 mm/h registrado a las 13:45

p.m. Como se mencionó previamente las lecturas de la EMA, corresponden a la magnitud promedio de las variables meteorológicas cada 10 min, por lo que modificó la escala temporal a 15 min (figura 9). Lo anterior para que exista concordancia con la resolución de las ISD.

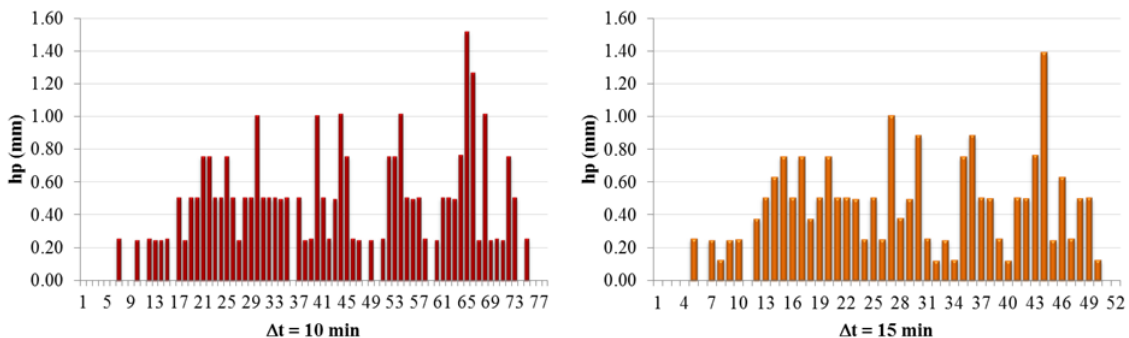


Figura 9. Modificación en la resolución temporal de la precipitación en la EMA Urique

La serie temporal que corresponde al pixel de la imagen satelital que está proyectado sobre la posición geográfica de la EMA Urique, P5, muestra una disminución en el valor inicial del ND pasando de 100 a 50. Este último valor se mantuvo constante, dicho comportamiento se modificó a partir de la lectura veintidós mostrándose un incremento hasta alcanzar una magnitud de 170 con un rápido descenso y nuevo incremento posterior. El comportamiento descrito derivado de la circulación atmosférica,

donde el brazo superior en la geometría del huracán se acerca al ojo disipándose y durante el flujo se reduce la nubosidad que genera la precipitación. Esto ocasiona el arrastre desde la parte final un núcleo de menor temperatura que da como resultado la máxima intensidad de precipitación registrada (figura 10). Los valores registrados en las series temporales de la tormenta para el ND e I fueron estandarizados empleando la ecuación 6, con lo cual ambas variables son adimensionales (figura 11).

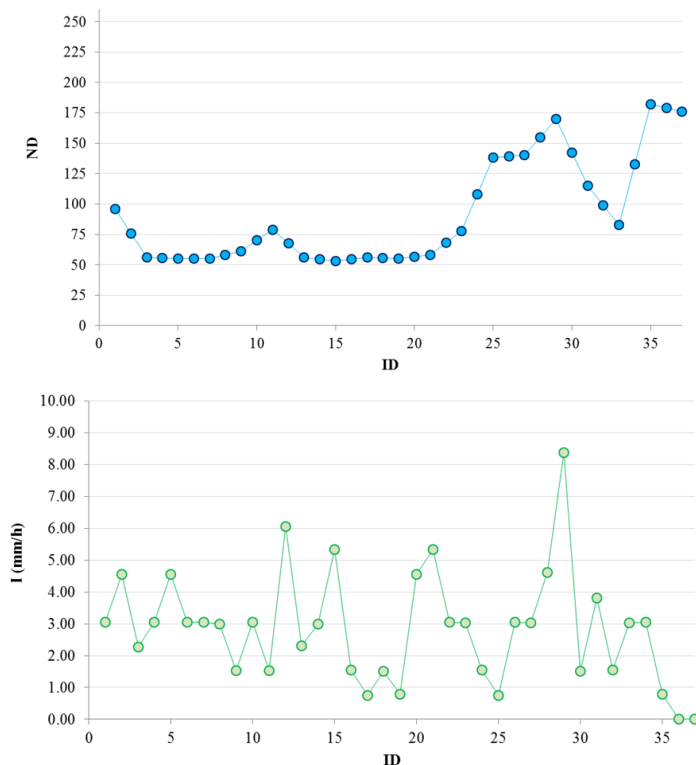


Figura 10. Registro del ND en el pixel central (arriba) e intensidad de lluvia (abajo) en la posición geográfica de la EMA Urique

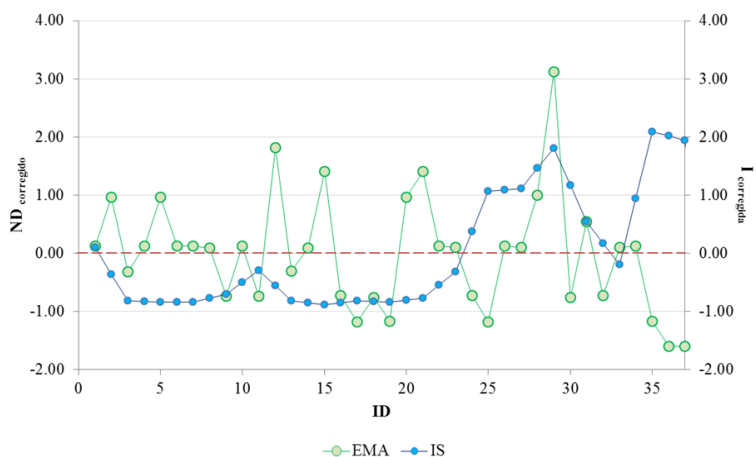


Figura 11. Series estandarizadas del pixel central en la ISD (azul) y la EMA (verde)

Empleando las series temporales estandarizadas del pixel central y los pixeles vecinos se determinan las 48 combinaciones para los 12 grupos posibles, seleccionándose para cada tiempo la combinación que permite el ATE respecto de la serie estandarizada de la

intensidad registrada en la EMA de estudio (figura 12). Una vez identificadas todas las combinaciones y con fines de verificar los criterios estadísticos del ATE, se des-estandarizan ambas series utilizando la registrada en la EMA (figura 13).

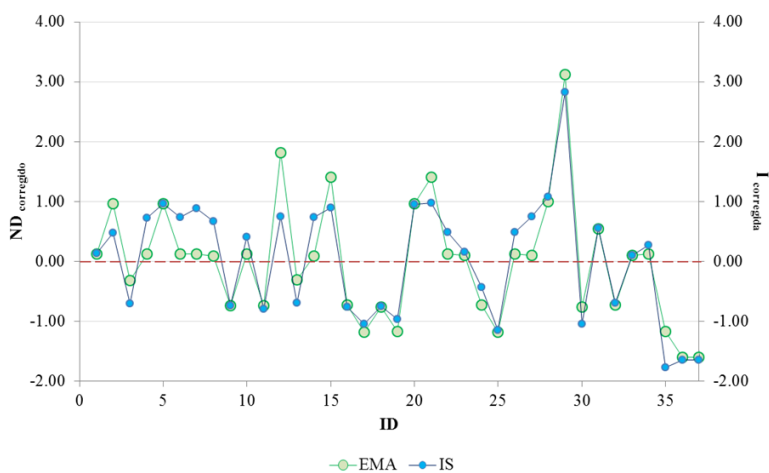


Figura 12. Acoplamiento de las series estandarizadas del pixel central y la EMA

La metodología descrita (figuras 10 a 13) se repitió para el resto de las EMA de estudio, se identificó dificultad para acoplar las intensidades máximas en el registro del CT, no así en intensidades medias o bajas (figura 14). Para los

9 ATE que corresponden a las estaciones de estudio, se evaluaron las ecuaciones 8 y 9, considerando la  $I_r$  respecto de las  $I_a$  mediante el HE y el AT (tabla 3).

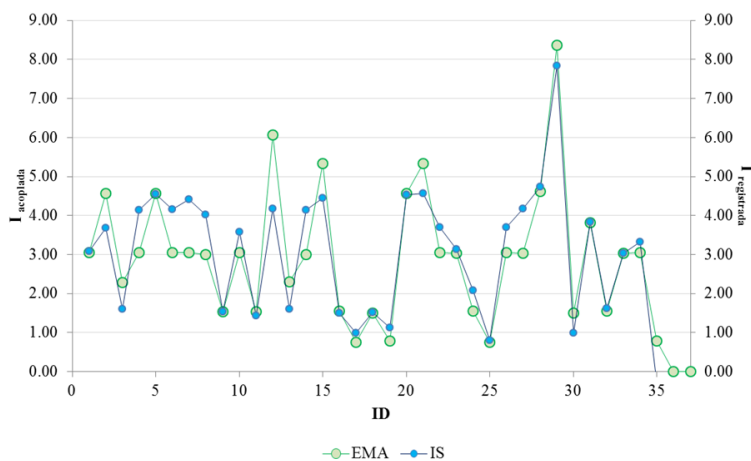


Figura 13. Des-estandarización de las series estandarizadas del pixel central y la EMA

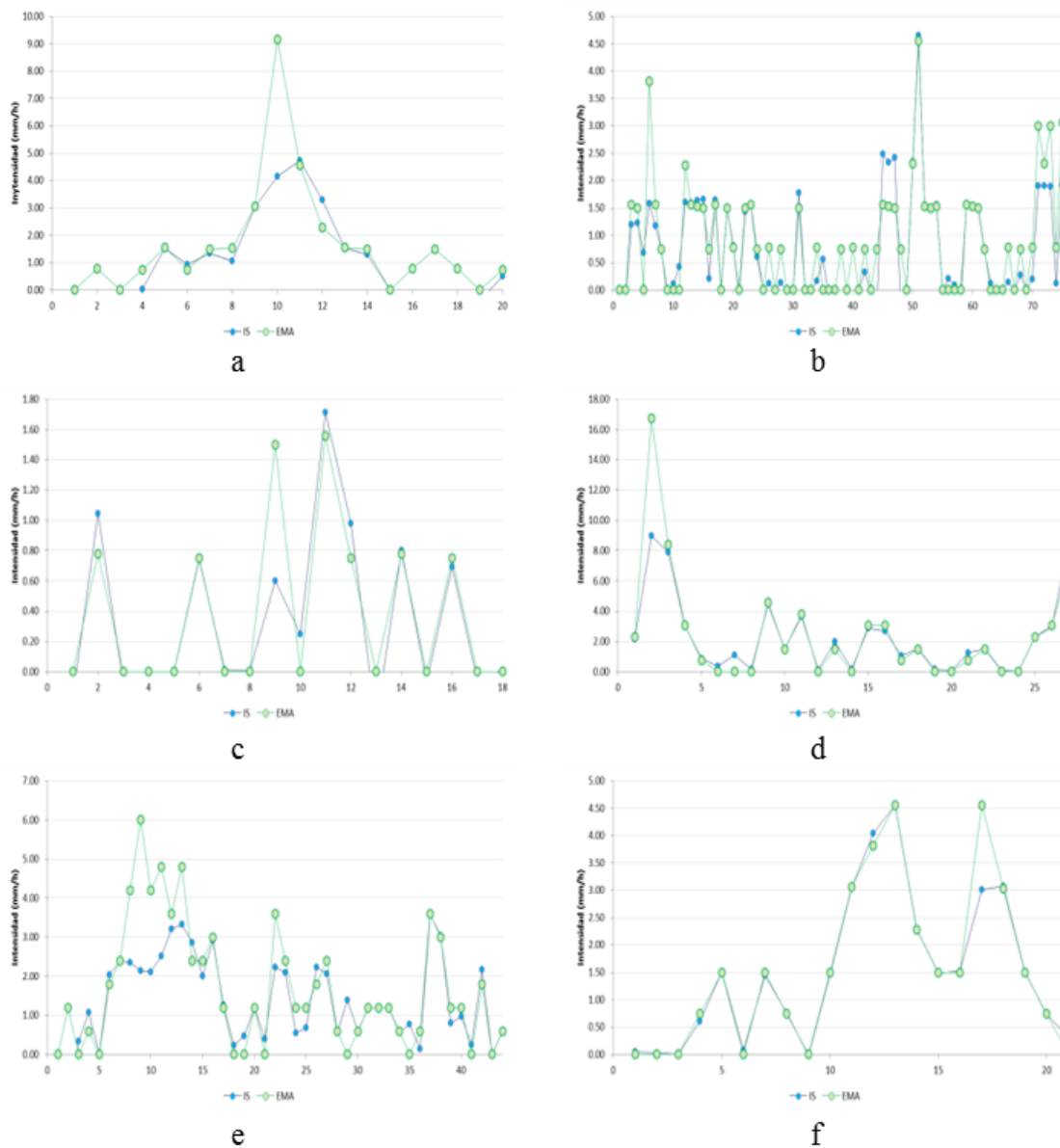


Figura 14. Acoplamiento espacial en la EMA (a) Chinipas, (b) Guachochi, (c) Maguarichi, (d) El obispo, (e) El fuerte y (f) Álamos durante el ciclón tropical Paul

Tabla 3. Validación estadística de las estimaciones con el HE y AT

EMA	r		RMSE	
	HE	ATE	HE	ATE
Urique	-0,26	<b>0,92</b>	3,31	<b>0,69</b>
Chinipas	-0,14	<b>0,80</b>	20,05	<b>1,38</b>
Guachochi	-0,07	<b>0,87</b>	1,35	<b>0,53</b>
Maguarichi	0,17	<b>0,89</b>	0,74	<b>0,26</b>
El obispo	-0,13	<b>0,92</b>	4,27	<b>1,55</b>
El fuerte	-0,18	<b>0,73</b>	2,28	<b>1,15</b>
Álamos	0,45	<b>0,97</b>	2,11	<b>0,35</b>

#### 4. DISCUSIÓN

Durante el desarrollo del CT Paul se observa en las ISD la rotación característica acompañada del ojo del huracán en la emisión de los boletines 8 a 14, durante los cuales se aproxima a la Península de Baja California, momento en el cual al establecer contacto con la plataforma terrestre se degrada y cambia de dirección alejándose del territorio mexicano. Durante este lapso temporal una importante formación nubosa que abarca la región norte de México se desplaza con una dirección Noreste-Suroeste. Al mismo tiempo una formación en espiral se desprende de la estructura central del núcleo que ingresa al país con dirección y sentido opuesto a la formación nubosa descrita previamente.

El código FISIRG13 dota de versatilidad la lectura y decodificación de ISD, incorporando a su estructura un listado en el que se definen los sitios de estudio. A partir del pixel central georreferenciado se determina una región, o vecindad, que abarca 25 datos con los que se revisa la máxima variabilidad en el desarrollo de la formación nubosa y que intervienen en la precipitación registrada por la EMA asociada con el pixel central. El código procesa el conjunto finito de ISD definidas por la duración de la tormenta de manera continua y simultáneamente se desarrollan y registran las lecturas del total del sitio de interés. Dichas lecturas corresponde con la escala de falso color establecido. Al extraer la información de la precipitación observada y llevar a cabo el cambio de resolución temporal, se observa que se mantiene el comportamiento (figura 9) sin

perder el origen y evolución. A continuación se procedió a verificar si existe relación de las series temporales que permiten el ATE respecto de las variables meteorológicas dirección de viento (DV) y dirección de ráfaga (DR), se determinó que en el caso de la estación Urique, el ATE tiene la restricción de comparar la combinación en la matriz de pixeles respecto de las *DV's* y *DR's* registradas en las EMA (figura 15). Al establecer la correlación del ángulo formado por la combinación de pixeles que permite el ATE, se observa que tiene un mejor desempeño respecto a *DR* sin que exista diferencia notoria respecto de *DV*. Lo anterior se debe a que la resolución temporal de la información permite una comparación discreta a 30 min lo que limita la metodología.

Al revisar cada uno de los ATE en las EMA de la zona de estudio, se pudo detectar que las estaciones ubicadas en elevaciones cercanas al nivel de mar tienen una mayor relación de DV respecto la combinación de pixeles para el correcto acoplamiento. En el caso de las estaciones situadas por encima de 400 msnm donde existe una mejor relación de DR con la combinación de pixeles (tabla 4). Los valores para r no son elevados, dado que únicamente se está haciendo la comparación en intervalos de 30 min donde se tiene coincidencia entre las ISD para las combinaciones de pixeles respecto de las lecturas de dirección en las EMA. El registro de las precipitaciones provocada por el CT Paul en la estación Urique muestra una tendencia tanto en DV y DR de NW a SE en su etapa media, teniendo al final una tendencia NW a NE.



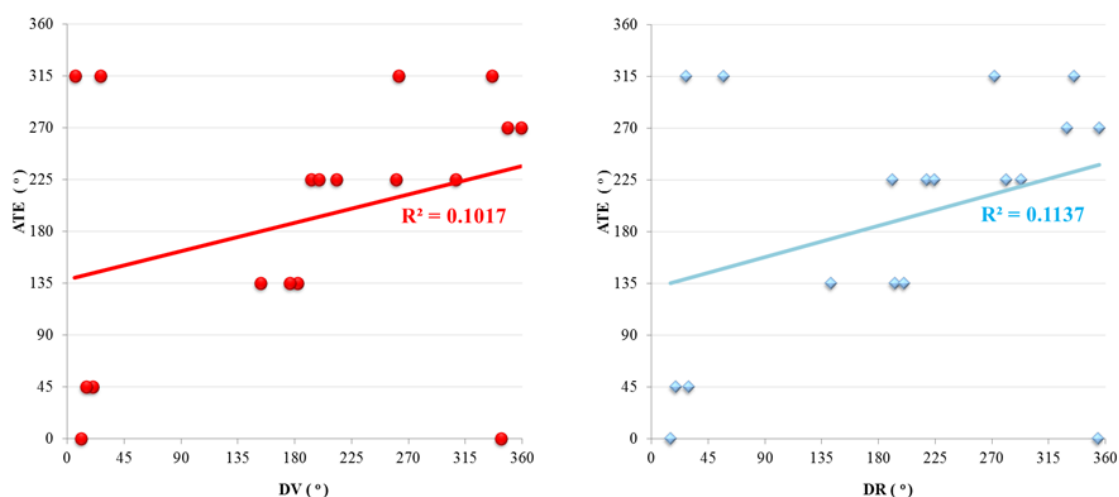


Figura 15. Correlación del ángulo de la combinación de pixeles solución con *DV* y *DR* en la EMA Urique

Tabla 4. Correlación de la combinación del ATE respecto *DV* y *DR*

EMA	r	
	DV	DR
Urique	0,1017	<b>0,1137</b>
Chinipas	0,5584	<b>0,6124</b>
Guachochi	0,0771	<b>0,1675</b>
Maguarichi	0,0514	<b>0,2151</b>
El obispo	<b>0,1013</b>	0,0873
El fuerte	<b>0,1487</b>	0,1292
Álamos	0,1157	<b>0,3996</b>

En la EMA Chinipas la tendencia general para *DV* varió ligeramente entre SE y SW, por su parte *DR* mantuvo la misma tendencia. La EMA Guachochi en su etapa inicial mostró una tendencia para *DV* que varió entre NE y SE manteniéndose esta tendencia durante su etapa media, mientras que en la etapa final se mostró una fuerza tendencia en la dirección SE. La *DR* mostró las mismas tendencias, con ligeras variaciones. La EMA Maguarichi a lo largo del desarrollo de la tormenta mostró tendencias para *DV* y *DR* predominantes al SE con ligeros cambios en la dirección SW. La EMA El Obispo a lo largo del desarrollo de la tormenta mostró para *DV* y *DR* tendencias dominantes en dirección SE. En la EMA Álamos *DV* y *DR* para su etapa inicial mostraron dirección con una tendencia SE, en su etapa media tuvo una desviación hacia la dirección NW y retomando la dirección SE en tu etapa final. Finalmente la

EMA El Fuerte en el desarrollo de la tormenta *DV* y *DR* tuvo dirección dominante SW.

En trabajos futuros se incorporará información de ISD captadas por el nuevo satélite geoestacionario, GOES16, el cual permite de manera natural comparar respecto de las variables meteorológicas registradas a nivel superficial, lo que establece un nuevo marco teórico y metodológico para mejorar las técnicas SPE a tiempo real.

## 5. CONCLUSIONES

La metodología propuesta es adecuada para realizar el ATE de la SPE empleando ISD respecto de las mediciones realizadas en las EMA, estableciéndose valores cercanos a 1.0 en el valor del coeficiente de correlación, Lo que hace válida la homogeneización entre ambas instrumentos de medición.

Al obtenerse la precipitación acumulada en el intervalo de la tormenta se aprecia que no existe pérdida de información, con lo cual se valida el método, siendo útil para resolver la problemática del ATE de la información, que es fundamental en distintos modelos meteorológicos y climatológicos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la información otorgada por el área de percepción remota del Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua. De igual manera agradecemos a los comentarios y sugerencias recibidas por parte de los revisores, los cuales ayudaron a mejorar y precisar la información en el artículo.

## REFERENCIAS

- Ajaaj, A. A., A. K. Mishra & A. A. Khan. (2015). Comparison of BIAS correction techniques for GPCP rainfall data in semi-arid climate. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*: 30(6) 1659–1675.
- Ashouri, H., K. L. Hsu, S. Sorooshian, D. K. Braithwaite, K. R. Knapp, L. D. Cecil, B. R. Nelson & O. P. Prat. (2015). PERSIANN-CDR: Daily Precipitation Climate Data Record from Multisatellite Observations for Hydrological and Climate Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*: 96 69-83. [doi:10.1175/bams-d-13-00068.1](https://doi.org/10.1175/bams-d-13-00068.1)
- Ballari, D., E. Castro & L. Campozano. (2016). *Validation of satellite precipitation (TRMM 3B43) in Ecuadorian coastal plains, andean highlands and Amazonian rainforest*. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B8, pp. 305 – 311.
- Berg, R. (2013). *Hurricane Paul (EP162012) 13 – 17 October 2012*. Tropical Cyclone Report. National Hurricane Center. U.S.A.
- Bravo, L. C. (2012). *Reseña del huracán Paul del Océano Pacífico. Temporada 2012 de ciclones tropicales*. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. Gerencia de Meteorología y Climatología. Subgerencia de Pronóstico Meteorológico. México.
- Chubb, T. H., M. J. Manton, S. T. Siems & A. D. Peace. (2016). Evaluation of the AWAP daily precipitation spatial analysis with an independent gauge network in the Snowy Mountains, J. South. *Hemisphere Earth Syst. Sci.*: 66(1) 55–67.
- García-Benítez, M. & S. Adame-Martínez. (2017). Propuesta metodológica para evaluar la vulnerabilidad por ciclones tropicales en ciudades expuestas. *Quivera*: 19 (2) 35-58.
- Gutiérrez-Lopez, A. & Arellano, F. (2010). Estudio de tormentas tipo en la ciudad de Querétaro. *ciencia@uaq*: 3(1) 62–79.
- Hobouchian, M. P., P. Salio, Y. G. Skabar, D. Vila & R. Garreaud. (2017). Assessment of satellite precipitation estimates over the slopes of the subtropical Andes. *Atmospheric Research*: 190 43–54. [doi:10.1016/j.atmosres.2017.02.006](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.02.006)
- Martens, B., P. Cabus, I. De Jongh, & N. E. C. Verhoest. (2013). Merging weather radar observations 556 with ground-based measurements of rainfall using an adaptive multiquadric surface fitting algorithm. *Journal of Hydrology*: 500 84-96. [doi:10.1016/j.jhydrol.2013.07.011](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.07.011)
- Meza, M., L. Curiel, D. González & C. Álvarez. (2014). Imágenes satelitales y distribución espacial de la lluvia en el estado de Querétaro. Caso: Tormenta del 18 de agosto de 2014”. *Nthe*: 14. 21–29.

- Miao, C., H. Ashouri, k. L. Hsu, S. Sorooshian, & Q. Y. Duan. (2015). Evaluation of the PERSIANN-CDR daily rainfall estimates in capturing the behavior of extreme precipitation events over China, *J. Hydrometeorol.*: 6(3) 1387–1396. [doi:10.1175/jhm-d-14-0174.1](https://doi.org/10.1175/jhm-d-14-0174.1)
- Miao, C., Q. Sun, Q. Duan, & Y. Wang, (2016). Joint analysis of changes in temperature and precipitation on the loess plateau during the period 1961–2011. *Clim. Dyn.*: 47(9–10), 3221–3234. [doi:10.1007/s00382-016-3022-x](https://doi.org/10.1007/s00382-016-3022-x)
- Molina, J., J. Trejo & A. Gutiérrez. (2018a). Construcción automatizada de series temporales en estadísticos de fenómenos meteorológicos. *Nthe*: 24 1-10.
- Molina, J., J. Trejo & A. Gutiérrez. (2018b). Aplicación web para referenciar fenómenos meteorológicos en imágenes satelitales infrarrojas. *Nthe*: 24 84-90.
- Salio, P., M. P. Hobouchian, Y. G. Skabar & D. Vila. (2015). Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over Southern South America using a dense rain gauge network. *Atmospheric Research.*; 163 146–161. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.11.017>
- Satge, F., M. P. Bonnet, M. M. Gosset, J. Molina, W. H. Y. Lima, R. P. Zola, F. Timouk, & J. Garnier, (2016). Assessment of satellite rainfall products over the Andean plateau. *Atmos. Res.*: 167 1–14. [doi:10.1016/j.atmosres.2015.07.012](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.07.012)
- Shen, G. Y., N. C. Chen, W. Wang & Z. Q. Chen. (2018). High-resolution daily precipitation estimation data derived from Wuhan University Satellite and Gauge precipitation Collaborated Correction method (WHU-SGCC) in TIFF format. *PANGAEA*. [doi: 10.1594/PANGAEA.896615](https://doi.org/10.1594/PANGAEA.896615)
- Su, F., Y. Hong, & D. P. Lettenmaier. (2008). Evaluation of TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin. *J. Hydrometeorol.*: 9 (4) 622–640.
- Teutschbein, C. & J. Seibert. (2013). Is bias correction of regional climate model (RCM) simulations possible for non-stationary conditions?. *Hydrology and Earth System Sciences*: 17 (12) 5061–5077.
- Vicente, G. A., J. C. Davenport & R. A. Scofield. (2002). The role of orographic and parallax corrections on real time high resolution satellite rainfall estimation. *Int. J. Remote Sens.*; 23 221-230.
- Vicente, G. A., R. A. Scofield & W. P. Menzel. (1998). The operational GOES infrared rainfall estimation technique. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*: 79 1883-1898.
- Yang, Z., K. Hsu, S. Sorooshian, X. Xu, D. Braithwaite & K. M. J. Verbist. (2016). Bias adjustment of satellite-based precipitation estimation using gauge observations: A case study in Chile. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*: 121 3790-3806. [doi:10.1002/2015jd024540](https://doi.org/10.1002/2015jd024540)

## Nota Técnica

# Plataforma de Información Geográfica del Centro Internacional de Hidroinformática

### *Geographic Information Platform of the International Hydroinformatics Center*

Santiago Vera <sup>1\*</sup>, María Eugenia Alderete <sup>1</sup>

Recibido: 12/02/2018

Aceptado: 15/01/2019

\*Autor de correspondencia

## Resumen

La Plataforma de Información Geográfica fue diseñada por el Centro Internacional de Hidroinformática para proporcionar un mejor acceso a información geográfica (IG) de alta calidad entre los funcionarios de la Itaipu Binacional y otros colaboradores vinculados con la gestión de recursos hídricos. La plataforma conjuga un software libre y de código abierto estable y robusta con una interfaz amigable y moderna permitiendo a los usuarios utilizar e interactuar con datos espaciales en el ambiente de trabajo. La Plataforma de Información Geográfica tiene los siguientes objetivos: (1) organizar la información geográfica a través de una Infraestructura de Datos Espaciales (IDE), (2) disponer de la información geográfica a los usuarios interesados, (3) promover la interacción entre los diferentes usuarios de información geográfica. Algunas de las funcionalidades de la Plataforma de Información Geográfica son la carga de datos, metadatos, documentos y la creación de mapas. Los datos pueden ser visualizados y compartidos por los usuarios, dependiendo de las restricciones previamente establecidas. La creación de grupos de usuarios facilita el uso, la gestión y el control de calidad de datos de la plataforma. Una de las principales ventajas de la Plataforma de Información Geográfica es la flexibilidad con la que los desarrolladores de software pueden mejorar sus características y adaptarlas a las necesidades de los usuarios.

**Palabras clave:** Información geográfica, datos espaciales, software libre y de código abierto.

## Abstract

*The Geographic Information Platform was designed by the International Hydroinformatics Center to facilitate access to high-quality geographic information among Itaipu Binacional officials and other collaborators involved in water resources management. The platform combines a free and open source and robust software with a friendly and modern interface that allows users the use and interaction with spatial data in the work environment. The Geographic Information Platform has the following objectives: (1) organize geographic information through a Spatial Data Infrastructure (IDE), (2) make geographic information available to interested users, (3) promote interaction between different users of geographic information. Some of the functionalities of the Geographic Information Platform are loading data, metadata, documents and creating maps. The data can be visualized and shared by users, depending on the restrictions established. The creation of user groups facilitates the use, management and quality control of the platform's data. One of the main advantages of the Geographic Information Platform is the flexibility with software developers can improve their characteristics and adapt them to the needs of users.*

**Keywords:** *Geographic information, spatial data, free and open source software.*

1 Centro Internacional de Hidroinformática, Itaipu Binacional-Unesco, Paraguay, veraaqui@itaipu.gov.py ; alcormar@itaipu.gov.py

## 1. INTRODUCCIÓN

En el pasado, la colecta, provisión y utilización de la información geográfica (IG) era un campo de interés exclusivo de ciertas instituciones gubernamentales. Hoy en día, esta tarea es realizada por un sinnúmero de instituciones para fines de provisión de servicios públicos, científicos, comerciales, etc. Además, la ciudadanía en general ha pasado a ser un actor clave como usuario de IG, pasando a utilizarla regularmente a través de software de navegación hasta llegar a ser proveedor de información a través de plataformas como *OpenStreetMap*. Debido a esto, muchos países cuentan con información accesible, completa y a tiempo real sobre su territorio (Paudyal *et al.*, 2009).

Los términos “información geográfica”, “información espacial”, “datos espaciales”, “datos geográficos” son utilizados como sinónimos, en este artículo adoptaremos el término “información geográfica” (IG). La IG es relevante porque conjuga información relativa a la ubicación en la tierra con características biofísicas, sociales y económicas, siendo un insumo directo en la planificación, la toma de decisiones, las políticas públicas, la gestión ambiental, la preparación ante emergencias, la creación de nuevos productos, la movilidad y la participación comunitaria (Welle, 2009).

Pese al gran avance en la diseminación de la IG y el desarrollo de los sistemas de IG, se han detectado deficiencias en los canales de compartición y publicación de IG entre diferentes instituciones e inclusive en el interior de las mismas, ocurre que la IG se encuentra diseminada en diferentes áreas, se desconoce la forma en que fueron generados o no se encuentran accesibles. Estos procesos repercuten en una alta demanda de recursos, duplicación de tareas y generan desconfianza sobre la calidad de la IG. Ante esta situación, han surgido diferentes iniciativas en todo el mundo que alientan el uso de Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) con el fin de mejorar el uso de la IG.

La iniciativa INSPIRE, es una de las directiva supranacionales más relevantes, su propósito es hacer disponible la IG concertada y de calidad de forma que se permita la formulación,

implementación, monitorización y evaluación de las políticas de impacto o de dimensión territorial de la Unión Europea. Infraestructura de datos espaciales de España (Inspire-Europeo, 2007).

Según Bernabé *et al.*, (2012) una infraestructura de información geográfica o infraestructura de datos espaciales (IDE), es una herramienta que hace posible el intercambio y compatibilización de la IG a través especificaciones técnicas comunes y acciones coordinadas de recolección y mantenimiento de datos.

El *Global Spatial Data Infrastructure Association Cookbook* (Nebert, 2004), se refiere a una IDE como el conjunto de tecnologías, políticas y acuerdos instituciones que facilitan la disponibilidad y acceso a IG, promoviendo un marco para optimizar la creación, mantenimiento y distribución de la IG a diferentes niveles organizativos, involucrando instituciones privadas y públicas. Igualmente la IDE es descrita como un concepto dinámico, jerárquico y multidisciplinario que envuelve políticas, competencias organizacionales, datos, tecnología, estándares, mecanismos de entrega y recursos humanos (Paudyal *et al.*, 2009). También es posible definir a una IDE como un portal donde diferentes actores pueden acceder, usar, intercambiar IG para lograr el bienestar social, económico y ambiental (Paudyal *et al.*, 2009).

En la actualidad, se encuentran disponibles diversos tipos de IDEs, algunos son de ámbito local como las IDEs municipales (Rio de Janeiro a través del Sistema Nacional de Informaciones Urbanas), otras son a nivel nacional (Infraestructura de Datos Espaciales de España, Infraestructura Nacional de Datos Espaciales de Brasil, Infraestructura de Datos Espaciales de Canadá), otras son creadas a nivel mundial para dar una respuesta ante emergencias, como el Programa Mundial de Alimentos.

También se han desarrollado IDEs en base a una temática específica, un ejemplo de ellos es el Sistema de Red de Información sobre el Agua desarrollado por el Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO, esta IDE contiene información a escala mundial relacionada con

ecohidrología, agua subterránea, los objetivos de desarrollo sostenible, educación, asentamientos, calidad, riesgos y escasez. El objetivo del sistema es servir de referencia mundial en el diseño y gestión de funciones de apoyo para la toma de decisiones, que contribuyan a mejorar la gobernanza de los recursos hídricos y asistir a los estados miembros en el monitoreo implementación del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 para "garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos" (ODS6) Programa Hidrológico Internacional (UNESCO, 2018).

En el ámbito de las cuencas hidrográficas, se ha identificado el proyecto SDIGER, un proyecto piloto para la implementación de una IDE, financiado por la Comisión Europea en los años 2006-2008. El proyecto consistió en el desarrollo de una IDE para permitir el acceso a IG relativa a la Directiva Marco del Agua, en el marco de un escenario transfronterizo, envolviendo a dos países (Francia y España) y dos cuencas hidrográficas (Zaragoza-Soria *et al.*, 2007).

La mayoría de los fenómenos hidrológicos y climáticos que ocurren en un territorio, sobrepasan las fronteras políticas y administrativas de los municipios, departamentos y naciones. Disponer de IG actualizada y homogénea es clave para la toma de decisiones eficaces en el marco de la gestión integrada de los recursos hídricos. La gestión integrada de los recursos hídricos se caracteriza por ser multidisciplinaria y por requerir participación multinivel, es decir, por un lado es necesaria información de aspectos ambientales, sociales y económicos y por otro lado, demanda información a nivel local, nacional y regional (Bernabé *et al.*, 2012).

## 2. METODOLOGÍA

La Plataforma de Información Geográfica fue desarrollada por el Centro Internacional de Hidroinformática para mejorar el acceso a la información geográfica entre los usuarios de la Itaipu Binacional y otros actores claves en la gestión de los recursos hídricos de la cuenca del embalse.

La Plataforma de Información Geográfica tiene los siguientes objetivos:

1. Organizar la información geográfica a través de una Infraestructura de Datos Espaciales (IDE).
2. Que los usuarios interesados dispongan de la información geográfica.
3. Promover la interacción entre los diferentes usuarios de información geográfica.

Los componentes principales de la Plataforma de Información Geográfica son: datos, tecnologías de acceso, metadatos, estándares, esquema organizativo y usuarios.

### 2.1 Datos

Son los recursos que se ponen a disposición de los usuarios con las restricciones de uso que decida su propietario, los tipos de datos que se encuentran en la plataforma son los siguientes:

- *Capas*: las capas son un recurso publicado que representa una fuente de datos espaciales *raster* (información presentada a través de una matriz de celdas) o vectoriales (información representada a través de puntos, líneas y polígonos).
- *Mapas*: los mapas se componen de varias capas y sus estilos. Las capas pueden ser capas locales en la Plataforma de Información Geográfica o capas remotas servidas desde otros servidores web.
- *Documentos*: los documentos pueden ser archivos reales o enlaces a otros documentos en línea y pueden estar asociados a una capa o un mapa.

### 2.2 Tecnologías de acceso

Las tecnologías son lo que hacen visible la IDE, a través de los portales, los datos ingresan a esta haciendo posible la búsqueda, acceso y exploración. El catálogo permite al usuario navegar de forma eficaz por la información contenida en una IDE.

La IDE se basa en el modelo de arquitectura informática denominado cliente-servidor. Esta tecnología es la que generalmente utilizan las

aplicaciones de internet-intranet, donde un software llamado genéricamente cliente, que funciona en un ordenador local, se comunica y realiza una petición a un ordenador remoto que le responde con la información o el servicio solicitado. Un único servidor sirve a una multitud de clientes, ahorrando a cada uno de ellos problema de tener la información almacenada localmente y verse obligado a actualizarla y gestionarla.

La plataforma de Información Geográfica se basa en *GeoNode*, una aplicación web y una plataforma para el desarrollo de sistemas de información geográfica y la implantación de una IDE. El portal permite gestionar IG a través de la web, está diseñado para permitir el acceso a la base de datos georreferenciadas, productos cartográficos y metadatos relacionados de diversas fuentes. Su principal característica es el uso de un *software* libre, lo que permite mejorar sus características y adaptarlas a las necesidades de los usuarios (Geonode, 2018).

### 2.3 Metadatos

Los metadatos son las descripciones de los datos y servicios disponibles, permitiendo al usuario tener información sobre el objetivo, la calidad, actualidad, disponibilidad, restricciones, etc., de la IG. Los metadatos permiten que la IG sea interoperable y pueda ser compartida entre diferentes sistemas (Luaces *et al.*, 2016).

Los metadatos de la plataforma son los siguientes:

- *Identificación*: título, resumen, fecha de publicación, tipo, categoría, regiones.
- *Dueño*: nombre, correo electrónico, posición, organización, ubicación, voz, fax.
- *Información*: imagen de identificación, resolución especial, sistema de proyección.
- *Características*: propósito, idioma, información adicional.
- *Punto de contacto*: nombre, correo electrónico, posición, organización, ubicación, voz, fax.
- *Referencias*: enlace en línea, página de metadatos.

- *Autor del metadatos*: nombre, correo electrónico, posición, organización, ubicación, voz, fax.

### 2.4 Estándares

Para asegurar el buen funcionamiento de una IDE, es indispensable el uso de estándares, estos posibilitan la interoperabilidad de la plataforma.

El estándar de metadatos geográfico adoptado se basa en la norma internacional ISO 19115:2003 *Geographic Information-Metadata*. Esta norma presenta la estructura y terminología que describe la IG y garantiza que la información obligatoria para los criterios de búsqueda se cumpla conforme a los protocolos internacionales de búsqueda y recuperación de información. ISO 19119:2005. La norma ISO 19115 es extensa, por lo tanto se seleccionaron aquellos elementos que conforman un perfil de metadatos. Este perfil de metadatos incluye los elementos de mayor importancia en el ámbito de aplicación de la IDE (Luaces *et al.*, 2016).

Los servicios de la plataforma utilizan estándares abiertos aprobados por el *Open Geospatial Consortium*. En particular se utilizan los siguientes estándares:

- WMS (*Web Map Service*) para acceder mapas
- WFS (*Web Feature Service*) para acceder a datos de vectores,
- WCS (*Web Coverage Service*) para acceder a datos de trama o raster.
- WMC (*Web Map Context Documents*) se utiliza para el intercambio de mapas.

### 2.5 Esquema organizativo

Las distintas áreas que generan IG dentro de la Itaipu Binacional fueron identificadas, cada área ha designado a un responsable de suministrar y actualizar la Plataforma de Información Geográfica con la adecuada frecuencia.

El Centro Internacional de Hidroinformática es el encargado de coordinar y mantener la Plataforma de Información geográfica actualizada.



## 2.6 Usuarios

Los usuarios son los pilares de la Plataforma de Información Geográfica, ya que son quienes utilizan la herramienta y aseguran su mantenimiento y evolución. Los usuarios de la plataforma son colaboradores de la Itaipu Binacional y usuarios de otras instituciones vinculadas a la gestión de los recursos hídricos de la cuenca como universidades, centros de investigación, municipalidades, organismos no gubernamentales y personas individuales.

La plataforma de IG, clasifica a los usuarios según su perfil en:

- *Usuario temporal*: usuario no registrado que visita la plataforma y la utiliza como un visor web.
- *Usuario no editor*: usuario registrado que accede a la plataforma, puede descargar recursos.
- *Usuario editor*: usuario registrado que accede a la plataforma, puede descargar y suministrar recursos.
- *Usuario gestor*: usuario que gestiona los usuarios y recursos de la IDE.
- *Administrador*: responsable de mantener la infraestructura y dar soporte técnico a los restantes usuarios.

## 2.7 Funcionalidades de la plataforma

La plataforma permite la visualización de una lista con todas las capas, mapas y documentos disponibles, cada recurso cuenta con sus metadatos, así como información sobre la cantidad de visualizaciones que tuvo cada recurso, la cantidad de veces que fue compartido, su calificación promedio y la posibilidad de crear mapas a partir de las capas.

Otras de las funcionalidades de la Plataforma de Información son la carga de datos, metadatos, documentos y la creación de mapas. Los datos pueden ser visualizados y compartidos por los usuarios, dependiendo de las restricciones previamente establecidas. La creación de grupos de usuarios facilita el uso, la gestión y el control de calidad de datos de la plataforma.

## 3. RESULTADOS

La Plataforma de Información Geográfica fue presentada a las altas partes como una herramienta para la concreción de los objetivos estratégicos de la Itaipu Binacional. Luego, funcionarios de distintas áreas fueron capacitados a través de los talleres básico y avanzado y se designaron responsables de actualizar los recursos de cada área. En conjunto, se fijaron lineamientos para los metadatos con el fin de armonizar la información y asegurar una rápida comprensión por parte de los usuarios.

Actualmente, la Plataforma de Información Geográfica permite el acceso a una amplia gama de IG relacionada con la gestión de los recursos hídricos. Las capas disponibles están en formato vectorial o *raster* y se distribuyen en 14 categorías: agricultura y ganadería, agua, ambiente, biota, catastro, cobertura terrestre, economía, elevación, estructura, geociencia, límites, localización, sociedad, transporte. La extensión geográfica de las capas disponibles es variable, dependiendo de la fuente específica de cada conjunto de datos. Están disponibles capas que cubren toda la región de América del Sur (por ejemplo, cursos de agua de América del Sur, de tipo vectorial) y una gran cantidad de capas locales, que se refieren a áreas específicas (por ejemplo, curvas de nivel de Itaipu Binacional). Cada capa cuenta con información sobre los metadatos, atributos y las opciones de compartir, puntuar y comentar.

Combinando las capas, se puede confeccionar mapas interactivos, gestionar estilos, medir, acercar o alejar el mapa y agregar leyendas. La plataforma utiliza como lienzo, las imágenes de *Google Satellite* y *OpenStreetMap*.

La plataforma pone a disposición documentos de tipo texto y mapas estáticos. Los documentos de tipo texto, en su mayoría son informes a cerca de actividades de monitoreo de calidad de agua. Los mapas, por su parte, corresponden a temas relacionados con modelados 3D en cuencas, mapas de batimetría, altimetría, inundación, planificación territorial, etc.

Otra funcionalidad adicional de la plataforma de IG es la posibilidad de descargar datos de la

plataforma Yrato, una plataforma para el monitoreo hidrológico en tiempo casi real de los principales ríos del Paraguay. En la sección “Yrato” es posible descargar imágenes (*raster*) de precipitación del proyecto GPM (Medición Global de la precipitación, por sus siglas en

inglés) en la cuenca del Plata, con un retraso de cinco horas. Además, es posible descargar datos de calidad y altura de agua de diversos puntos de los ríos Paraná, Paraguay (ríos transfronterizos) y el lago Ypacarai (Paraguay). Las figuras 1 a 4 muestran el detalle de la plataforma.

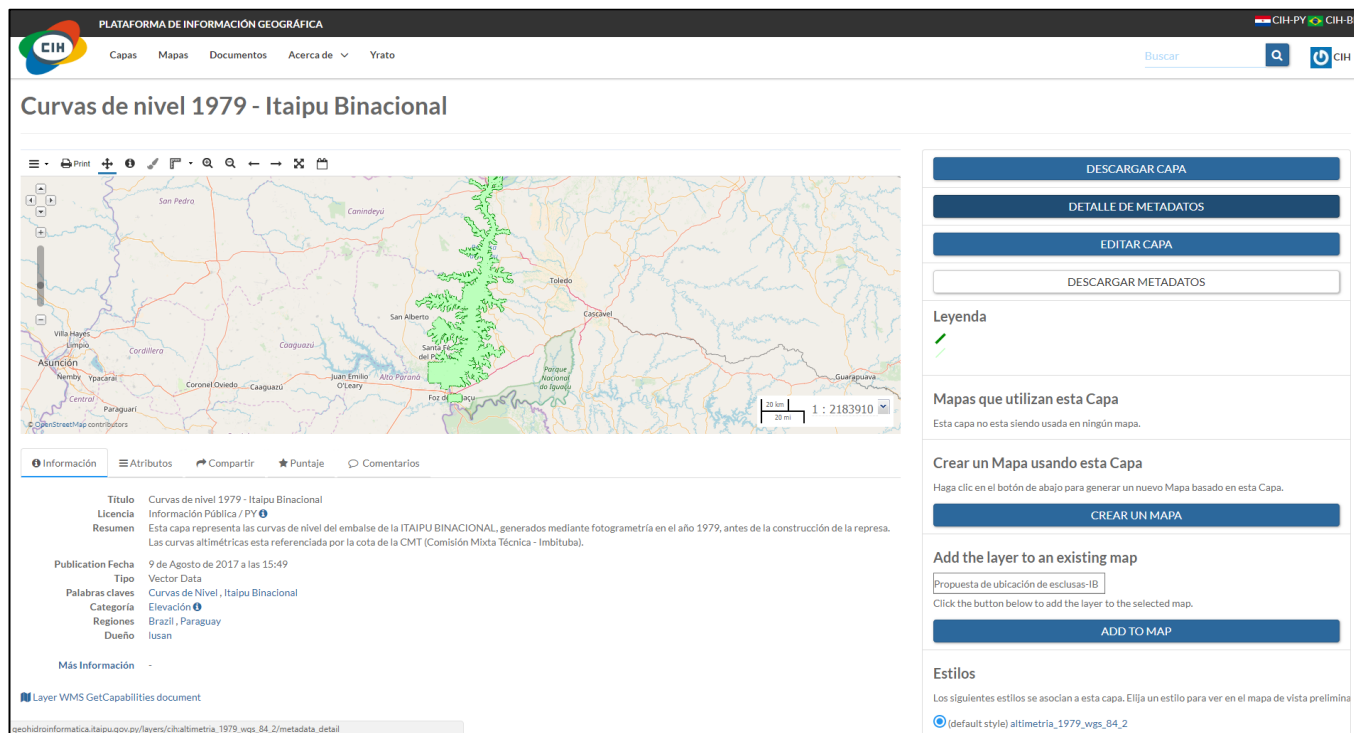


Figura 1. Capa en la Plataforma de Información Geográfica



Figura 2. Mapa dinámico en la Plataforma de Información Geográfica

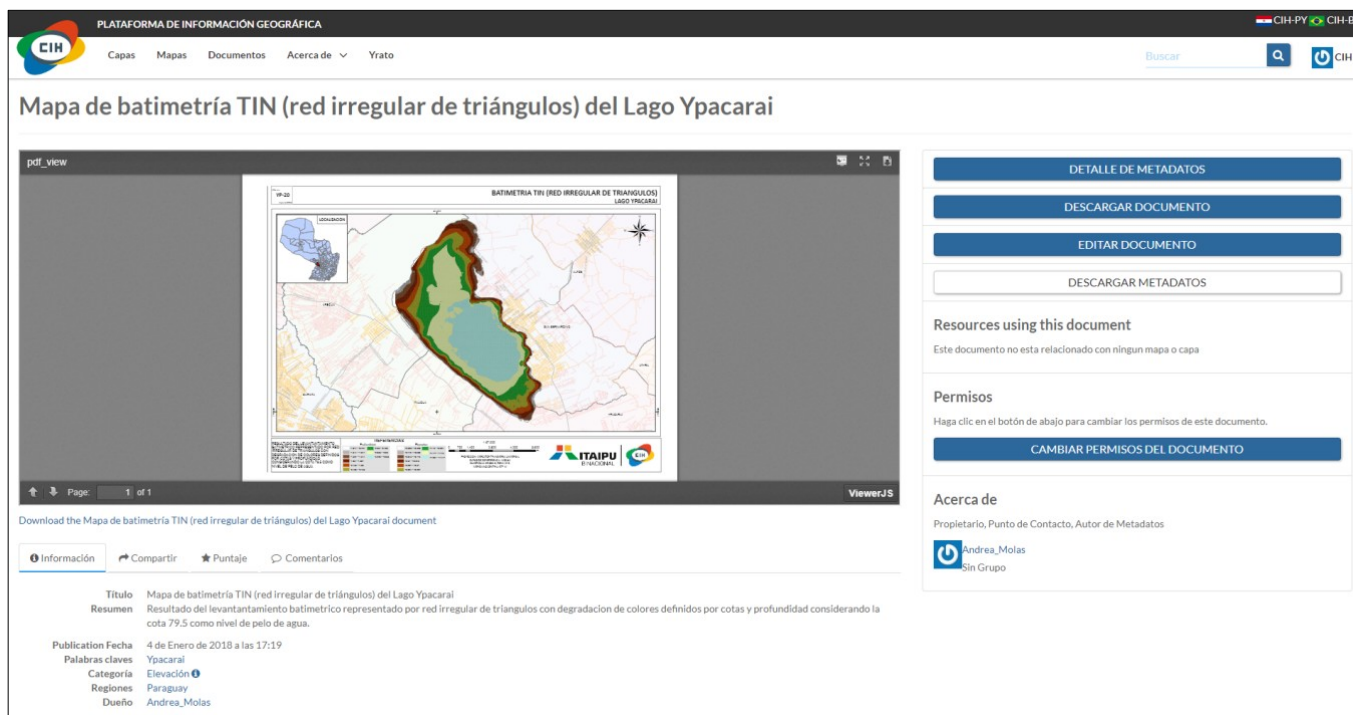


Figura 3. Documento de tipo mapa en la Plataforma de Información Geográfica

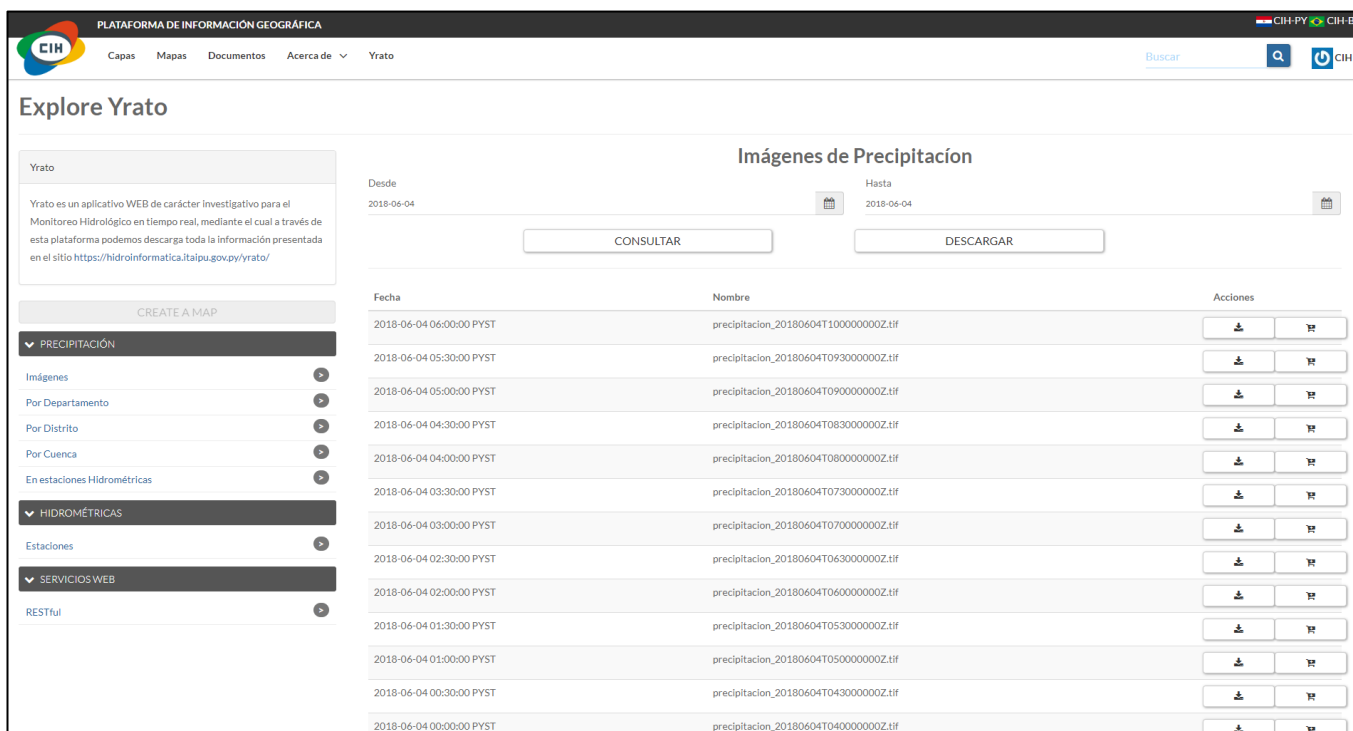


Figura 4. Opción de descarga de datos de “Yrato” en la Plataforma de Información Geográfica

#### 4. CONCLUSIONES

La plataforma de Información Geográfica permite a los usuarios de la Itaipu Binacional y sus colaboradores externos acceder a IG de manera rápida y confiable para la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del embalse.

La falta de cultura informacional, la falta de visiones globales, el rechazo a las nuevas tecnologías, la falta de coordinación y el desconocimiento del potencial de la IG han sido identificadas como obstáculos en la implantación de la IDE.

Para la implantación exitosa de una IDE, se identificaron ciertas características necesarias: (1) responder a las necesidades reales de los usuarios de la IG (2) contar con la infraestructura necesaria (*software y hardware*) y personal para mantenerlos y actualizarlos según las necesidades de los usuarios, (3) contar con un esquema organizativo eficaz en donde se identifique claramente a los responsables de cada actividad y que éstos le dediquen el tiempo suficiente para cumplir con los objetivos. (Luaces, 2016).

#### REFERENCIAS

- Bernabé, M., López-Vázquez, C. (2012). *Fundamentos de la Infraestructura de Datos Espaciales*. UPM Press, 1ª Ed. Madrid, España.
- Geonode. *Open Source Geospatial Content Management System*. (2018). 18/05/2018. <http://geonode.org/>
- Inspire-Europeo. (2007). *Infraestructura de datos espaciales de España*. 2018. 18/05/2018. <http://www.idee.es/europeo-inspire>
- Luaces, M., Olaya, V., Fonts, O. (2016). *Sistemas de Información Geográfica*. 15/05/2018. <http://volaya.github.io/libro-sig/index.html>
- Nebert, D. (2004). *The SDI Cookbook. Global Spatial Data Infrastructure*. 18/05/2018. [http://gsdiassociation.org/images/publications/cookbooks/SDI\\_Cookbook\\_GSDI\\_2004\\_ver2.pdf](http://gsdiassociation.org/images/publications/cookbooks/SDI_Cookbook_GSDI_2004_ver2.pdf)
- Paudyal, D., McDougall, K., Apan, A. (2009). *Building SDI Bridges for Catchment Management*. p 265. In: SDI Convergence. Research, Emerging Trends, and Critical Assessment. B. van Loenen, J.W.J. Besemer, J.A. Zevenbergen (Editors). Netherlands Geodetic Commission. Delft, Holanda.
- UNESCO. (2018). Water Information Network System (IHP-WINS). 18/05/2018. <http://ihp-wins.unesco.org/>
- Welle, F. (2009). *Public Sector Geo Web Services: Which Business Model Will Pay for a Free Lunch?* p 35. In: SDI Convergence. Research, Emerging Trends, and Critical Assessment. B. van Loenen, J.W.J. Besemer, J.A. Zevenbergen (Editors). Netherlands Geodetic Commission. Delft, Holanda.
- Zarazaga-Soria, F., Noguera-Iso, J., Latre, M., Rodríguez, A., López, E., Vivas, P., Muro-Medrano, P. (2007). *Providing Spatial Data Infrastructure Service in a Cross-Border Scenario: The SDIGER Project*. p 108. In: Research and Theory in Advancing Spatial Data Infrastructure Concepts. Onsrud, H. Esri. California, USA.

## Nota Técnica

# Programa CSED-TRANSVEL para cuantificar transporte de sedimentos en cauces



*CSED-TRANSVEL program to quantify transport of sediments in channels*

Juan Pablo Molina-Aguilar <sup>1\*</sup>, José Armando Vélez-Vargas <sup>2</sup>

Recibido: 07/02/2019

Aceptado: 28/02/2019

\*Autor de correspondencia

## Resumen

En cauces naturales ocurre de manera permanente el transporte de sólidos conjuntamente con el agua, dicho material refiere a sedimentos minerales del cauce o de su cuenca de aportación. El mecanismo de movimiento, suspensión o arrastre, lo definen las características físicas de las partículas y los fenómenos hidrodinámicos. Las metodologías para su cuantificación han sido desarrolladas empíricamente y requieren algunas de ellas procedimientos elaborados donde intervienen en ocasiones procesos iterativos para definir la solución, las cuales han sido agrupadas en transporte de fondo, transporte de fondo en suspensión, transporte de fondo total, transporte de lavado, transporte en suspensión y transporte total. Ello motivó el desarrollo de una herramienta computacional para cuantificar los distintos transportes de sedimentos dentro de un cauce natural. Su desarrollo se basó en la hipótesis de que el cauce de estudio se aproxima al funcionamiento de un canal prismático acorde con sus características geométricas e hidráulicas. Se logró compilar un programa ejecutable en equipos de cómputo de 32 y 64 bits desarrollado en Visual Basic Net dentro del entorno Visual Studio, con una página inicial de entrada de datos, una estructura reticular conformada por el tipo de sedimento y el método de cuantificación, además de una página resumen de los cálculos. El resultado es una herramienta compatible con el sistema operativo Windows, amigable para el usuario final, que reduce el tiempo de cálculo, mejora la certidumbre del resultado obtenido y capaz de resolver el método completo de Hanss Einstein.

**Palabras clave:** Sedimento, suspendido, arrastrado, cauce natural, canal prismático.

## Abstract

*In natural streams occurs permanently transport of solids together with water, this material refers to mineral sediments of the streambed or its watershed. The mechanism of movement, suspension or dragging is defined by the physical characteristics of the particles and by hydrodynamic phenomena. The methodologies for their quantification have been developed empirically and require some of them to be followed by iterative processes to define the solution, which have been grouped into bottom transport, bottom suspended transport, total bottom transport, washed transport, suspension transport and total transport. This motivated the development of a computational tool to quantify the different sediment transports within a natural channel. Its development was based on the hypothesis that the study stream approaches the operation of a prismatic channel according to its geometric and hydraulic characteristics. It was possible to compile an executable program in 32-bit and 64-bit computer equipment developed in Visual Basic Net within the Visual Studio environment, with an initial data input page, a reticular structure formed by the type of sediment and the quantification method, as well as a summary page of the calculations. The result is a tool compatible with the Windows operating system, user-friendly, which reduces the calculation time, improves the certainty of the results obtained and capable of solving the complete method of Hanss Einstein.*

**Keywords:** Sediment, suspended, dragged, natural channel, prismatic channel.

1 Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Edificio H, Ciudad Universitaria, Francisco J. Mújica S/N. Col. Felicitas del Río, Morelia, Michoacán, México, C.P. 58030 valnahr@hotmail.com

2 ISSGEO Ingenieros S.A. de C.V. Morelia, Michoacán. avelez.issgeo@@outlook.com

## 1. INTRODUCCIÓN

Las partículas al interior de un cauce natural suelen ser transportados como sedimentos de fondo o sedimentos suspendidos, ello en función de las propiedades del material del cauce y su relación con las características del flujo (Van Rijn, 1993). Para llevar a cabo su cuantificación se han desarrollado múltiples ecuaciones desde los primeros trabajos de du Boys y que suelen basarse en la tensión de arrastre sobre el lecho del río, el caudal, una función estocástica para el movimiento o bien la potencia hidráulica (García y Sala, 1998), en las cuales cada autor define las condiciones de aplicación de cada una de ellas. Reduciendo tanto los errores y los tiempos de cómputo.

La condición inicial considerada en cada una de las formulaciones es el equilibrio de las partículas ubicadas en el lecho del cauce, entre las fuerzas desestabilizadoras (sustentación y arrastre) y estabilizantes (gravedad y fricción) (Aguirre-Pe y Olivero, 2000). Dichas fuerzas definen la complejidad en la mecánica del transporte de sedimentos, por lo que no existe una ecuación dinámica para la fase sólida en un flujo bifásico (Martin, 2002). En su lugar las ecuaciones empíricas propuestas no son exactas, dan soluciones aproximadas y restringidas a los límites de las variables consideradas, que han sido desarrolladas en canales experimentales donde se controla la relación entre las características hidráulicas y los sedimentos generados.

El desarrollo de programas se ha llevado a cabo con distintos enfoques, Luna *et al.*, (2013) desarrollaron el programa Hidra\_flu 1.0 como propuesta para resolver la complejidad de calcular volúmenes de sedimentos transportados por lechos naturales empleando metodologías empíricas, logrando reducir los errores y el tiempo de cómputo, desarrollaron formularios en Visual Basic considerando el sistema metros (SI) y validaron los resultados respecto de un estudio sedimentológico obteniendo diferencias de 0.37% a 17.15%. El programa DEHIDRO facilita el diseño de estructuras hidráulicas en sistemas de riego y drenaje empleando el módulo de sedimentos para la cuantificación de arrastre de material considerando datos concretos de las

partículas y para calcular el transporte de fondo-suspensión-total emplearon las metodologías de Van Rijn, Meyer, Engelund-Hansen y Acker-White; además de la distribución de los sedimentos en una columna de agua (DEHIDRO, 2019). Por su parte la programación del modelo EIH AD32\_TS para cuantificar el transporte de sedimentos fue realizada en el entorno de Windows de 32 bits, su algoritmo es de adaptación no instantánea que no incluye fuentes tanto constantes como variables (EIH, 2019). La herramienta computacional SETRA v1.0 (Salinas-Tapia *et al.*, 2014) se conformó de 4 módulos: la interfaz principal, la adquisición de los datos de proyecto, el análisis granulométrico del material y el cálculo de transporte de sedimentos. Todos ellos programados en Matlab2008b. Mientras que el programa SEDIMENT V 1.0 calcula el transporte de sedimentos en ríos considerando la carga de fondo, en suspensión y el total. Desarrolla y resuelve las metodologías de Duboys-Straub, Schoklits, Shields, Meyer-Peter y Müller, Leva, Einstein, Einstein-Brown, Sato-Kikkawa-Ashida, Rottner, Frijlink, Yalin, Pernecker-Vollmer, Inlis-Lacey, Bogardi, Van Rijn, Engelund-Hansen, Shen-Hung, Yang, Ackers-White, Brownlie, Karim-Kannedy y Graf-Acaroglu (HYDROVLAB, 2019)

La finalidad de calcular la cantidad de material transportado en un cauce deriva de su uso en diseño u operación de diversas obras hidráulicas; como puede ser la definición de la capacidad muerta en un embalse, la frecuencia del dragado en cauces como en embalses, el diseño de tanques sedimentadores, la altura de una obra de toma, por citar algunos (Pérez *et al.*, 2010).

Por ello se presenta la herramienta computacional Cuantificador de Sedimentos en una sección Transversal (CSED-TRANSVEL) desarrollada en lenguaje Visual Basic NET dentro del entorno de Visual Estudio 2010, que realiza la cuantificación de los distintos transportes de sedimentos dentro de un cauce natural, ofreciendo la posibilidad al usuario de seleccionar los datos que requiere en las actividades hidráulicas e hidrológicas.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 sección tipo y características geométricas asociadas

En el desarrollo metodológico propuesto, se hizo la aproximación de la sección transversal del cauce natural en estudio a una sección transversal trapezoidal (figura 1), análoga a un canal prismático. Dicha sección queda definida mediante el ancho de la base ( $b$ ), los taludes

izquierdo ( $K_i$ ) y derecho ( $K_d$ ) en las márgenes, la pendiente longitudinal ( $S$ ) y la magnitud de calado o tirante dentro de la sección ( $d$ ), éste último asociado a un caudal ( $Q$ ) que puede ser función de un periodo de retorno ( $Tr$ ). Las dimensiones de la sección transversal permiten obtener las características geométricas área hidráulica ( $A$ ), perímetro mojado ( $P$ ), Radio hidráulico ( $R_h$ ), Ancho de superficie libre del agua ( $B$ ) y tirante hidráulico medio ( $d_m$ ), descritas por las ecuaciones 15 a 17.

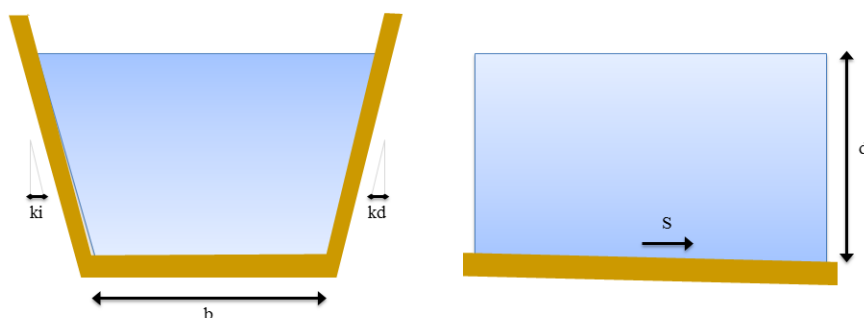


Figura 1. Sección transversal tipo y sus dimensiones geométricas

$$A = bd + kd^2 \quad (1)$$

$$P = b + 2d\sqrt{1 + k^2} \quad (2)$$

$$R_h = \frac{A}{P} \quad (3)$$

$$B = b + 2kd \quad (4)$$

$$d_m = \frac{A}{B} \quad (5)$$

### 2.2 Propiedades de los sedimentos y su distribución granulométrica

Una característica primordial en cauces naturales es la heterogeneidad en la forma y peso de las partículas del material, lo cual hace necesario un estudio granulométrico. En este estudio se definen propiedades que caractericen de manera pertinente la heterogeneidad mencionada, entre ellas el peso específico del material ( $\gamma_s$ ) y el coeficiente de rugosidad ( $n$ ). Una vez cribada una muestra obtenida *in situ* y graficados los resultados en distintos papeles probabilísticos, se define a que ley de probabilidad se asemeja la

distribución de diámetros en la muestra del cauce. Siendo posible posteriormente la definición de cualquier diámetro nominal ( $D_n$ ) necesario para el cálculo de los sedimentos transportados. Como se aprecien en las ecuaciones (6) a (9) de la tabla 1, es necesario conocer tres diámetros nominales característicos del material granulométrico en estudio. Los diámetros  $D_{16}$ ,  $D_{50}$  y  $D_{84}$  deben ser obtenidos del estudio de granulometría realizado y la magnitud de la variable aleatoria de probabilidad ( $Z_n$ ) que corresponde con el diámetro nominal ( $D_n$ ) a definir.



Tabla 1. Distribuciones granulométricas de sedimentos

Distribución	Expresión	Desviación estándar geométrica	Ecuación
Log-Normal	$D_n = D_{50}(\sigma_g)^{Z_n}$	$\sigma_g = \frac{D_{84}}{D_{50}}$	(6)
Normal	$D_n = D_{50} + Z_n(\sigma_g)$	$\sigma_g = \sqrt{D_{84} - D_{16}}$	(7)
Logarítmica	$D_n = D_{50}10\left[\left(\frac{n-50}{34}\right)\log(\sigma_g)\right]$	$\sigma_g = \frac{D_{84}}{D_{50}}$	(8)
Log - Log	$D_n = D_{50}e^{\left[\frac{\ln\left(\frac{n}{50}\right)\ln(\sigma_g)}{\ln\left(\frac{84}{54}\right)}\right]}$	$\sigma_g = \frac{D_{84}}{D_{50}}$	(9)

### 2.3 Características y propiedades hidráulicas

La correcta caracterización del fluido que interactúa con los sedimentos, establece la precisión y certidumbre de los resultados obtenidos al cuantificarse los sedimentos en las metodologías de las secciones transporte de fondo, transporte total de fondo sin separar, transporte total de fondo separando y transporte en suspensión. Debe verificarse la temperatura del fluido ( $T$ ) *in situ*, para definir los valores de la viscosidad cinemática ( $\nu$ ) y el peso específico ( $\gamma$ ) asociados.

No obstante se requiere la definición de parámetros que asocien las características de los materiales con el flujo, acorde con los resultados de estos parámetros se puede definir el tipo de sedimento que está presente en el cauce. De

manera concreta la magnitud de la aceleración de la gravedad ( $g$ ) tiene un rol trascendental en relación fluido-sedimentos en particular su relación de pesos específicos ( $\Delta$ ) calculada con la ecuación (10).

Algunos de los parámetros que involucran ambos elementos son la velocidad de caída ( $w$ ) acorde con la morfología de los sedimentos (ecuación 11) propuesta por Rubey (1933) en términos del parámetro  $F_1$  (ecuación 12), la velocidad media de la corriente con transporte de sedimentos ( $U$ ) propuestas por Maza - Cruickshank (1973) que contemplan el régimen inferior (ecuación 13) y el régimen superior (ecuación 14). Por su parte el parámetro adimensional de Shields ( $\tau^*$ ) indica el momento en el cual las partículas del fondo inician su movimiento (ecuaciones 15 a 17).

$$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \tag{10}$$

$$w = F_1 \sqrt{g \Delta D} \tag{11}$$

$$F_1 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{g \Delta D^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{g \Delta D^3}} \tag{12}$$

$$U = 7.58 w_{50} \left(\frac{d}{D_{84}}\right)^{0.634} \left(\frac{S}{\Delta}\right)^{0.456} \rightarrow \frac{1}{S} \geq 83.5 \left(\frac{d}{\Delta D_{84}}\right)^{0.350} \tag{13}$$

$$U = 6.25 w_{50} \left(\frac{d}{D_{84}}\right)^{0.644} \left(\frac{S}{\Delta}\right)^{0.352} \rightarrow \frac{1}{S} \leq 66.5 \left(\frac{d}{\Delta D_{84}}\right)^{0.382} \tag{14}$$

$$\tau^* = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)D} = \frac{\gamma R_h S}{(\gamma_s - \gamma)D} = \frac{R_h S}{\Delta D} \tag{15}$$

$$Re_* = \frac{U_* D}{\nu} \quad (16)$$

$$U_* = \sqrt{g R_h S} \quad (17)$$

#### 2.4 Generalidades del transporte de sedimentos

La medición de la cantidad de sedimentos transportados en un cauce puede realizarse en unidades de peso (kg/s) o bien en volumen (m<sup>3</sup>/s). En el caso del primer tipo es de uso

común su manejo por unidad de  $B$ , con el cual se obtiene el gasto sólido unitario ( $g$ ) cuyas unidades serán kg/s-m (ecuación 18). En el segundo caso el gasto sólido unitario ( $q$ ) tendrá unidades m<sup>3</sup>/s-m. La relación entre ambas mediciones es función de  $\gamma_s$ .

$$g = \gamma_s(q) \quad (18)$$

Acorde con el origen del arrastre y el transporte de los sedimentos (figura 2) se han asignado los nombres: de lavado ( $G_L$ ), de fondo ( $G_B$ ), de fondo en suspensión ( $G_{BS}$ ), en suspensión ( $G_S$ ),

de fondo total ( $G_{BT}$ ) y total ( $G_T$ ). La definición de cada uno de ellos puede obtenerse al multiplicar

$$G = g(B) \quad (19)$$

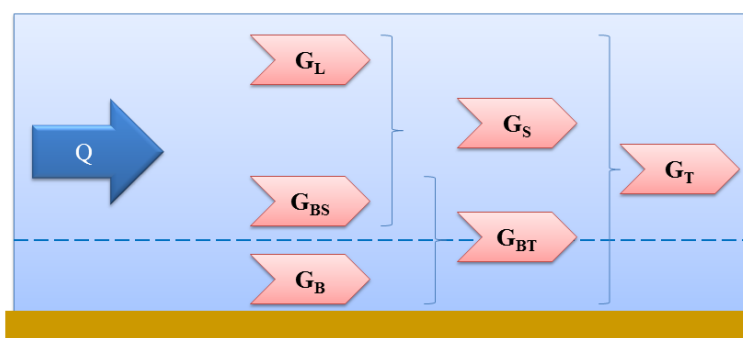


Figura 2. Definición del transporte de sedimentos acorde con su origen

#### 2.5 Transporte de fondo

Para determinar el transporte de fondo ( $g_B$ ) en la estructura del programa desarrollado, se consideraron las metodologías de Meyer-Peter y

Müller (1948), Frijlink (1982) y Pernecker y Vollmers (1965).

#### Método de Meyer-Peter y Müller

$$g_B = 8\gamma_s \sqrt{g \Delta D_m^3} \left[ \left( \frac{n'}{n} \right)^2 \tau^* - 0.047 \right]^{\frac{3}{2}} \quad (20)$$

$$n' = \frac{D_{90}^6}{26} \quad (21)$$

La aplicación de las ecuaciones (2) y (3) se limita a las restricciones  $0.40 \text{ mm} < D_m < 30 \text{ mm}$ ;  $0.04 < S < 0.2$ ;  $1 \text{ cm} < d < 120 \text{ cm}$ ;  $0.002 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 4 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $1.25 \text{ t/m}^3 < \gamma_s < 4.02 \text{ t/m}^3$ ,  $D_{90}$  en m.

#### Método de Frijlink

$$g_B = 5\gamma_s D_{50} \sqrt{\mu R_h S} e^{\left(\frac{-0.27}{\mu \tau_*}\right)} \rightarrow \left(\frac{1}{\mu \tau_*}\right) \leq 18 \quad (22)$$

$$\mu = \left(\frac{C}{18 \log\left(\frac{12 R_h}{D_{90}}\right)}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (23)$$

$$C = \frac{U}{\sqrt{R_h S}} \quad (24)$$

En la ecuación (24) se determina  $U$  utilizando la ecuación (13) o (14) pertinente.

#### Método de Pernecker y Vollmers

$$g_B = 25\gamma_s \sqrt{g \Delta D_m^3} (\tau_*)^{\frac{3}{2}} (\tau_* - 0.04) \quad (25)$$

La ecuación (25) es aplicable cuando la ecuación (15) es menor que 0.5. Si no se cumple con esta restricción la ecuación en realidad define el transporte total de fondo ( $g_{BT}$ ).

#### 2.6 Transporte total de fondo sin separar

Los métodos que permiten calcular el transporte total de fondo ( $g_{BT}$ ), sin especificar qué porcentaje corresponde tanto a ( $g_B$ ) como a

( $g_{BS}$ ), fueron propuestos por Engelund y Hansen (1967) con buenos resultados para cauces arenosos, Graf y Acaroglu (1968) con aplicación a secciones circulares y Brownlie (1981) realizó su propuesta a partir del análisis dimensional de los parámetros que intervienen en el fenómeno. La ecuación (29) es aplicable cuando en el cauce el flujo presenta régimen inferior, por su parte la ecuación (30) es para régimen superior.

#### Método de Engelund y Hansen

$$g_{BT} = \frac{0.04\gamma_s (R_h S)^{\frac{3}{2}} U^2}{\sqrt{g} \Delta^2 D_{35}} \quad (26)$$

Aplicable para  $0.15 \text{ mm} < D_{50} < 2 \text{ mm}$ ,  $Re \geq 1200$ .

#### Método de Graf y Acaroglu

$$g_{BT} = \frac{20\gamma_s \sqrt{g} (R_h S)^{3.3}}{\Delta^{2.8} D_m^{1.8}} \quad (27)$$

#### Método de Brownlie

$$g_{BT} = 9.0218 U \bar{d} (Fr_g - Fr_{gc})^{1.987} S^{0.6601} \left(\frac{D_{50}}{R_h}\right)^{0.3301} \quad (28)$$

$$U = \frac{4.5294\sqrt{g}d^{0.5293}S^{0.3888}}{D_{50}^{0.0293}\sigma_g^{0.1606}} \quad (29)$$

$$U = \frac{7.515\sqrt{g}d^{0.6005}S^{0.4605}}{D_{50}^{0.1005}\sigma_g^{0.01283}} \quad (30)$$

$$Fr_g = \frac{U}{\sqrt{g\Delta D_{50}}} \quad (31)$$

$$Fr_{gC} = \frac{4.596\tau_{*C}^{0.5293}}{S^{0.1405}\sigma_g^{0.1606}} \quad (32)$$

$$\tau_{*C} = \frac{0.22}{D_*^{0.90}} + \frac{0.06}{10^{D_*^{0.90}}} \quad (33)$$

$$D_* = D_{50} \left( \frac{g\Delta}{v^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (34)$$

## 2.7 Transporte total de fondo separando

### Método de Einstein

En este tipo de metodologías uno de los más completos fue propuesto por Hanss Einstein (1950) al considerar la mayor cantidad de parámetros presentes en el fenómeno. Su propuesta determina las características hidráulicas de la corriente al generarse el transporte de sedimentos, con ellas calcula  $g_B$  y  $g_{BS}$ . En su procedimiento establece la solución de dos integrales (35) y (36) cuya variable de integración no es explícita lo que dificulta su

solución algebraica, que adicionalmente dependen de parámetros adicionales (37) y (38). Como propuesta de solución a las integrales 35 y 36, Maza-Alvarez y García-Flores, (1993) presentan un gráfico para resolver cada integral. Acorde con la estructura de ellas se trata de una familia de curvas paramétricas en un papel doble logarítmico. La solución basada en esta propuesta establece un error de precisión dada las escalas de sus ejes y desde luego la proximidad entre curvas lo que eleva el grado de imprecisión en el valor definido de ambas integrales.

$$I_1 = 0.216 \frac{A^{Z-1}}{(1-A)^Z} \int_A^1 \left( \frac{1-Y}{Y} \right)^Z dy \quad (35)$$

$$I_2 = 0.216 \frac{A^{Z-1}}{(1-A)^Z} \int_A^1 \left( \frac{1-Y}{Y} \right)^Z \ln(Y) dy \quad (36)$$

$$Z = 2.5 \frac{w_i}{U_*} \quad (37)$$

$$Ar = 2 \frac{D_i}{d_m} \quad (38)$$

### Método de Bagnold

Otra propuesta metodológica fue establecida por Bagnold (1966) quien presentó ecuaciones específicas para cada tipo de transporte,  $g_B$  (39) y  $g_{BS}$  (40).

Ambas se caracterizan por ser mucho más simples de aplicar que la elaborada y extensa

propuesta de Einstein, sin embargo requieren definirse un factor de eficiencia en el arrastre ( $e_b$ ) como función de  $U$  y  $D_m$ , así como la desviación de trayectorias entre partículas líquidas y sólidas ( $\tan \alpha$ ) en función de  $\tau_*$  y  $D_m$ . Los parámetros  $e_b$  y  $\tan \alpha$  pueden determinarse mediante solución gráfica propuesta por el propio autor.

$$g_B = \frac{\gamma_S \tau_* U D_m e_b}{\tan(\alpha)} \quad (39)$$

$$g_{BS} = \frac{0.01 \gamma_S \tau_* U^2 D_m}{w_m} \quad (40)$$

## 2.8 Transporte en suspensión

### Método de Brooks

La cuantificación del transporte en suspensión ( $g_S$ ) fue abordado en investigaciones realizadas por Brooks (1958), define su expresión en

términos de la concentración de partículas medido a la mitad del tirante medio ( $C_{d/2}$ ) y un factor  $f\left(Z, \frac{kU}{U_*}\right)$  definido con base a un parámetro adimensionales y la constante de Von-Karman, presentando una solución grafica para este último.

$$g_S = q C_{d/2} \left[ f\left(Z, \frac{kU}{U_*}\right) \right] \quad (41)$$

### Método de Lane y Kalinske

Los investigadores Lane y Kalinske (1941) empleando las distribuciones de velocidades

propuesta por Prandtl y Von-Karman y de concentración de sedimentos suspendidos de autoría propia, para calcular  $g_S$ .

$$g_S = q C_y e^{(6ZA)} P_1 \quad (42)$$

$$P_1 = \frac{1.7n\sqrt{g}}{d^6} \quad (43)$$

$$C_y = C_a e^{\left\{ \frac{-15w}{U_*} \left( \frac{y-a}{d} \right) \right\}} \quad (44)$$

### Método de Einstein

Einstein propuso también una expresión para calcular  $g_S$ , la cual es consistente con la descripción realizada en la sección transporte total de fondo separando de este trabajo.

Presenta la ventaja de calcular el transporte de sedimentos en cualquier profundidad dentro del calado del cauce en estudio.

$$g_S = 11.6 U_*' \gamma (C_y) (P_1 + I_2) \quad (45)$$

### Lenguaje de programación

La implementación en lenguaje de las ecuaciones 1 a 45, acorde con la lógica establecida por los autores de cada uno de los métodos descritos para calcular el transporte de sedimentos en cauces naturales, se desarrolló la programación en la paquetería de Visual Studio 2010. Dicho programa está orientado al

desarrollo de aplicaciones empresariales y de negocios, las cuales pueden ser desarrolladas en lenguajes Java, C, C+, C++ o Visual Basic NET. Visual Studio tiene como características la posibilidad de ofrecer una interfaz amigable a los usuarios finales y al programador la posibilidad de realizar compilaciones para que sean ejecutadas en sistemas de 32 o 64 bits. Se decidió implementar los algoritmos en Visual

Basic NET en el entorno de Visual Studio, particularmente por las ventajas de su interfaz. Ya que permite crear formularios de forma visual ahorrando tiempo en la implementación de código para programar y desarrollar la interfaz de usuario final del programa.

### 3. CASO DE ESTUDIO

Con la finalidad de evaluar cada uno de los métodos descritos en las secciones transporte de

fondo, transporte total de fondo sin separar, transporte total de fondo separando y transporte en suspensión, se llevaron a cabo estudios en el río Pitillal, ubicado en el estado de Jalisco, México.

El tramo de estudio está definido desde su cruce con la carretera que da acceso a Puerto Vallarta hasta el delta que se genera en la desembocadura con el Océano Pacífico (figura 3).

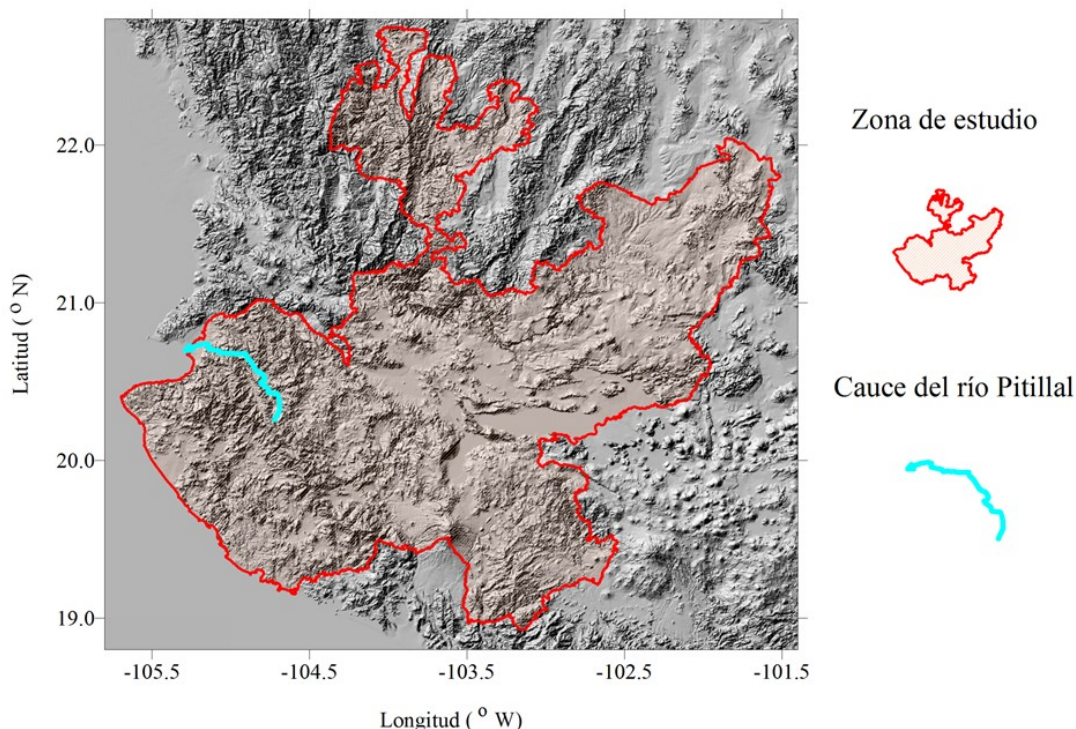


Figura 3. Tramo de estudio del río Pitillal del estado de Jalisco, México

Los estudios se realizaron a lo largo de 2120 m de longitud, identificándose con el cadenamiento 0+000 su cruce con la carretera y 2+120 la desembocadura. Las mediciones topográficas definieron un ancho en el cauce ( $d$ ) de 67.00 m, un calado ( $d$ ) de 2.50 m, la pendiente longitudinal del tramo ( $S$ ) es de 0.002278, la margen izquierda tiene un talud ( $K_i$ ) de 5:1 mientras que la margen derecha ( $k_d$ ) es 4:1.

De la muestra de material que conforma el cauce, los estudios de mecánica de suelos le asignan un coeficiente de rugosidad ( $n$ ) de magnitud 0.022, sus partículas presentaron una

distribución de probabilidad tipo Logarítmica, cuyos diámetros representativos  $D_{50}$  fue de 0.70 mm y  $D_{84}$  de 4.00 mm, la desviación geométrica ( $\sigma_g$ ) asociada es 5.714 para un peso específico ( $\gamma_s$ ) de 2,352 kg/m<sup>3</sup>.

Respecto del muestreo del fluido ( $d_c$ ) realizado a una profundidad de 1.50 m medida desde la superficie libre del agua hacia el fondo del cauce, presentó una concentración de sedimentos ( $C_{sed}$ ) de 3.99 ppm en peso asociada con una temperatura ( $T$ ) de 25° C.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La estructura propuesta para el programa es mediante la utilización de dos pantallas. La primera de ellas tiene el objetivo ingresar todas las características geométricas del cauce natural, las propiedades de los sedimentos y del fluido así como la concentración suspendida. En el caso particular de los sedimentos ofrece al usuario la posibilidad de seleccionar una de las cuatro distribuciones granulométricas de sedimentos definidas por las ecuaciones (6), (7), (8) y (9), a partir de las cuales mediante el uso de los diámetros representativos se pueden generar los diámetros nominales necesarios para la aplicación de las metodologías consideradas en el programa. También se establecieron espacios necesarios para identificar el proyecto mediante el nombre y ubicación del sitio de estudio (figura 4a). La segunda pantalla contempla pestañas en la parte superior que consideran un método

específico para mostrar los resultados obtenidos. De forma análoga pestañas en la margen izquierda, las primeras cuatro concentran los métodos para cada tipo específico de sedimentos y la última para concentrar los resultados obtenidos.

En cada método los encabezados de las tablas consideran un fondo amarillo con texto en color naranja. En caso de ser necesario algún parámetro propio del método de cuantificación, se da la posibilidad de ingresar su valor mediante ventanas específicas. Adicionalmente se colocaron ventanas desplegables en la cuales se pueden decidir número de intervalos de cálculo o expresiones concretas para concluir la cuantificación. Una vez definidas estas características adicionales se activa el botón "análisis" ubicado en la esquina superior derecha (figura 4b).

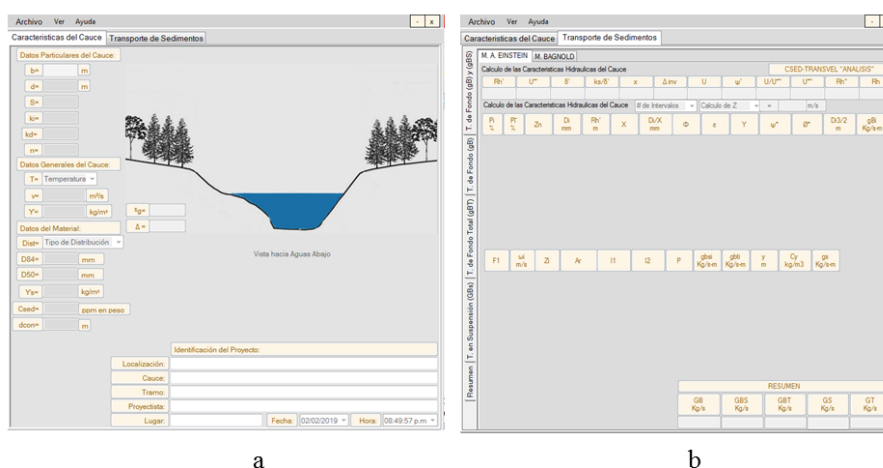


Figura 4. (a) Vista de la página de inicio del programa CSED-TRANSVEL y (b) la estructura en pestañas para ejecutar los métodos en cada tipo de transporte de sedimentos

La primera cuantificación es el transporte total del fondo separando de  $g_B$  y  $g_{BS}$ , iniciando con el método de Hanss Einstein (figura 5a). El cual se activa una vez ingresados todos los datos de entrada en la pantalla inicial (figura 4a), antes de mostrar los cálculos realizados se definen mediante las ventanas desplegables el número de intervalos para realizar el cálculo respectivo, se pueden ingresar 4, 5 o 10 intervalos, de igual manera se define la velocidad de corte para

definir  $Z$  en términos de las partículas o bien las ondulaciones del fondo.

En la implementación de las ecuaciones (35) y (36) se llevó a cabo una integración numérica definiendo el intervalo de integración mediante 50,000 segmentos, los cuales garantizaron la aproximación deseada y que corresponde a un error máximo del 4%. En el caso de los títulos de columnas con texto en color negro, indican que



al presionarla se desplegara la gráfica de la cual se tomó el valor consignado o de ser necesario incluirlo manualmente, como lo requiere el método de Bagnold (figura 5a,b) para los parámetros del factor de eficiencia en el arrastre ( $e_b$ ) y la desviación de las trayectorias de las

partículas líquidas con las sólidas ( $\tan \alpha$ ). En ambas pestañas, una vez ingresados los parámetros adicionales necesarios, se activa en botón de cálculo que se indica mediante los bordes en color azul.

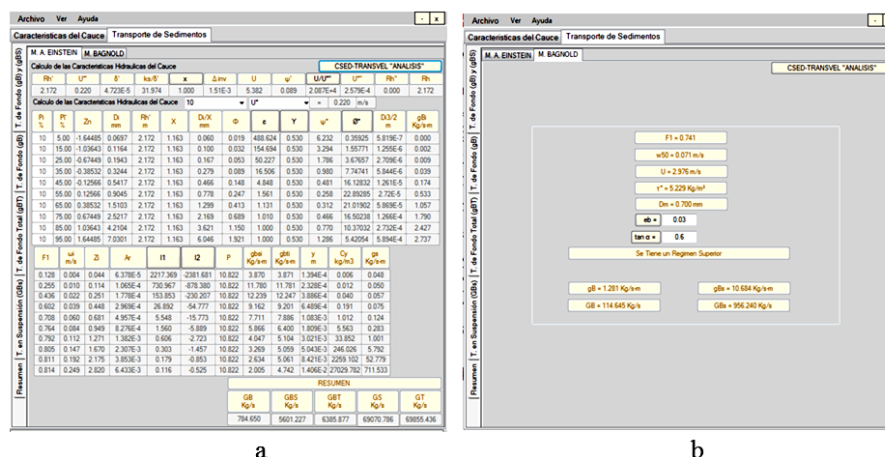


Figura 5. Resultados del cálculo de transporte total del fondo separando en  $g_B$  y  $g_{BS}$  con la metodología de Hanss Einstein (a) y Bagnold (b)

La segunda pestaña del lado izquierdo permite cuantificar el transporte de fondo  $g_B$ , como se aprecia solamente dos métodos fueron aplicados (figura 6a), ello debido a que en el caso del método de Pernecker y Vollmers en realidad calcula  $g_{BT}$ . Dado que el parámetro

adimensional de Shields ( $\tau^*$ ) es mayor que 0.50, por lo que en la tercera pestaña que corresponde al transporte total de fondo inicia con dicho método y se consiguan adicionalmente los resultados de los métodos de Engelund y Hansen, brownlie y Graf y Acaroglu (figura 6b).

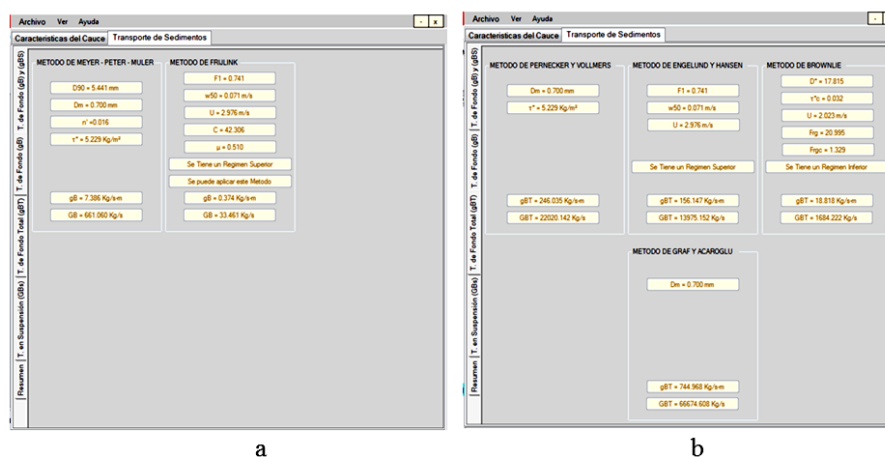


Figura 6. Resultados del cálculo del transporte de fondo  $g_B$  (a) y del transporte total de fondo  $g_{BT}$  (b)

La cuarta pestaña (figura 7a) muestra la cuantificación del transporte en suspensión

utilizando dos métodos el de Brooks y el de Lane y Kalinske. En el primero de ellos requiere

ingresar un parámetro adicional definido por el autor, por ello se vuelve a indicar el botón análisis para concluir las operaciones.

La quinta pestaña (figura 7b) presenta la síntesis de todos los métodos descritos. De los cuales

definir la solución correcta requiere de la experiencia y el conocimiento del proyectista, tanto del sitio de proyecto como de los métodos empleados.

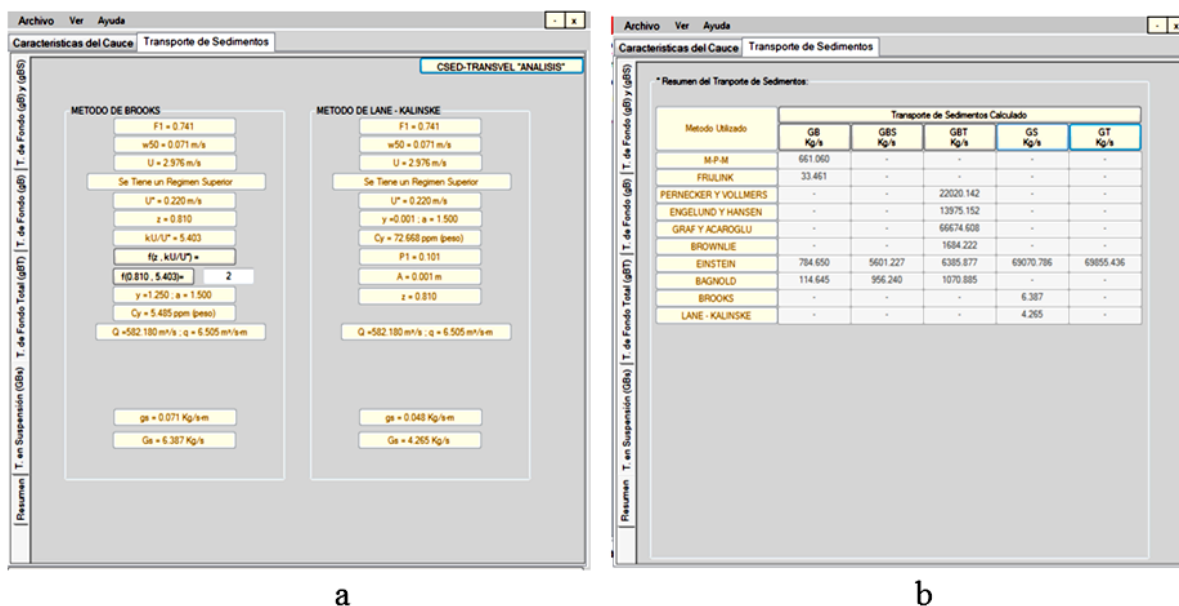


Figura 7. Resultados del cálculo de transporte total del fondo  $g_{BS}$  (a) y resumen de los métodos resueltos (b)

Los resultados obtenidos para el transporte de sedimentos en el río Pitillal, en unidades de peso parecen ser muy elevados. No obstante considerando el peso específico de los materiales, en unidades de volumen representan el 1.19% que es un porcentaje pequeño respecto del gasto líquido transportado por el cauce ( $Q$ ) de  $582.180 \text{ m}^3/\text{s}$ . por lo que el resultado seleccionado son los valores obtenidos empleando la metodología de Einstein, es importante mencionar adicionalmente que es la única propuesta que nos permite la cuantificación de todos los tipos de sedimentos empleando un mismo fundamento teórico. No obstante todas las metodologías descritas por las ecuaciones 20 a 45 son cuantificadas de manera paralela por la herramienta y mostrados en la página resumen de cálculos (figura 7b). En este sentido se requieren trabajos futuros de implementación de la herramienta en proyectos ejecutivos que permitan su validación.

## 5. CONCLUSIONES

La programación realizada facilita el ingreso de datos en su ventana inicial, mostrando los resultados de cada metodología en las ventanas correspondientes integran el programa CSED-TRANSVEL. La inserción de pestañas para cuantificar cada tipo de transporte de sedimentos permite al usuario centrarse en el método de interés, convirtiéndolo en una herramienta amigable.

La herramienta desarrollada se convierte en una opción eficaz y eficiente para el desarrollo de estudios sedimentológicos, al reducir el trabajo extenso y laborioso que fundamentan algunos de los métodos, los cuales incluyen procesos iterativos en su solución. Permite la impresión de reportes para cada uno de los resultados obtenidos. Facilita las actividades diseño, operación y mantenimiento al contar con datos necesarios para la toma de decisiones. Como característica adicional permite visualizar los

gráficos que definen parámetros específicos de cada metodología, facilitando la determinación de sus valores y por ende la precisión en el resultado respectivo.

El programa CSED-TRANSVEL es un producto académico de uso libre desarrollado para la

obtención del grado del ingeniero civil del coautor del presente trabajo, por lo que se encuentra disponible a través de su correo electrónico de afiliación.

## REFERENCIAS

- Bernabé, M., López-Vázquez, C. (2012). *Fundamentos de la Infraestructura de Datos Espaciales*. UPM Press, 1ª Ed. Madrid, España.
- Aguirre-Pe, J., Olivero, M. Moncada, A. (2000). *Transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente*. Fundación para el Fomento de la Ingeniería del Agua (7) 4. Universidad de Córdoba, España. 353-365. DOI: <https://doi.org/10.4995/ia.2000.2851>
- Bagnold, R. (1966). *An approach to sediment transport problem from general physics*. United State Geological Survey. Professional paper 422-I, Washington, D. C. DOI: <https://doi.org/10.3133/pp4221>
- Brooks, N. (1958). Mechanics of streams with movable beds of fine sand. *Am. Soc. Civil Engineers Trans.*, Vol 38. 708-717.
- Brownlie, W. R. (1981). *Prediction of flow depth and sediment discharge in open-channels*. Report nº KH-R-43A. Pasadena: California Institute of Technology, W.M. Keck Laboratory, USA. DOI: <http://dx.doi.org/10.7907/Z9KP803R>
- DEHIDRO 07/02/2019. [tierradehidro.com/software-dehidro/](http://tierradehidro.com/software-dehidro/)
- EIH 07/02/2019. Estudios de ingeniería hidráulica S. A. [http://www.elhsa.com/software/modelo\\_de\\_sedimentacion.html](http://www.elhsa.com/software/modelo_de_sedimentacion.html)
- HYDROVLAB 07/02/2019 Laboratorio Virtual de Hidrología. Programa SEDIMENT V 1.0. Universidad Técnica Particular de Loja. [www.hydrovlab.utpl.edu.ec](http://www.hydrovlab.utpl.edu.ec)
- Einstein, H. (1950). *The bed-load function for sediment transportation in open channel flows*. Technical Bulletin 1026. U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington D. C.
- Engelund, F., Hansen, E. (1967). *A monograph on sediment transport in alluvial streams*. Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark.
- Frijlink, H. (1982). Discussion: Total Load Transport in Alluvial Channels by Ranga Raju, K. F., Garde, R. J., Bhardwaj, R. B. (Proc. Paper 10620), *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, No. HY3, 457 – 458.
- García, C., Sala, M. (1998). Aplicación de fórmulas de transporte de fondo a un río de gravas: comparación con las tasas reales de transporte obtenidas en el río Tordera. *Ingeniería del Agua*, vol. 5. DOI: <https://doi.org/10.4995/ia.1998.2744>
- Graf, W. Acaroglu, E. (1968). Sediment Transport in Conveyance Systems (Part 1) / A physical model for sediment transport in conveyance systems, *Hydrological Sciences Journal*. 13:2, 20-39. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626666809493581>
- Lane, E., Kalinske, A. (1941). Engineering calculations of suspended sediment. *Transaction of American Geophysical Union*, 637 p. DOI: <https://doi.org/10.1029/TR022i003p00603>

- Luna, P., Casanova, C., González, C., De Caldas, J. (2013). Algoritmo de la metodología de Pacheco Ceballos para el cálculo de transporte de sedimentos en ríos Aluviales. *Tekhnê*. Vol. 10, Núm. 1, 38-48.
- Martín, J. (2002). *Ingeniería de Ríos*. Universidad Politécnica de Cataluña
- Maza, J., Cruickshank, C. (1973). *Stable channels in alluvion*. Proceedings International Symposium on River Mechanics, Bangkok, Tailandia, 715-722.
- Maza-Alvarez, J., García-Flores, M. (1993). *Transporte de Sedimentos*. Capítulo 10 del Manual de Ingeniería de ríos. Instituto de Ingeniería, UNAM, 549p.
- Meyer-Peter, E., Müller, R. (1948). *Formulas for bed-load transport*. Report on the 2<sup>nd</sup> Meeting International Association Hydraulic Structure Research, Stockholm, Sweden, 39-64.
- Pérez-Morales, G., Rodríguez Castro, J., Molina-Aguilar, J. (2010). *Ingeniería de ríos*. Editorial Universitaria, Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 292 p.
- Pernecker, L., Vollmer, H., (1965). *Neve Betrachtungsmöglichkeiten des Feststoff-transportes in offenen Gerinnen*. Die Wasser-Wirtschaft, 55, Jahrgang, Heft 12.
- Rubey, W. (1933). Settling velocities of gravel, sand and silt particles. *Am. J. Sci.* Vol. 25 325-338. DOI:10.2475/ajs.s5-25.148.325
- Salinas-Tapia, H., Mendoza-Silva, L. García Aragón, J. (2014). *Herramienta computacional para el cálculo de la tasa de transporte de sedimentos de fondo y en suspensión en ríos*. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica. Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- Van Rijn, L. (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers*. Estuaries and Coastal Seas. Netherlands, Aqua Publications.

---

### **SUSCRIPCIONES**

Si desea recibir la revista Aqua-LAC en forma  
periódica en formato digital envíe un correo electrónico a:

aqualac@unesco.org  
aqualac@uaq.mx

### **SUSCRIPTIONS**

*If you would like to periodically receive Aqua-LAC  
journal in digital format send an email to:*

*aqualac@unesco.org  
aqualac@uaq.mx*

---





Organización  
de las Naciones Unidas  
para la Educación,  
la Ciencia y la Cultura

70  
1949 - 2019

## Oficina de Montevideo

Oficina Regional de Ciencias  
para América Latina y el Caribe

### UNESCO

Programa Hidrológico Internacional  
Oficina Regional de Ciencias  
para América Latina y el Caribe

*International Hydrological Programme  
Regional Office for Science  
for Latin America and the Caribbean*

Revista científica del Programa Hidrológico Internacional  
en América Latina y el Caribe (PHI-LAC)  
ISSN: 1688-2873

Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe  
UNESCO. Edificio Mercosur. Luis P. Piera 1992, 2º piso  
11200 Montevideo, Uruguay  
aqualac@unesco.org

Centro de Investigaciones del Agua  
Campus Universitario Cerro de las Campanas  
Facultad de Ingeniería, UAQ  
76010 Querétaro, México  
aqualac@uaq.mx

[www.unesco.org/new/es/office-in-montevideo/natural-sciences/water-ihp-lac/revista-aqualac/](http://www.unesco.org/new/es/office-in-montevideo/natural-sciences/water-ihp-lac/revista-aqualac/)

