



# CONAGUA

2017

**XXVI CONGRESO NACIONAL DEL AGUA**

**SEPTIEMBRE 2017**  
**Córdoba - Argentina**

Titulo:

Anales de trabajos completos de XXVI CONAGUA

Tomo I – 1º edición

Compilador:

Andrés Rodríguez

ISBN: 978-

**EDITADOR POR**

Anales de trabajos completos de XXVI CONAGUA

DATOS DEL ISBN



# LA GESTION DEL AGUA ANTE LOS DESAFIOS CLIMATICOS Y AMBIENTALES

Acta de Trabajos Completos  
de Congreso

## Organizadores:

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales –  
Universidad Nacional de Córdoba

Gobierno de la Provincia de Córdoba: Ministerio de Agua,  
Ambiente y Servicios Públicos

Empresa Provincial de Energía de Córdoba (EPEC)

Comité Permanente del Congreso Nacional del Agua



**PATROCINADORES**



### **AUTORIDADES PROVINCIALES:**

Gobernador Provincial: Juan Schiaretti  
Vicegobernador: Martín Llaryora  
Ministro de Agua, Ambiente y Servicios Públicos: Fabián López  
Secretaría de Recursos Hídricos: Edgar Castelló  
Presidente Directorio EPEC: Luis Giovine

### **AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA:**

Rector: Hugo Oscar Juri  
Vicerrector: Ramón Pedro Yanzi Ferreira  
Secretario General: Roberto Terzariol

### **AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE CS. EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES:**

Decano: Pablo Recabarren  
Vice-decana: Adriana Cerato  
Secretario General: Daniel Lago  
Secretario de Extensión: Luis Bosch

### **COMITÉ PERMANENTE DE LOS CONGRESOS NACIONALES DEL AGUA**

Presidente: Juan Carlos Bertoni  
Vicepresidente: Héctor Daniel Farías  
Secretario: Antonio Milesi  
Tesorero: Andrés Rodríguez  
Vocal: Eric Zimmerman  
Comisión revisora de cuentas: Cristóbal Lozeco, Raúl Lopardo, Eduardo Zamanillo. Suplente: Gabriel Caamaño Nelli.

### **COMITÉ ORGANIZADOR LOCAL:**

Álvarez J., Baraquet M. M, Camponovo D., Camurri C., Díaz Lozada, J.M,  
Eder M., Flores Nieto F., Ingaramo R., Kelly Percichelli C., Menajovsky S.,  
Rodríguez A., Soria A. y Vaschalde T.

**COORDINACION COMITÉ CIENTIFICO:**

Héctor Daniel Farías, Ricardo Ingaramo, Andrés Rodríguez y Juan Carlos Bertoni

**DIFUSIÓN, COMUNICACIÓN Y DISEÑO**

Javier Álvarez, Andrea Soria, Celeste Camurri y Agustina Sastre

**INFRAESTRUCTURA Y LOGISTICA**

Sergio Menajovsky y Andrea Soria

**CULTURA DEL AGUA Y REVISTA CETA**

Coro de la FCEFYN de la UNC, Zuzana Boneu y Marcelo García

**PAGINA WEB**

Lucas Gianre, Agustin Martina y Javier Álvarez

**EXPO CONAGUA 2017**

Diego Camponovo, Matías Eder, Nicolás Guillen y Andrea Soria

**AUSPICIANTES**

INTA – Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

INA – Instituto Nacional del Agua

IAHR – International Association for Hydro-Environment Engineering

COHIFE – Consejo Hídrico Federal

## COMITÉ CIENTIFICO

Abril, Ernesto  
Alonso, Facundo  
Álvarez, Javier  
Araujo, Héctor Ricardo  
Bachiega, Daniel  
Basan Nickisch, Mario  
Basile, Pedro  
Bazán, Raquel  
Bertoni, Juan Carlos  
Bocanegra, Emilia  
Cardini, Julio Cesar  
Carro Pérez, Magalí  
Catalini, Carlos  
Chreties, Christian  
Cioccale, Marcela  
Collins, Jorge  
Corral, Mariano  
Cosavella, Ana  
Currie, Héctor  
Díaz, Eduardo Luis  
Díaz, Érica  
Díaz, Leandro Raúl  
Díaz Lozada, José  
Dolling, Oscar  
Duarte, Oscar C.  
Eder, Matias.  
Farías, Héctor Daniel  
Fernández Cirelli, Alicia  
Flores Nieto, Federico  
García, Carlos Marcelo  
Guillén, Nicolás.  
Gyssels, Paolo  
Herrero, Horacio  
Hillman, Gerardo  
Ingaramo, Ricardo  
Iturraspe, Rodolfo

Laboranti, Claudio  
Larrosa, Nancy  
Llop, Armando  
Lopardo, Raúl A.  
Menajovsky, Sergio  
Menéndez, Ángel  
Merg, Carlos  
Millón, Jorge  
Morabito, José  
Moya, Gonzalo  
Niño, Yarko.  
Olmos, Luis  
Oroná, Claudia  
Pagot, Mariana  
Paoli, Carlos Guillermo  
Patalano, Antoine  
Paz, María Eugenia  
Pedocchi, Francisco  
Pertusi, Laura  
Pilar, Jorge  
Plencovich, Gonzalo  
Pozzi Piacenza, Cecilia  
Prieto Garra, Daniel  
Pusineri, Graciela  
Ragessi, Matías  
Ramonell, Carlos  
Reyna, Santiago  
Riccardi, Gerardo  
Rodríguez, Andrés  
Rodríguez, Leticia  
Rohrman, Hugo  
Romagnolli, Martín  
Ruiz, Marcia  
Rujana, Mario  
Scacchi, Graciela  
Scavuzzo, Marcelo  
Schneider, Dagni  
Schreider, Mario

Seoane, Rafael  
Serra, Juan José  
Silber, Mario  
Spalleti, Pablo  
Stenta, Hernán  
Szupiany, Ricardo  
Tarrab, Leticia  
Testa, Alejo  
Toselli, Luis  
Tuchneider, Ofelia  
Valiente, Miguel  
Vanlesberg, Susana  
Vicario, Leticia  
Villanueva, Adolfo  
Vives, Luis  
Weber, Juan F  
Zamanillo, Eduardo  
Zimmerman, Eric  
Zucarelli, Viviana

## PROLOGO

### **Sobre el XXVI Congreso Nacional del Agua**

*Los factores motivadores fundamentales de la realización del Congreso Nacional del Agua de Argentina (CONAGUA) surgieron de la intensa actividad de ingeniería asociada a los recursos hídricos y de un ferviente historial hidráulico de los profesionales de la Dirección General de Hidráulica de la Provincia de Córdoba en los inicios de los años 60.*

*A partir de ese momento y con el transcurrir del tiempo, los Congresos Nacionales del Agua se han ido convirtiendo en el encuentro técnico-científico y de gestión del agua más tradicional, numeroso y completo (por su transversalidad y cantidad de ejes temáticos) de la Argentina, por lo cual ha cobrado trascendencia a nivel Regional y Latinoamericano.*

*A partir del año 1963 y hasta el momento la historia registra 25 ediciones realizadas, en la mayoría de los casos con frecuencia bianual. El Comité Permanente se ha ocupado a lo largo de 54 años de mantener la vigencia del Congreso Nacional del Agua e estrecha colaboración con los organizadores provinciales y locales de cada Congreso.*

*Tiene un carácter amplio: en lo territorial recorriendo casi todas las Provincias Argentinas, y países tales como Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, México, y Uruguay, en lo político por su carácter federal, y en lo temático cubriendo prácticamente todas las especialidades asociadas al agua.*

*En esta oportunidad bajo el lema “**La gestión del agua ante los desafíos climáticos y ambientales**” reunirá a cerca de 1000 profesionales del sector para compartir y discutir los problemas que nuestra sociedad y país tienen alrededor del agua. Esto se promueve a través de las propias presentaciones orales (cerca de 280) y en poster (cerca de 40), de 3 mesas redondas, 5 sesiones especiales y 3 conferencias plenarias, todas con profesionales reconocidos de la materia.*

*La difusión del material del Congreso incluye la publicación del libro (con ISBN) de los Resúmenes Extendidos evaluados previamente por el Comité Científico, la publicación de los artículos completos en libro con formato digital, y la publicación de los mejores artículos de cada eje temático y del artículo del Premio INA en la Revista (con ISSN) Ciencia Tecnología e Innovación del CETA de la FCEFyN de la Universidad Nacional de Córdoba (retomando la tradición iniciada en el XXIV CONAGUA de Resistencia).*

*El presente libro digital contiene los trabajos completos in-extenso, que complementa a la versión impresa de los resúmenes extendidos, e incluye los textos completos de las 323 contribuciones aceptadas para el presente Congreso. A continuación se presenta la cantidad de trabajos según el área temática:*

<i>Eje temático A: HIDRÁULICA FLUVIAL Y MARÍTIMA</i>	<i>28</i>
<i>Eje temático B: OBRAS HIDRÁULICAS</i>	<i>22</i>
<i>Eje temático C: LEGISLACIÓN DEL AGUA, PLANIFICACIÓN Y ECONOMÍA DEL AGUA</i>	<i>46</i>

<i>Eje temático D: AGUAS SUBTERRANEAS</i>	22
<i>Eje temático E: HIDROLOGIA URBANA Y RURAL</i>	62
<i>Eje temático F : RIEGO Y DRENAJE</i>	31
<i>Eje temático G: INGENIERIA SANITARIA, AMBIENTAL Y CALIDAD DEL AGUA</i>	67
<i>Eje temático H: AGUA, SOCIEDAD, SALUD, CULTURA Y EDUCACIÓN</i>	16
<i>Eje temático I: SENSORES REMOTOS Y SIG</i>	19
<i>Eje temático J: VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMATICO</i>	10

*Se estima que tanto en el libro de memorias, como en las presentaciones queda sintetizado el estado del arte de los estudios e investigaciones en el área de recursos hídricos en Argentina.*

*Se espera que los trabajos publicados puedan resultar útiles para aportar elementos que contribuyan a la solución de diversos problemas con los que se enfrentan a diario técnicos, profesionales, investigadores y funcionarios que habitualmente tienen que tratar con temas vinculados al aprovechamiento, gestión, control y preservación de los recursos hídricos.*

*En esta XXVI edición agradecemos a las 4 Instituciones organizadoras, a las auspiciantes –especialmente al INA y al COHIFE-, y particularmente a todo el personal involucrado que desinteresadamente ha trabajado y hecho posible el CONAGUA.*

#### **Comité Organizador**

## **SENSORES REMOTOS Y GIS**



XXVI CONGRESO NACIONAL DEL AGUA

## EJE TEMATICO I: SENSORES REMOTOS Y SIG

Determinación de los usos del suelo en el área irrigada de la cuenca del río Diamante. - Albrieu, Federico .....	Pág.14
Aplicación de nuevos sensores remotos para la estación de la calidad del agua en sistemas acuáticos. - Bonansea, Matías .....	Pág.28
La interferometría radar (INSAR) en la modelación hidráulica: Estado del arte y aplicación - Burgos, Víctor.....	Pág.36
Avances para la sistematización del resamplio de imágenes térmicas a escala de cuenca en el sur de Santa Fe. - Chiarito, Eugenia .....	Pág.51
Cálculo del NDVI en imágenes Landsat 5 para la cuenca del río San Marcos. - Cosano, Noelia .....	Pág.59
Evaluación preliminar del desempeño en la humedad del suelo de los modelos NOAH y VIC - Díaz, Gonzalo M. ....	Pág.61
Sistema integrado de vigilancia, alerta y pronóstico de precipitaciones - SIVAPP - Dölling, Oscar .....	Pág.66
Aplicaciones hidrológicas del modelo digital de elevación ajustado en la zona serrana de arroyo del Azul. – Fajardo, Luisa .....	Pág.77
Estimación de precipitación a partir de datos del radar meteorológico RMA!- Córdoba, Argentina. - Furbatto, Celina Grisel.....	Pág.86
Detección y caracterización de floraciones algales en el embalse San Roque a partir de sensores remotos - Germán, Alba.....	Pág.88
Desarrollo e implementación de un sistema automático para el monitoreo de eventos hidrológicos extremos. - Ibarlucía, Daniela .....	Pág.99
Teleconexiones del régimen de caudales medios mensuales del río Chubut - Malnero, Héctor .....	Pág.101
Reconstrucción de eventos meteorológicos de magnitud para la calibración hidrológica del radar meteorológico RMA1. - Petrolí, Gastón.....	Pág.111
Implementación progresiva del canon de aprovechamiento agrícola de aguas públicas en la provincia de Corrientes resultados preliminares. - Pianalto, Natalia ..	Pág.125
EVQ4000 – sistema de adquisición, almacenamiento y visualización de parámetros hidrometeorológicos. Prena, Sebastian .....	Pág.133
Aplicación de sistemas de información geográfica y de sensores remotos en el monitoreo del riego suplementario en el sudeste bonaerense. - Quiroz Londoño, Orlando Mauricio .....	Pág.143
OMHM CBA para integración de sensores hidrometeorológicos para monitoreo y alerta en la región centro de Argentina - Rodríguez, Andrés .....	Pág.145
Cartografía de susceptibilidad hídrica para dos cuencas de la provincia - Sepulcri, María Gabriela.....	Pág.147
Fundamentos del empleo de radares meteorológicos para prevención y alerta hidrometeorológica y de otros eventos severos en zonas patagónicas. - Serra, Juan	Pág.149

# DETERMINACIÓN DE LOS USOS DEL SUELO EN EL ÁREA IRRIGADA DE LA CUENCA DEL RÍO DIAMANTE CONAGUA 2017. CÓRDOBA, ARGENTINA, 2017

**Federico Albrieu, Juan Fernández**

Departamento General de Irrigación

C.P.:5500/Tel.: 0261-4234000

E-mail: [falbrieu@irrigacion.gov.ar](mailto:falbrieu@irrigacion.gov.ar) – [www.irrigacion.gov.ar](http://www.irrigacion.gov.ar)

## RESUMEN

Mediante un análisis de la base de datos del Registro Permanente del Uso de la Tierra (RUT) de la Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas (DACC), el cual detalla la superficie cultivada por especie de las propiedades rurales de la provincia, se realizó una célula de cultivo (composición porcentual para cada clase de uso determinada en el área) de la cuenca. Por otro lado, se obtuvo la superficie abandonada de dichas propiedades a través de una interpretación visual de imágenes Google Earth utilizando un software de SIG para volcar la información sobre un parcelario de la zona. Dicho proceso fue acompañado por un trabajo de validación que sirvió para corregir los valores de la interpretación.

De ésta manera, se obtuvo una célula de cultivo final, dividida en Unidades Administrativas de Manejo y con abandonos incluidos.

Los resultados muestran que de 73972 ha empadronadas para riego, un 52% se encuentra abandonado mientras que el 48% restante está cultivado, siendo los frutales el cultivo predominante, seguido de la vid.

Asimismo, del total de hectáreas empadronadas con derecho superficial de uso agrícola y que no se encuentra en producción, el 84% corresponde a abandonado antiguo y vegetación natural.

## ABSTRACT

Through an analysis of the data base of the Land Uses Permanent Register (RUT by its spanish name) of the Agriculture and Climate Contingencies Direction (DACC by its spanish name), which details the cultivated area by species of the rural properties of the province, a crop cell was made (percent composition for each crop class determined in the area) of the catchment area. On the other hand, the abandoned area of these properties was obtained through a visual interpretation of Google Earth images using GIS software to pass the information to a cadastral cartography. This process was accompanied by a validation work that helped to correct the interpretation values.

In this way, a final crop cell was obtained, divided into Administrative Management Units (UAM by its spanish name) and with the abandoned surface included.

The results show that from 73972 ha that have irrigation permission, a 52% is abandoned while the remaining 48% is cultivated, being the fruit trees the most predominant crop, followed by the vine.

Likewise, from the total number of registered hectares with superficial right for agricultural use and that are not under production, the 84% correspond to old abandoned crops and natural vegetation.

## INTRODUCCIÓN

En el marco del Balance Hídrico del Río Diamante, en la provincia de Mendoza, fue preciso calcular la demanda hídrica por parte de las fincas que cuentan con derecho de riego. Para llegar a ello, fue necesario conocer la superficie cultivada y la composición porcentual de la célula de cultivo por clase de uso (forestal, frutal, hortícola, vid, olivo, pastura, etc.), distintivos en cuanto a consumo hídrico, lo que permitiera determinar un volumen demandado por el área cultivada.



agua superficial, con su declaración de cultivo y superficie, nomenclatura, ID Propiedad, categoría de derecho, superficie empadronada, año de baja, etc.

**Tabla 1.- Tabla aportada por el RUT utilizada para armar la célula de cultivo.**

Id Propiedad	Id Tipo Cultivo	Superficie Cultivada	Id Destino	Id Producción
6	3617	2,8	5	1
6	36361	4,7	5	1
6	36362	3	5	1
10	3615	1,2306	5	1
10	36361	6,868	5	1
10	36362	1,7525	5	1
12	36361	12,75	5	1
12	36362	12,84	5	1
12	3615	1	5	1

**Tabla 2.- Tabla aportada por el RUT utilizada para armar la célula de cultivo.**

Id Propiedad	INV	Catastro	Irrigación
6	K66415	179900250088840300007	40910033
6	-----	-----	17001774
12	K67018	179900330079062000004	30090255
12	-----	-----	17001302
12	K59633	179900330077058000001	30090144

**Tabla 3.- Tabla aportada por el RUT utilizada para armar la célula de cultivo.**

Id Tipo cultivo	Especie	Grupo	Tipo	Cultivo
3611	Manzano	Frutales pepita	Frutales	Frutales
3613	Peral	Frutales pepita	Frutales	Frutales
3614	Cerezo	Frutales carozo	Frutales	Frutales
3616	Damasco	Frutales carozo	Frutales	Frutales
3617	Duraznero	Frutales carozo	Frutales	Frutales
3634	Olivo	Otras frutas	Frutales	Olivo
3430	Alfalfa	Forrajes	Otros	Otros
36361	Viña	Vid	Vid	Vid
36362	Parral	Vid	Vid	Vid

### Recurso Cartográfico

Se trabajó con el mosaico parcelario catastral proveniente de la Dirección Provincial de Catastro (DPC), como lo establece la ley N° 8051/2009 y la información registral del DGI (febrero 2016). La base de datos alfanumérica de la DPC se relacionó con la base de datos registral del DGI (Tabla 4) de donde surgió una nueva base que especifica las parcelas que cuentan con derecho de agua superficial, su categoría de derecho y el uso correspondiente (Tabla 5)

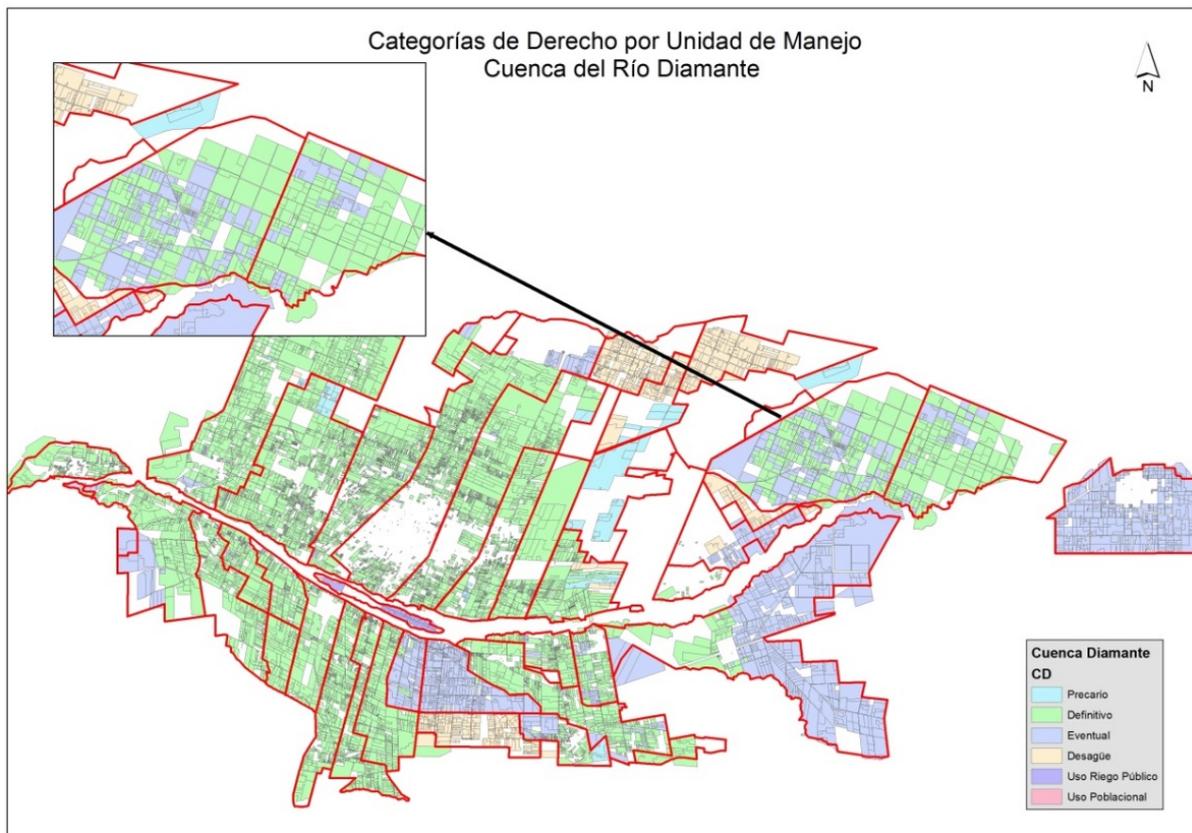
**Tabla 4.- Identificación de parcelas y características DGI.**

Nomenclatura Catastral	Código cauce	Padrón parcial	Categoría de derecho	Descripción
1799001900532260	4064	219	1	Definitivo
1799001900478220	4064	220	1	Definitivo
1799001900480220	4064	221	1	Definitivo
1799001900477230	4064	222	1	Definitivo
1799001900472240	4064	223	1	Definitivo

**Tabla 5.- Base relacional DPC – DGI: definición de parcelas con derecho de agua superficial.**

Nomenclatura Catastral	Categoría de derecho	Titular	Código cauce	Padrón parcial	Superficie empadronada
1799001900532260	Definitivo	Maggioni, Carlos	4064	219	0,5304
1799001900478220	Definitivo	Mercado, Jessica	4064	220	0,1837
1799001900480220	Definitivo	Nieto, Silvia	4064	221	0,1848
1799001900477230	Definitivo	Prado, Hugo	4064	222	0,853
1799001900472240	Definitivo	Prado, hugo	4064	223	0,9083

En la Figura 2, en primer plano se individualizan las UAM en trazo rojo y en detalle las parcelas con su categoría de derecho. En el extremo superior izquierdo de dicho mapa se visualiza un acercamiento a las UAM Elena y La Llave unificada, en donde se distinguen las diferentes categorías de derecho por su color.



**Figura 2.- Categoría de Derecho por UAM.**

**Herramienta informática**

Para la interpretación visual de terrenos abandonados recientes, antiguos y vegetación natural, y para el análisis y la elaboración de las cartas de síntesis se utilizó un software SIG como soporte informático. En tal programa, se carga una imagen satelital y sobre ésta, se carga un shape del parcelario con su base de datos correspondiente, obteniendo el insumo para realizar la interpretación visual.

**Proceso**

Para calcular la célula de cultivo de la cuenca del río Diamante y de cada una de las UAM que la conforman, se decidió recurrir a la base de datos del RUT, el cual declara la superficie

cultivada por cada propiedad y tipo de producción. Como dicha tabla no informa sobre superficies abandonadas, incultas o con vegetación natural, se decidió realizar una interpretación visual de las mismas y se clasificaron como abandonado antiguo, abandonado reciente y vegetación natural, para luego complementarlos con los datos extraídos del RUT. Es decir, se realizaron dos trabajos en paralelo: interpretación visual y la extracción de la célula de cultivo del RUT, cuyas metodologías de trabajo se desarrolla a continuación y en forma separada.

### **Interpretación visual**

Para determinar el abandonado antiguo, abandonado reciente y vegetación natural, se sistematizó una única base de datos alfanuméricos provenientes de la Base Catastral de la DPC y la base de datos Registrales del DGI, tomando como campo relacional la Nomenclatura catastral. Posteriormente se elaboró una nueva base de datos teniendo en cuenta la información aportada por los datos registrales del DGI y la Dirección Provincial de Catastro.

Los datos que fueron utilizados para establecer los tipos de usos del suelo y los abandonos por UAM, y que permiten estimar la superficie abandonada en esta unidad de análisis, se obtuvieron a partir del procesamiento remoto de imágenes tomando como recurso informático un software SIG y como base de interpretación visual las imágenes de Google Earth, con fecha de captura 2012/13/14/15 y 16.

Luego se realizó la validación a campo tanto aleatoria como de aquellas parcelas en donde la imagen satelital no era clara, permitiendo así confirmar el tipo de uso del suelo existente en dichas parcelas.

El proceso se inició tomando como fondo de carta el parcelario catastral y las imágenes satelitales (Figura 3). Sobre éstos se trazaron polígonos para identificar los usos semejantes, respetando siempre el límite de la parcela, ya que es ésta la que tiene asociada los derechos de agua. En la columna diseñada para colocar el uso identificado se colocó lo interpretado en las imágenes satelitales de Google Earth y en la columna observación se colocó todo aquello que presentaba duda sobre el tipo de abandono que serán validados en el campo.

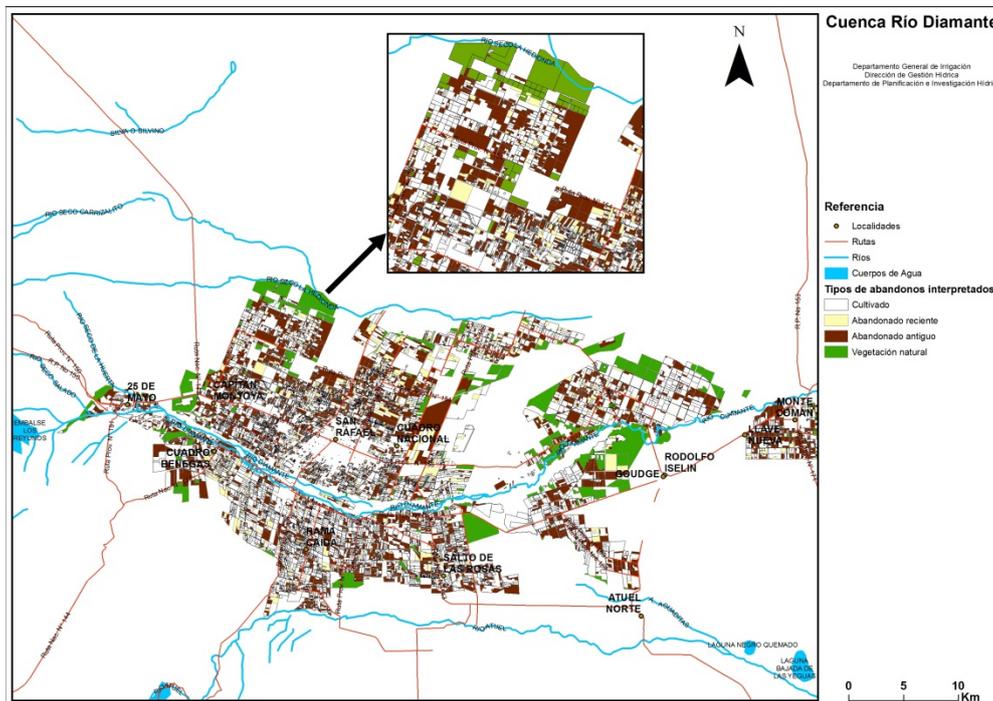


**Figura 3.- Fondo de carta con base catastral e imagen satelital.**

En la tabla siguiente se definen los criterios con los que se clasificaron los usos interpretados.

**Tabla 6.- Abandonos según su tipo.**

Uso	Tipo	Referencia
Agrícola	abandonado antiguo	Hace referencia a la zona en donde se ha detectado que hace 4 años, por lo menos, no hay actividad agrícola.
	abandonado reciente	Hace referencia a la zona en donde se ha detectado que existe movimiento en el terreno, o porque se ha sembrado o cultivado en los últimos 4 años.
	vegetación espontánea bajo riego	Hace referencia a parcelas en las que no se observaba trabajo agronómico realizado o que cuenta con mínima o nula inversión, pero que sin embargo son regadas para favorecer el crecimiento de alguna vegetación pastoril espontánea y se observaba la presencia de animales pastando o señales de ello.
No Agrícola	vegetación natural	Se hizo referencia a la vegetación xerófila, vegetación natural de la provincia de Mendoza la cual forma parte de la Provincia Fitogeográfica del Monte.



**Figura 4.- Tipos de abandonos identificados en la cuenca del río Diamante.**

En la Figura 4 se representan los distintos tipos de abandonos en el área irrigada de la cuenca del río Diamante. En la zona central superior se realizó un acercamiento a la zona de Socavón Frugoni Marco, en donde se distinguen los tipos de usos interpretados visualmente a través del software Google Earth.

**Tabla 7.- Ejemplo de la tabla de Usos de la tierra según interpretación (Ejemplo de Gutiérrez y Cejas del Monte e Hij. Vicuña).**

Nomenclatura Catastral	Tipo derecho	Uso DGI	Observación	Padrón parcial	Código cauce	UAM	Sup. (ha)
1799002800739398	Definitivo			4067	77	Gutiérrez	12,3062
1799002800739398	Definitivo	Abandonado Antiguo		4067	77	Gutiérrez	12,3062
1799002700890800	Definitivo			4068	1	Cejas del monte e hij. Vicuña	20
1799002100130510	Definitivo	Abandonado reciente		4068	5	Cejas del monte e hij. Vicuña	95,8188
1799002100100630	Definitivo	Vegetación natural		4068	15	Cejas del monte e hij. Vicuña	1,2027

Dado que se interpretó sobre un parcelario incompleto al cual le faltaban parcelas y varios CCPP, el relevamiento visual se realizó sobre 64870 ha cuando en realidad hay empadronadas 73972 ha. Por lo tanto, se vincularon los datos relacionando así la información subempadronada a la empadronada real.

Una vez finalizada la interpretación, se calculó la superficie por propiedad de aquellos usos que quedaron en blanco o sin interpretar (tomado como cultivado, ya que sólo se interpretó abandono) y se obtuvo la superficie empadronada cultivada (35238 ha). Luego, la diferencia entre superficie empadronada y la superficie empadronada cultivada se tomó como la superficie empadronada abandonada (38132 ha). (Tabla 8)

**Tabla 8.- Ejemplo de la tabla de Superficie Empadronada, Cultivada y Abandonada en algunas UAM.**

	Superficie Empadronada REAL	Superficie Cultivada Empadronada REAL	Superficie Abandonada Empadronada REAL
UAM.01.Villa e Hij. El Molino	920	561	359
UAM.02.Unif. Socavon Frugoni Marco	6083	2353	3729
UAM.04.Toledano	3121	858	2263
UAM.05.Cerrito e Hij. Pampita	5572	2006	3566
UAM.07.Salas	1915	958	958
Hij. N°1 Canal Elena	410	92	319
UAM.12.Elena	4608	2342	2266
UAM.13.La Llave e Hij. Piquillin	3515	2342	1173
UAM.14.Sauce de las Rosas	753	470	283
UAM.15.Goudge	8587	3168	5419
UAM.23.Gutierrez	1530	1040	490
UAM.25.Day Forte	1580	1008	571
UAM.27.Barruti y del Medio	649	351	298
UAMD.29.Resolana	869	549	319
UAMD.34.Vidalino	3124	2083	1041
Aguas Subterráneas	192	85	107

### Célula de cultivo

Para conseguir la célula de cultivo a partir de RUT, se realizaron los siguientes pasos:

El archivo Excel del RUT contiene varias pestañas con diferentes tablas e información, tal como se detalló anteriormente. Las mismas contenían datos de productores, NC, tipo de producción, superficies y CCPP, entre otras. Éstos datos se unieron en una sola tabla usando como nexo el ID Productor y el ID de cultivo.

Usando la NC y el CCPP como datos en común, se amplió la tabla trayendo del padrón del DGI datos como UAM, múltiples CCPP correspondientes a la misma propiedad, año de baja y superficie empadronada, para así poder detallar célula de cultivo por UAM.

Analizando la tabla resultante, se observó que la superficie cultivada daba muy alta con respecto a la estimada. Esto era provocado por datos repetidos y/o parcelas que aportaban al valor total pero en la realidad se encontraban dadas de baja. (Tabla 9) Debido a esto, se procedió a encontrar y eliminar las parcelas en cuestión, acercando así el valor de superficie cultivada a uno más real.

**Tabla 9.-** Ejemplo de la tabla obtenida luego del cruce entre tablas del RUT y el DGI.

Id prop	Nomenclatura Catastral	Ccpp	Ccpp1	Ccpp2	U.A.M.	Sup emp	For	Frut	Hor	Olivo	Past	Vid	Total
8207	179900170044014200009	4051021 2	40510212		Seru civit	399	0	248	1	70	0	122	441
8207	179900170051925200009	4051022 7	40510227	40510235	Seru civit	171	0	248	1	70	0	122	441
8207	179900170058014200002	4051021 1	40510211	40510228	Seru civit	100	0	248	1	70	0	122	441
8207	179900170048916600004	4051021 3	40510213		Seru civit	37	0	248	1	70	0	122	441
8207	-----	4051022 8			Seru civit	29	0	248	1	70	0	122	441
11281	179900220082571800009	4131016 4			Elena	183	150	12	0	0	215	41,05	418
11281	179900110045028000004	4131032 8	41310328	49060018	Hij. N°1 elena	125	150	12	0	0	215	41,05	418
11281	179900220077065000000	4131004 4	41310044		Elena	50	150	12	0	0	215	41,05	418
11281	-----	4131032 8			Elena	50	150	12	0	0	215	41,05	418
11281	-----	4906001 8			Hij. N°2 elena	20	150	12	0	0	215	41,05	418
11281	179900120007032000004	4049001 8	40490018		Bombal	5	150	12	0	0	215	41,05	418

Como se puede observar en el ejemplo de la Tabla 10, al resultado de superficie cultivada obtenido se lo discriminó entre los usos Forestal, Frutal, Hortícola, Olivo, Pastura y Vid, y a su vez se dividió en las UAM correspondientes.

Tabla 10.- Parte de la Célula de cultivo por UAM en ha.

	Forestal	Frutales	Hortalizas	Olivo	Pastura	Vid	Total general
Hij. N°1 Canal Elena	150	12	0	0	215	41,052	418,052
Hij. N°2 Canal Elena	2	7,35	7,6	0,1	0	16,723	33,773
UAM 01.Villa e Hij. El Molino	28	20,8	1,07	0	15,4	2,205	67,475
UAM 02.Unif. Socavon Frugoni Marco	2	378,3366	124,39	120,6428	155,45	1098,028	1878,8474
UAM 03.Las Paredes	0,75	385,6576	32,423	167,326	48,57	668,3612	1303,0878
UAM 22.R Caida e Hij. Salinas	0	358,8649	16,81	30,011	3,75	170,0229	579,4588
UAM 23.Gutierrez	0	355,6165	38,58	37,2401	101,25	205,3597	738,0463
UAM 24.Vila	0	241,797	29,64	20,144	1,5	98,9431	392,0241
UAM 25.Day Forte	0	509,9762	43,31	130,389	195,9	249,2693	1128,8445
UAM 26.Cejas del Monte e Hij. Vicuña	0	626,6081	9,99	80,125	177	415,3958	1309,1189
UAM 27.Barruti y del Medio	0,5	120,251	8,7	38,316	1,5	136,4549	305,7219
UAM 31.Los claveles	1,5	252,1268	43,5	61,66	0,6	53,4065	412,7933

Luego, el valor de superficie cultivada aportada por el RUT (27061 ha) se ajustó al valor de superficie empadronada cultivada obtenida por diferencia de la interpretación del abandono detallada en la Tabla 8 (35238 ha).

Para realizar dicho paso, se obtuvo la célula de cultivo en porcentaje por uso y por unidad de manejo. (Tabla 11)

Tabla 11.- Parte de la Célula de cultivo por UAM en %.

	Forestal	Frutales	Hortalizas	Olivo	Pastura	Vid
Hij. N°2 Canal Elena	6%	22%	23%	0%	0%	50%
Isla + Cerrito	0%	23%	5%	21%	23%	29%
UAM 01.Villa e Hij. El Molino	41%	31%	2%	0%	23%	3%
UAM 02.Unif. Socavon Frugoni Marco	0%	20%	7%	6%	8%	58%
UAM 03.Las Paredes	0%	30%	2%	13%	4%	51%
UAM 04.Toledano	0%	23%	7%	35%	15%	20%
UAM 24.Vila	0%	62%	8%	5%	0%	25%
UAM 25.Day Forte	0%	45%	4%	12%	17%	22%
UAM 27.Barruti y del Medio	0%	39%	3%	13%	0%	45%
UAM 34.Vidalino	0%	37%	3%	0%	11%	49%
UAM 28.Retamito e Hij. Española	0%	63%	0%	1%	9%	26%
UAM 29.Resolana	1%	35%	0%	4%	0%	59%

Estos porcentajes se relacionaron con la superficie empadronada inculca proveniente de la interpretación, obteniendo así la célula de cultivo con el abandono incorporado. (Tabla 12)

Tabla 12.- Parte de la Célula de cultivo en % con abandono incluido por UAM.

	Forestal	Frutales	Hortalizas	Olivo	Pastura	Vid	Abandonado
UAM 03.Las Paredes	0%	13%	1%	6%	2%	23%	56%
UAM 04.Toledano	0%	6%	2%	10%	4%	6%	73%
UAM 06.Pavez	0%	12%	2%	16%	5%	6%	58%
UAM 07.Salas	0%	29%	1%	6%	1%	14%	50%
UAM 17.Grande	0%	22%	1%	1%	0%	17%	59%
UAM 18.Sauce de la Leona	0%	44%	3%	1%	1%	17%	33%
UAM 19.Cortaderal	1%	57%	2%	3%	0%	9%	29%
UAM 20.R Caída González	0%	23%	3%	3%	1%	26%	45%
UAM 23.Gutierrez	0%	33%	4%	3%	9%	19%	32%
UAM 34.Vidalino	0%	23%	2%	0%	7%	30%	38%
UAM 28.Retamito e Hij. Española	0%	31%	0%	1%	5%	12%	51%
UAM 29.Resolana	1%	22%	0%	3%	0%	37%	37%
UAM La Morenina	0%	14%	0%	0%	34%	0%	52%

A la par de estas tareas, se realizó una validación a campo de parcelas tomadas al azar, de las que se presentaban dudas, y de aquellas en las que el RUT declaraba pastura.

Durante el recorrido de validación, en el que se validaron 234 parcelas, se observó que muchas de las parcelas interpretadas como vegetación natural, abandonado antiguo, abandonado reciente y las pasturas validadas del RUT eran, en realidad, parcelas en las que no se advierten labores culturales, o presentan mínima o nula inversión. No obstante las mismas son regadas para favorecer el crecimiento de alguna vegetación espontánea. Se observó también la presencia de animales pastando o signos de que lo habían estado haciendo. Esto llevó a la creación de un nuevo uso, ya que este tipo de vegetación no se comporta como pastura intensiva (alfalfa) pero tampoco se trata de un monte natural. Además, la Subdelegación de Aguas informa que solicitan la misma. Por todo lo expuesto, parcelas en esa situación se clasificaron como Vegetación Espontánea Bajo Riego y a los efectos de calcular la demanda se le asignó a este uso el 60 % del Kc de la Bermuda o Chepica (*Cynodon dactylon*).

Con los datos obtenidos en la validación, se corrigieron los porcentajes de la célula de cultivo ajustando los valores de cada uso para cada UAM, agregando además el nuevo Uso de Vegetación Espontánea Bajo Riego y discriminando el abandono en cada una de sus niveles. (Tabla 13)

Tabla 13.- Célula de cultivo final en % por UAM.

UAM	% FORESTAL	% FRUTAL	% HORTÍCOLA	% OLIVO	% PASTURA	% VID	% VEGETACIÓN ESPONTÁNEA BAJO RIEGO	% ABANDONAD O RECIENTE	% ABANDONAD O ANTIGUO	% VEGETACIÓN NATURAL
01.Villa e Hij. El Molino	25,3	18,8	1,0		13,9	2,0		1,3	36,1	1,7
02.Unif. Socavon Frugoni Marco	0,0	7,8	2,6	2,5	3,2	22,6		4,9	39,9	16,5
03.Las Paredes	0,0	13,0	1,1	5,6	1,6	22,5		6,9	44,1	5,1
04.Toledano		6,4	1,9	9,5	4,1	5,5		17,7	54,0	0,8
05.Isla + Cerrito	0,0	8,2	1,7	7,4	8,1	10,6		16,1	42,2	5,8
06.Pavez	0,1	12,2	2,3	15,7	5,4	6,0		18,9	38,3	1,0
07.Salas		28,6	0,8	5,7	0,5	14,4		5,7	37,6	6,7
08.C.Nacional		6,4	1,3	0,2	10,1	1,8		41,1	35,0	4,1
09.Bombal		32,9	0,6	3,6		22,7		13,4	15,5	11,2
10.Hij. N°1 Canal Elena	8,0	0,6			11,5	2,2			77,7	
11.Hij. N°2 Canal Elena	0,9	3,4	3,5	0,0		7,7	25,5	0,1	13,3	45,5
12.Elena	0,1	13,3	2,9	2,4	8,6	14,4	9,1	2,6	30,9	15,6
13.La Llave e Hij. Piquillin		19,5	2,1	2,2	8,4	18,3	16,2	0,8	15,8	16,7
14.Sauce de las Rosas		21,7	1,1	9,8	0,1	29,7		5,3	29,5	2,8
15.Goudge		14,3	0,6	4,2	4,9	12,8		4,0	40,4	18,7
16.SeruCivit	0,2	23,1	1,2	9,5	0,5	14,1		1,5	30,8	19,3
17.Grande		22,1	1,1	0,8	0,4	17,0		35,1	23,4	
18.Sauce de la Leona		44,1	3,3	1,0	1,2	17,4		9,1	24,0	
19.Cortaderal	0,6	57,2	1,7	2,6	0,1	8,7		3,5	25,5	
20.R. Caida Gonzalez		22,8	2,6	2,9	1,4	25,6		6,5	34,2	4,0
21.Cubillos	0,2	44,7	3,7	9,0	1,4	11,7		9,6	19,5	0,1
22.R. Caida e Hij. Salinas		43,0	2,0	3,6	0,4	20,4		4,7	25,9	
23.Gutierrez		32,8	3,6	3,4	9,3	18,9		3,4	25,2	3,4
24.Vila		40,8	5,0	3,4	0,3	16,7		6,5	27,4	
25.Day Forte		28,8	2,4	7,4	11,1	14,1		4,5	31,6	
26.Cejas del Monte e Hij. Vicuña		27,0	0,4	3,5	7,6	17,9		6,6	35,5	1,4
27.Barruti y del Medio	0,1	21,3	1,5	6,8	0,3	24,1		2,6	40,9	2,4
UMD.28.Retamito e Hij. Española	0,0	30,9	0,2	0,6	4,6	12,4		9,2	18,5	23,6
UMD.29.Resolana	0,5	22,2		2,8	0,3	37,4		7,9	14,8	14,0
UMD.30.Hij. Algarrobal	3,2	6,8	5,0	0,1	3,8	32,0		1,7	25,1	22,4
UMD.31.Los CLaveles	0,2	27,8	4,8	6,8	0,1	5,9		1,6	34,6	18,3
UMD.32.Arroyo del Medio Y Cienagas del Toran		13,3	1,2	0,4	22,2	12,2		7,9	42,8	

UMD.33.La Morenina		13,8			34,4				51,8	
34.Vidalino	0,2	19,4	1,5	0,2	10,6	25,9	8,8	0,6	19,3	13,4
Aguas Subterráneas		12,2	14,0	17,0	1,3			49,9	5,6	

## RESULTADOS

**Tabla 14.- Síntesis de los usos del suelo identificados.**

Usos identificados por percepción remota				en parcelas de derecho de agua superficial		en parcelas uso subterráneo		Total
				%	Sup. (ha)	%	Sup. (ha)	
Con Derecho	Sin producción	Abandonado antiguo + vegetación espontánea	84%	30697	10%	44	30742	
		Abandonado reciente	16%	5747	90%	396	6143	
		<b>Total sin producción</b>	<b>100%</b>	<b>36444</b>	<b>100%</b>	<b>440</b>	<b>36885</b>	
	Uso agrícola	En producción	Forestal	1%	243	0%	0	243
			Frutal	39%	13208	27%	97	13305
			Hortícola	4%	1246	31%	111	1357
			Olivo	9%	3179	38%	135	3314
			Pastura	11%	3719	3%	10	3730
			Vid	32%	10863	0%	0	10863
			Vegetación espontánea bajo riego	4%	1481	0%	0	1481
			<b>Total cultivado</b>	<b>100%</b>	<b>33941</b>	<b>100%</b>	<b>353</b>	<b>34294</b>
	<b>Total uso agrícola (ha)</b>			<b>70385</b>		<b>794</b>	<b>71178</b>	
	Uso no agrícola	Uso público (arbolado)	40%	1125	0%	0	1125	
		Recreativo	58%	1629	0%	0	1629	
Abastecimiento poblacional		1%	40	0%	0	40		
<b>Total uso no agrícola (ha)</b>		<b>100%</b>	<b>2794</b>	<b>0%</b>	<b>0</b>	<b>2794</b>		
Sin Derecho	Superficie de UM sin derecho		100%	18096,0818	100%	4206,5	<b>22302,5818</b>	
							<b>96275</b>	
							<b>TOTAL</b>	

Del análisis de resultados (Tabla 14 y Figura 5), se desprende que de las 73972 ha empadronadas con uso agrícola, un 48,18% se encuentra en producción mientras un 51,82% se encuentra en estado de abandono.

El 71% de las hectáreas en producción empadronadas con derecho de riego superficial está cultivado con frutal y vid, siendo predominante la primera de ellas con 39% cultivado, seguido por la vid con 32%.

Por otro lado, del total de hectáreas empadronadas con derecho superficial de uso agrícola y que no se encuentra en producción, un 84% corresponde a abandonado antiguo y vegetación natural.

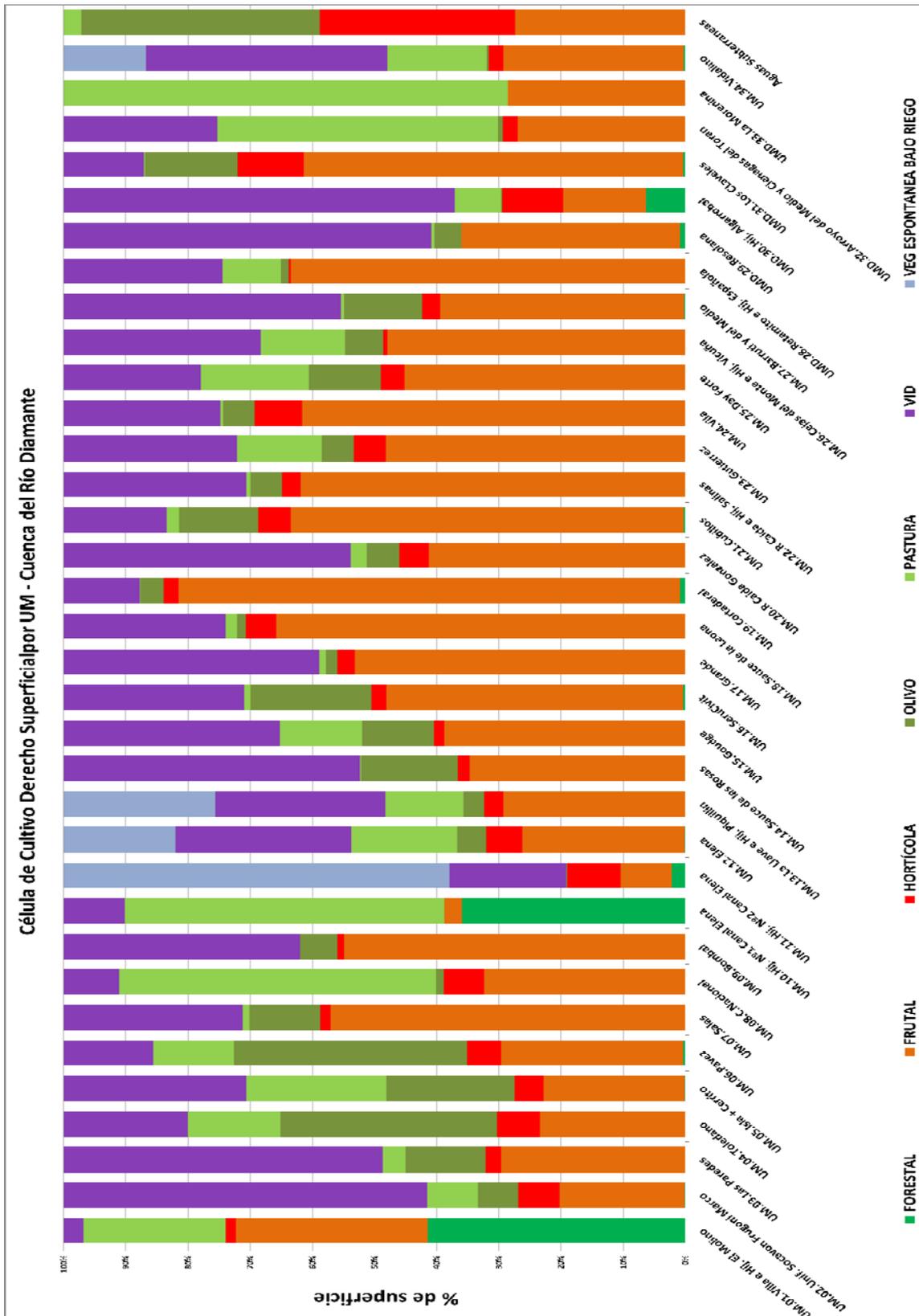
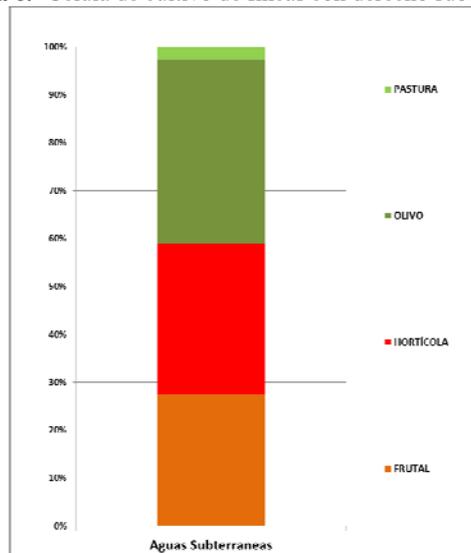


Figura 5.- Célula de cultivo de fincas con derecho superficial por UAM.

**Figura 6.-** Célula de cultivo de fincas con derecho subterráneo.

Por otra parte, considerando el área de Agua Subterránea (Figura 6), el cultivo predominante es el olivo con el 38% de la superficie en producción, seguido de cerca por el hortícola y el frutal. Mientras que el uso agrícola sin producción es ocupado por un 90% por parcelas abandonadas recientemente.

## CONCLUSIONES

Se concluye que el cultivo predominante sigue siendo el frutal, mientras que más de la mitad de la superficie empadronada para riego de la cuenca se encuentra abandonada.

En cuanto a la metodología, se requiere mucho tiempo para obtener los resultados. Sería oportuno considerar la implementación de detección de usos del suelo mediante la interpretación radiométrica en imágenes satelitales a través de bandas espectrales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Ley 4.438.** Ley Provincial del Registro Permanente del Uso de la Tierra, Mendoza, 30 de abril de 1980.

**Mustoni, N.** (2013). “La teledetección en la estimación del uso de los derechos de agua para el balance hídrico del río Tunuyán Superior”

**Departamento General de Irrigación.** (2015). Balance Hídrico del Río Tunuyan Superior.

**Departamento Genreal de Irrigación.** (2015). Resolución 267/S/2015. Aprueba el Balance Hídrico del Río Tunuyan Superior y ordena su elevación a la Honorable Legislatura. Mendoza.

## **APLICACIÓN DE NUEVOS SENSORES REMOTOS PARA LA ESTIMACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA EN SISTEMAS ACUÁTICOS**

**Bonanseña M.<sup>1,2</sup>, Cossavella A.<sup>3</sup>, Bonfanti E.<sup>4</sup>, Busso F.<sup>4</sup>, Ledesma M.<sup>2</sup> & Bazán R.<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>CONICET. <sup>2</sup>Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto. <sup>3</sup>Secretaría de Recursos Hídricos y Coordinación, Provincia de Córdoba. <sup>4</sup>Aguas Cordobesas S.A. <sup>5</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales- Universidad Nacional de Córdoba  
Ruta 36, km 601, Río Cuarto, Córdoba. Tel: 0358-4676512  
E-mail: mbonanseña@ayv.unrc.edu.ar

### **RESUMEN**

La eutrofización representa una amenaza para el medio ambiente y la sociedad. En la actualidad se dispone de nuevos sensores remotos de alta resolución que pueden ser utilizados para estimar con mayor precisión variables de calidad del agua en sistemas acuáticos. El objetivo de este estudio fue estimar la concentración de clorofila-a (Cl-a) en los embalses Los Molinos y La Quintana (Córdoba, Argentina), mediante el satélite Sentinel-2A el cual está disponible desde el año 2015. Utilizando técnicas estadísticas que relacionaron datos de campo con información satelital, se generó y validó un modelo para estimar y representar gráficamente la distribución de la Cl-a en la superficie de los reservorios. Los resultados obtenidos representan los primeros avances para estudiar, mediante el satélite Sentinel-2A, la dinámica de la Cl-a en dos de los sistemas acuáticos más importantes de la provincia, pudiendo además predecir su concentración en sitios no muestreados. Se concluye que el uso de nuevas tecnologías para el monitoreo y modelado de la calidad del agua es un tema estratégico en la toma de decisiones sobre el manejo y sustentabilidad de los recursos hídricos.

### **ABSTRACT**

Eutrophication is a threat for the environment and society. New high resolution remote sensors are now available to accurately estimate water quality variables in aquatic systems. The objective of this study was to estimate chlorophyll-a concentration (Chl-a) in Los Molinos and La Quintana reservoirs (Córdoba, Argentina) using the Sentinel-2A satellite which is available since 2015. Using statistical techniques which relate field data and satellite information, a model to estimate Chl-a was generated and validated. Obtained results represent the first improvements to study, using Sentinel-2A satellite, the dynamic of Chl-a in two of the most important reservoirs of the province, being able to predict its concentration in non-sampled sites. It is concluded that the use of new technologies for monitoring and modelling of reservoirs water quality is a strategic issue in management and sustainability of water resources.

### **INTRODUCCIÓN**

La eutrofización y las floraciones de algas y cianobacterias potencialmente tóxicas representan una fuerte amenaza para el ambiente y la sociedad. Los sensores remotos pueden ser utilizados como una herramienta complementaria en el monitoreo de los recursos acuáticos, obteniendo resultados complejos y con gran potencial en el mapeo y valoración espacio-temporal de parámetros de calidad del agua (Loveland & Irons, 2016).

Si bien existen diferentes satélites que pueden ser utilizados para evaluar diversos parámetros de calidad del agua (Matthews, 2011; Dörnhöfer & Oppelt, 2016), En la actualidad, existen nuevos sensores remotos que debido a sus características, pueden ser utilizados para estimar con mayor precisión variables en sistemas acuáticos. En este sentido, el satélite Sentinel 2-A, puesto en órbita en el año 2015 por la Agencia Espacial Europea (ESA) y de libre acceso puede ser utilizado para una mejor estimación de los procesos que ocurren en sistemas acuáticos dinámicos.

El objetivo del presente estudio fue estimar la concentración de clorofila-a (Cl-a) en los embalses Los Molinos y La Quintana, los cuales están localizados en la región central de la provincia de Córdoba (Argentina). La selección de la variable Cl-a se debe a que es reconocida como una de los principales parámetros de calidad del agua, estando directamente relacionada con la productividad primaria y la condición trófica del sistema (Liu et al., 2011).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Córdoba y zona de influencia, con una población aproximada de 1554000 habitantes (INDEC, 2010), satisface sus requerimientos de agua a partir de las cuencas de los ríos Suquía y Xanaes, abasteciendo a un 70 y 30 % de la ciudad, respectivamente. Diversos investigadores sugieren que desde hace décadas el abastecimiento hídrico que se realiza desde la cuenca del río Suquía, cuyo almacenamiento principal es el embalse San Roque, presenta un eminente grado de deterioro de la calidad de sus aguas y un avance del proceso de eutroficación (Bazán et al., 2014). De esta manera, la cuenca del río Xanaes, mediante el trasvase por el canal Los Molinos-Córdoba, podría satisfacer las demandas futuras de la región con mayor seguridad y con una reducción de los períodos críticos durante las épocas de sequía (Castelló et al. 2000).

El subsistema Xanaes tiene como principal fuente al embalse Los Molinos, el cual presenta una superficie del espejo de agua de 2110 ha que actúa como reservorio de una cuenca de 978 km<sup>2</sup>. Este embalse está conformado por el aporte de sus cuatro tributarios y posee un solo efluente, el río Los Molinos con un módulo de aproximadamente 10 m<sup>3</sup>/s (Figura 1). Aguas abajo se encuentra el dique compensador La Quintana, el cual posee una superficie de 50.5 ha. Estos embalses multipropósito, además de ser utilizados para abastecimiento de agua, son utilizados para generación de energía eléctrica, riego, control de crecidas, provisión de hábitat, pesca, turismo y deportes acuáticos (Bazán et al., 2014; Bonansea et al., 2017).

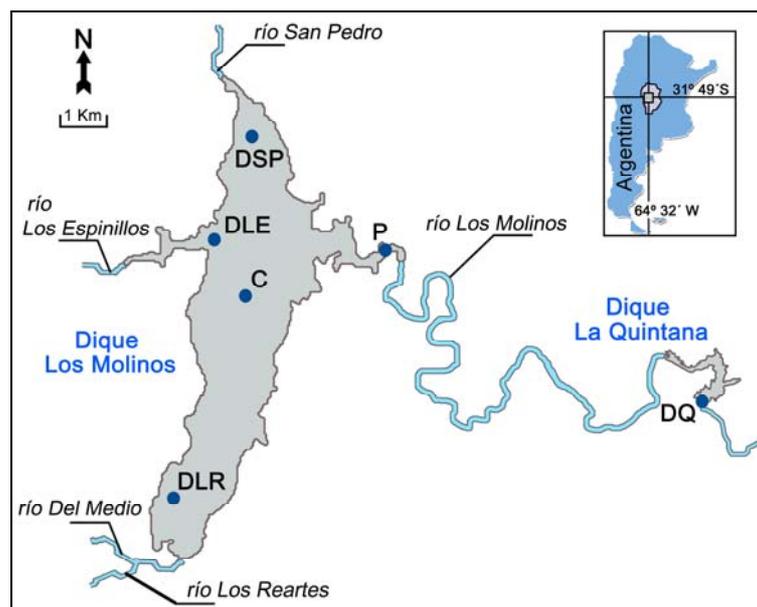


Figura 1.- Área de estudio y ubicación de sitios de muestreo

## TOMA DE MUESTRAS

Como parte de un programa de monitoreo de calidad del agua realizado por la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFyN) de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC) con la participación activa y complementaria de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia, la empresa Aguas Cordobesas S.A. (actual concesionaria del servicio de agua potable), CONICET y la colaboración del personal de Seguridad Náutica de la provincia, durante los últimos 18 (dieciocho) años se ha monitoreado sistemática e ininterrumpidamente el embalse Los Molinos y desde hace 3 (tres) años se incorporó el estudio del embalse La Quintana (Bazán et al., 2014). En cada sitio de muestreo (Figura 1) se realizan mediciones *in-situ* de las coordenadas de ubicación geográfica con GPS y se determina temperatura atmosférica mediante un termómetro manual y transparencia del agua con un disco de Secchi. Utilizando sondas Horiba U-10, U-23 y W-22XD se mide temperatura del agua, pH, oxígeno disuelto, conductividad y turbiedad. En laboratorio se determina la concentración de fósforo total (PT) y clorofila-a (Cl-a) según metodología estándar (APHA-AWWA-WEF, 2012).

En este estudio se utilizaron los datos obtenidos en 2 campañas de muestreo realizadas los días 06 de Diciembre de 2016 y 17 de Marzo de 2017. Así, mediante análisis de regresión simple y múltiple se relacionaron los datos de Cl-a obtenidos a campo con imágenes provistas por el Satélite Sentinel-2A de fecha similar, pudiendo predecir la Cl-a en toda la superficie de los reservorios en estudio.

## IMÁGENES SATELITALES

El satélite Sentinel-2A que se caracteriza por ser parte de la flota europea de satélites para la observación de la superficie terrestre, posee un único sensor denominado *MultiSpectral Imager* (MSI) que presenta 13 bandas espectrales ubicadas en la región del infrarrojo visible-infrarrojo cercano (NIR) y onda infrarroja corta (SWIR) del espectro electromagnético a 3 resoluciones espaciales diferentes (10, 20, 60 m) (Tabla 1) (ESA, 2015). Este sensor además presenta un ancho de barrido de 290 km con una frecuencia de revisita de 10 días. En Marzo de 2017 fue puesto en órbita su satélite gemelo Sentinel-2B, el cual reducirá la frecuencia de revisita a 5 días (Traganosa & Reinartzb, 2017).

**Tabla 1.-** Características técnicas del satélite Sentinel-2A

Bandas espectrales	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	Resolución espacial (m)
1- Aerosol	0.43-0.45	60
2- Azul	0.45-0.52	10
3- Verde	0.54-0.57	10
4- Roja	0.65-0.68	10
5- NIR	0.69-0.71	20
6- NIR	0.73-0.74	20
7- NIR	0.77-0.79	20
8- NIR	0.78-0.90	10
9- NIR	0.85-0.87	20
10- Vapor de agua	0.93-0.95	60
11- SWIR	1.56-1.65	20
12- SWIR	2.10-2.28	20
13- Nubes	1.36-1.39	60

## DESARROLLO DEL MODELO ESTADÍSTICO

Al contar con los sitios de muestreo georreferenciados, se logró relacionar los valores de Cl-a medidos en campo con la información satelital mediante técnicas estadísticas. Así, utilizando a la Cl-a como variable dependiente y a las bandas espectrales del satélite Sentinel-2A como variables independientes, se realizó un análisis de regresión múltiple con eliminación *backward* pudiendo generar el modelo que mejor estimó la variación de Cl-a en toda la superficie de los reservorios en estudio. Este modelo fue validado mediante análisis de regresión simple entre los valores de Cl-a medidos a campo y los estimados por teledetección. Posteriormente, el modelo validado fue utilizado para representar gráficamente la variabilidad espacio-temporal de la variable Cl-a durante el período en estudio.

## EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Al analizar los valores de Cl-a medidos se observó que en ambas campañas de muestreo los valores medios fueron bajos ( $2.7$  y  $5.7 \text{ mg/m}^3$  para las campañas de diciembre de 2016 y Marzo de 2017, respectivamente), sin encontrarse diferencias estadísticas significativas entre estas campañas de muestreo ( $p= 0.23$ ) (Tabla 2). El valor de Cl-a más alto se encontró en Marzo de 2017 ( $17.0 \text{ mg/m}^3$ ), mientras que ambas campañas de muestreo registraron el mismo valor mínimo ( $1.0 \text{ mg/m}^3$ ).

**Tabla 2.-** Medidas resúmenes de los valores de Cl-a medidos y estimados a partir del satélite Sentinel-2A

Fecha de muestreo	Valores de Cl-a medidos en campo ( $\text{mg/m}^3$ )		Valores de Cl-a estimados por teledetección ( $\text{mg/m}^3$ )	
	Media $\pm$ Ds.	Rango	Media $\pm$ Ds.	Rango
06 de Diciembre de 2016	$2.7 \pm 1.0$	1.0 – 4.0	$2.1 \pm 1.3$	0.8 – 4.1
17 de Marzo de 2017	$5.7 \pm 5.8$	1.0 – 17.0	$5.9 \pm 4.8$	1.0 – 14.3

Ds.: Desvío estándar

A partir del modelo de regresión generado para estimar la Cl-a que se explica más adelante y utilizando las imágenes satelitales correspondientes a cada campaña de muestreo, se obtuvieron los valores estimados de Cl-a para los sitio de muestreo, encontrándose que en todos los casos los valores predichos de Cl-a fueron similares a los medidos a campo (Tabla 1).

A partir del análisis de regresión múltiple con eliminación *backward* se determinó que las bandas 3 y 4 del sensor Sentinel-2A ubicadas en la región del verde y rojo del espectro electromagnético, fueron las que mejor explicaron la distribución de la variable Cl-a en los embalses en estudio ( $R^2=0,87$ ) (Ecuación 1):

$$Cl-a = -29.59 + 0.08 \cdot Band3 - 0.04 \cdot Band4 \quad (1)$$

donde *Band3* y *Band4* son los niveles digitales (ND) de las bandas espectrales verde y roja del sensor Sentinel-2A, respectivamente.

La buena relación encontrada entre los valores medidos de la variable Cl-a y los estimados por teledetección ( $R^2= 0.88$ ), confirma la alta capacidad predictiva del modelo generado (Figura 2).

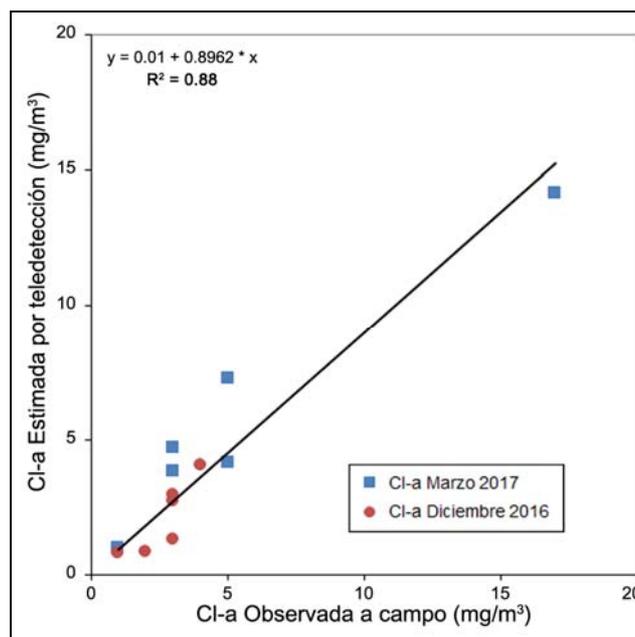
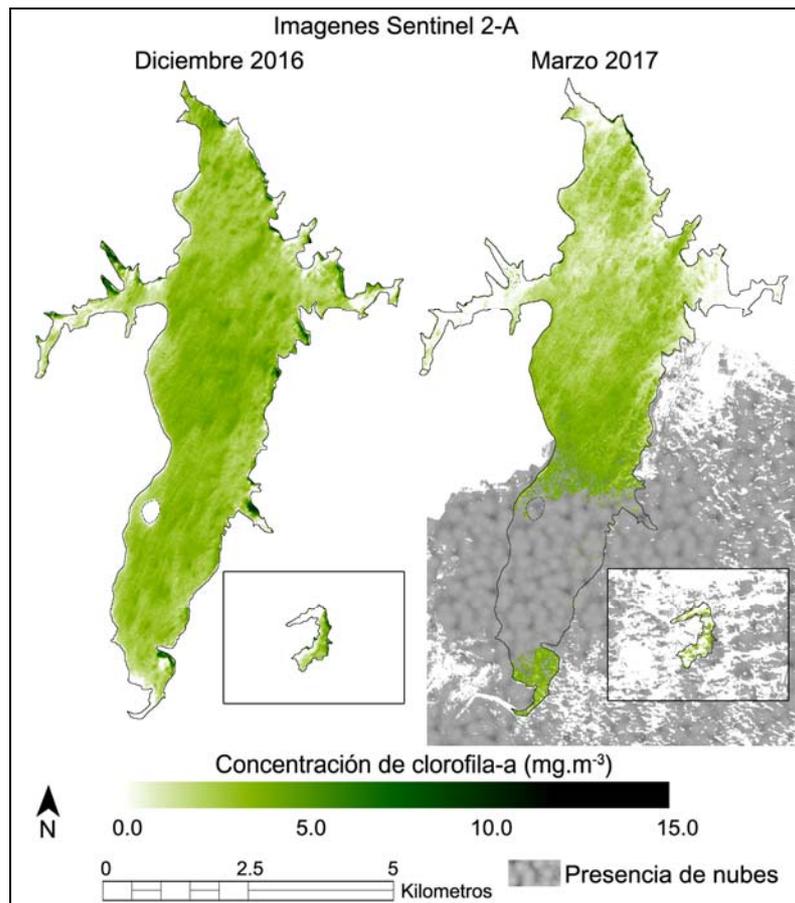


Figura 2.- Diagrama de valores de Cl-a observados vs esperados

Al aplicar el modelo de regresión obtenido sobre las imágenes Sentinel 2-A correspondientes a cada campaña de muestreo, se construyeron mapas que fueron utilizados para representar gráficamente la distribución espacial de la variable Cl-a en las campañas analizada (Figura 3).



**Figura 3.-** Distribución de CI-a en los embalses en estudio

Durante las campañas de muestreo analizadas, los valores de CI-a estimados por teledetección en la superficie de los reservorios fueron bajos y homogéneos, lo que concuerda con los datos obtenidos a campo. En el mapa de Marzo de 2017 se observó la presencia de formaciones nubosas que impidieron la estimación del parámetro analizado. Sin embargo, enmascarando estas regiones, se logró predecir la concentración de la CI-a en el resto de la superficie de los reservorios.

En ambos mapas los valores más bajos de CI-a se localizaron en la zona de la presa del dique Los Molinos y en el ingreso del dique La Quintana. Mientras que las concentraciones más altas se localizaron en la región central del embalse Los Molinos. Los altos valores de CI-a encontrados cerca de la costa, principalmente en el mapa de diciembre de 2016, pueden deberse a la acumulación de algas por acción de los vientos.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La determinación de la calidad del agua y estado trófico se considera el eje central de cualquier estudio de valoración o monitoreo de un lago o embalse. La incorporación de nuevas herramientas tecnológicas para el monitoreo y gestión de la calidad del agua es un tema estratégico para la toma de decisiones y sustentabilidad de los recursos hídricos a nivel local y regional.

A partir de la combinación de datos de campo e información satelital se logró generar un modelo de estimación de la variable Cl-a, el cual fue utilizado para representar gráficamente la distribución de esta variable en toda la superficie de los reservorios estudiados, logrando la identificación de áreas con características particulares.

Los resultados obtenidos representan los primeros avances para estudiar la dinámica de variables de calidad del agua en uno de los sistemas de embalses más importantes de la provincia de Córdoba mediante el nuevo satélite Sentinel-2A, del cual existen muy pocos antecedentes relacionados con el monitoreo de recursos hídricos.

Debido a la importancia de los sistemas en estudio, se recomienda continuar con los muestreos a campo y con la implementación de técnicas de teledetección, incluyendo nuevos sensores de alta resolución espacial, tales como el satélite Sentinel-2A y su gemelo Sentinel-2B, lo que servirá para una mayor y mejor comprensión de los procesos dinámicos que ocurren en estos sistemas.

#### LISTA DE SÍMBOLOS

Cl-a: Concentración de clorofila-a  
R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**APHA-AWWA-WEF** (2000). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 18th Ed. APHA-AWWA-WEF, Washington DC, USA.

**Bazán, R., Larrosa, N., Bonansea, M., López, A., Busso, F. y Cosavella, A.** (2014). “Programa de monitoreo de calidad de agua del Embalse Los Molinos, Córdoba-Argentina”, *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNC*, Vol. 1, No. 2, Septiembre, pp. 27-34.

**Bonansea, M., Bazán, R., Ferrero, S., Rodríguez, C., Ledesma, C. & Pinotti, L.** (2017). “Multivariate statistical analysis for estimating surface water quality in reservoirs”, *International Journal of Hydrology Science and Technology*. En Prensa.

**Castelló, E.** (2009). “Determinación de la capacidad hidráulica del canal Los Molinos-Córdoba”. *Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería*, UNC.

**Dörnhöfer, K. & Oppelt, N.** (2016). “Remote sensing for lake research and monitoring-Recent advances”, *Ecological Indicators*, Vol. 64, May, pp. 105-122.

**ESA.** (2015). *SENTINEL-2 User Handbook*. Disponible en Web: [https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2\\_User\\_Handbook](https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook)

**INDEC.** (2010). *Censo Nacional de Población, Hogares y viviendas*. Disponible en Web: [http://www.censo2010.indec.gov.ar/cuadrosDefinitivos/indice\\_censo\\_feb12.pdf](http://www.censo2010.indec.gov.ar/cuadrosDefinitivos/indice_censo_feb12.pdf)

- Liu, X., Lu, X. & Chen, Y.** (2011). “The effects of temperature and nutrient ratios on Microcystis blooms in Lake Taihu, China: An 11-year investigation”, *Harmful Algae*, Vol. 10 No. 3, March, pp. 337-343.
- Loveland, T. R. & Irons, J. R.** (2016). “Landsat 8: the plans, the reality, and the legacy”, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 185, November, pp. 1-6.
- Matthews, M.** (2011). “A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 32, No. 21, August, pp. 6855-6899.
- Traganosa, D. & Reinartzb, P.** (2017). “Mapping Mediterranean seagrasses with Sentinel-2 imagery”, *Marine Pollution Bulletin*. En prensa.

## **LA INTERFEROMETRÍA SAR EN LA MODELACIÓN HIDRÁULICA: ESTADO DEL ARTE Y APLICACIÓN**

**Victor Burgos <sup>(1)</sup>, Romina Solorza <sup>(2)</sup> y Ana Paula Salcedo <sup>(1)</sup>**

(1) Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Andino

Dirección: Belgrano (O) 210, Ciudad, Mendoza, Argentina; Tel.: 0261- 4288005; e-mail: vburgos@ina.gob.ar

(2) Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich, Comisión Nacional de Actividades Espaciales, Argentina

### **RESUMEN**

Actualmente se encuentra cada vez más difundido el uso de modelos digitales de elevación (MDE) en Hidrología para el estudio de cuencas e inundaciones. Las simulaciones matemáticas de las crecidas requieren de datos topográficos e hidráulicos a una escala temporal y espacial determinada, constituyendo una información de entrada esencial.

Una de las técnicas para la construcción de MDE de resoluciones medias a buenas es la interferometría radar de apertura sintética (InSAR). Esta técnica posee la capacidad de medir los patrones de interferencia causados por la diferencia de fase entre dos o más imágenes, pudiéndose determinar diferencias angulares y distancias relativas con gran detalle. Argentina está próxima al lanzamiento de los satélites de radar SAOCOM 1A y 1B, mediante los cuales también se espera un crecimiento en el uso de datos interferométricos.

En este contexto, este trabajo presenta un estado del arte de esta técnica y avances de la aplicación de datos TerraSAR-X y TanDEM-X para análisis hidrológico e hidráulico en sectores de nuestro país con ocurrencia de crecidas aluvionales e inundaciones. Estos datos son comparados con MDE globales y puntos acotados de redes geodésicas. Las imágenes radar fueron adjudicadas al INA-CRA mediante un Anuncio de Oportunidad de la Agencia Espacial Alemana (DLR).

### **ABSTRACT**

There is currently widespread to use Digital Elevation Models (DEM) in Hydrology, for catchment and flood management purposes. The mathematical simulations require topographic and hydraulic data in a determined temporal and spatial scale, representing an essential input variable within models.

One of the techniques used for building medium to high resolution DEM is Interferometric Synthetic-Aperture Radar (InSAR). This technique can measure the interference caused by phase difference between two or more scenes. With this way, angular differences and relative distances can be determined in detail. Argentina is ready for launching SAOCOM radar satellites, which will produce an expected increase in the use of interferometry data.

In that context, this study presents an overview of the state of the art for this particular technique, and new advances in TerraSAR-TanDEM data (Stripmap mode) application in hydrological and hydraulic studies in Argentina, with focus on river flashfloods. TerraSAR and TanDEM are been compared against global DEMs and conventional topography. The radar images were been obtained by an opportunity announcement of the German Space Agency (DLR) awarded to the INA-CRA.

### **INTRODUCCIÓN**

Se encuentra cada vez más difundido el uso de modelos digitales de elevación (MDE) en Hidrología para el estudio de cuencas e inundaciones. La disponibilidad de MDE globales y gratuitos permite el acceso a información topográfica, sin embargo muchas veces su baja resolución y precisión no los habilita para estudios hidráulicos. Por tal motivo, se buscan metodologías alternativas para la generación de MDE de calidad suficiente para el estudio de los recursos hídricos. La Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) se constituye como una técnica confiable para la obtención de MDE de resoluciones medias (si es en plataforma satelital) o altas (si es aerotransportado).

El presente trabajo tiene los siguientes objetivos:

1. Realizar una revisión bibliográfica de la técnica InSAR (conceptos teóricos) y en particular su aplicación para la obtención de MDE.
2. Realizar comparaciones entre MDE de distribución global y gratuita para la obtención de parámetros hidrológicos e hidráulicos.
3. Presentar avances del procesamiento InSAR para generación de MDE a partir de imágenes de las plataformas TerraSAR-X y TanDEM-X (DLR).

## MOTIVACIÓN

En el año 2015 y 2016, el INA-CRA se presentó a dos Anuncios de Oportunidad publicados por la DLR (Agencia Espacial Alemana) para la adquisición de imágenes TerraSAR-X y TanDEM-X. El proyecto “*Modelación hidrológica e hidráulica utilizando datos de alta resolución de TanDEM-X*” resultó seleccionado para la adjudicación de imágenes radar en sectores del noroeste de la provincia de Mendoza y noreste de la provincia de Catamarca.

A fin de fortalecer las capacidades internas del INA en temas de procesamiento de imágenes radar e Interferometría, se solicitó apoyo técnico a la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) mediante un convenio marco existente entre ambas instituciones. A partir de allí se comenzó a trabajar en conjunto con investigadores del Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich, perteneciente a la CONAE.

## MARCO TEÓRICO

### *Teoría de InSAR y comparación con otros MDE*

Las primeras aplicaciones interferométricas se realizaron en la década del 60 y 70. La estimación de la topografía ha sido el principal objetivo de aplicaciones InSAR, permitiendo precisión en la obtención de alturas, comparable a lo obtenido por métodos ópticos.

De acuerdo a Hanssen (2002), las aplicaciones geodésicas de InSAR se agrupan en a) cartografía topográfica; b) monitoreo de deformaciones (aplicado a estudios tectónicos, vulcanismo, subsidencia de tierras, movimiento y velocidad de glaciares, con precisiones submétricas); y c) cartografía temática, a partir de la detección de cambios de las características de la retrodispersión de la superficie entre dos adquisiciones distintas.

La técnica InSAR posee la capacidad de medir patrones de interferencia causados por diferencia de fase entre dos o más imágenes, pudiéndose determinar diferencias angulares y distancias relativas con gran detalle (De Ruyt, 2013). Esto es posible dada la simultaneidad de dos antenas radar las cuales emiten y reciben un pulso radar hacia la misma zona desde posiciones distintas. La separación entre las antenas se denomina línea de base, y éstas pueden estar montadas en la misma plataforma para pasada simultánea dando lugar a InSAR single-pass (como el caso de la misión Shuttle Radar Topography Mission - SRTM); o una única antena que pasa en forma repetitiva por la misma zona, lo que se denomina repeat-pass InSAR. El sistema SAR emite un pulso electromagnético a una determinada longitud de onda y polarización, y procesa tanto el dato de intensidad como el de fase de la onda reflejada. InSAR utiliza las interacciones de las ondas con la superficie terrestre, denominadas “interferencias” para medir con precisión distancias entre antena y terreno a fin de derivar la topografía (Zhong Lu, 2007).

La geometría de adquisición de un par interferométrico requiere de dos tomas. En la Figura 1A se observa la configuración con una antena en la cual no es posible obtener la altura del punto  $H_p$ , dado por la diferencia entre el punto  $P'$  en altura de referencia ( $H_{P'} = 0$ ) y un punto  $P$  en el mismo rango pero a una altura  $H_p$ . Ambos puntos se representan en una misma celda de resolución, y el cambio del ángulo  $\Theta$  no puede ser medido. En la Figura 1B bajo una configuración interferométrica, con dos antenas montadas en una plataforma a una distancia de base  $B$ , el cambio de ángulo  $\partial\theta$  puede ser determinado por la fase interferométrica utilizando el rango  $R_1$  y la altura  $H_{sat}$  de la plataforma, siendo posible determinar la altura  $H_p$  del punto  $P$ .

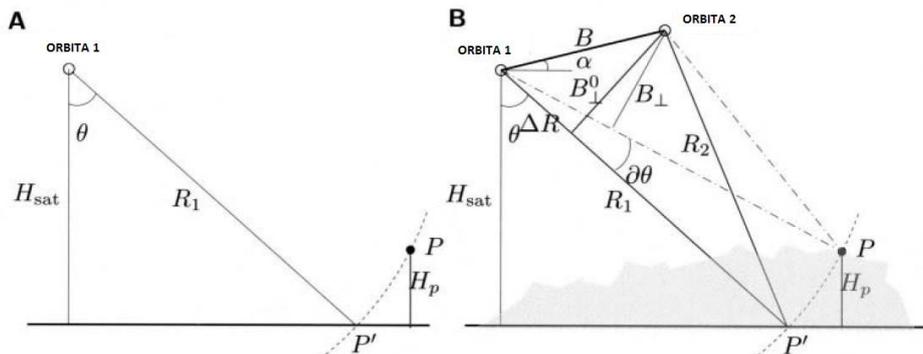


Figura 1 A y B.- Configuración interferométrica. (Adaptado de Hanssen, R., 2002).

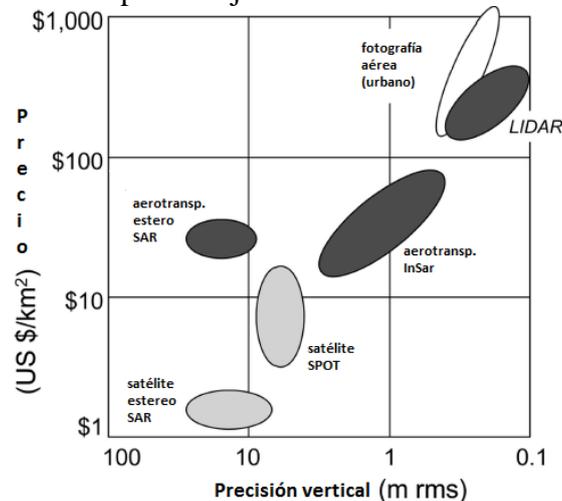
Existen dos tipos de configuración interferométrica, dependiendo si la línea de base se encuentra ortogonal o paralela a la línea de vuelo. Interferometría *cross-track* (CTI) corresponde al primero (línea de base ortogonal al vector de velocidad) y suele utilizarse para medir las variaciones de altura. Para el caso de la línea de base alineada con el vector de velocidad se denomina interferometría *along-track* (ATI) y sus aplicaciones son para medir variaciones en el tiempo, por ejemplo campos de velocidad en glaciares (Richards, M. 2007).

El interferograma es una imagen de fase interferométrica modulada en  $2\pi$ , lo que significa que los valores varían entre  $-\pi$  y  $\pi$  y forman franjas que son la contraparte en fase enrollada discontinua de la topografía (Euillades P., et al, 2005).

La ventaja de obtención de MDE a partir de InSAR, en relación a otras técnicas de cartografía topográfica, es su capacidad para tomar datos en condiciones climatológicas variadas (señal transparente a nubes), situación clave cuando se requieren datos de zonas montañosas y polares.

Es importante resaltar una serie de condiciones a tener en cuenta tanto a la hora de seleccionar las imágenes de radar a procesar. Podemos agrupar estas condiciones en dos grupos: fuentes de decorrelación y distorsiones geométricas. Respecto a las primeras, las imágenes radar poseen dos fuentes de decorrelación: espacial, determinada por la distancia de separación entre las dos órbitas de adquisición; y temporal, producida por cambios en la reflectividad de la zona entre dos pasadas distintas. Debido a que la geometría de adquisición de un sistema SAR es lateral, las elevaciones topográficas aparecen en la imagen resultante con distorsiones geométricas, las cuales se denominan: sombras (una elevación interrumpe el pulso radar y no permite tomar datos a sotavento), *layover* (inversión del terreno, dado por la llegada del haz a zonas más altas antes que a la base de éstas) y *foreshortening* (compresión de la información radiométrica, en zonas de pendiente) (Hanssen, 2002).

En la variedad de métodos de obtención de MDE, los costos y las precisiones pueden variar, haciendo que en función de nuestro objetivo de estudio y presupuesto, seleccionemos una técnica por encima de otra. En la Figura 2 se comparan precios y precisión para distintas técnicas. InSAR se ubica en términos medios desde el punto de vista de los costos y si es aerotransportada su precisión está por debajo del metro.



**Figura 2.-** Comparaciones costo-precisión entre distintas técnicas de obtención de MDE. (Adaptado de Richards, M. 2007)

En Griffin, J. et. al (2015) se realizan una serie de comparaciones entre MDE obtenidos bajo distintas técnicas, y arriban a las siguientes ventajas y desventajas: los MDE generados con Lidar son los más precisos y se pueden conseguir tanto como Modelo Digital de Terreno (MDT) como Modelo Digital de Superficie (MDS), es decir con la infraestructura y edificios representados. La desventaja es el elevado costo, y la limitación de generar vuelos en estaciones del año secas. Asimismo, requieren de buenos equipos de procesamiento informático dado el gran volumen de información que presentan. Para el caso de los MDE obtenidos mediante InSAR (en especial aerotransportado), poseen una precisión vertical razonable, se los puede obtener como MDT y MDS, y son bastante más económicos que Lidar. La desventaja es que tiene baja precisión en zonas de pendiente pronunciada y vegetación densa. Dentro de los obtenidos mediante InSAR pero de distribución gratuita como SRTM 90 m, los autores destacan como ventaja la distribución global de las escenas y la posibilidad de descargarlos en línea en forma gratuita. Por el contrario, poseen baja precisión vertical y solo se los encuentra como MDS. En relación a otro MDE global pero obtenido por estereoscopia como Aster, destacan la cobertura del 99% del globo terrestre, la descarga gratuita y la precisión se encuentra menos afectada por las fuertes pendientes. Las desventajas son los problemas causados por la cobertura de nubes, baja precisión vertical y solo disponible como MDS.

### ***MDE obtenidos por In SAR y otras técnicas y sus implicancias en hidrología e hidráulica***

Diversos autores (Griffin, J. et al (2015), Vaze, J. et al (2010), Mason, D. et al (2016)) resaltan la necesidad de obtener MDE de alta resolución para la solución de problemáticas hidráulicas. Dado el uso generalizado de MDE globales de distribución gratuita, es importante conocer sus alcances y limitaciones a fin de reducir el margen de error. En particular SRTM y Aster al ser MDS poseen baja precisión vertical, lo que los hace menos óptimos para cálculos hidráulicos. Los resultados del trabajo de Griffin, J. et al (2015) demuestran que la generación actual de MDE globales como Aster y SRTM 90 m, no son los suficientemente precisos para la simulación de tsunamis, específicamente por la limitación en la precisión vertical, en especial por errores en la elevación de las costas, que exceden la amplitud de la ola simulada. A Fin de

sortear estas dificultades, y cuando el único MDE disponible es SRTM, los mismos autores sugieren eliminar las celdas con vegetación e interpolar el valor con las celdas vecinas.

En Kumar (2005) se utilizan dos MDE (SRTM-C y AsterGDEM) para evaluar las incertidumbres del mapeo de inundación. Concluye que con un RMSE (*Root Mean Squareroot Error*, Raíz del Error Cuadrático Medio) de 14.70 m, AsterGDEM se comporta satisfactoriamente para modelación hidrodinámica con MIKE 11.

En Yamazaki et al. (2012) se realizan ajustes hidráulicos a un SRTM para uso en modelación hidrodinámica de planicies de inundación, obteniendo buenos resultados con el MDE ajustado a una red hidrográfica de detalle.

En Burgos (2012) se realiza comparaciones entre MDE globales, analizando residuos de elevación respecto a 194 puntos de control. Se concluye que el MDE SRTM v4.1 presenta menores residuos y dispersión de errores, con un RMSE de 5.96 m (al 90% de confiabilidad), que comparado con sus versiones anteriores del SRTM en banda C, presenta una mejora del error en un 27%. La banda X del SRTM presentó la menor dispersión del error pero el mayor RMSE de los SRTM, seguido por el AsterGDEM que manifestó el peor residuo (poco más del doble que para SRTM v4.1) y el mayor rango de dispersión de errores. Todos los MDE presentan errores medios subestimados, SRTM v2.1, v30 y v4.1 entorno al cero, indicando normalidad en los residuos, pero SRTM X y AsterGDEM presentan errores medios muy distintos de cero, lo que indicaría la presencia de errores sistemáticos. Se identifica como MDE óptimo al SRTM v4.1, el cual es ajustado con el análisis de errores, considerándolo válido como entrada geométrica para un modelo hidráulico pseudo-bidimensional y para escalas de trabajo del orden de 1:50.000 a 1:100.000.

Para el caso de los MDE obtenidos mediante InSAR aerotransportado, la inundación modelada con dicho MDE, arriba a resultados comparables con MDE de alta precisión como aquellos realizados con Lidar. En este caso es importante diferenciar MDS y MDT, obtenido por InSAR o por Lidar, ya que se han reportado diferencias considerables. Para evitar subestimación o sobrestimación de la inundación, Griffin et al (2015) recomiendan utilizar MDT con un adecuado parámetro de rugosidad de Manning. En Vaze et al (2010) se comparan un MDE realizado con Lidar a distintas resoluciones y un MDE generado a partir de curvas de nivel, validándolo con relevamiento de campo. Se indica que un MDE de 1 m resolución obtenido con Lidar representa bien las elevaciones del terreno para modelaciones hidráulicas. Asimismo, destaca que un MDE Lidar remuestreado a 25 m comparado con un MDE de 25 m generado a partir de curvas de nivel, permite una mejor delineación de cuencas y parámetros hidrológicos.

## ÁREA DE ESTUDIO

El área de interés (Figura 1) se ubica al oeste de la ciudad de Mendoza, Argentina, entre latitudes 32°41'S a 32°54'S y longitudes 68°53'W a 69°11'W. Es una zona de piedemonte con altitudes que van desde los 3000 m a los 1000 m, y conecta topográficamente la zona montañosa con el valle urbanizado albergando una población cercana a los 800.000 habitantes.

## METODOLOGÍA

El trabajo se realizó en cuatro fases. La primera de recopilación y revisión bibliográfica tanto de teoría radar e interferometría como del uso de los MDE en hidrología. Una segunda etapa de

procesamiento de imágenes TerraSAR-X y TanDEM-X (DLR, 2015, 2016). La tercera etapa para obtención y procesamiento de los MDE a comparar; y finalmente el procesamiento hidrológico e hidráulico y comparación entre los MDE.

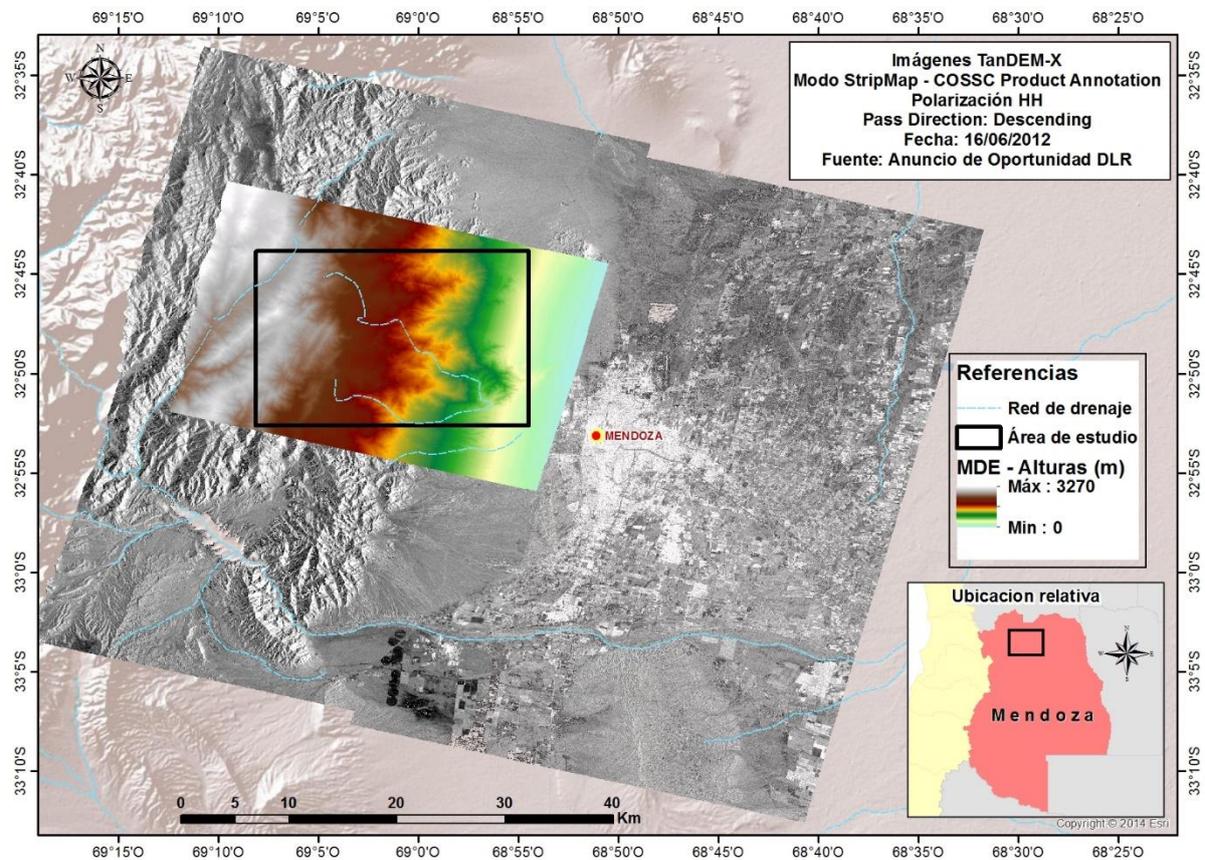
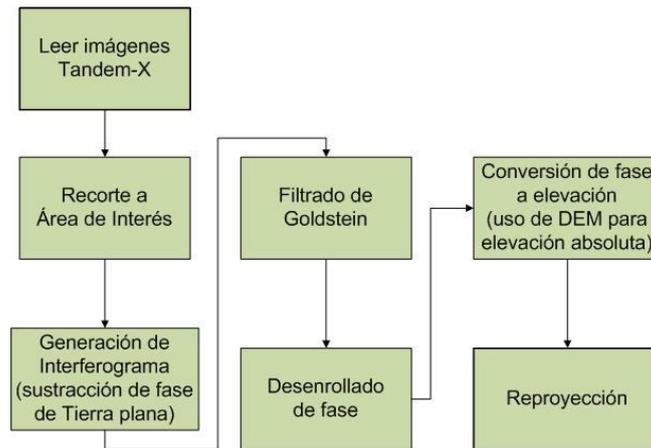


Figura 3.- Área de Estudio

Uno de los MDE utilizados para la comparación se procesó utilizando imágenes TerraSar-X y TanDEM-X (DLR, 2015) (modo Stripmap, polarización HH, de Junio de 2012), utilizando el programa SNAP (Sentinel Application Platform) de la Agencia Espacial Europea (ESA). Previo recorte de las imágenes al área de interés, se realizó el co-registro y se generó el interferograma (diferencia de fase pixel a pixel entre las imágenes que componen el par interferométrico), con sustracción de fase de tierra plana. Posteriormente el interferograma fue mejorado aplicando filtro genérico de Goldstein (que disminuye el ruido asociado a la fase), y luego se procedió al desenrollado de la fase (para transformar la fase discontinua en fase continua).

Para convertir la fase desenrollada en altura (metros) y disminuir el margen de error, se utilizó el MDE TanDEM-X (DLR, 2016) (IDEM: *Intermediate DEM*) de 10 m de resolución. La salida de este proceso es el MDE con alturas absolutas, al cual en la etapa final se le aplica la geocodificación. En la Figura 4 se observa un esquema secuencial metodológico y en Figura 5 los resultados del procesamiento para obtención del MDE en base a imágenes TanDEM-X.

Para la comparación, además del MDE TanDEM-X (IDEM), se obtuvieron y procesaron 5 MDE: SRTM-C v4 (90 m), SRTM-X (30 m), MDE-Ar (30 m), AsterGDEM v2 (30 m), y ALOS-PALSAR DEM (12.5 m), presentados en Figura 5a. Todos se llevaron a alturas elipsoidales (WGS84) utilizando el geoide argentino GEOIDE-AR16 (Piñon, 2016) y fueron comparadas sus alturas con datos de redes geodésicas (Posgar, PASMA, etc.)



**Figura 4.-** Esquema metodológico para generación del MDE en base a imágenes TanDEM-X.

Para cada MDE se corrieron geoprocursos hidrológicos para obtención de dirección y acumulación de flujo, subcuencas de aporte y red de drenaje, así como el cálculo de parámetros morfométricos (superficie, perímetro, longitud del cauce más largo, pendiente, orden de cauces). También se obtuvieron variables hidráulicas e índices morfométricos y perfiles transversales en secciones características de la cuenca.

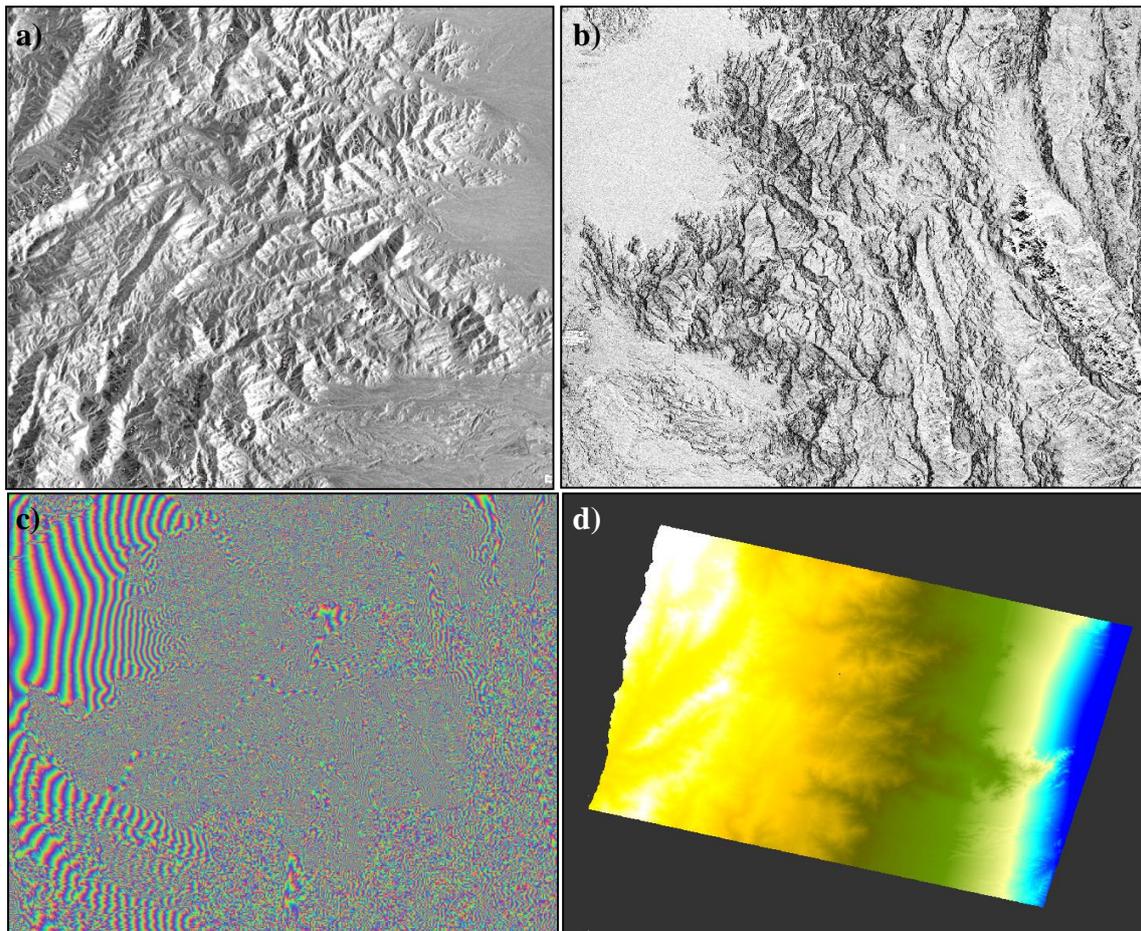
Se analizaron en 8 subcuencas dentro del área de estudio, las dispersiones en algunas variables hidrológicas. Además se estimaron y compararon algunos índices morfométricos como Índice de Compacidad  $K_C$ , Relación de Elongación  $R_e$ , Factor de Forma  $K_f$  de Horton, Relaciones de Bifurcación, Densidad de Drenaje, curvas hipsométricas, y coeficientes Orográfico, de Masividad y de Torrencialidad (Schumm 1956, Horton, 1945). En Tablas 1 y 2 se presentan los resultados.

Utilizando el índice topográfico de humedad (*twi*, por sus siglas en inglés) (Beven y Kirby, 1979, cit. en Pack et. al, 1998) que indica la relación entre área de acumulación de flujo (*upslope grid*) y la pendiente de la celda analizada, se clasificaron los MDE y analizaron las diferencias presentadas en Tabla 3.

## RESULTADOS

El MDE resultante del procesamiento de imágenes TanDEM-X se presenta en Figura 5. La resolución espacial lograda fue de 2 m. Cabe aclarar que en algunos sectores del MDE es notable la presencia de saltos en altura que no se corresponden con las alturas reales del área. Estos errores, manifestados principalmente sobre agua (o nieve) y pendientes empinadas se producen por distorsiones geométricas, asociadas a artefactos atmosféricos o a errores propios del proceso de desenrollado de fase. También son observables en zonas de baja coherencia, parámetro que sirve para caracterizar la decorrelación entre dos imágenes. Este parámetro da idea de la confiabilidad de la fase interferométrica a utilizarse para reconstruir la topografía.

En la Figura 6a se observan los 6 MDE utilizados para la determinación de las subcuencas, indicado un detalle del punto de cierre, donde se aprecia la diferencia de resoluciones espaciales. En la Figura 6b se presentan perfiles transversales de la cuenca en el punto de cierre, en el que se aprecian las diferencias de las secciones resultantes. En las Tablas 1 y 2 se presentan los principales resultados de las comparaciones.



**Figura 5.-** a) Imagen en Intensidad; b) imagen de coherencia (colores blancos indican mayor coherencia); c) Interferograma filtrado; d) Modelo Digital de Elevación final.

**Tabla 1.-** Parámetros e índices morfométricos de la Cuenca bajo estudio en función de la fuente del MDE

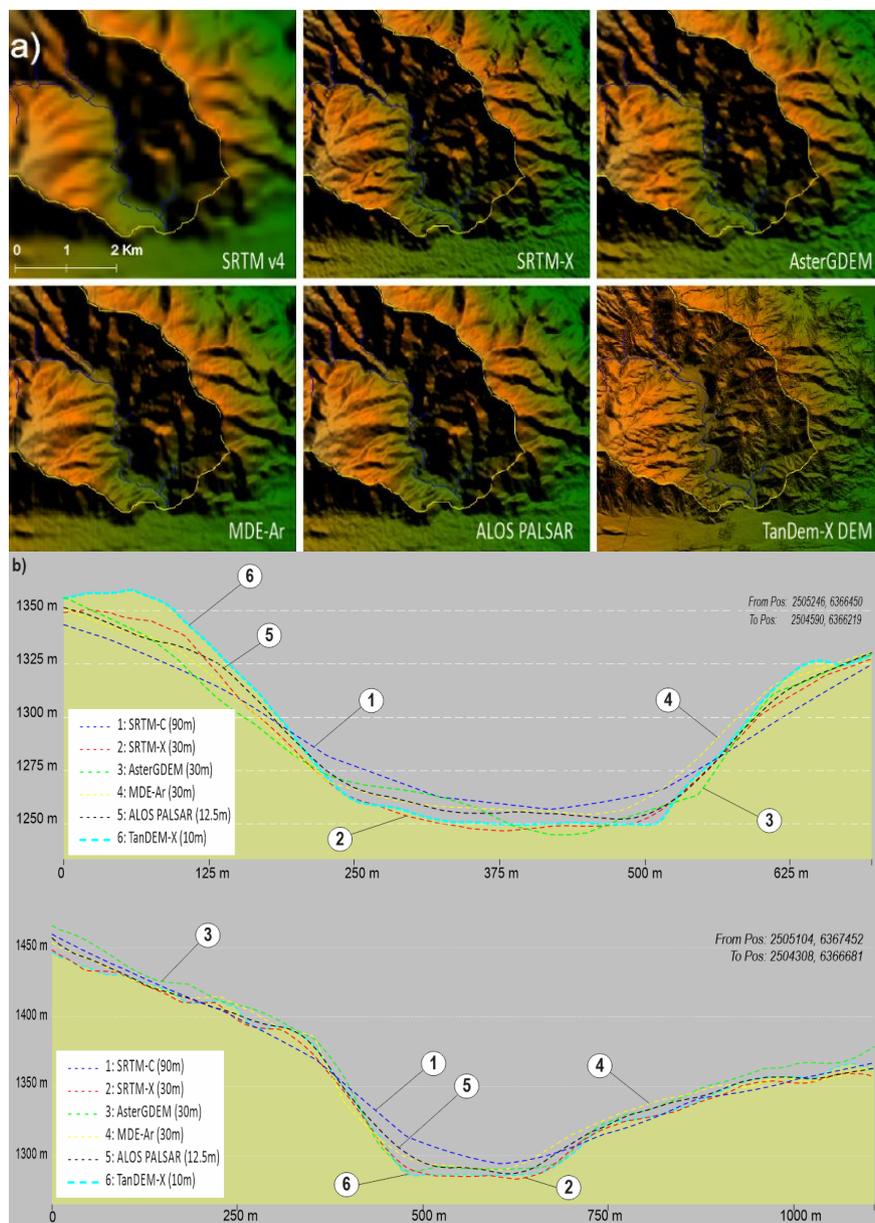
Fuente	Comparación de parámetros morfométricos													
	A [km <sup>2</sup> ]	P [km]	H [msnm]	h [msnm]	DH [m]	LC [km]	i [%]	C <sub>1</sub>	k	L <sub>1</sub> [km]	D <sub>d</sub> [km/ km <sup>2</sup> ]	R <sub>b</sub>	i <sub>m</sub> [%]	i <sub>M</sub> [%]
SRTM-C	96.61	55.4	3452.3	1158.0	2294.3	25.2	9.1	58	4	45.1	0.93	3.98	30.3	107.1
SRTM-X	97.01	59.1	3472.0	1145.7	2326.3	29.5	7.9	50	4	53.1	1.07	4.02	39.9	259.6
Aster GDEM	97.17	58.9	3461.0	1151.5	2309.5	29.2	7.9	53	4	45.4	1.06	4.11	37.7	164.8
MDE-Ar	97.12	59.0	3471.4	1153.4	2317.9	29.3	7.9	52	4	47.1	1.03	4.11	37.2	187.5
ALOS Palsar	97.05	60.0	3475.2	1152.0	2323.2	29.6	7.8	51	4	47.0	1.04	4.08	38.6	230.9
TanDEM-X	97.06	60.2	3478.9	1144.2	2334.7	29.9	7.8	53	4	55.4	1.12	4.14	45.6	389.7

A: Área, P: Perímetro; H: Cota máxima, h: Cota mínima, DH: Diferencia de altura, LC: Longitud de cauce más largo, i: Pendiente media de cauce, C<sub>1</sub>: Cantidad de cauces de primer orden, k: Orden de Horton de la Cuenca, L<sub>1</sub>: Longitud de los cauces de primer orden, D<sub>d</sub>: Densidad de drenaje, R<sub>b</sub>: Relación de bifurcación, i<sub>m</sub>: Pendiente media de cuenca; I<sub>M</sub>: Pendiente máxima de cuenca.

**Tabla 2.-** Continuación de Tabla 1 y Estadísticos de elevación

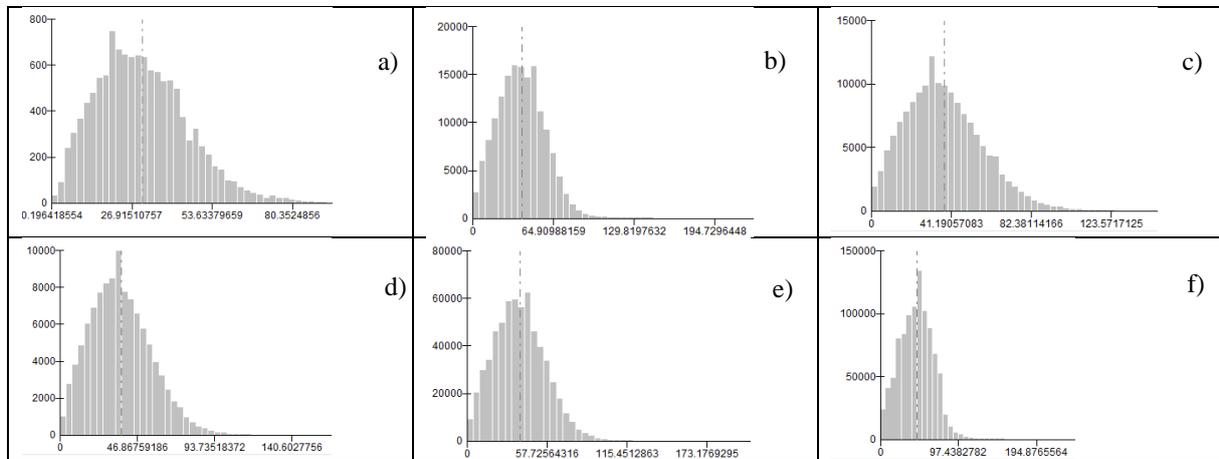
Fuente	Comparación de parámetros morfométricos						Estadísticos de diferencia en elevaciones en comparación con cotas conocidas								
	C <sub>t</sub> [1/km]	K <sub>f</sub>	R <sub>e</sub>	K <sub>c</sub>	K <sub>m</sub> [m/km <sup>2</sup> ]	C <sub>o</sub>	n	med	var	desv	min	max	asim	curt	RMSE
SRTM-C	0.60	0.15	0.440	0.160	10.18	11.68	229	-3.25	40.1	6.33	-19.7	33.3	11.3	18.5	7.1
SRTM-X	0.52	0.11	0.377	0.171	10.02	11.66	226	0.23	19.5	4.42	-18.8	13.9	1.4	4.7	4.4
Aster GDEM	0.55	0.11	0.380	0.170	10.15	11.72	229	0.56	35.1	5.93	-21.5	21.7	2.0	4.1	5.9
MDE-Ar	0.54	0.11	0.379	0.170	10.19	11.81	229	-3.49	24.4	4.94	-17.8	16.8	8.9	9.9	6.0
ALOS Palsar	0.53	0.11	0.375	0.173	10.03	11.65	229	-2.52	18.6	4.31	-10.7	15.4	8.0	6.5	5.0
TanDEM-X	0.55	0.11	0.371	0.174	10.04	11.72	326	-0.04	3.1	1.75	-7.1	6.0	-1.0	6.3	1.8

C<sub>t</sub>: Coef. de Torrencialidad, K<sub>f</sub>: Coef. de forma, R<sub>e</sub>: Relación de elongación, K<sub>c</sub>: Coef. de compacidad, K<sub>m</sub>: Coef. de Masividad, C<sub>o</sub>: Coef. Orográfico; n: Cantidad muestral, var.: Varianza, desv.: Desviación típica, min: Mínimo error; max: Máximo error, asim: Asimetría, curt.: Curtosis, RMSE: Raíz del error cuadrático medio.



**Figura 6.-** a) MDE utilizados en la comparación, b) Perfiles transversales en zona de cierre de cuenca

En la Figura 7 se detallan los histogramas de frecuencia para las pendientes en cada celda de la cuenca y según los MDE analizados. En la Figura 8 se presentan los órdenes de Horton de las redes hidrográficas extraídas de los geoprocetos y detalles de la relación entre el área de drenaje (*upslope area*) y la pendiente para cada celda.



**Figura 7.-** Histogramas de pendientes (%); la línea punteada es el valor medio. a) SRTM-C, b) SRTM-X, c) AsterGDEM, d) MDE-Ar, e) ALOS PALSAR, f) TanDEM-X

**Tabla 3.-** Porcentajes de cobertura de clases para el índice topográfico de humedad (*twi*)

Fuente	Índice Topográfico de Humedad			
	Baja Humedad	Parcialm. Húmedo	Umbral de Saturación	Zona Saturada
SRTM-C	1%	69%	6%	24%
SRTM-X	41%	44%	2%	13%
Aster GDEM	34%	50%	3%	14%
MDE-Ar	30%	54%	3%	13%
ALOS Palsar	39%	50%	2%	9%
TanDEM-X	64%	26%	1%	8%

En la Figura 9 se presentan las redes de Horton completas para la cuenca bajo estudio y en función de la fuente de MDE utilizada, junto con el índice topográfico de humedad clasificado. Cabe destacar que para la determinación de la red de drenaje se utilizó un umbral de 50 Ha para la determinación de cauces de primer orden.

En las Figuras 10, 11 y 12 se analizan las dispersiones de variables morfométricas y errores de elevación (cotas absolutas).

**CONCLUSIONES**

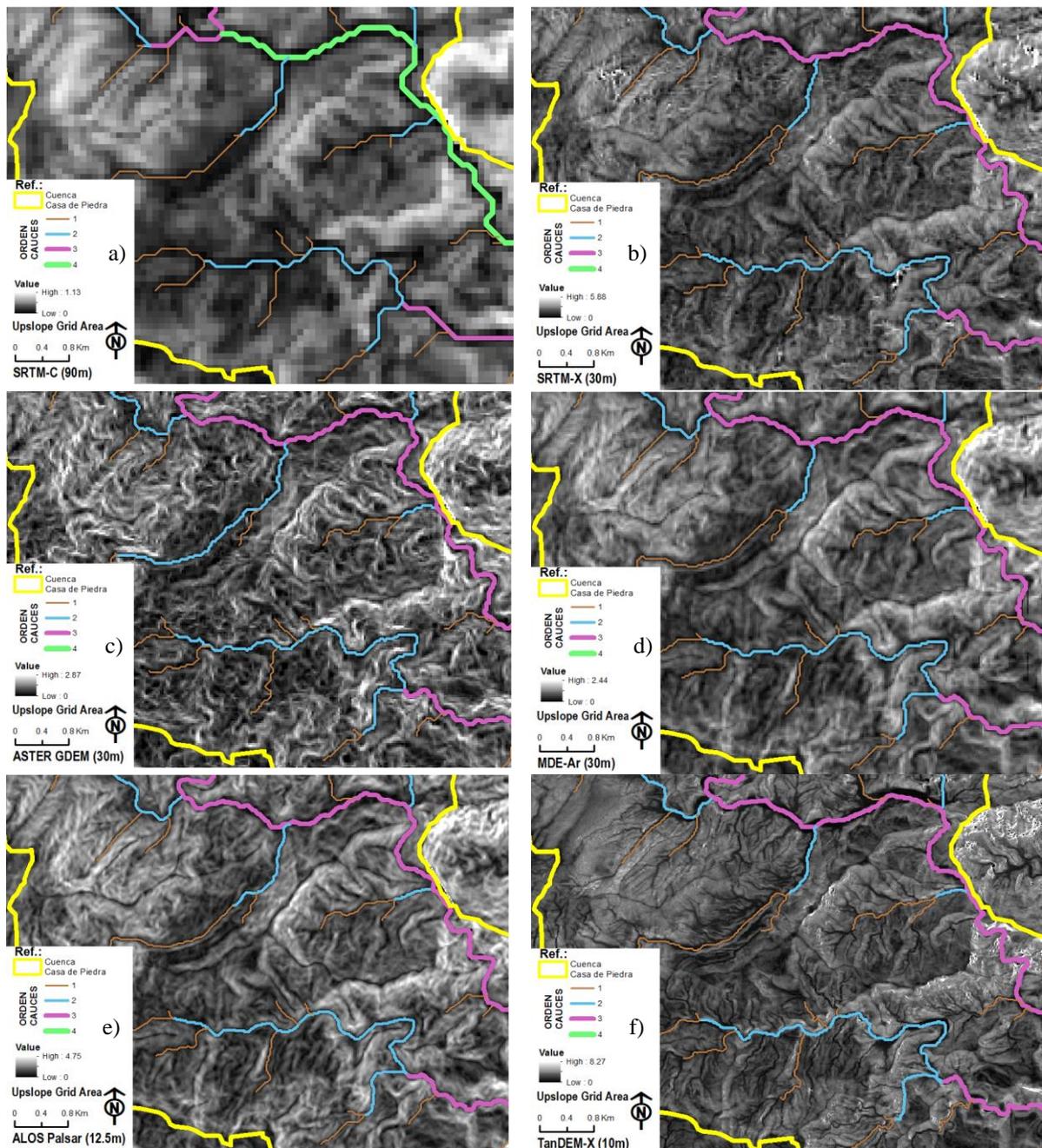
Las diferencias en variables hidrológicas como área y perímetro tienen alguna significancia (<5%) siendo los que más se alejan de la media AsterGDEM y SRTM-C (90m). Asimismo, tanto el perfil hipsométrico (datos no mostrados), como los órdenes de cauces, no presentaron diferencias significativas.

La densidad de cauces de primer orden tiene un rango de variación del 15% indicando un error de ±3 cauces cada 50 si se utiliza SRTM. Se debe destacar que el umbral para la definición de cauces de primer orden debe ser el mismo en todos los casos y dependerá en gran medida de varios factores como la geología de la zona, el área total de drenaje, el tipo de cuenca (llanura,

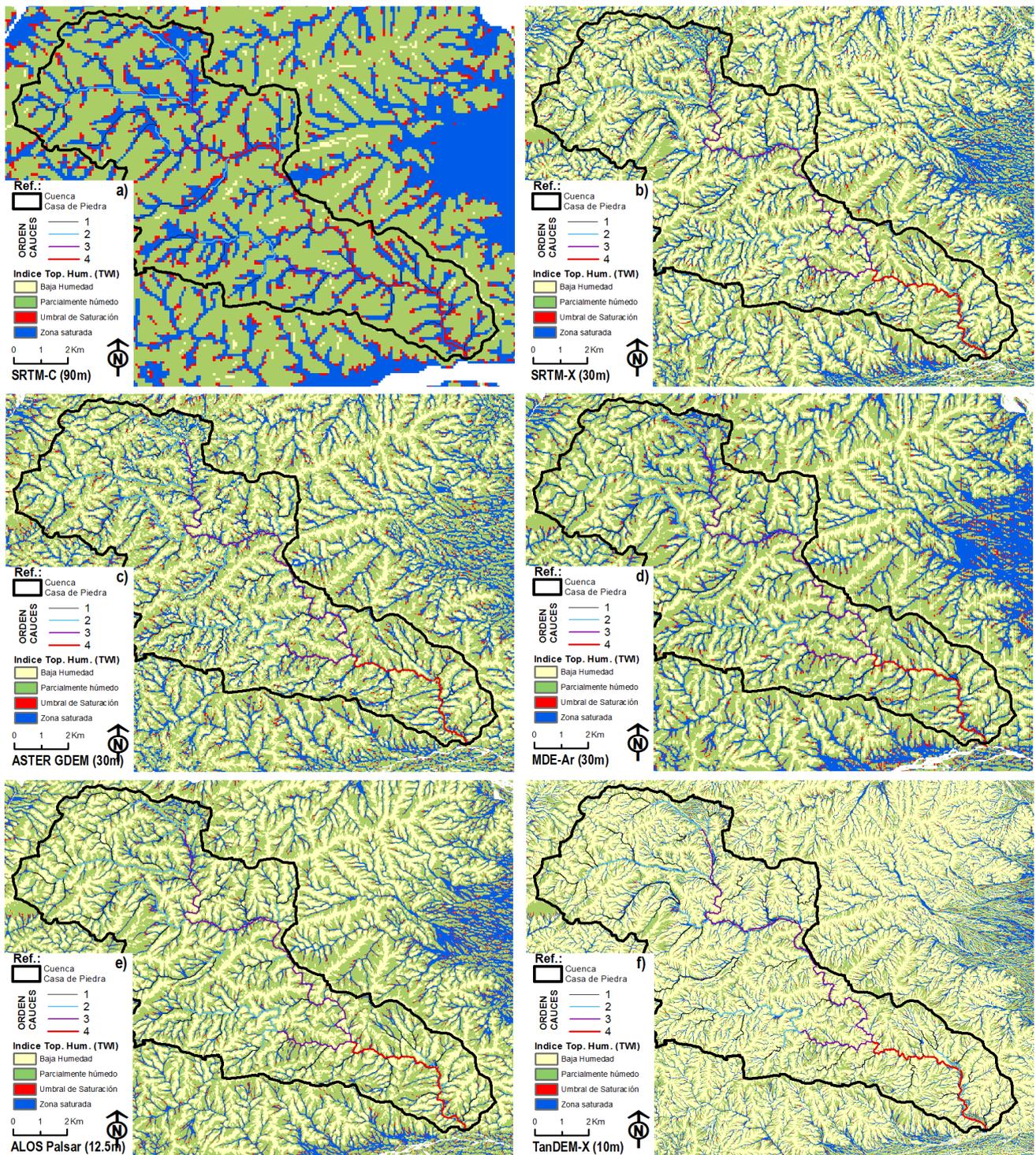
montaña, piedemonte), y el tipo de modelo hidrológico a utilizar, entre otros. En todos los casos el orden de la cuenca analizada fue de 4, con pequeñas diferencias en los coeficientes analizados, destacándose TanDEM-X en la densidad de drenaje y la longitud de cauces, seguramente por la mejor definición espacial. Existen en SRTM-C y AsterGDEM, zonas de drenaje con pequeños cambios de topología, lo que pudiera afectar una modelación hidrológica.

Respecto a las pendientes (de cauce y de cuenca) existe mayor dispersión de resultados siendo los histogramas de TanDEM-X junto con SRTM-X y MDE-Ar los de menor sesgo.

En la comparación con elevaciones conocidas, TanDEM-X presenta el menor residuo (RMSE=1.8 m) seguido de SRTM-X y ALOS PALSAR, considerados muy aceptables.



**Figura 8.-** Detalle de Grilla de área de flujo y pendiente, redes hidrográficas y órdenes de cauce. a) SRTM-C, b) SRTM-X, c) AsterGDEM, d) MDE-Ar, e) ALOS PALSAR, f) TanDEM-X



**Figura 9.-** Índices topográficos de humedad y órdenes de Horton. a) SRTM-C, b) SRTM-X, c) AsterGDEM, d) MDE-Ar, e) ALOS PALSAR, f) TanDEM-X

Comparando el índice topográfico de humedad o los mapas de área de acumulación de flujo respecto a la pendiente, las diferencias son significativas, quedando muy alejado de la media SRTM-C, pudiendo indicar que TanDEM-X presenta las mejores descripciones morfométricas.

Por lo tanto, el uso de MDE globales de 30 m (como SRTM-X o MDE-Ar) sigue siendo aconsejable para modelación hidrológica (concentrada con una adecuada subdivisión de subcuencas y en zonas de montaña), aunque se prefiere a los MDE de ALOS Palsar y TanDEM-

X por sus ventajas en resoluciones espaciales y representación de pendientes. Para modelaciones hidrológicas distribuidas o en zonas de llanura, no se han analizado casos de estudio, pero se presume la misma recomendación.

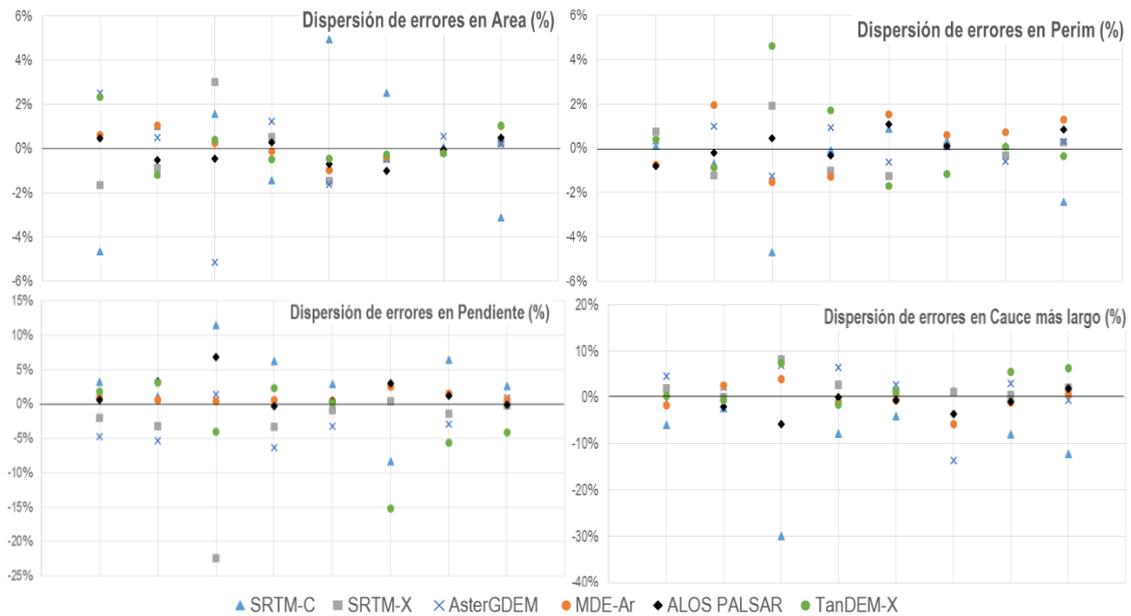


Figura 10.- Dispersión de errores en comparación de parámetros geométricos de subcuencas

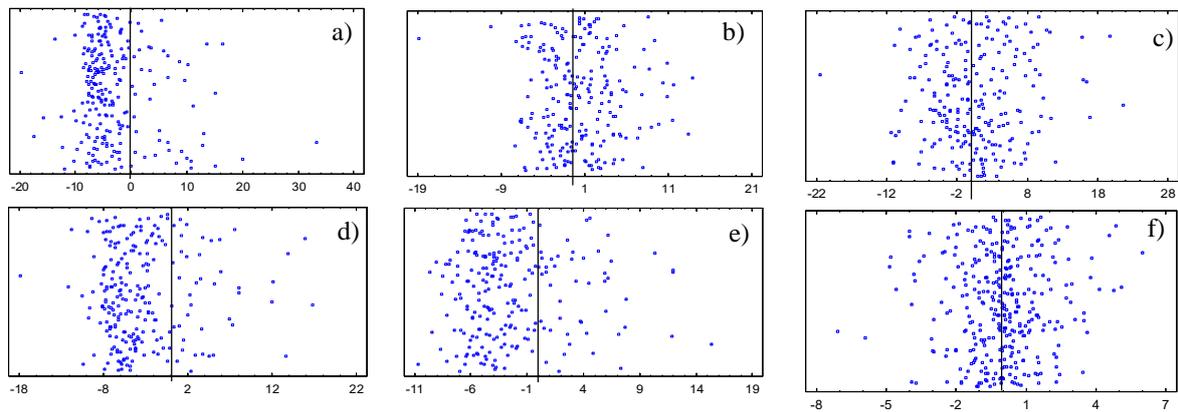


Figura 11.- Dispersión en elevaciones. a) SRTM-C, b) SRTM-X, c) AsterGDEM, d) MDE-Ar, e) ALOS PALSAR, f) TanDEM-X

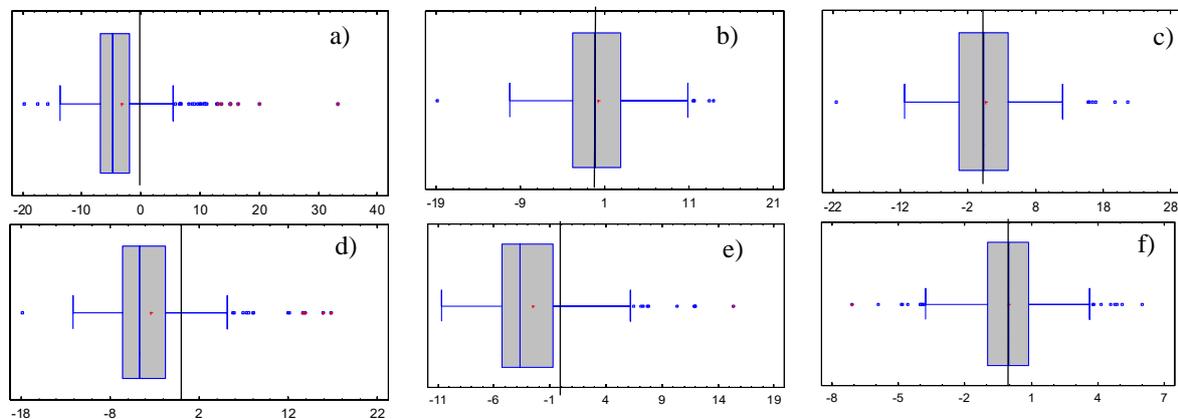


Figura 12.- Diagramas de caja para errores en elevaciones. a) SRTM-C, b) SRTM-X, c) AsterGDEM, d) MDE-Ar, e) ALOS PALSAR, f) TanDEM-X

Respecto a los análisis hidráulicos, la precisión de los mapas de inundación dependen en gran medida del modelo geométrico utilizado (además de condiciones de borde adecuadas, parámetros de flujo consistentes, parámetros de fricción y datos para calibración). Estudios recientes indican claramente que los MDE generados con LIDAR (*Light Detection and Ranging*) son los más adecuados para modelación hidráulica, debido a sus excelentes resoluciones espaciales (0.5 a 1 m); pero su baja disponibilidad (por sus costos o áreas de cobertura), fuerzan a buscar otras alternativas. Dentro de los MDE analizados, se destacan las técnicas InSAR, que permiten generar MDE de resoluciones adecuadas (de 2 a 10 m) con los cuales se incrementa la precisión de modelos hidráulicos.

El MDE generado con TanDEM-X presenta mejor detalle de las variables hidráulicas que el resto. Aun comparando el TanDEM-X IDEM con ALOS Palsar, cuyas resoluciones son similares (10 m y 12,5 m respectivamente), el primero presenta ventajas en la definición de zonas de cambios de pendiente y fondos de valles; probablemente por la diferencia de longitud de onda utilizada (banda X y L respectivamente).

La zona de estudio presenta características de poca vegetación, y muy poco avance urbano, por lo que incide en los resultados debido a que el MDS es similar al MDE. En zonas urbanas o muy vegetadas la aplicación de MDS de alta resolución requeriría un adecuado filtrado de puntos para representar el terreno, disminuyendo sus ventajas de aplicación en estudios hidráulicos.

Los resultados mostrados son parciales y se espera en posteriores estudios analizar en detalle esta ventaja con modelos hidráulicos bidimensionales y en otras zonas de interés.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ASF DAAC** (2016), *ALOS PALSAR Radiometric Terrain Corrected High res*; © JAXA/METI 2007. Accessed through ASF DAAC 11 November 2016. DOI: 10.5067/Z97HFCNKR6VA

**Burgos, V.** (2012). “Evaluación de ASTER GDEM y SRTM-C/X para modelación hidráulica de la rotura de presa El Carrizal, Mendoza. IFRH 2012” IFRH - Instituto Nacional del Agua

**De Ruyt, R.** (2013). “Análisis comparativo de las técnicas InSar Persistent Scatterers Interferometry (PSI) y Small Baseline Subset (SBAS) aplicadas en la medición de la deformaciones del complejo Volcánico Cordón Caulle (40.5°S) - Andes del Sur” Tesis de Maestría. UNC – CONAE.

**DLR/ASI** German Aerospace Center (2010) SRTM-X Dataset.

**DLR** German Aerospace Center (2015) TanDEM-X / TerraSAR Dataset / Project ID ATI\_HYDR6658: “Hydrological and hydraulic modelling using High Resolution TanDEM-X Data” © DLR <2015>

**DLR** German Aerospace Center (2016) TanDEM-X IDEM Dataset / Project ID DEM\_HYDR1884: “Landslide and flash flood risk assessment on informal foothill settlements at western of Mendoza and Catamarca province, Argentina” © DLR <2016>

**Euillades, P., L. Euillades, M. Blanco., G. Cabrera, J. Witte y J. Bergamasco,** (2005) “Aplicación de modelos digitales de elevación basados en imágenes SAR en el estudio de la geología estructural”. Rev. Petrotecnia, pp. 58-68.

**Griffin J, Latief H, Kongko W, Harig S, Horspool N, Hanung R, Rojali A, Maher N, Fuchs A,**

**Hanssen, R.** (2002). Radar interferometry. Remote Sensing and Digital Image Processing. Kluwer Academic Publishers.

- Horton, R. E.** (1945). *“Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology”* en Geological Society of America Bulletin,; 56 (3), 275-370
- Hossen J, Upi S, Edi Dewanto S, Rakowsky N and Cummins P** (2015) *“An evaluation of onshore digital elevation models for modeling tsunami inundation zones”*. F.in Earth Science. Vol 3. Article 32.
- IGN Instituto Geográfico Nacional** (2016) *MDE-Ar. Modelo Digital de Elevaciones de la Argentina*.
- Jarvis, A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara,** (2008), Hole-filled SRTM Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database.
- Kumar Singh, Shailesh.** (2005). *“Analysis of uncertainties in digital elevation models in flood (hydraulic) modelling”*. Int. Institute for Geo-Inform. Sc. and Earth Obs. Enschede, The Netherlands & Indian Instit. of Remote Sensing, Nat. Remote Sensing Agency (NRSA) Dep. of Space, Dehradun India.
- Mason, D. Trigg, M. Garcia-Pintado, J. Cloke, H. Neal, J. Bates, P.** (2016). *“Improving the TanDEM-X Digital Elevation Model for flood modelling using flood extents from Synthetic Aperture Radar images”*. Journal of Remote Sensing of Environment. Elsevier.
- NASA JPL.** (2009). ASTER Global Digital Elevation Model v2 - ASTER GDEM is a product of METI and NASA.
- Pack, R. T., Tarboton, D. G., & Goodwin, C. N.** (1998). *“The SINMAP approach to terrain stability mapping”*. In 8th congress of the int. Assoc. of eng. geology, Vancouver, Canada (Vol. 21, p. 25).
- Pinon, D.** (2016) *“Development of a precise gravimetric geoid model for Argentina”*. Thesis Master of Science in Geospatial Sciences RMIT University
- Richards, Mark** (2007). A Beginner’s Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing. IEEE A&E SYSTEMS MAGAZINE VOL. 22, NO. 9
- Schumm SA** (1956). *“Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey”*, Geol. Soc. Am. Bull., 67: 597-646.
- Vaze Jai, Teng Jin, Spencer Georgina.** (2010). *“Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices.”* Environmental Modelling & Software. Pag 1086-1098. Elsevier
- Yamazaki, D., Baugh, C.A. , Bates, P.D. , Kanae, S. ; Alsdorf, D.E. y Oki, T.** (2012). *“Adjustment of a spaceborne DEM for use in floodplain hydrodynamic modelling”*, J.of Hydrology, 436-437, 81-91
- Zhong Lu, Ohig K. y Russell R.** (2007). *“Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR): Its Past, Present and Future”* en Photogrammetric Engineering and Remote Sensing p 217-221.

**AVANCES PARA LA SISTEMATIZACIÓN DEL RESAMPLEO DE IMÁGENES  
TÉRMICAS A ESCALA DE CUENCA EN EL SUR DE SANTA FE  
CONAGUA 2017. CÓRDOBA, ARGENTINA, 2017**

**Chiarito Eugenia, Zimmermann Erik D., Mendez Zacarías Jovita S.**

CURIHAM, Departamento de Hidráulica, FCEIA, UNR, CONICET, Santa Fe, Argentina  
Riobamba 245Bis, 2000 Rosario, Tel. 0341-4808541  
E-mail: echiarit@fceia.unr.edu.ar, erikz@fceia.unr.edu.ar, jovitamz@fceia.unr.edu.ar - Web:  
www.fceia.unr.edu.ar/curiham/

### RESUMEN

Los registros térmicos que ofrecen los satélites de monitoreo ambiental resultan una fuente de información de amplia aplicabilidad en hidrología a pesar de su insuficiente resolución espacial. Resulta pertinente entonces la búsqueda de una metodología que permita sistematizar su resampleo a una resolución más adecuada para la escala de trabajo en cuencas de llanura.

Una alternativa ampliamente utilizada parte de la suposición que la temperatura superficial está condicionada fundamentalmente por la variación de la cobertura vegetal. A partir de la propuesta empírica desarrollada por Kustas (2003) se plantean alternativas de índices de vegetación (NDVI, EVI, SAVI) que describan el estado de los cultivos que puedan representar con mayor fidelidad la relación entre las variables en juego contemplando la estacionalidad.

Se aplicaron, compararon y validaron estas alternativas para recuperar los lineamientos que permitan diseñar un procedimiento sistemático de resampleo. Se partió de imágenes MODIS de temperatura con resolución 1000m, agregándolas a 2000m, aplicando sobre éstas la técnica de resampleo, comparando los resultados obtenidos con la escena original.

Los resultados obtenidos muestran la robustez del método en general con todas las variables, reflejando ciertas mejorías especialmente para la configuración de escasa cobertura vegetal.

### ABSTRACT

Satellite thermal data offers wide applicability in hydrological research despite its poor spatial resolution. Developing a methodology for resampling systematization is therefore needed for basin scale working in flatland landscapes.

A widely accepted technique proposed by Kustas (2003) which supposes land surface temperature depends on vegetation cover variations, was used. Different Vegetation Indices (NDVI, EVI, SAVI) are applied to this technique in order to explore whether they better adjust to different seasonal typical land covers.

These alternatives were applied, compared and validated looking for the guidelines to design a systematic downscaling proceeding. MODIS temperature product was used, rescaled from 1000 to 2000m pixel resolution, comparing the original scenes to resampled estimated ones.

The results show the robustness of the method with all the VI (vegetation index) used, with improvements especially for scenes where bare soils prevailed.

### INTRODUCCIÓN

Para el aprovechamiento de los registros de temperatura de plataformas satelitales a escala de cuenca de llanura es necesario en muchas ocasiones realizar un ajuste a la moderada resolución espacial que éstos ofrecen.

Kustas (2003) (y otros investigadores que proponen alguna variante sobre el modelo original) propone realizar el remuestreo de las imágenes térmicas a partir de la relación que existe entre la temperatura superficial de una nube de píxeles y su cobertura vegetal, representada por un valor de índice de vegetación (VI), entendiéndolo como remuestreo al incremento de la resolución espacial de una imagen, sin modificar su resolución radiométrica. Sabiendo que el NDVI tiende a saturarse cuando el estado de los cultivos alcanzan su máximo esplendor en épocas cercanas a la cosecha, y que también pierde sensibilidad cuando predomina la

vegetación rala o el suelo desnudo, y considerando que el EVI y SAVI configuran las alternativas para contemplar esta variabilidad en sendos casos, el presente trabajo pretende explorar el potencial de cada índice frente a las distintas configuraciones de cobertura predominante.

## OBJETIVOS

El objetivo es aplicar un modelo de remuestreo basado en la relación entre índice de vegetación y temperatura de brillo de una imagen variando dicho índice para buscar aquel que mejor se ajuste en función de los niveles de cobertura vegetal (definidos los ciclos de cultivo) sobre un conjunto de 5 imágenes de la región al Sur de la Provincia de Santa Fe que abarca cuatro cuencas.

Se pretende comprobar la validez del método para la escala de trabajo antes mencionada, y comparar las variantes de VI en búsqueda de un criterio que se utilizará (en una etapa futura) para diseñar un algoritmo de resmuestreo sistematizado de imágenes térmicas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó con productos MODIS de temperatura superficial MYD11\_L2 de resolución espacial de 1000m, y de reflectancia MYD09GA con las dos primeras bandas cuyo rango corresponde al rojo (R) e infrarrojo cercano (NIR) en resolución 500m. Las mismas fueron utilizadas para calcular los tres VI con los que se realizó el trabajo, vale decir:

El NDVI o Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas, que tiene la forma

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

, el EVI o el Índice de Vegetación Mejorado utilizando 2 bandas,

$$EVI(NIR, R) = G \frac{NIR-R}{L+NIR+C \times R} \quad (2)$$

, donde G es el factor de ganancia que se asume como 2.5, y L y C son dos coeficientes cuyos valores son L=1 y C=2.4, y el SAVI o Índice de Vegetación Ajustado al Suelo,

$$SAVI = \frac{(1+L)(NIR-R)}{NIR+R+L} \quad (3)$$

, donde L es el factor de ajuste de fondo del cultivo, y que asume el valor L=0.5.

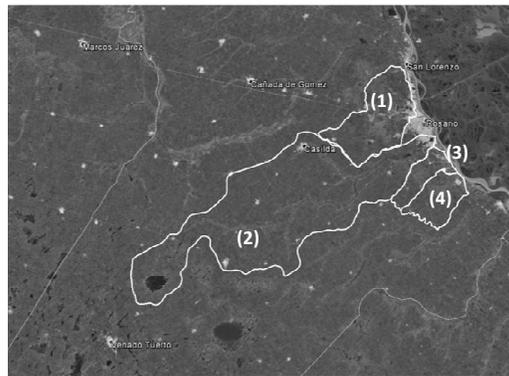
Las cinco fechas fueron seleccionadas teniendo en cuenta los ciclos de cultivo típicos de la región, buscando representar períodos ligeramente anteriores a la cosecha con cobertura vegetal significativa, y períodos posteriores a la misma o de incipiente siembra donde predominara el suelo desnudo, rastrojo o vegetación rala. Las imágenes corresponden entonces a los días 03/12/2014, 16/06/2015, 14/01/2016, 30/01/2017 y 10/03/2017, presentándose altos niveles de cobertura vegetal en los meses de Enero y Marzo, y el escenario opuesto en Diciembre y Junio, tal como se muestra en la tabla a continuación.

**Tabla 1.-** Descripción cobertura vegetal a partir de VI para cada escena. Los primeros 3 corresponden a vegetación frondosa.

Fecha	14/01/2016			10/03/2017			30/01/2017			03/12/2014			16/06/2015		
VI	NDVI	EVI	SAVI												
MIN	-0.575	-0.072	-0.088	-0.335	-0.131	-0.153	-0.578	-0.174	-0.210	-0.650	-0.124	-0.150	-0.636	-0.164	-0.199
MAX	1.000	0.875	0.776	0.926	0.888	0.787	0.934	0.967	0.832	0.876	0.656	0.597	0.838	0.642	0.606
MEAN	0.791	0.570	0.543	0.765	0.628	0.588	0.742	0.631	0.587	0.500	0.284	0.295	0.453	0.265	0.275
STDEV	0.164	0.168	0.145	0.115	0.138	0.114	0.154	0.169	0.141	0.159	0.095	0.092	0.153	0.092	0.091

Ref.: MIN: mínimo, MAX: máximo, MEAN: media y STDEV: desvío estándar.

El área de estudio comprende cuatro cuencas del Sur de la provincia de Santa Fe que pueden observarse en la Figura 1. Se trata de un sistema de llanura sub-húmedo de clima templado.



- 1 Cuenca Arroyo Ludueña (740Km<sup>2</sup>)
- 2 Cuenca Arroyo Saladillo (3200 Km<sup>2</sup>)
- 3 Cuenca Arroyo Frias (220 Km<sup>2</sup>)
- 4 Cuenca Arroyo Seco (320 Km<sup>2</sup>)

**Figura 1.** Región en estudio: Sur provincia de Santa Fe, y cuencas particulares analizadas (imagen Google Earth).

El procedimiento consistió en agregar las imágenes a un tamaño de pixel de 2000m por método de vecino más cercano para luego procesarlas y desagregarlas a resolución 1000m y compararlas con la imagen original proporcionada por MODIS.

La técnica de desagregación fue propuesta por Kustas et al. (2003) y se conoce por el nombre de TsHARP y consiste en remuestrear los índices de vegetación (variable independiente) a resolución baja y encontrar la recta de regresión lineal que lo relaciona con la temperatura (variable dependiente) a la misma escala:

$$T_{BajaResol}^* = f(VI_{BajaResol}) = a.VI_{BajaResol} + b \tag{4}$$

, donde a y b son los parámetros que definen la relación lineal entre ambas variables.

Posteriormente se calcula la diferencia píxel a píxel entre el valor de temperatura calculado según esta relación lineal y la temperatura de la imagen original a baja resolución (2000m):

$$\Delta t = T_{BajaResol} - T_{BajaResol}^* \tag{5}$$

Finalmente se estima la temperatura a alta resolución a partir de la imagen original del índice de vegetación, sumando el valor residual  $\Delta t$ :

$$T_{AltaResol}^* = f(VI_{AltaResol}) = a.VI_{AltaResol} + b + \Delta t \tag{6}$$

, donde a, b y  $\Delta t$  surgen de las ecuaciones 4 y 5.

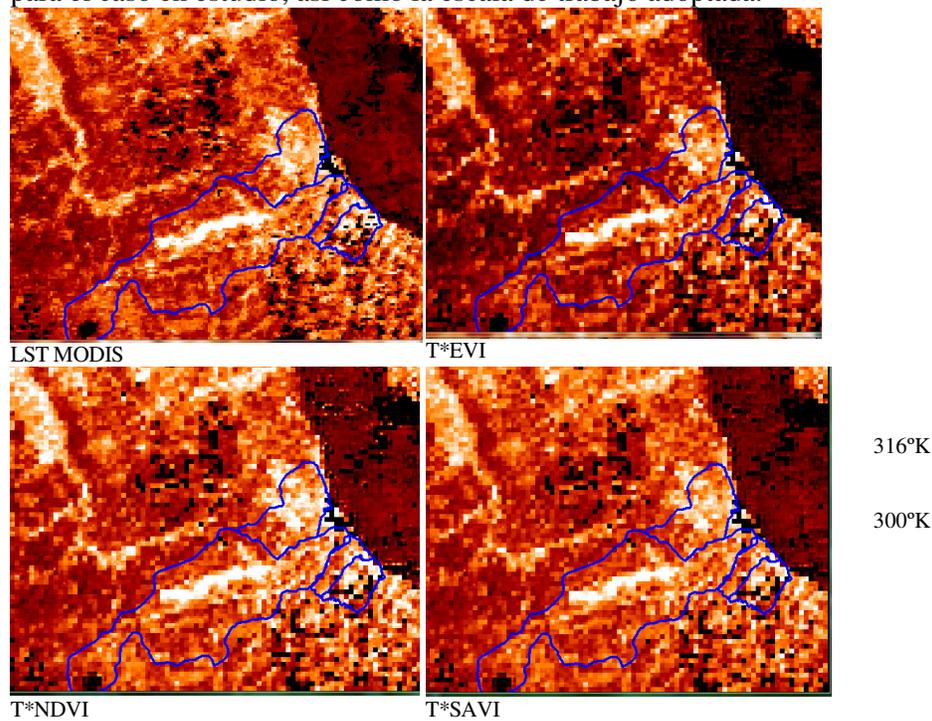
Cabe aclarar que los grandes cuerpos de agua (especialmente el río Paraná) fueron enmascarados para obtener la regresión lineal ya que producen distorsiones en la relación

entre índices de vegetación y temperatura.

Asimismo se verificó que la escala de trabajo seleccionada hubiera sido la adecuada, comparando los resultados de las estimaciones con regiones mayores. La validación y comparación se efectuó analizando un conjunto de parámetros estadísticos propios de cada serie y relativos respecto de la serie de datos del producto MODIS original.

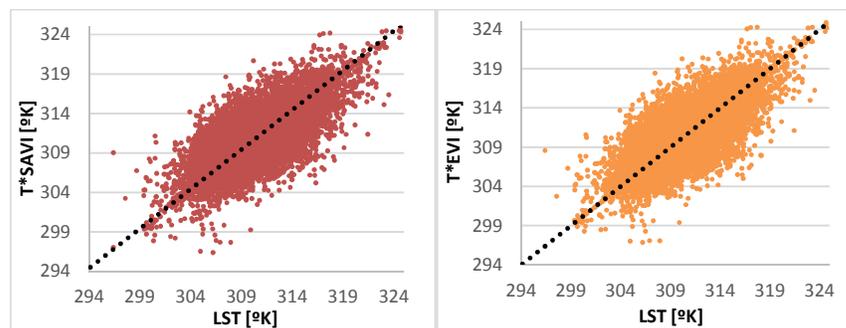
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

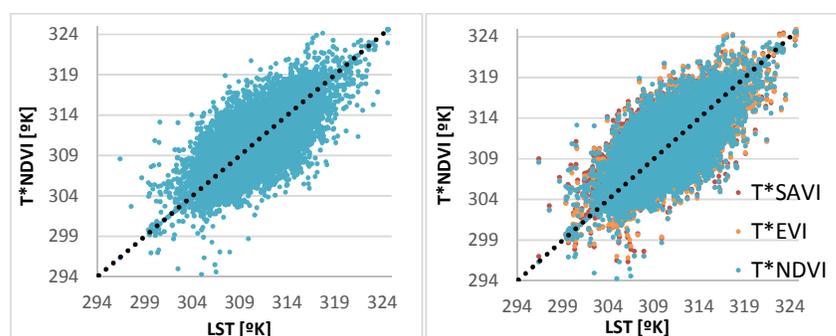
En primer lugar se observó una alta correlación entre los valores observados y estimados a resolución 1000m en todas las fechas. El ajuste puede apreciarse tanto visualmente como a partir de los estadísticos que se resumen en la tabla 2. Esto permite validar la metodología para el caso en estudio, así como la escala de trabajo adoptada.



**Figura 2.-** Comparación temperatura observada MODIS MYD11\_L2 y temperaturas estimadas con cada VI para fecha 30/01/2017. Los píxeles negros corresponden a áreas enmascaradas. A la izquierda se presenta la escala cromática utilizada.

La escasa dispersión entre temperaturas estimadas y observadas es otro indicativo del buen ajuste de la metodología. La siguiente figura representa estas correlaciones para la imagen del 30 de Enero de 2017.





**Figura 3.-** Relación temperaturas observadas vs. estimadas fecha 30/01/2017, según los distintos índices de vegetación.

El análisis más detallado de los resultados se efectuó a partir de un conjunto de estadísticos que permitieron describir no sólo la distribución de la masa de datos obtenida con cada VI en cada escena, sino también el nivel de ajuste alcanzado. Se compilaron los mismos en la siguiente tabla resumen:

**Tabla 2.-** Resumen parámetros estadísticos para cada escena. Los primeros 3 corresponden a vegetación frondosa.

FECHA	T(VI)	MAX	MIN	RANGO	MEAN	STDEV	CV	CT	SK	R2	RMSE
14/01/2016	LST	315.64	299.46	16.18	306.0117	2.3674	0.8024	1.3180	1.1360		
	T*NDVI	315.45	300.34	15.12	305.9876	2.4551	0.7984	1.4355	1.1953	0.5193	1.8041
	T*EVI	315.00	300.10	14.90	305.9640	2.4429	0.7944	1.1855	1.0887	0.5170	0.5365
	T*SAVI	315.21	299.69	15.52	305.9741	2.4306	0.6087	1.1847	1.0948	0.5163	0.4038
10/03/2017	LST	308.02	297.22	10.80	300.8534	1.8314	0.6087	0.0657	0.5940		
	T*NDVI	309.32	296.19	13.12	300.8581	2.1050	0.6997	0.0307	0.5816	0.6299	1.2905
	T*EVI	309.06	295.49	13.58	300.8682	1.9518	0.6487	0.0310	0.4913	0.6647	1.1553
	T*SAVI	309.13	295.65	13.48	300.8684	1.9491	0.6478	0.0543	0.5127	0.6646	1.1545
30/01/2017	LST	324.68	299.34	25.34	311.2430	3.3287	1.0695	1.2667	0.2091		
	T*NDVI	325.69	294.33	31.37	311.1352	3.4096	1.0959	1.6436	0.1999	0.6651	1.0861
	T*EVI	324.92	297.05	27.87	311.1342	3.3771	1.0854	1.4054	0.1997	0.6679	1.0858
	T*SAVI	324.90	296.56	28.35	311.4915	3.2769	1.0520	1.6929	0.1837	0.6586	1.0800
03/12/2014	LST	315.40	301.84	13.56	310.8407	1.6536	0.5320	1.9461	-0.5272		
	T*NDVI	315.45	305.08	10.37	310.8474	1.5802	0.5083	0.2170	-0.0809	0.2623	1.5981
	T*EVI	315.51	304.97	10.54	310.8461	1.5778	0.5076	0.2121	-0.0854	0.2625	1.5967
	T*SAVI	315.51	304.98	10.54	310.8474	1.5778	0.5076	0.2156	-0.0906	0.2628	1.5962
16/06/2015	LST	296.58	284.18	12.40	294.2924	1.1285	0.3835	29.2150	-3.9491		
	T*NDVI	296.93	283.80	13.13	294.3304	1.1949	0.4060	30.1592	-4.1389	0.3905	1.0086
	T*EVI	297.04	284.07	12.97	294.3323	1.1932	0.4054	31.0161	-4.2432	0.3925	1.0057
	T*SAVI	296.86	284.04	12.82	294.3304	1.1886	0.4038	30.7131	-4.2052	0.3933	1.0026

Referencias:  
Máx.= Máximo, Mín = Mínimo, Stdev= desvío estándar, CV= Covarianza, CT= Curtosis, SK= Skewness, R2= Coeficiente de Correlación y RMSE= Error Cuadrático Medio.

Contrariamente a lo esperado, no se observan mejores ajustes a partir de la variación de índice de vegetación según el nivel de cobertura. Respecto de la regresión lineal, ésta es tanto mejor cuanto mayor sea el nivel de cobertura presente en escena.

Se repitió el mismo procedimiento para una región con mayor cantidad de píxeles (bajo las condiciones de que tales regiones abarcaran las cuatro cuencas y comprendieran un número de

píxeles por lo menos un orden de magnitud mayor), pero no se observaron mejorías significativas en los resultados, aunque los estadísticos de las escenas con escasa cobertura vegetal acusaron alguna leve mejoría. Esto permite inferir que la escala de trabajo utilizada es representativa de los distintos estados de cobertura superficial, especialmente si se tiene presente que los valores máximos y mínimos en las cinco imágenes oscilan dentro del mismo rango, y lo que varía es su distribución de frecuencias.

Para ambas escalas de trabajo existe una coincidencia fuerte entre los parámetros estadísticos del conjunto de píxeles observados y los remuestreados a partir de los distintos índices de vegetación. Los diagramas de caja confeccionados para cada imagen reflejan estas coincidencias.

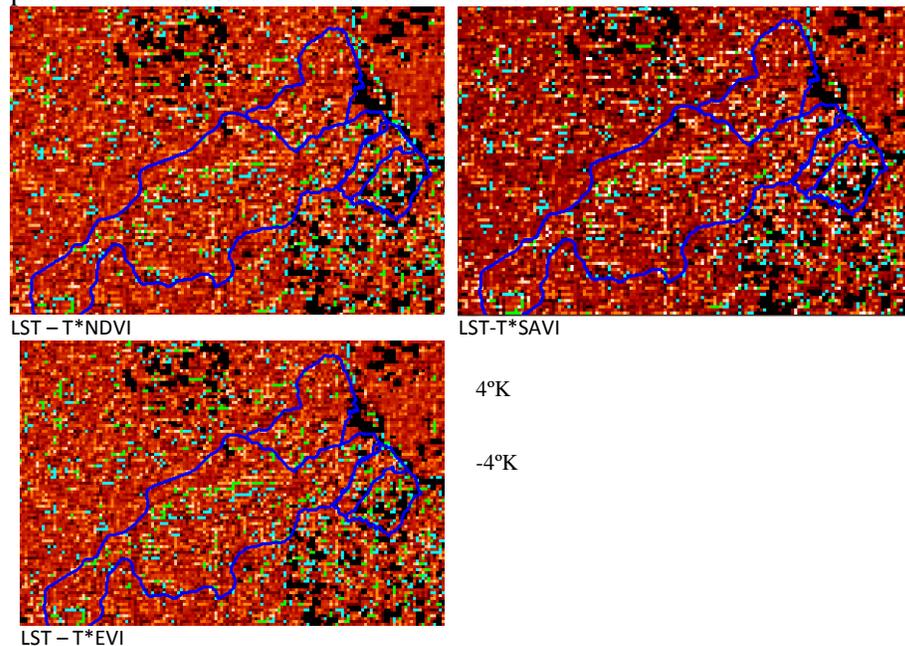
No se observa del conjunto de imágenes analizadas que el nivel de ajuste tenga correlato con la amplitud térmica de la escena, ni con el rango de VI asociado. Asimismo tampoco se encontraron coincidencias en lo referente a la distribución de frecuencias de dichas temperaturas (o VI) respecto de la media y su mejor o peor ajuste. Esto se realizó analizando el desvío estándar, Curtosis y Skewness de cada escena, comparando su magnitud con los estadísticos de relación R2 y RMSE.

**Tabla 3.-** Resumen parámetros estadísticos para cada escena. Los primeros 3 corresponden a vegetación frondosa.

FECHA	T(VI)	MAX	MIN	RANGO	MEAN	STDEV	CV	CT	SK	R2	RMSE
14/01/2016	LST	319.58	302.88	16.70	307.7422	2.5945	0.8431	0.2850	0.0662		
	T*NDVI	319.07	301.65	17.43	307.8571	2.8347	0.9208	0.0334	0.0567	0.5236	0.6423
	T*EVI	317.90	302.30	15.60	307.8632	2.7584	0.8960	-0.0694	0.0523	0.5329	0.1535
	T*SAVI	317.94	301.86	16.08	307.8751	2.7531	0.8942	-0.0740	0.0522	0.5261	0.1082
10/03/2017	LST	308.02	297.22	10.80	300.7586	1.7061	0.5673	0.766	0.7663		
	T*NDVI	309.41	294.88	14.53	300.7623	1.9661	0.6537	0.699	0.6995	0.6081	1.2429
	T*EVI	309.32	295.49	13.83	300.7641	1.8294	0.6083	0.642	0.6417	0.6365	1.1302
	T*SAVI	309.41	295.65	13.76	300.7639	1.8264	0.6073	0.664	0.6636	0.6363	1.1293
30/01/2017	LST	324.68	296.38	28.30	310.1679	3.2918	1.0613	-0.0404	0.3276		
	T*NDVI	325.69	293.30	32.39	310.1563	3.3486	1.0797	0.0939	0.3296	0.6932	1.9221
	T*EVI	324.92	296.38	28.54	310.1555	3.3306	1.0739	0.0060	0.3203	0.6943	1.9125
	T*SAVI	324.90	296.40	28.50	310.5777	3.2056	1.0321	0.1359	0.2849	0.6824	1.9610
03/12/2014	LST	319.92	301.42	18.50	311.6554	2.0823	0.6681	0.2165	0.3893		
	T*NDVI	319.92	305.08	14.84	311.6955	2.0787	0.6669	0.0547	0.4495	0.5006	1.5917
	T*EVI	319.92	304.97	14.95	311.6944	2.0825	0.6681	0.0475	0.4502	0.4978	0.1761
	T*SAVI	319.96	304.98	14.98	311.6940	2.0812	0.6677	0.0452	0.4480	0.4985	0.0912
16/06/2015	LST	296.98	284.18	12.80	294.2601	1.0545	0.3584	12.0155	-1.8917		
	T*NDVI	296.94	283.80	13.14	294.2785	1.0902	0.3705	13.3096	-2.0240	0.4498	0.8402
	T*EVI	297.04	284.07	12.98	294.2779	1.0816	0.3676	14.0528	-2.1139	0.4626	0.8302
	T*SAVI	296.94	284.04	12.90	294.2786	1.0809	0.3673	13.7402	-2.0772	0.4586	0.8317
Referencias: Máx.= Máximo, Mín = Mínimo, Stdev= desvío estándar, CV= Covarianza, CT= Curtosis, SK= Skewness, R2= Coeficiente de Correlación y RMSE= Error Cuadrático Medio.											

Se confeccionaron mapas también con la diferencia absoluta entre temperatura observada por el producto MODIS y la imagen remuestreada a escala 1000m. De la misma se observa una dispersión de error que permite asumir su aleatoriedad, concentrándose el 94% de los píxeles dentro de un rango de error absoluto de  $\pm 4^{\circ}\text{K}$ . No obstante al resaltar los píxeles con error más

grosero (el 6% restante), los mismos coinciden con la presencia de cuerpos de agua y cobertura nubosa, los cuales no fueron enmascarados por tratarse de píxeles mixtos, donde la presencia de estas coberturas no era exclusiva.



**Figura 4.-** error absoluto imagen fecha 30/01/2017, para cada estimación con VI respecto del valor observado MODIS. En Cyan se resaltan las estimaciones con error mayor a 4°K por exceso y en verde por defecto.

Esto avala la hipótesis de trabajo inicial según la cual los píxeles que contienen agua no se ajustan a la ley de regresión lineal existente entre vegetación y temperatura, sino que presentan valores de índice de vegetación bajos en coincidencia con temperaturas bajas (en oposición a suelos desnudos o vegetación rala que poseen temperaturas altas).

## CONCLUSIONES

Queda validada la metodología general para la región Sur de la provincia de Santa Fe, para la escala de trabajo adoptada, siendo posible suponer que la misma abarca una variedad de coberturas que permite la correcta estimación en la relación tener índice de vegetación y temperatura superficial.

Respecto de la utilización de diversos índices de vegetación, no se observaron mejoras al variarlos, por lo cual se decidió continuar futuras investigaciones aplicando el NDVI ya que presenta la relación más simple entre bandas y un ajuste satisfactorio verificado según distintos parámetros estadísticos y en condiciones diversas de cobertura vegetal.

El análisis de errores permitió corroborar la hipótesis inicial (según la cual los cuerpos de agua presentan relación VI-Temperatura inversa a los sistemas de vegetación y cultivo) al identificar que los errores mayores correspondían a píxeles total o parcialmente cubiertos por agua, mientras que para el resto de la imagen los errores respondía a una distribución aleatoria y con un margen aceptable.

Se pretende en futuras etapas desarrollar un procedimiento automatizado que permita realizar este procesamiento en plazos de tiempo breves para utilizar las imágenes remuestreadas en aplicaciones hidrológicas.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Kustas W, Norman J, Anderson M, French A** (2003). “Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship”. *Rem. Sen. Env.* 85: pp. 429-440.
- Bayala M, Rivas R, Scavuzzo M** (2013). “generación de mapas de temperatura de alta resolución mediante técnicas de remuestreo”. *Interiencia*, VOL. 38, N° 07, Jul 2013, pp. 502:508.
- Bayala M., Rivas R.** (2014). “Enhanced sharpening procedures on edge difference and water stress index basis over heterogeneous landscape of sub-humid region”. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 17. Pp. 17-27.
- Wang F., Qin Z., Li W., Song C., Karnieli A., Zhao S.** (2015). “An Efficient Approach for Pixel Decomposition to Increase the Spatial Resolution of Land Surface Temperature Images from MODIS Thermal Infrared Band Data”. *Sensors Journal* 15: pp. 304-330.

# CÁLCULO DEL NDVI EN IMÁGENES LANDSAT 5

## PARA LA CUENCA DEL RIO SAN MARCOS

*Noelia Cosano<sup>1</sup>, Inés Bernasconi<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Secretaría de Recursos Hídricos  
Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos  
Humberto Primo 607, Córdoba, Argentina.  
TEL: +54 351 4321254  
E-mail: [noeliacosano@gmail.com](mailto:noeliacosano@gmail.com)

### INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se estudia la cubierta vegetal de la sub cuenca del Río San Marcos, ubicada entre los departamentos Cruz del Eje y Punilla, al noroeste de la provincia de Córdoba. Está integrada por los ríos San Jerónimo, Río Dolores, Río Calabalumba, Río Seco, Río San Marcos e involucra varios arroyos tributarios a los mismos, hasta la desembocadura en el Embalse Cruz del Eje.

### OBJETIVOS

Reconocer las zonas afectadas por el urbanismo, las cuales han perdido cubierta vegetal. Este trabajo se lleva a cabo desde la Secretaría de Recursos Hídricos, fundamentalmente para dar respuesta a los integrantes de la Comisión Técnica de la Subcuenca del Río Dolores San Marcos

Familiarizarse con la descarga y procesamiento de imágenes satelitales a través de servidores y con los programas Quantum Gis.

### MATERIALES Y MÉTODOS

Para la descarga de las imágenes satelitales, se utilizó el servidor gratuito del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Se utilizó el programa Quantum Gis para procesar las imágenes y confeccionar los mapas resultantes.

### EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Se analizaron dos imágenes Landsat 5 TM Path y Row 229 082, de la zona de la Cuenca del Río San Marcos de los años 1987 y 2017. Luego, se calculó el índice espectral NDVI en cada imagen con el propósito de comparar los cambios producidos en la vegetación. Para esto, se utilizó el programa Quantum Gis.

Los valores resultantes del cálculo del índice NDVI varían como para el resto de los índices normalizados, entre -1 y 1, siendo mayor el vigor vegetal, cuanto mayor sea el resultado obtenido, permitiendo entre otras aplicaciones la identificación de áreas forestadas-deforestadas, la evaluación del estado de la vegetación y su grado de estrés, la separación entre distintos tipos de masas vegetales, el monitoreo de plagas y la evaluación de riesgos de incendio (Chuvieco Salinero, 2002).

### CONCLUSIONES

Se pudo cuantificar a través del análisis de los cambios entre las imágenes de los años 1987 y 2011, que hubo un aumento del 13% del suelo desnudo, un 56% de suelo mezcla, suelo desnudo y vegetación, disminución del 18% de la cubierta vegetal. Se puede observar en la imagen del año 1987 que los valores de NDVI predominantes son: 0 a 0.2, suelo desnudo; sin vegetación (color naranja) y 0.2 a 0.4 de mezcla de suelo desnudo y vegetación (color verde lima). En menor medida, se observa en algunas zonas el predominio de vegetación vigorosa con un valor de NDVI que va desde 0.41 a 1 representado en color verde, a diferencia de la imagen del año 2011, donde predominan valores de NDVI que van desde 0 a 0.2, clasificados como suelo desnudo sin vegetación. También en menor medida, encontramos zonas con predominio de vegetación vigorosa donde el

valor de NDVI varía desde 0.41 a 1 (color verde). Se observa la existencia de nuevos cuerpos de agua donde el NDVI es mayor a cero.

## **BIBLIOGRAFIA**

Chuvieco Salinero, Interpolación espacial de la evapotranspiración del cultivo de referencia, ETO a partir de imágenes de satélite

## EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL DESEMPEÑO EN LA HUMEDAD DEL SUELO DE LOS MODELOS NOAH Y VIC CONAGUA 2017. CÓRDOBA, ARGENTINA, 2017

**Gonzalo M. Díaz<sup>(1,2)</sup>, Silvina A. Righetti<sup>(1,2)</sup>, Lorena J. Ferreira<sup>(1)</sup>, Álvaro Soldano<sup>(3)</sup>**

(1) Servicio Meteorológico Nacional, Ministerio de Defensa. Argentina.

(2) Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN, UBA. Argentina.

(3) Comisión Nacional de Actividades Espaciales.

Av. Dorrego 4019, (011) 51676767, [gdiaz@smn.gov.ar](mailto:gdiaz@smn.gov.ar), [srighetti@smn.gov.ar](mailto:srighetti@smn.gov.ar)

### RESUMEN

La humedad del suelo es una de las variables más importantes en el ciclo hidrológico. Por lo tanto, su identificación es crucial para la prevención de eventos de impacto hidrológico como, por ejemplo, las inundaciones. Una de las herramientas más utilizadas para determinar la humedad del suelo es el uso de modelos de suelo, los cuales una vez validados, pueden ser útiles para producir registros continuos de humedad del suelo en regiones donde las mediciones in situ son escasas. Este trabajo propone realizar una evaluación preliminar del desempeño de dos modelos numéricos de suelo: NOAH y VIC. Se tomaron dos ubicaciones geográficas dentro de la provincia de Córdoba (S9 y S14), donde se contaba también con mediciones in situ, y se evaluaron los resultados a partir del cálculo de los estadísticos Coeficiente de Correlación (R) y Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE). En S9, la diferencia entre estadísticos de un modelo y otro no es importante. Sin embargo, en S14 el modelo NOAH representa de mejor manera a la humedad del suelo, con una mejora en los estadísticos ( $R = 0.81$  y  $RMSE = 0.045$ ), siendo el RMSE un orden de magnitud menor al encontrado con el VIC.

### ABSTRACT

Soil moisture is one of the most important variables in the hydrological cycle. Thus, its identification is crucial for hydrological impact events prevention, for example, floods. One of the most known tools to define soil moisture is the application of Land Soil Models, which once are validated, may be useful for producing soil moisture continuous records in regions where in situ measurements are poor. This work proposes a preliminary performance evaluation of two numerical Land Soil Models: NOAH and VIC. Two geographic locations in Cordoba (S9 and S14) were taken, where there were also in situ measurements, and the results were evaluated based on statistical calculation like Correlation Coefficient (R) and Root Mean Square Error (RMSE). In S9, the difference between statistics from one and another model is not important. However, in S14 NOAH model has a better representation of soil moisture, with an improvement in the statistics ( $R = 0.81$  y  $RMSE = 0.045$ ), being RMSE an order of magnitude lower than the one calculated for VIC.

### INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la humedad del suelo cumple un rol importante en el balance de agua en el sistema suelo-atmósfera y también, de forma indirecta, en el balance de energía. La problemática de esta variable rige en conocer cómo son las interacciones suelo-atmósfera en distintas condiciones hídricas. Grayson et al (1997) han comentado la importancia de la humedad del suelo para la ocurrencia de procesos hidrológicos, como son la partición del contenido de agua en el suelo entre escurrimiento, infiltración y evapotranspiración según condiciones iniciales de suelo. Para la prevención de fenómenos de impacto hidrológico, como son las inundaciones, es importante caracterizar la condición inicial de humedad del suelo previo al evento de precipitación que genera la inundación (Pathiraja et al, 2012). Debido a la falta de una red institucional de monitoreo de humedad del suelo (Spennemann, 2010), es que la simulación hidrológica, mediante el uso de modelos de suelo (LSM, por sus siglas en inglés), se vuelve una herramienta útil para generar series continuas de humedad del

suelo para distintos casos y así producir un sistema de monitoreo operativo para la prevención de eventos de impacto hidrológico. Algunos de los LSM utilizados para estos fines son: el NOAH (Chen and Duhia, 2001) y el VIC (Variable Infiltration Capacity) (Liang et al, 1994) entre otros. Por último, vale destacar que una correcta caracterización de la humedad del suelo influye directamente en la capacidad de los modelos meteorológicos de pronóstico para representar las tormentas que producen inundaciones (Dillon et al, 2016).

## OBJETIVOS

Actualmente, en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se están realizando simulaciones con los modelos NOAH y VIC para analizar el comportamiento de la humedad en el suelo y poder realizar un monitoreo de las condiciones hidrológicas. Teniendo esto en cuenta, el objetivo principal de este trabajo será entonces realizar un primer análisis del desempeño de ambos modelos para simular el contenido de agua del suelo en los primeros 10 cm en algunos sitios de Argentina.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este trabajo se contó tanto con datos observados como simulados numéricamente durante los años 2013 y 2014. Las mediciones in-situ se tomaron de dos sitios pertenecientes a la Red Telemétrica de Humedad, Temperatura y Salinidad del Suelo de la Misión SAOCOM/SIASGE de la CONAE (Tabla 1) y fueron seleccionados por ser aquellos que contaban con más valores medidos dentro de los dominios en que se realizaron simulaciones de los LSM. Las observaciones se realizaron a 10 cm de profundidad con sondas del tipo HydraProbe II de la marca Stevens con una resolución temporal de 1 hora.

En cuanto a las simulaciones numéricas, las mismas fueron realizadas con dos modelos: NOAH y VIC. El modelo NOAH fue corrido con una resolución de 10 km, en modo desacoplado mediante el sistema HRLDAS y fue forzado cada 6 horas con análisis de GFS (0.25° de resolución espacial) y estimaciones de precipitación 3B42 (V7) de TRMM. El modelo VIC fue ejecutado en su modalidad de balance de agua y forzado con observaciones diarias de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima e intensidad de viento medio (datos obtenidos de la red de observaciones del SMN). Esta información fue grillada mediante el método de interpolación Kriging a una retícula de 0.125° (aproximadamente 14 km).

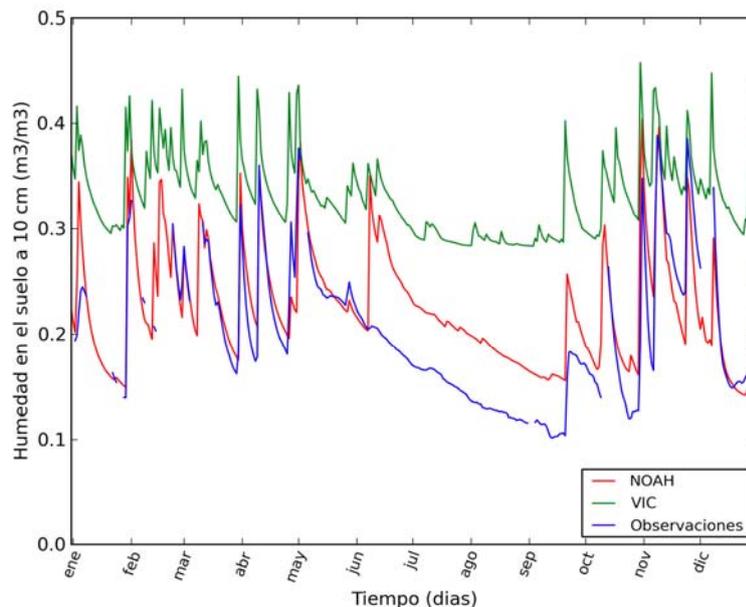
**Tabla 1.-** Características de los sitios seleccionados

Nombre	Coordenadas geográficas		Período de observación
	Latitud	Longitud	
Sitio 9 (S9)	32.39 °S	62.64 °O	01/01 al 31/12 de 2014
Sitio 14 (S14)	30.98 °S	61.41 °O	01/01 al 31/12 de 2013

Para analizar el desempeño de ambos modelos se evaluaron los estadísticos de correlación (R) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés).

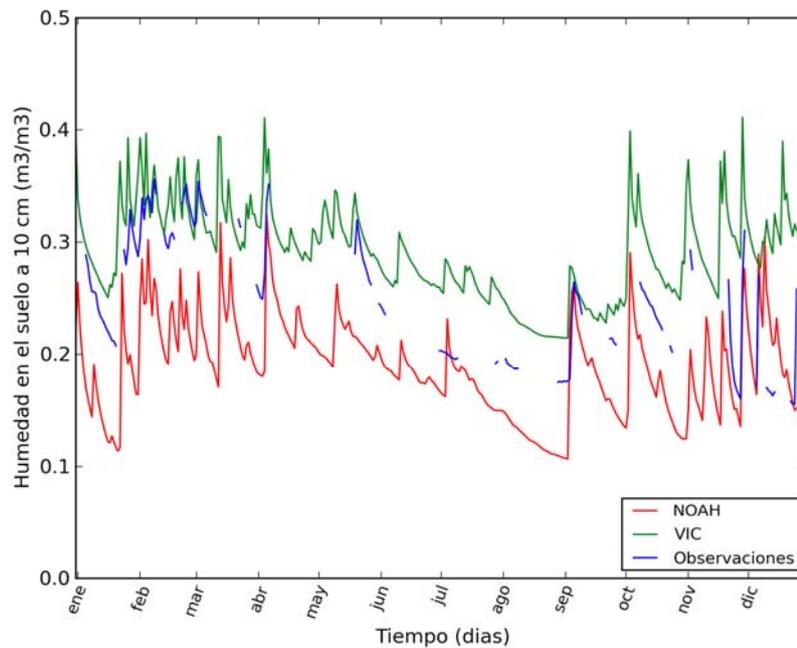
## EVALUACIÓN DE RESULTADOS

En las Figuras 1 y 2 se presenta la evolución temporal de la humedad en el suelo modelada y observada en ambos sitios de estudio. Lo primero que se puede notar es que la cantidad de datos observados no es la misma en ambos sitios, siendo mayor en el S14 (85%) que en el S9 (43%). A pesar de este problema se considera trabajar con esas observaciones. También se puede observar que, en ambos sitios, VIC siempre presenta mayores valores de humedad que NOAH y lo observado. Es importante destacar que si bien los valores de VIC son mayores, la forma de la variación temporal es similar entre los modelos. Otra característica que se puede apreciar en la Figura 1 es que en S14, de enero a principios de junio, el modelo NOAH simula muy bien la humedad observada, pero a partir de un falso dato de precipitación, brindado por la estimación satelital, NOAH también pasa a sobrestimar el valor observado. Luego, para fines del mes de octubre, ambas curvas tienden nuevamente a presentar valores similares. Si se analiza el tiempo que tarda cada modelo en perder la humedad de su primer capa de suelo, se puede notar que siempre el NOAH tiende a secarse más rápido que el VIC y este comportamiento es bastante parecido al observado.



**Figura 1.-** Evolución temporal de la humedad en el suelo a 10 cm ( $m^3/m^3$ ) en el Sitio 14 durante el año 2013. En rojo se presenta el modelo NOAH, en verde el VIC y en azul las observaciones.

En el sitio 9 (Figura 2), a diferencia de lo observado en S14, el modelo VIC comienza simulando de mejor modo la humedad en el suelo. Sin embargo, a mediados del mes de mayo se puede ver como el VIC comienza a sobrestimar los valores observados, mientras que el NOAH los subestima. Hacia el fin del período de estudio se aprecia un mejor ajuste a las observaciones por parte del NOAH que del VIC. En este sitio no se observan diferencias notorias entre ambos modelos en la velocidad de pérdida de humedad.



**Figura 2.-** Evolución temporal de la humedad en el suelo a 10 cm ( $m^3/m^3$ ) en el Sitio 9 durante el año 2014. En rojo se presenta el modelo NOAH, en verde el VIC y en azul las observaciones.

La Tabla 2 muestra los estadísticos RMSE y R para los sitios estudiados. Se puede apreciar que los resultados obtenidos para S14 son mejores al utilizar el NOAH que el VIC. La correlación es mayor y más cercana a 1, siendo 0.810 para NOAH y 0.720 para VIC. El RMSE se encuentra más cercano a 0 para el NOAH, con un valor de 0.045 contra un valor de 0.136 para VIC, un orden de magnitud menor de NOAH con respecto a VIC. En el caso de S9, los valores de correlación son muy similares tanto para NOAH como para VIC, pero no así para RMSE. Para este último, el valor de VIC se encuentra más cercano a cero que el de NOAH.

**Tabla 2.-** Valores de RMSE y R entre la humedad en el suelo observada y modelada con NOAH y VIC en los sitios S14 y S9

	RMSE		R	
	VIC	NOAH	VIC	NOAH
<b>Sitio 9</b>	0.063	0.073	0.650	0.660
<b>Sitio 14</b>	0.136	0.045	0.720	0.810

**CONCLUSIONES**

Se observó que en ambos sitios el modelo VIC tendía a presentar mayores valores de humedad que el NOAH, siendo esta diferencia en algunos momentos mayor a  $0.1 m^3/m^3$ . En cuanto al análisis de estadísticos, el NOAH en el S14 presenta mejores valores de R y RMSE que el VIC. Sin embargo, en el S9 la diferencia entre los estadísticos de ambos modelos no es tan notoria, siendo un poco mejor la representación del VIC por tener un RMSE levemente menor que el de NOAH.

Las discrepancias entre los modelos pueden encontrarse asociadas, en parte, a tres efectos: 1. Los forzantes meteorológicos, 2. La conductividad hidráulica (Ksat) y 3. El uso de

suelo. Con respecto al primer efecto, ambos modelos utilizan distintos forzantes meteorológicos, pudiendo esto impactar en los resultados modelados. Por otro lado, en la Tabla 3, se observa cuan distintos son los parámetros asociados a los otros dos efectos tanto para el NOAH como para el VIC. Considerando esto podemos concluir que las diferencias que existen en la humedad del suelo entre estos dos modelos pueden estar fuertemente influenciadas por estos efectos.

**Tabla 3.-** Parámetros de los modelos numéricos para S9 y S14

Parámetros		Sitio 9	Sitio 14
Ksat [mm/día]	NOAH	292.03	84.15
	VIC	211.37	84.15
Uso de suelo	NOAH	Cropland/Woodland Mosaic	Dryland Cropland and Pasture
	VIC	Woodland/Wooded Grasslands/Grasslands/Cropland	Wooded Grasslands/Cropland

**Agradecimiento.** A CONAE por facilitar la información de la Red Telemétrica de Humedad, Temperatura y Salinidad del Suelo de la Misión SAOCOM/SIASGE.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Chen and Dudhia J.** (2001). "Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity". *Monthly Weather Review*. Vol. 129, 569–585.

**Dillon M. E., Collini E. A. and Ferreira L. J.** (2016). "Sensitivity of WRF short-term forecasts to different soil moisture initializations from the GLDAS database over South America in March 2009". *Atmospheric Research*, Vol. 167, 196–207.

**Grayson R.B., Western A.W. and Chiew F.H.S.** (1997). "Preferred states in spatial soil moisture patterns: Local and nonlocal controls". *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 12, 2897-2908.

**Liang X., Lettenmaier D. P., Wood E. F. and Burges S. J.** (1994). "A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models". *J. Geophys. Res.*, Vol. 99 (D7), 14415–14428.

**Pathiraja S., Westra S. and Sharma A.** (2012). "Why continuous simulation? The role of antecedent moisture in design flood estimation". *Water Resources Research*, Vol. 48.

**Spennemann P.** (2010). "Evaluación de la representación de la humedad de suelo por el modelo WRF-ARW" (Graduate Thesis) Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Buenos Aires.

# **SISTEMA INTEGRADO DE VIGILANCIA, ALERTA Y PRONÓSTICO DE PRECIPITACIONES - SIVAPP**

**Dr. Ing. Oscar Dölling, Lic. Héctor Lépez, Ing. Ana Guadalupe López**

PGICH - Facultad de Ingeniería UNSJ, San Juan, Argentina

Email: odolling@gmail.com Cel: 2646716378

Email: lepezhr@yahoo.com.ar Cel: 2644137337

Email: anaguadalupelopez@gmail.com Cel: 264-4708742

## **RESUMEN**

El Sistema Integrado de Vigilancia, Alerta y Pronóstico de Precipitaciones (SIVAPP), fue elaborado para el Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos, Secretaría de Recursos Hídricos de Córdoba entre el año 2015 y el 2016. El sistema incluye reportes diarios generados a partir de información de siete sistemas. El resultado es un conjunto de productos que son utilizados a diario por la Secretaría de Recursos Hídricos y el (EPEC) de Córdoba para facilitar la toma de decisiones y potenciar el trabajo con municipios, defensa civil, operadores de embalses y operadores de sistemas eléctricos entre otros.

## **ABSTRACT**

The Integrated Surveillance, Alert and Precipitation Forecasting System (SIVAPP) was developed for the Ministry of Water, Environment and Public Services, Secretariat of Water Resources of Córdoba between 2015 and 2016. The system includes daily reports generated from eight systems. The result is a set of products that are used daily by the Secretariat of Water Resources and the (EPEC) of Córdoba to facilitate decision making and enhance work with municipalities, civil defense, reservoir operators and electrical system operators between others.

## **INTRODUCCIÓN**

El Sistema Integrado de Vigilancia, Alerta y Pronóstico de Precipitaciones (SIVAPP), elaborado entre el año 2015 y el 2016, incluye reportes diarios generados a partir de información de ocho sistemas.

1. Sistema de vigilancia de cielos a tiempo real.
2. Sistema de alerta por imágenes satelitales, radar de tierra y modelo de pronóstico.
3. Sistema integrado de modelos de pronóstico/probabilidades.
4. Sistema de análisis de estado de circulación atmosférico.
5. Sistema que utiliza un proceso de Extracción, Transformación y Carga (ETL) de datos meteorológicos obtenidos de la red de Estaciones existentes.
6. Sistema de alerta visual geo-referenciado de pronóstico de precipitaciones máximas.
7. Sistema (SIG) para generación de mapas de isohietas.
8. Sistema de análisis de tendencias climáticas trimestrales.

## **SISTEMA DE VIGILANCIA DE CIELOS A TIEMPO REAL.**

Este sistema está compuesto por un conjunto de cámaras de vigilancia de cielos a tiempo real, cámaras domo que permiten un giro de hasta 180° y cámaras fijas como el ejemplo de la figura 1.

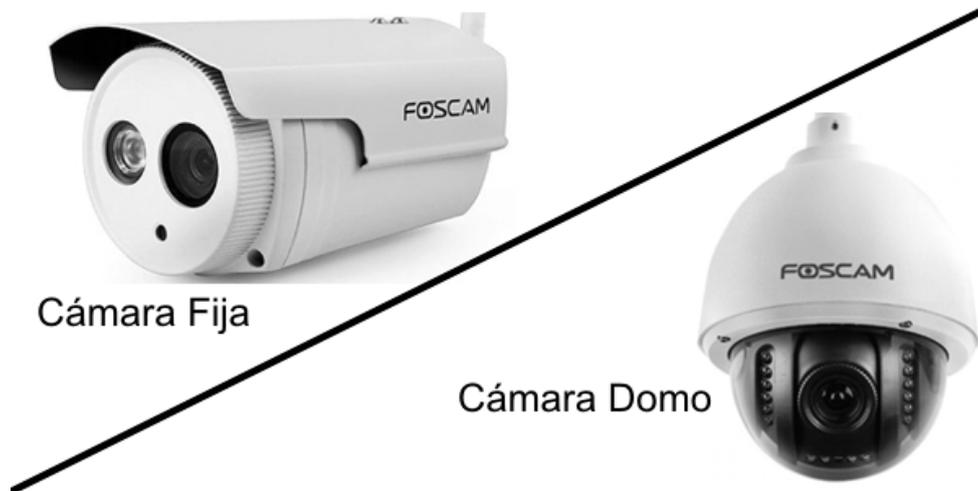


Figura 1.- Tecnología de Cámaras Fijas y Domos.

Ambas tecnologías de cámaras están conectadas al sistema de red segura del gobierno de Córdoba las 24 horas del día. La ubicación inicial de las primeras 6 cámaras se basaron, en la disponibilidad técnica de recursos de red y seguridad, se instalaron en edificios públicos del Gobierno de Córdoba. Actualmente se encuentran disponible cámaras en la zona de Mogotes ver figura2, Río Cuarto ver figura 3, y Centro Cívico ver figura 4.

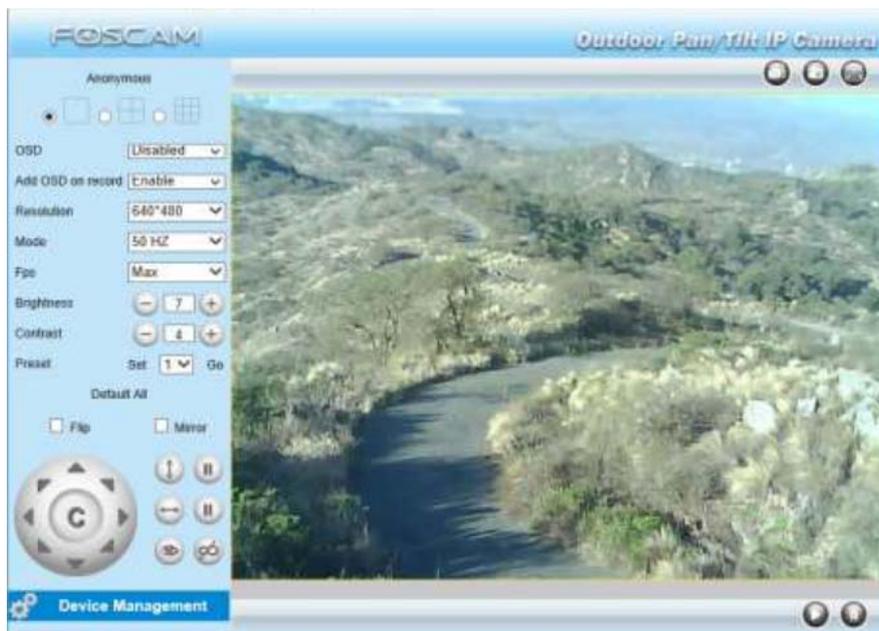


Figura 2.- Cámara domo en zona de Mogotes.

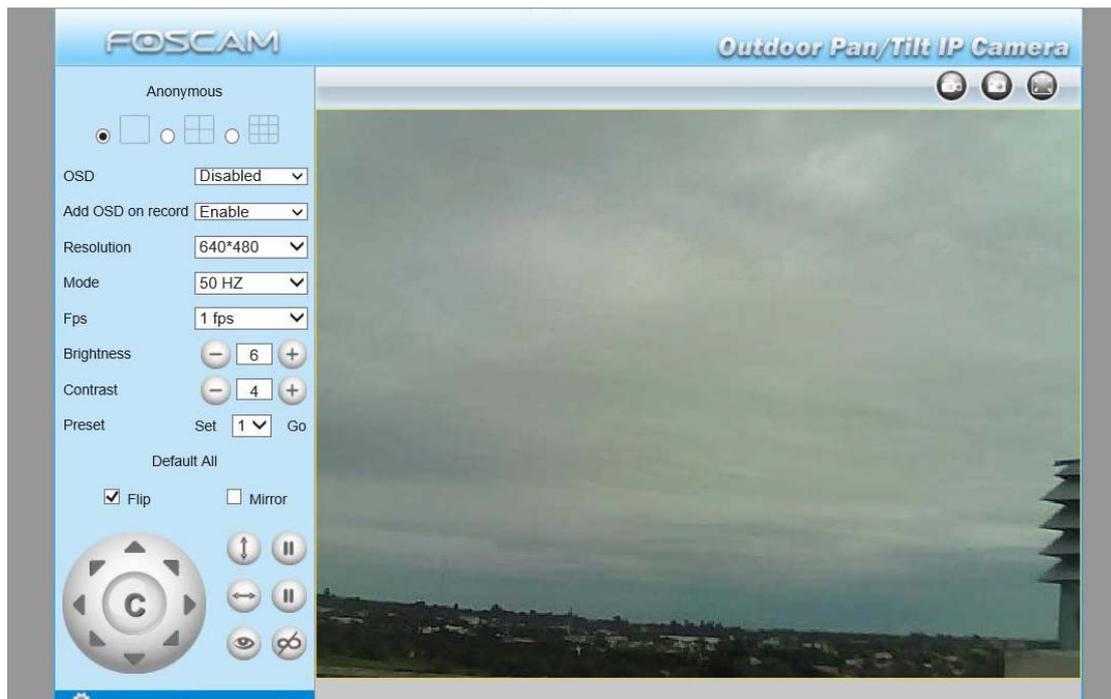


Figura 3.- Cámara domo en zona de Rio Cuarto.

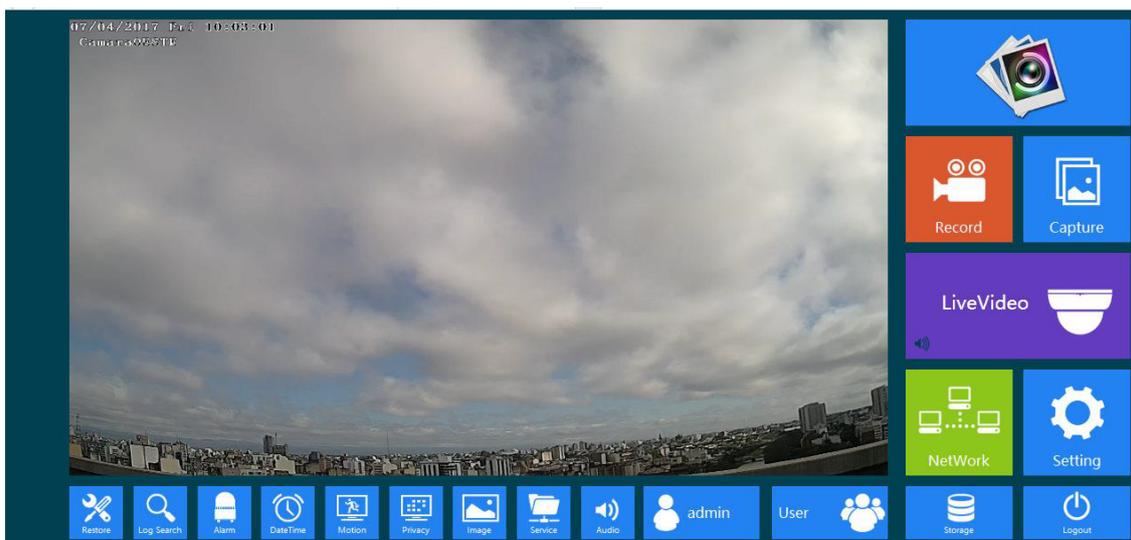


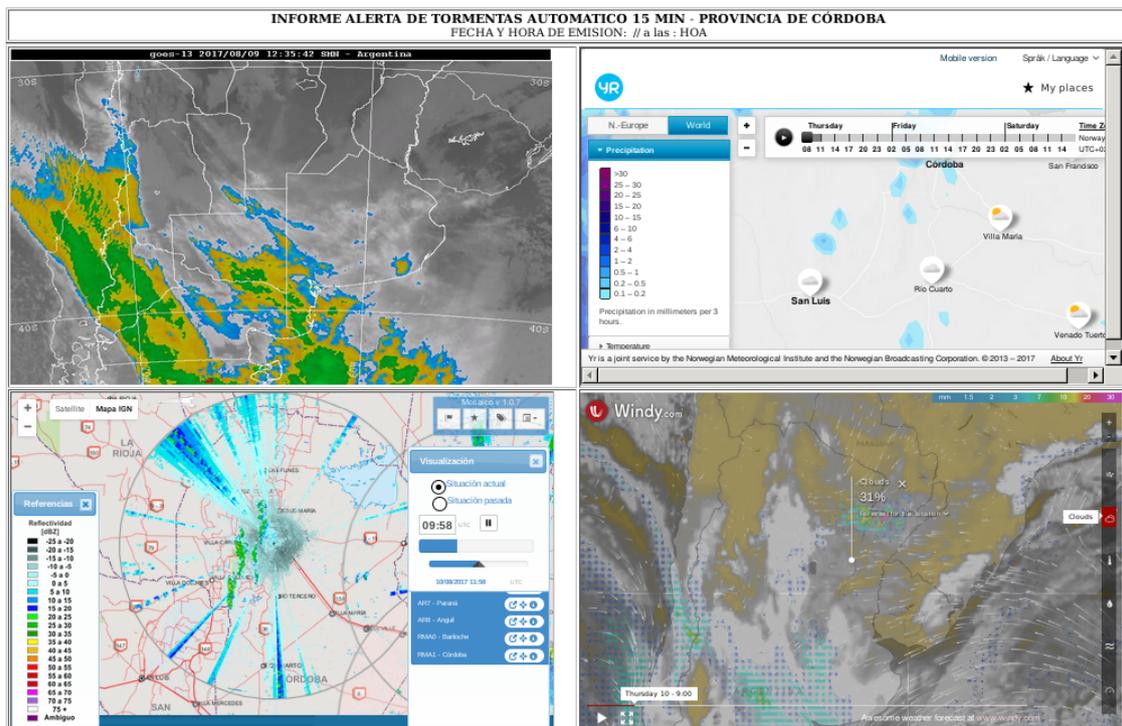
Figura 4.- Una de las 4 Cámaras fijas en zona de Centro Cívico.

El parte diario enviado compone las imágenes y además adiciona capturas de cámaras de municipios y organismos no gubernamentales.

**SISTEMA DE ALERTA POR IMÁGENES SATELITALES, RADAR DE TIERRA Y MODELO DE PRONÓSTICO.**

En base a un conjunto de recursos de distintos proveedores y agencias nacionales como el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) e internacionales como NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration, se elaboró un sistema web que actualiza esta información cada quince minutos, buscando las

últimas imágenes disponibles en Internet, ver figura 5.



**Figura 5.- SISTEMA DE ALERTA POR IMÁGENES SATELITALES, RADAR DE TIERRA Y MODELO DE PRONÓSTICO.**

El sistema está desarrollado en lenguaje PHP y alojado en servidor DEBIAN junto a otros sistemas que operan de forma permanente.

**SISTEMA INTEGRADO DE MODELOS DE PRONÓSTICO/PROBABILIDADES.**

El sistema analiza los resultados de 12 modelos de pronóstico de diferente instituciones y servicios climáticos, incluyendo precipitaciones, temperatura ambiente y vientos a mediano plazo (1, 3, 7 y 14 días).

Entre los modelos analizados se puede citar: WeatherOnline (Ltd. Meteorological Services - United Kingdom; MeteoGroup); WeatherPro and MeteoEarth; Foreca - Helsinki, Stockholm and Moscow weather services worldwide; Yr (Norwegian Meteorological Institute and the Norwegian Broadcasting Corporation.); Instituto Uruguayo de Meteorología; SMN Servicio Meteorológico Nacional de Argentina; INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos; AccuWeather, Inc.; NOAA/ National Weather Service National Centers for Environmental Prediction; Weather Company, LLC; The Weather Company An IBM Business; Met Office United Kingdom; MeteoGroup. NASA's EOSDIS Earth Observing System Data and Information System; WeatherOnline Widgets and WeatherOnline RSS Feeds; Windyty: open source codes of Cameron Becarrio; ECMWF ; UKMO; GFS; GFS 0.25\*; CMC; NAVGEM; HIRLAM; WRF Weather Research and Forecast; ETA, Météo-France : le modèle AROME : simulations détaillées sur l'Europe

de l'ouest à la résolution kilométrique, modèle ARPEGE : simulations à l'échelle du globe; Eta (11 dias) 15 X 15km; entre otros.

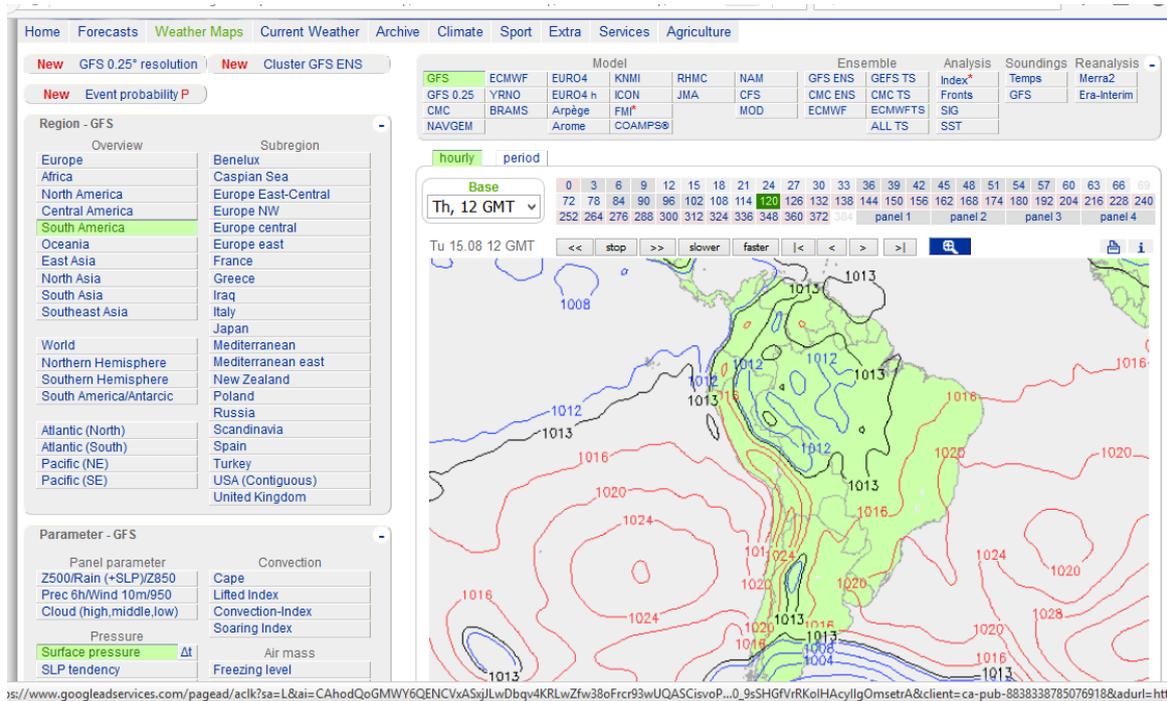


Figura 6.- SISTEMA WeatherOnline (Ltd. Meteorological Services -United Kingdom)

**SISTEMA DE ANÁLISIS DE ESTADO DE CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICO.**

Se realiza a través de la implementación del modelo WRF Weather Research and Forecasting Model (WRF) en su versión la 3.5. Este sistema, de cálculo numérico por diferencias finitas para simulación atmosférica, fue diseñado para satisfacer las necesidades tanto de investigación como de predicción atmosféricas. WRF incluye dos núcleos diferentes (ARW, NMM), un sistema de asimilación de datos, y una arquitectura de software diseñada para la posibilidad de ejecuciones distribuidas o paralelas y la escalabilidad del sistema. WRF implementa una extensa gama de aplicaciones meteorológicas en escalas que van desde los metros a los miles de kilómetros.

El sistema se calibró con resolución de 4 km para la región centro cuyo y da información para diferentes capas atmosféricas en colaboración con la Universidad Nacional de Córdoba.

Precipitación acumulada (mm) de todo el día desde las 00:00 hs

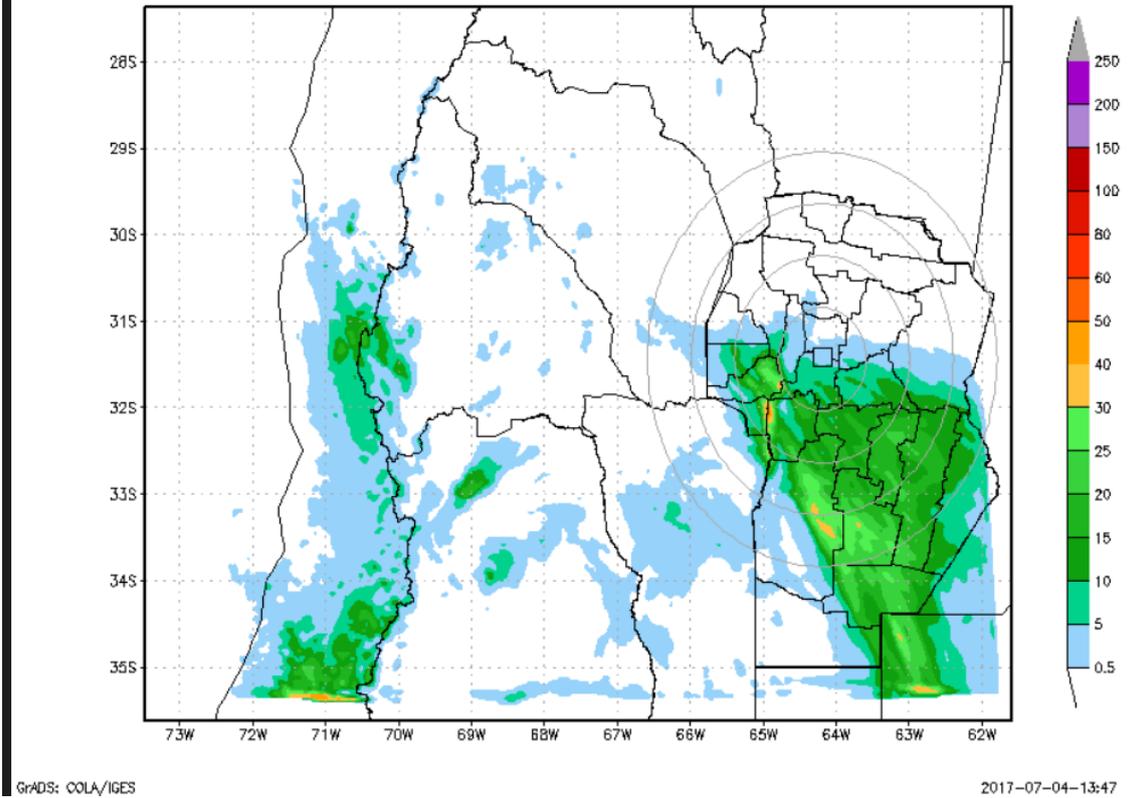


Figura 7.- Imagen Pronóstico WRF.

**SISTEMA QUE UTILIZA UN PROCESO DE EXTRACCIÓN, TRANSFORMACIÓN Y CARGA (ETL) DE DATOS METEOROLÓGICOS OBTENIDOS DE LA RED DE ESTACIONES EXISTENTES.**

Web Scraping es un programa que inspecciona las páginas del World Wide Web (WWW) de forma metódica y automatizada. La búsqueda de palabras claves o macheo de información, le permite al algoritmo de extracción buscar las variables de las estaciones meteorológicas que están publicando información en tiempo real, utilizando código de programación (PHP) para leer los datos de esos sitios web

A través de la técnica web-scraping, programado en lenguaje (PHP), junto a un proceso de transformación y carga (ETL), se extrae de forma continua datos de las estaciones meteorológicas de las redes “BCCBA”, “MAGYA” e “INTA”. La visualización geo-referenciada de datos se realiza mediante un cliente web (SIG) de Google Maps que permite la consulta en línea por Internet, como se ve en el ejemplo de la figura 7.

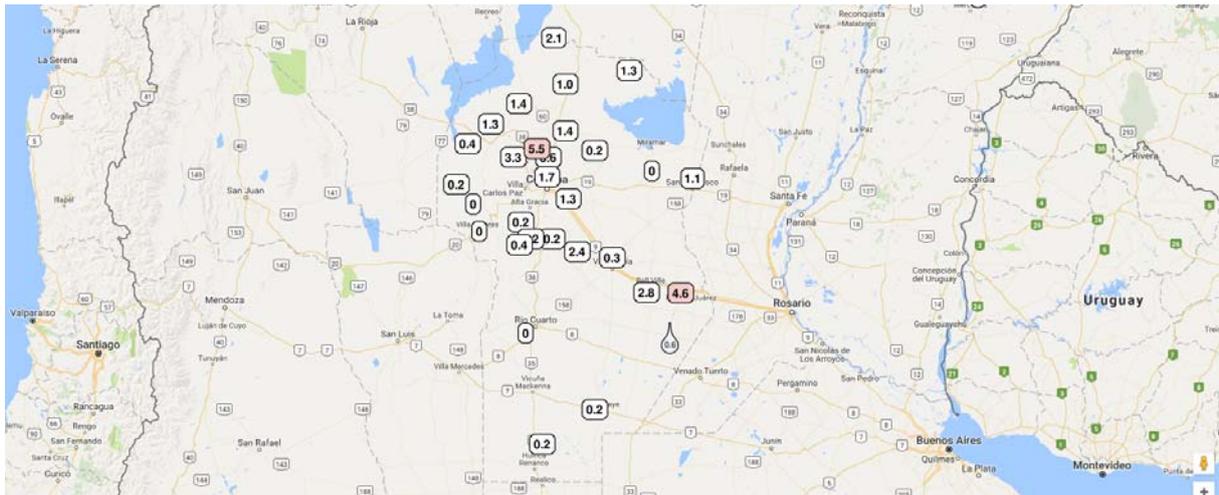


Figura 8.- Imagen precipitación acumulada (día 18/04/2017 de 0hs a 11hs)..

**SISTEMA DE ALERTA VISUAL GEO-REFERENCIADO DE PRONÓSTICO DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS.**

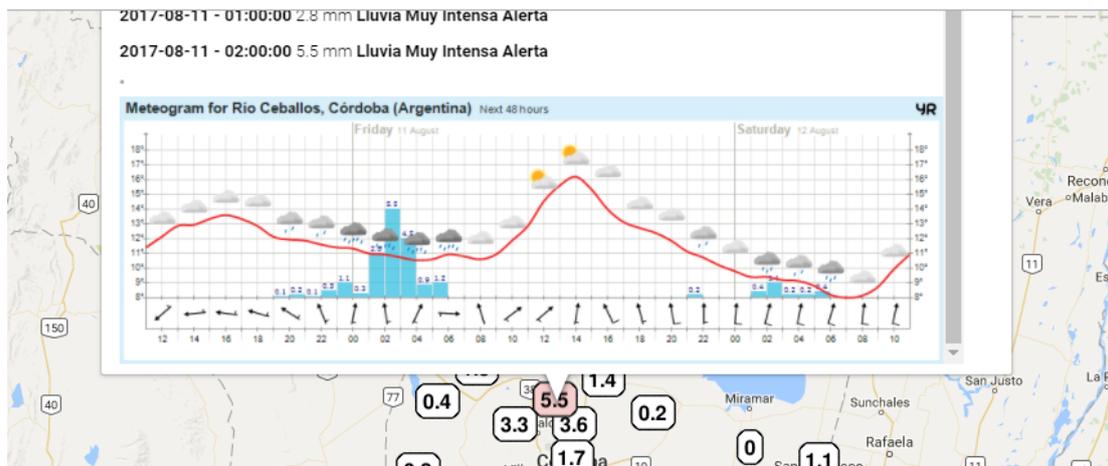
Este sistema permite, a través de cualquier dispositivo incluyendo celulares, consultar para horizontes de 24hs o 48hs, resultados de los modelos de pronóstico de precipitaciones YR (Været for Norge og verden fra NRK og Meteorologisk institutt), Open Weather (VANE owm.io/about) y MeteoRed (Alpred, S.L), incluyendo un reporte de precipitaciones máximas.

El sistema desarrollado en PHP utiliza la librería API Google Maps para integrar los datos en un mapa Ver Figura 8.



**Figura 9.- - Imagen pronóstico YR precipitación.**

Además se integra un meteograma en cada punto de interés. En la figura 9 se ve un ejemplo de pronóstico con el modelo YR.

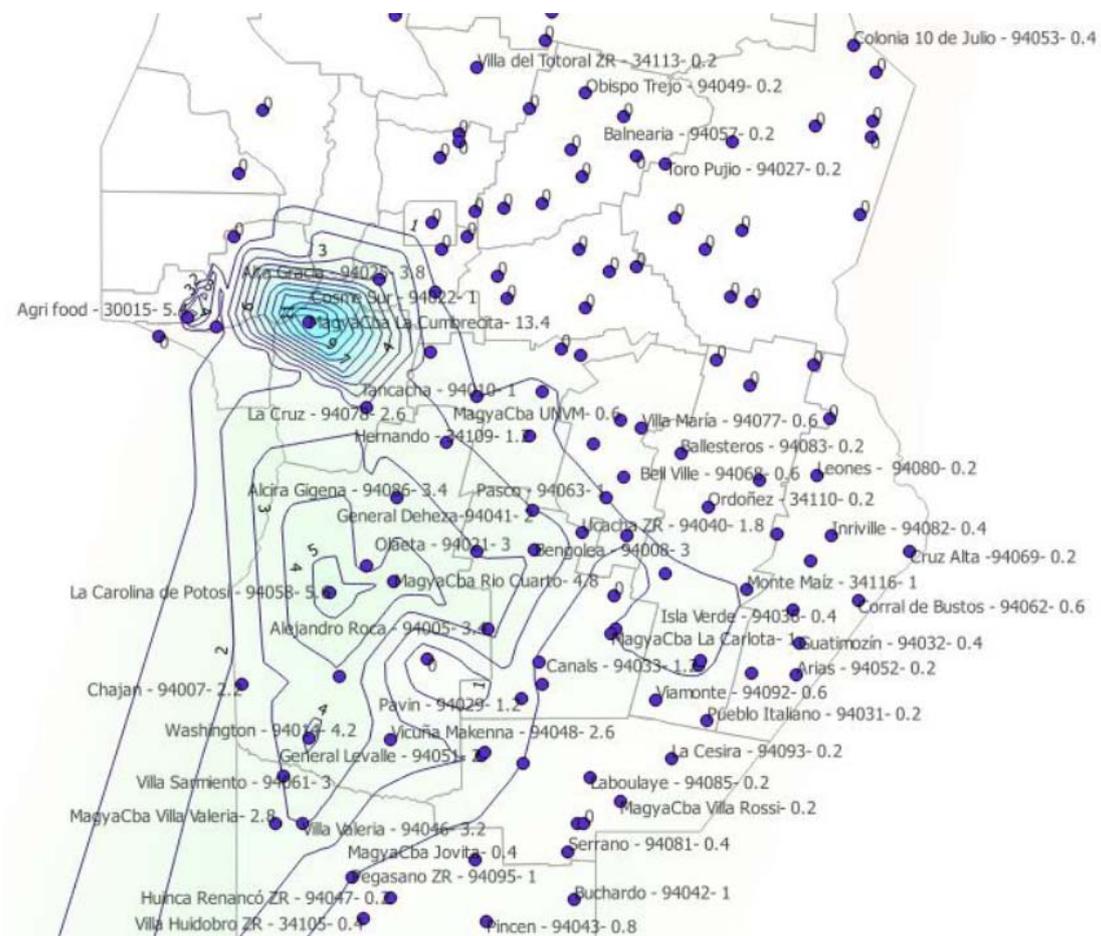


**Figura 10.- - Imagen pronóstico YR precipitación, con meteograma.**

**SISTEMA (SIG) PARA GENERACIÓN DE MAPAS DE ISOHETAS.**

En base a los datos que se extraen de las redes “BCCBA”, “MAGYA” e “INTA”, se desarrolla un sistema SIG de distribución espacial de precipitación pluvial acumulada del día anterior y otro mapa diario de precipitación acumula entre las 0:00 AM y las 11:00 AM.

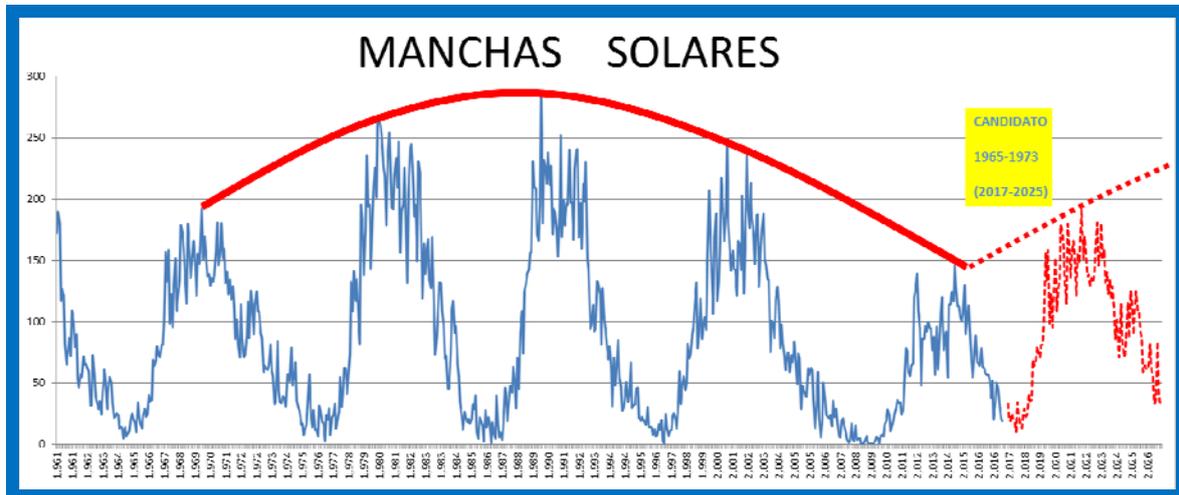
El reporte diario como se visualiza en la figura 10, se elabora con software de licencia GNU utilizando el aplicativo QGIS. Anteriormente llamado también Quantum GIS, es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código libre multiplataforma. Permite manejar formatos ráster y vectoriales, así como bases de datos.



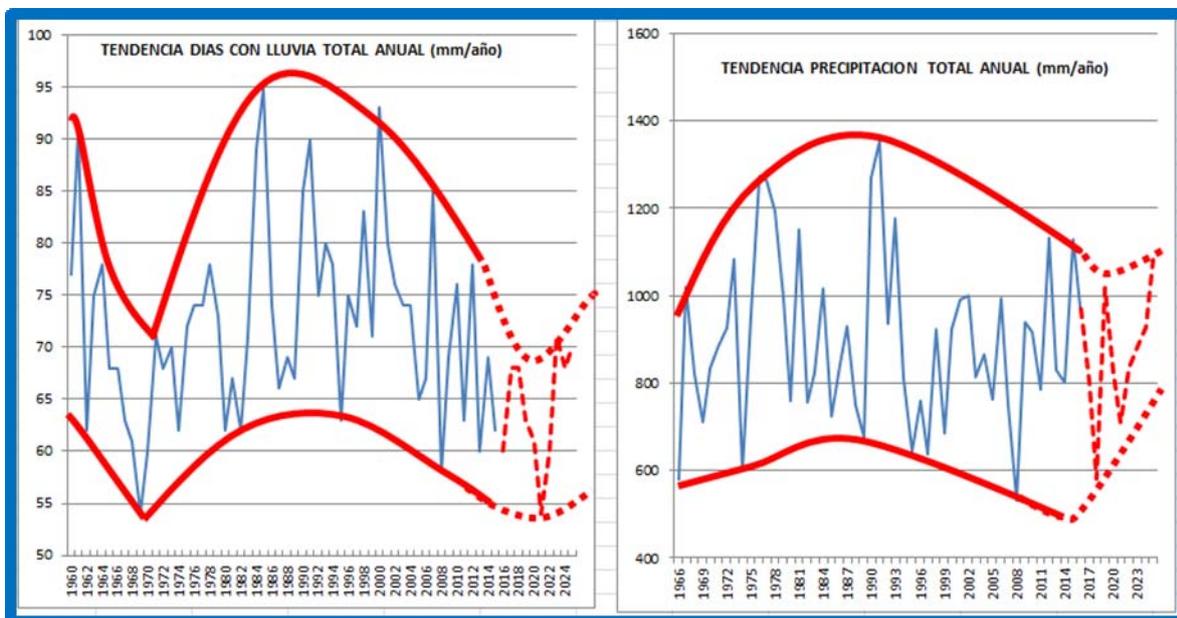
**Figura 11.-** Mapa isohieta de precipitaciones acumuladas (día 21/04/2017 de 0hs a 11hs).

**SISTEMA DE ANÁLISIS DE TENDENCIAS CLIMÁTICAS TRIMESTRALES.**

Se ha desarrollado una técnica especial que permite, a partir del análisis de correlación del patrón de comportamiento de manchas solares, con el patrón de comportamiento del fenómeno niño, medida con el indicador ONI, identificar los años candidatos para pronosticar la tendencia de la precipitación a escala trimestral, semestral y anual.



**Figura 12:** Serie de manchas solares, patrón cíclico de comportamiento solar y candidato para la tendencia de actividad solar para el período 2017 al 2025, (actividad solar período 1965-1973 - hipótesis del ciclo 20).



**Figura 13:** Serie de precipitación total anual de Marcos Juárez, prov. de Córdoba (registro de 1966 a 2016). Se muestra el patrón de comportamiento cíclico plurianual y los resultados del modelo de tendencia a partir del análisis del patrón de comportamiento de manchas solares.

**CONCLUSIONES**

La integración de información disponible vía WEB sumado al uso de técnicas propias de observación continua, pronóstico y análisis de tendencia es un método robusto que permite

hoy a la provincia de Córdoba contar con un servicio continuo de Vigilancia, Alerta temprana y Pronóstico de Precipitaciones, viento y temperaturas muy útil para la toma de decisiones para el manejo de los recursos hídricos.

*Agradecimiento.* Agradecemos al Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos, Secretaría de Recursos Hídricos de Córdoba, Gobierno de la Provincia de Córdoba, además a las instituciones nacionales SMN, INTA y a la Bolsa de Cereales de Córdoba y al Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba por su colaboración.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**IV Congreso Internacional sobre “Gestión y Tratamiento Integral del Agua. (2012) –** Expositor: “El agua: un desafío para la humanidad” del trabajo “Optimización Nacional del Uso del Agua” y participación del Seminario Taller “Propuestas sobre estrategias para implementar una nueva cultura del Agua” 14 al 16 de noviembre de 2012, Campus Universidad Blas Pascal, Córdoba, Argentina.

**Lépez, Héctor. (2017). Maestría en Informática**  
**“TÉCNICA DE EXTRACCIÓN, TRANSFORMACIÓN Y CARGA DE DATOS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS”**

## APLICACIONES HIDROLÓGICAS DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN AJUSTADO EN LA ZONA SERRANA DEL ARROYO DEL AZUL

Ing. Luisa Fajardo <sup>(1,2,3)</sup>, Dra. Ilda Entraigas <sup>(1,2,4)</sup> y Dr. Carlos Scioli <sup>(5)</sup>

(1) Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff"; (2) Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires; (3) Facultad de Ingeniería (UNCPBA); (4) Facultad de Agronomía (UNCPBA); (5) Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (UNL)

Av. República de Italia 780, Azul, Provincia de Buenos Aires. Tel: +54 02281 432-666

E-mail: luisafajardog.28@gmail.com - Web: <http://www.ihlla.org.ar/>

### RESUMEN

Los modelos digitales de elevación (MDE) representan la topografía y son usados como un factor de control en el análisis del sistema natural. La cuenca del arroyo del Azul, ubicada en el centro de la provincia de Buenos Aires, posee una topografía definida que se suaviza en dirección sur-norte. Se definieron la red de drenaje y las áreas de aporte mediante el software WMS 8.3 a partir de un modelo de elevación ajustado. Los sitios de cierre fueron puntos de medición de caudal sobre los arroyos del Azul, Videla y Santa Catalina. Los productos obtenidos se evaluaron mediante el análisis temporal de imágenes satelitales en épocas de exceso hídrico. Se obtuvieron sitios donde no se lograron representaciones adecuadas de ciertos elementos del paisaje, por lo que dichas zonas fueron corregidas mediante la modificación de sus cotas, logrando representar su condición de barrera al escurrimiento superficial. Por último se evaluaron de manera comparativa los productos obtenidos a partir del modelo ajustado, el SRTM y el obtenido de las curvas de nivel del Instituto Geográfico Nacional. Los módulos hidrológicos son herramientas útiles al momento de evaluar la calidad de un MDE.

**Palabras claves:** modelos digitales de elevación, SRTM. Cuenca hidrográfica, Argentina.

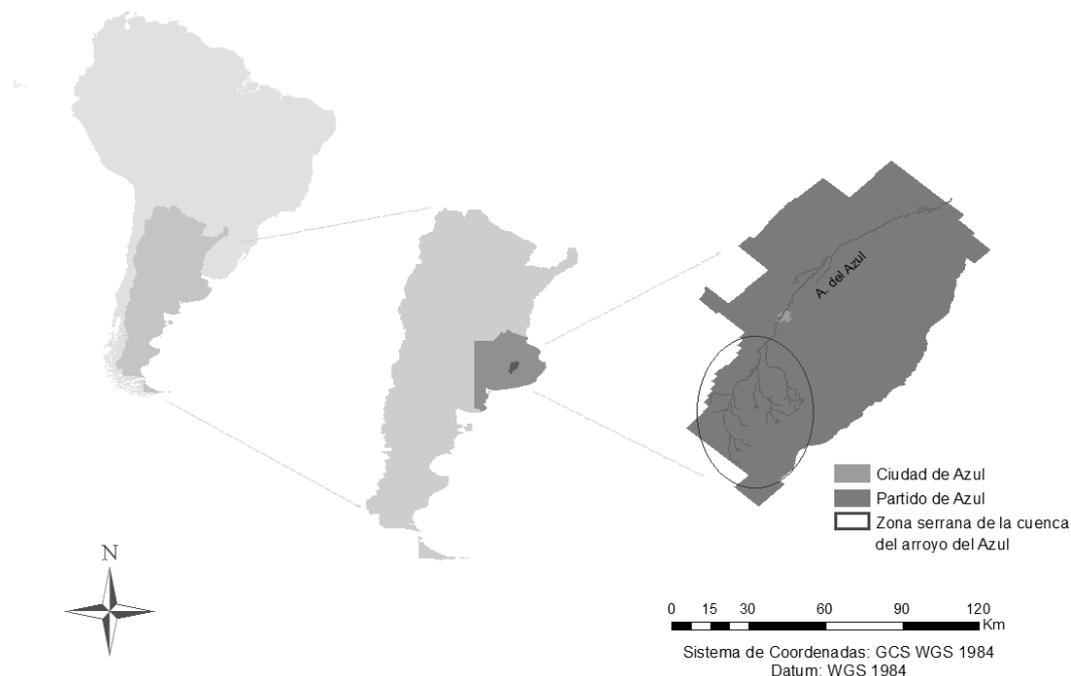
### ABSTRACT

Digital elevation models (DEM) represent topography and they work as a control factor in the analysis of the natural system. The Azul creek basin has a defined topography that softens in a south-north direction. The definition of drainage network and basin boundary was performed in the WMS 8.3 software from a fitted elevation model. Starting point were points of flow on the streams of the Azul, Videla and Santa Catalina. The obtained products were evaluated by the temporal analysis of satellite images during periods of water excess. Sites were identified where the artificial elements of the landscape were not well represented. The zones were corrected by modification of their height, to achieve represent their condition as a barrier to surface runoff. Finally, the drainage network and the boundaries basin that were obtained from the adjusted model, the SRTM and the obtained from level contour lines of the National Geographic Institute were evaluated in a comparative way. Hydrological models are useful tools to evaluate the representative quality of a DEM.

**Key words:** digital elevation models, SRTM, watershed, Argentina.

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo se llevó a cabo en la zona serrana de la cuenca del arroyo del Azul, donde el relieve permite definir claramente las divisorias de aguas superficiales, a diferencia del sector más llano en el que la red de drenaje no está integrada y es menos densa. Esta cuenca se ubica en la zona central de la provincia de Buenos Aires, entre los 59° 53' y 60° 05' de longitud oeste y 36° 50' y 37° 20' de latitud sur (Figura 1), en los ámbitos del sistema de Tandilia y la cuenca tectónica del Salado, y es uno de los ambientes hidrológicos de Argentina más monitoreados y analizados desde distintas perspectivas disciplinarias. Esta zona se desarrolla por encima de los 200 msnm, alcanzando su mayor altura en el sector oriental, específicamente en los cerros La Crespa (379 msnm) y La Armonía (359 msnm). Estos cerros representan las formas relativamente más pronunciadas del área, con pendientes que pueden ser superiores al 5 %, que si bien son valores bajos, resultan destacables en relación con las pendientes circundantes (Sala et al., 1987). Así también hay otro grupo de superficies cumbrales más bajas, con cotas de alrededor de 250-300 msnm (Zárate y Mehl, 2010). Todas estas sierras están constituidas por afloramientos conformados por rocas metamórficas precámbricas de aproximadamente 2.000 millones de años (Dalla Salda et al., 2005).



**Figura 1.-** Ubicación relativa del área de estudio.

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) permiten el acceso a la descripción de la morfología y topografía de un área de interés, a partir de la cual es factible obtener una fuente de información que puede ser ingresada en la modelación de procesos ambientales. El SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) es un MDE producto de la aplicación de la tecnología de Interferometría Radar de Apertura Sintética a partir de un sensor instalado en el transbordador espacial Endeavor. Cubre el 80 % de la superficie terrestre, con una referencia espacial horizontal sobre el elipsoide WGS-84 y vertical sobre el modelo geoidal EGM06.

Los Sistemas de Información Geográfica, por su parte, admiten la integración de los MDE con otras capas de información y así se desarrollan aplicaciones en diferentes disciplinas. Por ejemplo, los MDE son utilizados en cuestiones referidas al ordenamiento territorial, la identificación de zonas de aptitud para diversos fines, la delimitación de regiones geomorfológicas, la cartografía de suelos, los estudios de impacto ambiental, etc.

En Argentina, hay numerosos trabajos en los cuales se ha utilizado la información proveniente de los MDE. Por ejemplo, Tchilinguirian et al. (2003) realizaron la cartografía de la laguna La Picasa (Santa Fe) a partir de la creación de un MDE producto de imágenes ASTER que fueron contrastadas con series temporales de imágenes Landsat 7 en las que se identificaron las áreas deprimidas. Por otro lado, Nabel y Becerra (2007) definieron unidades geomorfológicas en el área de la Ciudad de Buenos Aires a partir de la elaboración de un MDE construido a partir de curvas de nivel, y de la descripción de la topografía en cuanto a los parámetros de elevación, pendiente, orientación y curvatura. También en el área de la Biología los MDE son útiles al momento de determinar áreas potenciales de distribución de numerosas especies Jayat y Pacheco (2006).

En otros países de Latinoamérica, por ejemplo en Colombia, Martínez et al. (2015) utilizaron diferentes variables extraídas del análisis del MDE SRTM en la evaluación del potencial hidroeléctrico de una cuenca hidrográfica, a partir de la determinación de la red de drenaje y la delimitación de la cuenca correspondiente.

Específicamente en el campo de la Hidrología, a partir de la definición de las líneas de flujo y área tributaria, se pueden delimitar automáticamente cuencas hidrográficas, simular caudales máximos o efectuar análisis temporales de los mismos. Además son útiles en el proceso de modelación de la escorrentía y los riesgos de erosión, así como también en el manejo integrado de cuencas. Tal como lo plantean Pusineri et al. (2011), la modelación hidrológica es el uso más frecuente que tienen los MDE, ya que son la estructura base para los procedimientos del cálculo de parámetros en los modelos hidrológicos, con información concerniente a la red de drenaje superficial y la forma de la cuenca. En el caso particular de la cuenca del arroyo del Azul, la zona serrana presenta una clara divisoria de aguas y una pendiente definida que va disminuyendo en dirección sur-norte.

## **OBJETIVOS**

- Definir la red de drenaje y la delimitación de cuenca para el área serrana del arroyo del Azul y las subcuencas del Videla y Santa Catalina, a partir de un MDE ajustado.
- Evaluar de manera comparativa la conformación de la red de drenaje y la delimitación de áreas de aporte producto del MDE ajustado, el SRTM y el obtenido de las curvas de nivel del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Para la definición de la red de drenaje y el área de aporte de la zona serrana del arroyo del Azul y las subcuencas del Videla y Santa Catalina, se utilizó el software Watershed Modeling System (WMS, 2009), empleando como base topográfica el MDE ajustado obtenido a partir del SRTM mediante la eliminación de la vegetación (aplicación de una máscara elaborada por

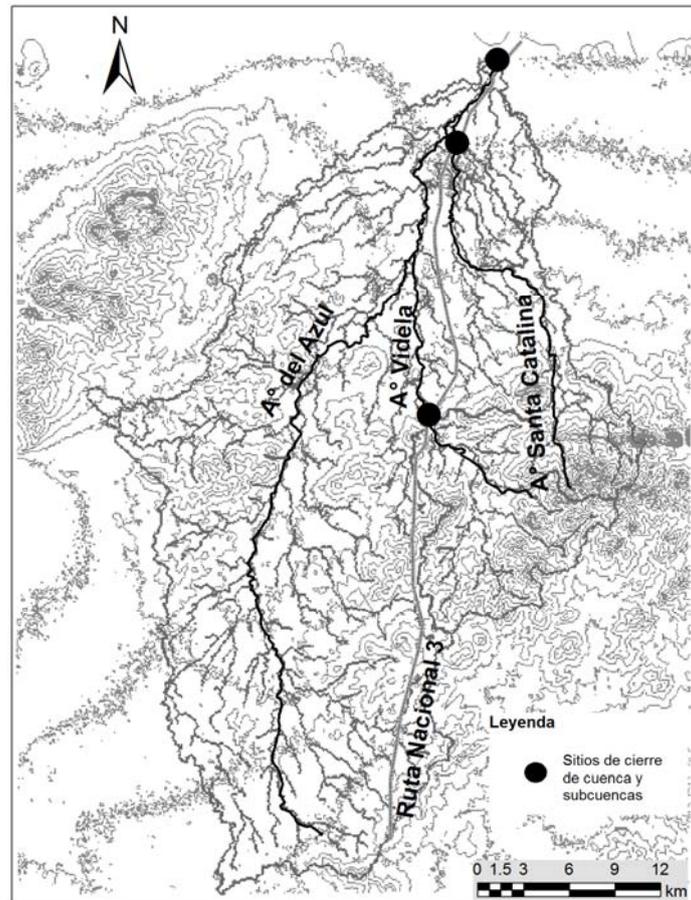
digitalización en pantalla de una imagen Spot 5 del año 2014), y la adición de registros de cotas medidos a campo con equipos GPS (de potreros agrícolas, pastizales naturales, zonas bajas y batimetrías) (Fajardo, 2017). En primer lugar, se consideraron como puntos de cierre a las estaciones de aforo pertenecientes a la Red Hidrométrica del Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA). Se llevó a cabo un suavizado de la superficie (relativo a las operaciones involucradas en el llenado de aquellas depresiones muy puntuales que introducen “ruido” en los cálculos) mediante la aplicación de la rutina fill; a su vez se ejecutó el asistente hidrológico de modelación Hydrologic Modeling Wizard a fin de calcular mediante parametrización topográfica las direcciones y acumulaciones de flujo superficial y, a partir de estos productos intermedios, se generó la capa de la red de drenaje y la delimitación de la cuenca y subcuencas.

Estos productos obtenidos fueron evaluados mediante el análisis de secuencias temporales de imágenes satelitales correspondientes a épocas de excesos hídricos. Así, fueron reconocidos sectores en los que el patrón de drenaje surgido del MDE ajustado no se correspondía satisfactoriamente con la dinámica hídrica superficial observada en las mencionadas imágenes. Así, sobre el MDE ajustado, se realizaron modificaciones específicas sobre el valor de las cotas de las celdas que no respetaban la dinámica hídrica observada en las imágenes. El producto obtenido se denominó MDE operacional.

Con el objetivo de acceder a una instancia de evaluación, se procedió a realizar el análisis comparativo de la conformación de la red de drenaje y la delimitación de áreas de aporte obtenidas a partir del MDE operacional, el SRTM y aquel generado a partir de la interpolación de las curvas de nivel contenidas en las cartas IGN.

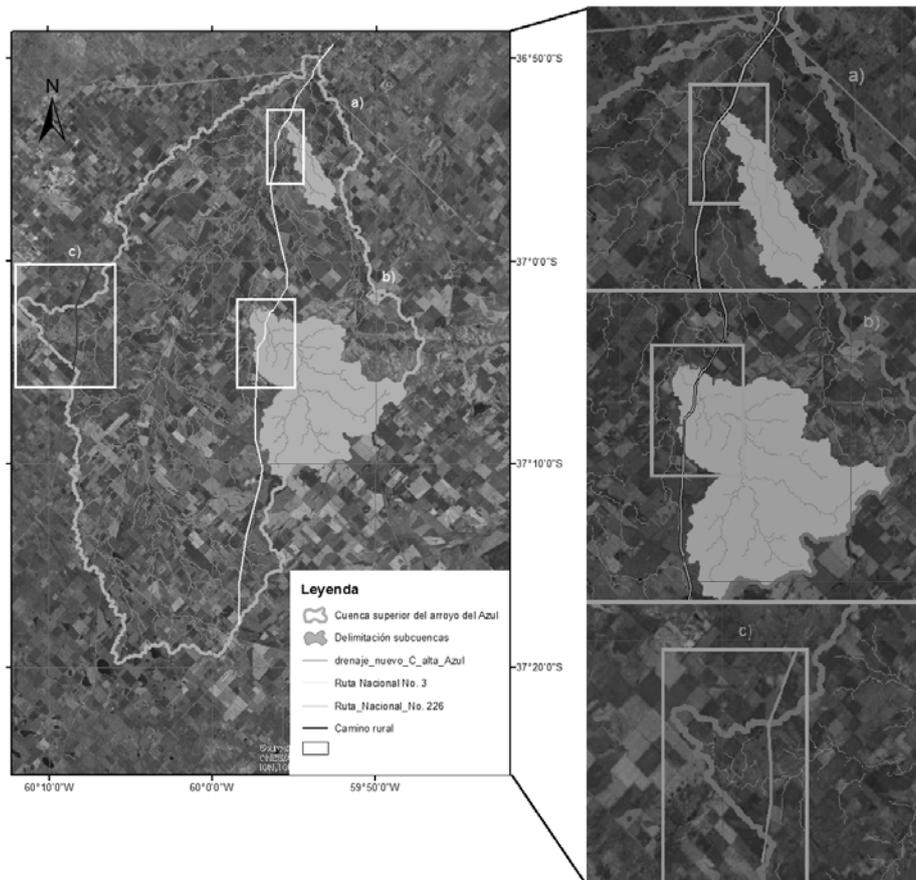
## **EVALUACIÓN DE RESULTADOS**

Con el MDE ajustado se generó la red de drenaje y se delimitó la cuenca alta del arroyo del Azul considerando como punto de cierre la estación de aforo Seminario perteneciente a la Red Hidrométrica del Instituto de Hidrología de Llanuras. Por otro lado, para las subcuencas de los arroyos Santa Catalina y Videla se utilizaron las secciones de control ubicadas en los puntos de cruce de agua con la Ruta Nacional 3 (Figura 2).



**Figura 2.** -Delimitación de cuenca, subcuencas y red de drenaje a partir del MDE ajustado con el software WMS.

A partir del análisis de series temporales de imágenes satelitales correspondientes a periodos de excesos hídricos se identificaron tres sitios incongruentes, pertenecientes a elementos artificiales del paisaje que el modelo no representó correctamente (Figura 3). Todos estos inconvenientes tienen en común, además, que se presentan en áreas donde el relieve comienza a ser más suave y la red de drenaje se vuelve un tanto desordenada. Dichas zonas fueron examinadas particularmente mediante la elaboración de perfiles longitudinales.

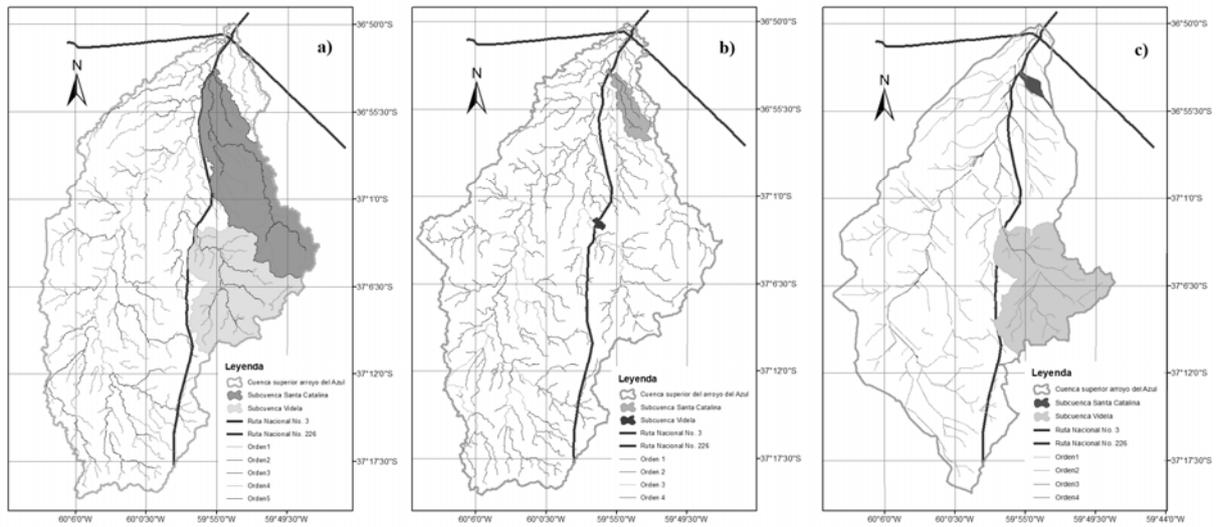


**Figura 3.** –Identificación de sectores incongruentes en las delimitaciones de cuencas obtenidas a partir del MDE ajustado.

Para lograr una delimitación de cuenca y subcuencas ajustada a los diferentes elementos del paisaje, se llevaron a cabo modificaciones específicas consistentes en el aumento de las cotas de las celdas de ciertos sectores estratégicos de rutas y caminos rurales que no cumplían con su condición de barrera al flujo superficial de agua que se reconoció en las imágenes. Los valores de dichas celdas fueron incrementados de manera progresiva hasta lograr que los mismos funcionaran como umbrales para la dirección de flujo de agua superficial.

Por último, y con el objetivo de acceder a una instancia de evaluación comparativa, se procedió nuevamente a operar con el software WMS 8.3. Así, se obtuvo la red de drenaje y la delimitación de cuenca y subcuencas a partir del MDE operacional, el SRTM y el MDE producido a partir de la interpolación de las curvas de nivel contenidas en las cartas IGN (Figura 4). En la Tabla 1 se detallan el Error Medio Cuadrático estimado para cada superficie, las áreas obtenidas (cuenca y subcuencas) y la cantidad de segmentos pertenecientes a los distintos órdenes de cursos de agua y su longitud correspondiente.

Esta comparación permite mostrar que la delimitación de las áreas de aporte y la red de drenaje mejora en áreas con pendientes bajas cuando se realizan correcciones morfológicas sobre los modelos digitales de elevación global. También pone en evidencia los errores groseros que se originan cuando se utilizan estos modelos sin ninguna corrección en cuencas de zonas de llanura.



**Figura 4.** –Delimitación de cuenca, subcuencas y red de drenaje con el software WMS 8.3, a) MDE operacional, b) SRTM, c) Producido por interpolación de curvas de nivel contenidas en las cartas IGN.

**Tabla 1.** –Comparación de delimitaciones y red de drenaje a partir de las diferentes superficies.

Delimitación		MDE operacional	SRTM	MDE curvas de nivel (IGN)
Error Medio Cuadrático (EMC)		1,58 m	2,98 m	2,30 m
<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>				
Cuenca del Azul		1047,1	1031,7	906,3
Subcuenca Santa Catalina		139,0	16,4	3,9
Subcuenca Videla		118,9	1,1	125,2
<b>Cursos de la red de drenaje discriminados por órdenes</b>				
1 <sup>er</sup> Orden	Segmentos (Nº)	252	261	182
	Longitud (km)	497,7	517,6	345,7
2 <sup>do</sup> Orden	Segmentos (Nº)	113	116	76
	Longitud (km)	207,3	182,7	155,5
3 <sup>er</sup> Orden	Segmentos (Nº)	61	60	36
	Longitud (km)	117,1	126,7	57,8
4 <sup>to</sup> Orden	Segmentos (Nº)	33	50	27
	Longitud (km)	52,7	78,0	37,0
5 <sup>o</sup> Orden	Segmentos (Nº)	11	-	-
	Longitud (km)	20,6	-	-

## CONCLUSIONES

La comparación entre la red de drenaje y la delimitación de cuenca y subcuencas mediante el análisis temporal de imágenes satelitales de periodos de extremos hídricos, sirvió para la identificación de aquellos sectores en los cuales el modelo no representaba adecuadamente el relieve. Esto sucedió, específicamente, con fragmentos de elementos antrópicos del paisaje que no cumplían su condición de barrera al flujo superficial del agua.

En áreas en las cuales el relieve posee pendientes extremadamente suaves, los MDE no siempre reflejan adecuadamente los cambios en el terreno, por lo que es útil evaluar su calidad de representación tanto mediante la consideración de secuencias temporales de imágenes satelitales, como su inclusión en modelos hidrológicos.

Tanto las áreas de aporte como las redes de drenaje definidas a partir de la aplicación de rutinas hidrológicas, mostraron diferencias según la superficie base utilizada. El MDE operacional permitió identificar con mayor precisión las redes de drenaje reales y las divisorias de agua sobre la cuenca y las subcuencas.

Estos modelos de elevación son, justamente, modelos que a pesar de las numerosas correcciones, nunca representarán de manera fiel la superficie del terreno. Lo importante será, entonces, analizar qué tipo de correcciones sobre determinados elementos del paisaje son las apropiadas, para acercar lo más posible el modelo a los requerimientos del tipo de aplicación que se pretende.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Dalla Salda, L. de Barrio, R.E. Echeveste, H. J. Fernández, R. R.** (2005). “El basamiento de las sierras de Tandilia”. En: R.E. de Barrio, R.O. Etcheverry, M. F. Caballé y E. Llambías (Eds), Geología y recursos minerales de la provincia de Buenos Aires. Relatorio XVI Congreso Geológico Argentino, Cap. III: 31-50.

**Fajardo, L.** (2017). “Planteamiento y aplicación de técnicas de corrección del modelo digital de elevación SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) en la zona serrana de la cuenca del arroyo del Azul”. Tesis de maestría. Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.

**Jayat, P. Pacheco, S.** (2006). “Distribución de *necromys lactens* y *phyllotis osilae* (rodentia: cricetidae: sigmodontinae) en el noroeste argentino: modelos predictivos basados en el concepto de nicho ecológico”. Sociedad Argentina para el Estudio de los Mamíferos, Mastozoología Neotropical, Mendoza. Pág. 69-88.

**Martínez, C. García, P. Obregón, N.** (2015). “Análisis de la exactitud del Modelo de Terreno Digital para Colombia”. Revista de investigaciones. Universidad del Quindío. Colombia, 27(1). Pág. 30-38.

**Nabel, P. Becerra, R.** (2007). “Uso de técnicas geomáticas para el mapeo y caracterización de unidades geomórficas de la Ciudad de Buenos Aires, Argentina mediante interpretación visual de parámetros morfométricos”. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Tomo 60.

Núm. 2. Pág. 173-185.

**Pusineri, G. Pedraza, R. Lozeco, C.** (2011). “Usos de Modelos Digitales de Elevación y de Sistemas de Información Geográfica en la modelación Hidrológica”. Geográfica Digital. Instituto de Geografía. Facultad de Humanidades. Universidad Nacional del Nordeste.

**Tchilinguirian, P. Azcurra, D. Kaku, M. Candaosa, G.** (2003). “Aplicación imágenes satélites ASTER en Zonas inundadas, Laguna Picasa, Provincia de Santa Fe”. Primer Congreso de la Ciencia Cartográfica y VIII Semana Nacional de Cartografía, Buenos Aires. Pág. 25-27.

**WMS.** (2009). “*WMS 8.2 Tutorial*”. *Watershed Modeling System*. Aguaveo, LLC. <http://www.aquaveo.com/wms.html>.

**Zárate, M. Mehl, A.** (2010). “Geología y geomorfología de la cuenca del arroyo del Azul, provincia de Buenos Aires, Argentina”. En: M. Varni, I. Entraigas y L. Vives (Eds.) *Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanura*. Editorial Martín. Mar del Plata. Vol. I. 65-78.

## ESTIMACIÓN DE PRECIPITACIÓN A PARTIR DE DATOS DEL RADAR METEOROLÓGICO RMA1-CÓRDOBA, ARGENTINA

Celina Grisel Furbatto<sup>(1)</sup>, Raúl Comes<sup>(2)</sup>, Ricardo Ingaramo<sup>(1)</sup>, Gastón Petrolí<sup>(1)</sup>, Jorge Saffe<sup>(1)</sup>,  
Ignacio Montamat<sup>(1)</sup>, Agustín Martina<sup>(1)</sup>, Sergio Menajovsky<sup>(1)</sup>, Juan Carlos Bertoní<sup>(1)</sup>, Andrés  
Rodríguez<sup>(1)</sup>, Giorgio Caranti<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Departamento de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Bv. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba X5000HUA, Argentina. <sup>(2)</sup>Facultad de Matemática, Astronomía y Física - Universidad Nacional de Córdoba, Medina Allende s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba X5000HUA, Argentina.  
E-mail: celifurbis@gmail.com, jcbertoní@gmail.com, comes@famaf.unc.edu.ar

### Introducción

La distribución espacial y temporal de las precipitaciones es una necesidad para la comunidad en general. Los registros de precipitaciones mediante datos puntuales de pluviómetros y pluviógrafos, en redes de escasa densidad e irregular distribución, no reflejan adecuadamente la variabilidad espacial característica de la lluvia. Éstos miden la lluvia a nivel de suelo con precisión (Calheiros y Zawadski, 1986) y en forma puntual pues el dato es tomado en forma directa (Arkin y Meisner, 1986), pero no permiten obtener un campo continuo de medidas que cubran todo un territorio (German et al, 2006). Los radares meteorológicos ofrecen la capacidad de aportar información espacial detallada con la posibilidad de integrarla temporalmente. Cubren grandes áreas sus datos son de rápido acceso para aplicaciones hidrológicas en tiempo real. Las ventajas de obtener datos de precipitación con radar son múltiples (Collier, 1986).

### Objetivos

El objetivo de este trabajo será evaluar el desempeño del primer radar meteorológico RMA1; de origen nacional y que está equipado con tecnología Doppler, Banda C de doble polarización simultánea, con un alcance de 480 km en modo vigilancia, 240 Km en Doppler y 120 Km en alta resolución; ubicado en la Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba Capital, provincia de Córdoba, Argentina, como estimador de la precipitación, y a partir de la integración con pluviómetros instalados se validarán datos de radar para su posterior uso en los modelos hidrológicos distribuidos. Se compararán los datos estimados, de radar, con los observados por pluviómetros a través de regresiones lineales simples, considerando los valores de los pluviómetros como variable regresora y los correspondientes a radar como variable dependiente. Los estadísticos para el análisis utilizado fueron el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y los parámetros de la regresión.

### Materiales y Métodos

Para este trabajo se utilizaron datos de precipitación estimados por el radar meteorológico ubicado en la Universidad Nacional de Córdoba y datos de lectura de lluvia acumulada de pluviómetros pertenecientes a la red pluviométrica de diferentes instituciones, administradas y operadas por distintos organismos, provinciales y nacionales, públicos y privados de la Provincia de Córdoba. El radar de doble polarización tiene un radio de alcance de 240 km desde la antena. Se utilizaron las estimaciones de precipitación diaria

acumulada en milímetros, las que corresponden a la integral de varias imágenes generadas automáticamente (1 cada 12 minutos) de la ventana de estudio de la tormenta, con una resolución de 0.25 km<sup>2</sup>. Para el cálculo se busca la relación exponencial que ajuste para convertir la reflectividad ( $Z$ ) a intensidad de precipitación ( $R$ ) durante el período de evaluación. El período de evaluación comprendió desde 1:30 UTC a 4:20 UTC del 08 de Marzo de 2016. Dato que surgió de compilados entre las imágenes y acumulados diarios de pluviómetros, descartando aquellos que no tenían integración completa comparable entre ambas fuentes. Se buscaron los pluviómetros distribuidos bajo el área de cobertura del radar, incorporando las coordenadas geográficas de los pluviómetros al sistema, obteniendo los datos correspondientes al radar centrados en la misma ubicación y hora absoluta del rayo que pasa por el pluviómetro, como así también las ocho celdas aledañas a la central. Llegando a pares de datos (radar-pluviómetro) en todo el período analizado.

Al establecer una relación de dependencia entre las variables de Reflectividad ( $Z_i$ ) e Intensidad de Precipitación ( $R$ ) y si los cambios en una de las variables influyen en los cambios de otra teniendo en cuenta el desfase del tiempo, diremos que las variables están correlacionadas de la siguiente manera;  $\rho[Z_i(t), R(t+\tau)]$ .

### Resultados Preliminares

Los coeficientes de determinación obtenidos fueron diferentes para el desfase en el tiempo, consiguiendo el mejor ajuste para el grupo evaluado en un desfase de tiempo de 10 minutos y sobre una celda aledaña correspondiente al radar respecto de la ubicación del pluviómetro. Los datos mencionados se corresponden debido a la dirección del viento y tiempo, en que la gota llega a la superficie.

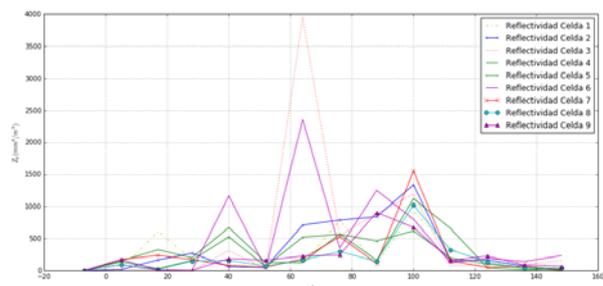


Figura 1.- Valores de reflectividades de RMA1 de 9 celdas asociadas a la estación meteorológica Ascochinga, para 160 minutos.

	Celda 1	Celda 2	Celda 3	Celda 4	Celda 5	Celda 6	Celda 7	Celda 8	Celda 9
Desfasaje [t minutos]	R <sup>2</sup>								
0	0.0614	0.1611	0.012	0.0305	0.2201	0.0194	0.0145	0.0255	1787
10	0.0458	0.0891	0.3536	0.0966	0.3936	<b>0.4178</b>	0.0002	0.0032	0.0007
20	0.000002	0.0008	0.0576	0.0044	0.0018	0.059	0.0046	0.0004	0.0265

**Tabla 1 .-** Ajustes obtenidos (R<sup>2</sup>) con desfasaje de tiempo y las nueve celdas.

De esta manera llegamos a una relación Z-R, donde los coeficientes a y b de ésta, son estimados a partir de regresión lineal entre reflectividad de radar y mediciones de intensidad de precipitación,  $Z = 1284,8 \cdot R^{1.0115}$ , donde el valor de 1284,8 para a y 1,0115 para b, para el periodo de estudio. Podemos continuar con el estudio de varios fenómenos y aún así de distintas estaciones meteorológicas para las mismas características del caso de estudio, con el fin de establecer líneas de trabajo tendientes a evaluar la reflectividad estimada y su relación con las diferentes distribuciones de tamaño de gotas, permitirá obtener relaciones Z-R adecuadas a las condiciones meteorológicas donde está instalado el radar RMA1.

## Conclusiones y Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos se concluye que los primeros análisis sobre estimación de lluvia acumulada mediante este radar presentan relación entre los ajustes en concordancia con las medidas en superficie relevadas en pluviómetros. Pese a la gran variabilidad de la intensidad de tormentas existentes, se pudo caracterizar la relación de reflectividad e intensidad para lluvia débil.

Las comparaciones serán objeto de evaluaciones futuras con mayor cantidad de datos en periodos más largos y contrastes de igual similitud. Una vez logrado permitirá disponer de una valiosa herramienta para elaboración de alertas y exactitud en la precipitación en el radio de alcance del mismo.

## Referencias Bibliográficas

- Bertoni, J.C., Caranti, G., Catalini, C., Cioccale, M., Comes, R., Furbatto, C., Ingaramo, R., Martina, A., Menajovsky, S., Poffo, D., Rodríguez, A., Saffe, J., Smrekar, M., Vicario, L., Villa Uría, A.** (2015) "Puesta en marcha del primer Radar Meteorológico Argentino RMA1 en la Universidad Nacional de Córdoba" *XXV Congreso Nacional del Agua - CONAGUA 2015*. ISBN 978-987-27407-4-0.
- Comes, R., Ingaramo, R., Poffo, D., Furbatto, C., Saffe, J., Vicario, L., Dasso, C., Rodríguez, A., Bertoni, J.C., Caranti, G., Catalini, C., Martina, A., Menajovsky, S., Montamat, I., Rico, A., Rodríguez González, S., Serra, J., Villa Uría, A.** (2016) "Empleo del Radar Meteorológico Argentino RMA1 para la detección de un evento severo" *XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Lima, Perú.
- Gunn, R., Kinzer, D.G.** (1949) "The Terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air" *Journal of Meteorology*, 6, pg. 243-248.
- Marshall, J.S., Palmer, W.M.** (1948) "Shorter Contributions" *Journal of Meteorology*, 5, pg. 165-166.
- Marshall, J.S., Langille, R.C., Palmer, W.M.** (1947) "Measurement of Rainfall by Radar" *Journal of Meteorology*, 4, pg. 186-192.
- Calheiros, R.V., Zawadzki, I.** (1986) "Reflectivity-Rain Rate Relationships for Radar Hydrology in Brazil" *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26, pg. 118-132.
- Germann, U., Galli, G., Boscacci, M., Bollinger, M.** (2006) "Radar precipitation measurement in a mountainous region" *Q J R Meteorology Soc*, 132, pg 1669-1692.
- Collier, C.** (1986) "Accuracy of rainfall estimates by radar, Part I: Calibration by telemetering raingauges" *Journal of Hydrology*, 83, pg 207-223.

# DETECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FLORACIONES ALGALES EN EL EMBALSE SAN ROQUE A PARTIR DE SENSORES REMOTOS

*German Alba<sup>1,2</sup>, Ferral Anabella<sup>2</sup>, Daniela Romero Arijon<sup>1</sup>, Inés Bernasconi<sup>1</sup>.*

*<sup>1</sup>Secretaría de Recursos Hídricos. Humberto Primo 607,  
Córdoba, Argentina.*

*<sup>2</sup>Instituto Mario Gulich, Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), Córdoba,  
Argentina.*

*albagerman@gmail.com*

## Resumen

Situado aproximadamente a 600 msnm en el Valle de Punilla en la alta cuenca del Río Suquía en la provincia de Córdoba, el Embalse San Roque es la principal fuente de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Córdoba. La eutrofización es un fenómeno que afecta a muchos cuerpos de agua en todo el mundo, que en casos severos puede llevar a grandes floraciones de algas. El Embalse de estudio no es ajeno a este proceso, por lo que se hace necesario el estudio de la calidad de agua en el mismo. La teledetección es una herramienta fundamental para complementar los monitoreos tradicionales y comprender los procesos que ocurren en los cuerpos de agua. En este trabajo se presenta la implementación del monitoreo de floraciones algales en el Embalse San Roque a través de sensores remotos. Se utilizan imágenes obtenidas con el sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) a bordo del satélite TERRA, específicamente el producto de reflectancia a tope de atmósfera denominado MOD09GQ e imágenes del sensor Operational Land Imager (OLI) a bordo del satélite Landsat 8. Se pudo observar desde satélites distintos eventos de floración ocurridos durante la temporada primavera – verano 2016-2017 (Octubre de 2016 hasta Abril de 2017) en el Embalse y fue posible cuantificar la intensidad de los mismos.

**Palabras Clave:** Embalse San Roque, Eutrofización, teledetección, LANDSAT 8 OLI, MODIS.

## Abstract

San Roque Reservoir is the main source of drinking water in the city of Córdoba, located approximately 600 meters above sea level in the Punilla Valley in the upper Suquía river basin in the province of Córdoba. Eutrophication is a phenomenon that affects many water bodies around the world, which in severe cases can lead to large algae blooms. Our dam of study is no stranger to this process. Consequently, it is necessary to study the water quality of the San Roque Reservoir. Remote sensing is a fundamental tool to complement traditional monitoring and understanding the processes that occur in water bodies. This work presents the implementation of monitoring algae blooms in the San Roque Reservoir through remote sensors. Images obtained with the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor on board the TERRA satellite are used, specifically the surface reflectance product called MOD09GQ and images of the Operational Land Imager (OLI) sensor aboard the Landsat 8 satellite. It was possible to observe from satellites, different flowering events during the spring - summer season 2016-2017 (October 2016 to April 2017) in the reservoir. In addition, thanks to the techniques of remote sensing used, it was possible to quantify the intensity of the events.

**Keywords:** San Roque Reservoir, Eutrophication, remote sensing, LANDSAT 8 OLI, MODIS.

## INTRODUCCIÓN

La eutrofización es el proceso por el cual la producción primaria aumenta, ya que se ve potenciada por un mayor aporte de materia orgánica y nutrientes a un ecosistema. Este enriquecimiento de las aguas con nutrientes, particularmente nitrógeno y fósforo, si se produce a un ritmo tal que no puede ser compensado por la mineralización total, la descomposición del exceso de materia orgánica produce una disminución del oxígeno disuelto, que puede producir efectos tales como la mortandad de peces. Las masas de agua eutrofizadas tienen un alto nivel de productividad y de biomasa en todos los niveles tróficos. Es así, que los procesos de eutrofización producen cambios cuantitativos y cualitativos en la comunidad del fitoplancton. En casos severos, este proceso puede llevar a grandes floraciones algales, es decir un rápido aumento de la población de algas en un sistema acuático (Wetzel, R. G., 2001).

Este fenómeno afecta a muchos cuerpos de agua en todo el mundo y el Embalse San Roque no es ajeno a éste. Situado aproximadamente a 600 msnm en el Valle de Punilla en la alta cuenca del Río Suquía en la provincia de Córdoba, el Embalse San Roque es la principal fuente de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Córdoba. Frente a esto el estudio de la calidad de agua del mismo es clave.

Las floraciones algales son generalmente monitoreadas con medición de biomasa, examinando las especies presentes. Una medida ampliamente usada es la concentración de clorofila-a. Valores pico de esta última para un lago oligotrófico son de alrededor de 1 a 10  $\mu\text{g l}^{-1}$ , mientras que en un lago eutrófico puede alcanzar 300  $\mu\text{g l}^{-1}$ . El agua del Embalse San Roque ha presentado valores medidos que en ocasiones pueden llegar a 1000  $\mu\text{g l}^{-1}$ .

Ha sido mostrado (Rantajarvi et al., 1998) que las frecuencias temporales y espaciales de los programas de muestreo de agua convencionales no son adecuados para reportar cambios en la biomasa del fitoplancton, especialmente durante condiciones de floración, donde la variabilidad espacial y temporal en la densidad del fitoplancton es particularmente alta.

La teledetección es una herramienta fundamental para complementar los monitoreos tradicionales y comprender los procesos que ocurren en los cuerpos de agua. Consiste en medir alguna propiedad de un objeto de interés desde la distancia, desde un sensor a bordo de un satélite, por ejemplo, lo que nos permite extrapolar una característica de un área particular relevada por mediciones locales a una escala más grande, en menor tiempo y costo (Kutser T., 2004).

Específicamente, el sensor MODIS ( Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo de los satélites Terra y Aqua de la NASA, puestos en órbita en el año 1999 y 2002, muestra mucho potencial para monitorear calidad de agua ya sea terrestre u oceánica. Estos dos satélites proveen información diaria y disponible de forma libre y abierta. MODIS está equipado con varias bandas de reflectancia de la superficie de la tierra de resolución media y además genera productos en distintas resoluciones espaciales. Estos últimos son productos de suelo, productos de índices de vegetación y productos de Albedo (<https://modis.gsfc.nasa.gov>).

Particularmente, para este trabajo se utilizó el producto MOD09GQ - MODIS Reflectancia de Superficie Diaria L2G Global de 250 metros de resolución espacial, que contiene dos bandas de información espectral que se centran entre los 645 nm y los 858 nm del espectro electromagnético.

La información provista por este sensor es de mucho interés, ya que provee datos diarios y gratuitos, que permiten realizar un monitoreo constante. Para el caso de las floraciones algales, este punto es muy importante, ya que son de explosión muy rápida y para detectar su aparición es esencial contar con una resolución temporal alta.

Por otro lado, para aprovechar las distintas resoluciones de los sensores que proveen imágenes libres, se trabajó además con el satélite Landsat 8 que transporta al sensor OLI (*Operational Land Imager*). El mismo consiste en nueve bandas espectrales que cubren el espectro desde los 0,433  $\mu\text{m}$  a los 1,390  $\mu\text{m}$ , con una resolución espacial de 30m x 30m. El satélite Landsat 8 fue lanzado el 11 de febrero de 2013 y es parte del proyecto Landsat operado por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos, que provee datos desde 1972.

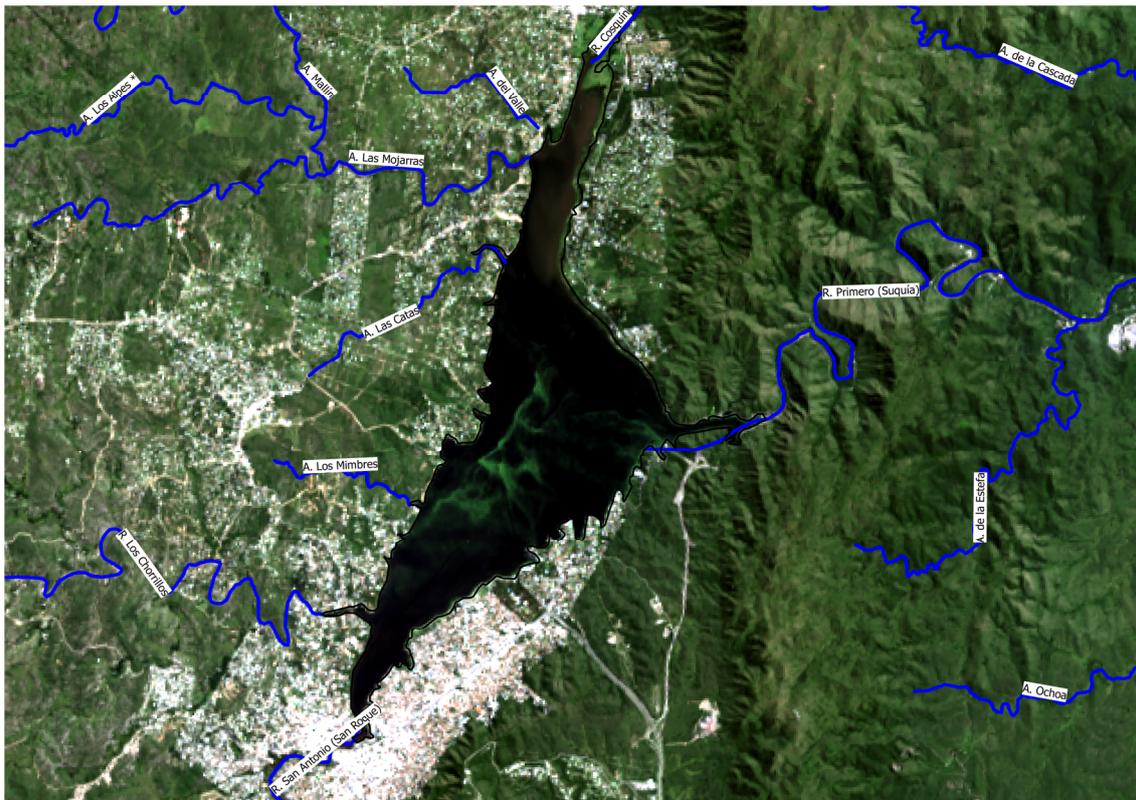
En este trabajo se presenta la implementación del monitoreo de floraciones algales en el Embalse San Roque a través de sensores remotos. El objetivo principal de este método implementado es controlar la calidad del agua del embalse con métodos complementarios al monitoreo tradicional y así caracterizar las floraciones algales y estado trófico del cuerpo de agua de estudio. Se muestran aquí los resultados pertenecientes a la temporada primavera – verano 2016 – 2017 (Octubre de 2016 hasta Abril de 2017).

## AREA DE ESTUDIO

El Embalse San Roque, con su baricentro superficial con coordenadas  $31^{\circ} 22' 56''$  S,  $64^{\circ} 27' 56''$  O, está situado aproximadamente a 600 msnm en el Valle de Punilla en la alta cuenca del Río Suquía (provincia de Córdoba). El clima de la región es templado con una temperatura media anual de  $14^{\circ}$  C y vientos predominantes del cuadrante sur y norte, con precipitaciones estivales en el rango de 400 a 1000 mm y una media anual aproximadamente de 720 mm (Rodríguez, et al. 2006).

El área de drenaje del Embalse comprende una superficie de  $1750 \text{ km}^2$ , recibiendo el aporte de cuatro tributarios: los ríos San Antonio, Cosquín y Los Chorrillos junto con el arroyo Las Mojarras sumados al pequeño aporte debido al perillago que conforman las fuentes de agua por escorrentía superficial. A su vez cuenta con un único emisario, el Río Suquía (Figura 1).

Un primer dique fue construido en el año 1888 el cual fue reemplazado por el actual paredón en 1944 para aumentar el volumen de almacenamiento.



**Figura1.-** Imagen Landsat 8 del día 22/2/2017. Combinación de bandas RGB: 4, 3 ,2 (Color Real). Se observan los cursos de agua de la región en azul.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para este trabajo, se utilizó un algoritmo de teledetección de cl-a desarrollado en German, A. et al (2017) elaborado a partir de datos del sensor MODIS y datos de campo recolectados y generados en el contexto del plan de monitoreo que realiza la Secretaría de Recursos Hídricos del Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la provincia de Córdoba.

El diseño del monitoreo *in situ* se elaboró considerando los términos de referencia del convenio firmado oportunamente con la Secretaría de Ambiente de la Nación (Bernasconi et al., 2009). Esta metodología es coherente con el modelo propuesto por la EPA (Environmental Protection Agency) para el monitoreo de lagos con sistemas de aireación artificial (EPA, 1990).

Para la elaboración del algoritmo, se utilizaron los valores de concentración de cl-a medidos en laboratorio, pertenecientes solo al punto de monitoreo denominado centro (con coordenadas -31.3753, -64.4693) ya que en Ferral (2013) se muestra que el mismo es estadísticamente representativo de todo el cuerpo de agua. Además, este punto es el único que en todas las cotas del Embalse durante el año, está cubierto por agua y no tiene influencia de la reflectancia de la superficie terrestre.

El Instrumento MODIS provee imágenes en 36 bandas espectrales de alta sensibilidad radiométrica (12 bit), en un rango de longitudes de onda que van desde los 0.4  $\mu\text{m}$  a los 14.4  $\mu\text{m}$ . Dos bandas son tomadas a una resolución espacial nominal de 250 m en el nadir, cinco bandas a 500 m y las remanentes 29 a 1km. El patrón de escaneo a  $\pm 55$  grados en la órbita EOS de 705 km, obtiene un barrido de 2330 km y provee una cobertura global cada uno o dos días. Se obtienen diversos productos a partir de las bandas espectrales, de los cuales se utilizó para la elaboración del algoritmo el denominado MOD09GQ ([https://lpdaac.usgs.gov/products/modis\\_products\\_table/mod09gq](https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mod09gq)). El mismo es un producto de reflectancia superficial, que provee un estimado de la reflectancia espectral superficial como si fuera medida al nivel del suelo en ausencia de dispersión atmosférica o absorción. Los datos de nivel bajo son corregidos para gases y aerosoles atmosféricos, de forma flexibles para generar una base de nivel 2 para varios productos grillados de mayor orden de procesamiento, como productos L2G y de Nivel 3. MOD09GQ provee las bandas 1 y 2 a 250 m de resolución en un producto grillado diario L2G, en proyección Sinusoidal. Se trabajó con el pixel que corresponde a las coordenadas del punto de monitoreo centro.

Por el otro lado, se calcula con las imágenes Landsat 8 - OLI el índice espectral Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Rouse, J. W. et al, 1973). Éste se utiliza comúnmente para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. En nuestro caso de estudio, las masas de algas son tan abundantes durante los eventos de floración que pueden ser detectadas con este índice de verdor. El mismo aprovecha la absorción que realizan las células fotosintéticas en la región del espectro electromagnético perteneciente al visible – rojo y la reflexión que existe en la región del infrarrojo cercano. Al ser un índice normalizado, sus valores van del -1 al 1, representando los valores positivos y cercanos a 1 mayor vigor en la vegetación. Éste se calcula mediante la siguiente ecuación (1):

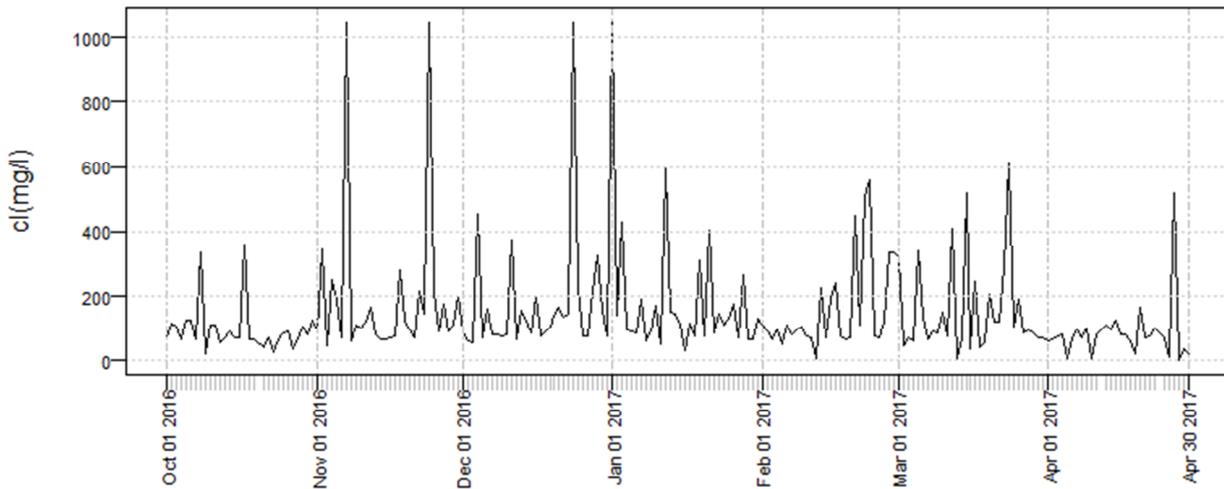
$$\text{NDVI} = (\text{IR cercano} - \text{Rojo}) / (\text{IR cercano} + \text{Rojo}) \quad (1)$$

Respecto al instrumento utilizado para calcular el índice nombrado a bordo del Landsat 8, el Sensor OLI es del tipo multispectral y cuenta con nueve bandas espectrales en el espectro visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio (Vermote E. et al., 2016). La resolución espacial de cada una de las bandas es de 30 metros. Se aprovecha aquí la mayor resolución espacial con respecto al

sensor MODIS para generar mapas que permitan analizar cómo varía el verdor observado en el espejo de agua.

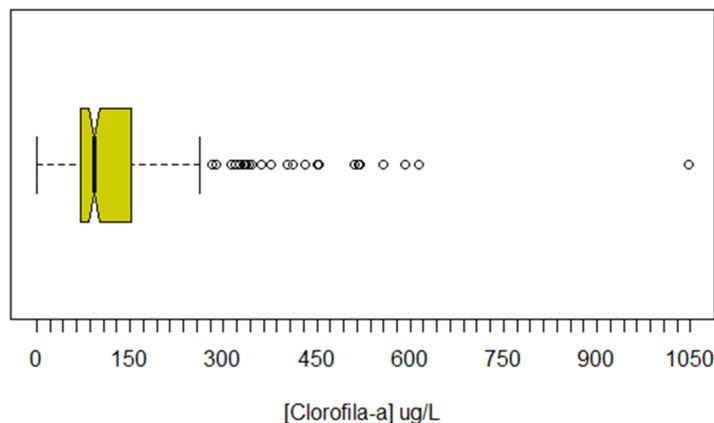
## RESULTADOS

A partir de la implementación del algoritmo desarrollado en German, A. et al (2017), se generó una serie diaria de valores de concentración de cl-a en el agua del embalse San Roque, excluyendo las fechas que se registró presencia de nubes (figura 2) para el período correspondiente a la temporada primavera – verano de 2016-2017 (Octubre de 2016 hasta Abril de 2017).



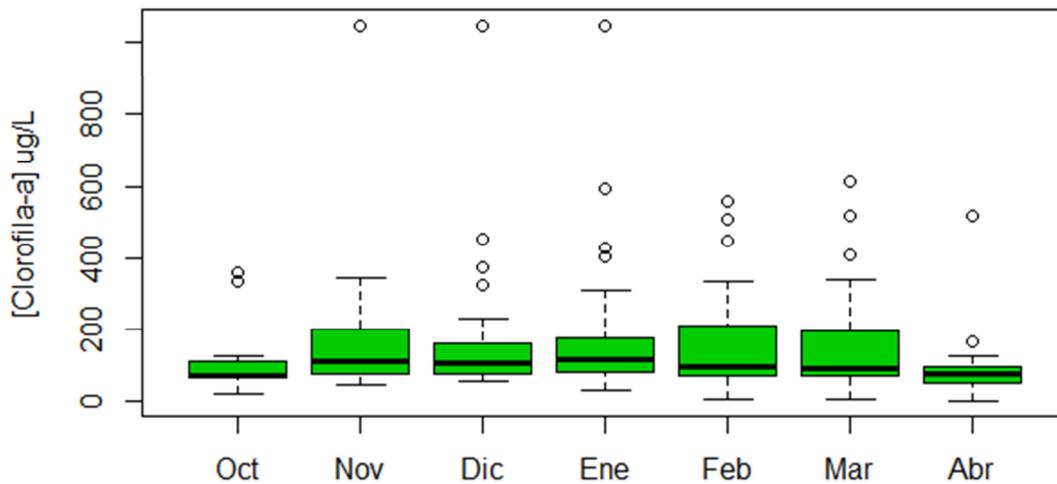
**Figura 2.-** Gráfico de la serie de tiempo diaria (a excepción de fechas con nubes) de Octubre de 2016 hasta Abril de 2017 de concentración de cl-a estimada desde satélite con el algoritmo nombrado.

En la figura 3 podemos ver el gráfico de caja que representa la distribución de las concentraciones de cl-a calculadas. La mediana de los valores representada por la línea de la caja es de 92.52  $\mu\text{g/l}$ . Se observan valores identificados como outliers que llegan hasta 1050  $\mu\text{g/l}$ .



**Figura 3.-** Gráfico de Caja que representa la distribución de los valores de concentración de Cl-a en el Embalse San Roque.

En la figura 4 es posible observar la distribución por mes de los valores de concentración de Cl-a, calculada desde satélite. Los valores outliers más altos se presentan en los meses de Noviembre, Diciembre y Enero, aunque están presentes durante todo el período.



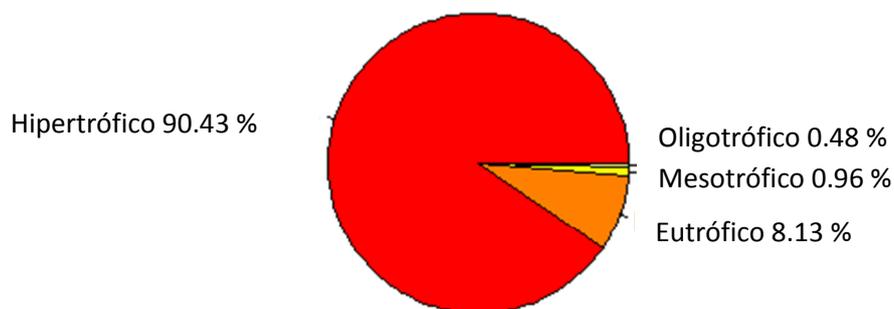
**Figura 4.-** Gráficos de caja que representan la distribución de los valores de concentración de cl-a por mes en el Embalse San Roque.

Por otro lado, se presenta un análisis del estado trófico del embalse en estas fechas analizadas. Para esto se calcula el índice TSI (Trophic State Index) de Carlson (1977) a partir de la concentración de cl-a, según la ecuación (2):

$$TSIc = 30.6 + 9.81 * \ln(Cl-a) \quad (2)$$

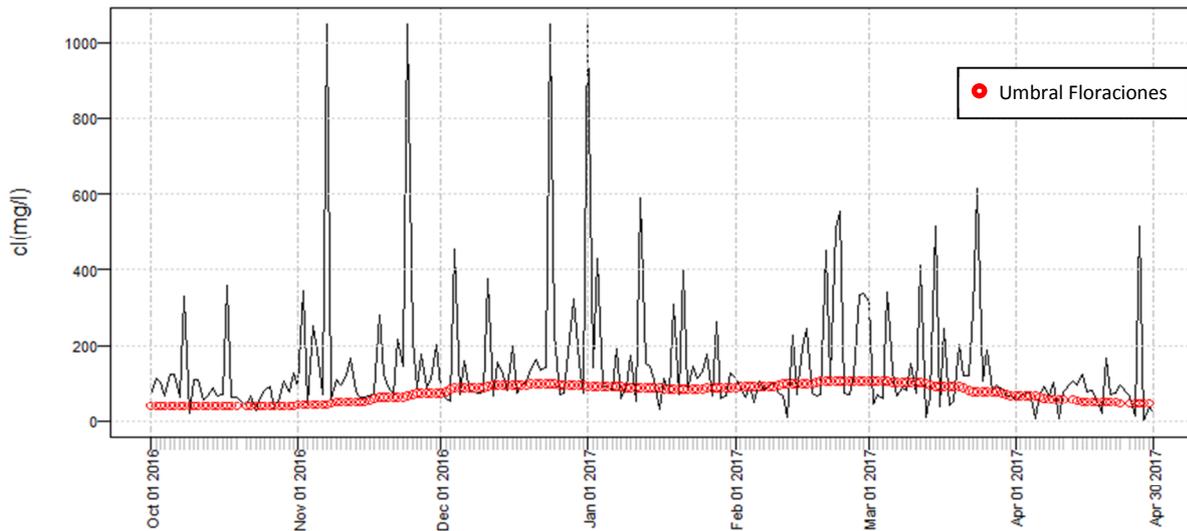
Así se clasifica un cuerpo de agua según la siguiente escala: los valores de TSI menores a 20 corresponden a un lago ultraoligotrófico, entre 20 y 40 a uno oligotrófico, entre 40 y 50 a uno mesotrófico, entre 50 y 70 a uno eutrófico y superiores a 70 a un hipereutrófico.

El resultado del cálculo de este índice para cada fecha estimada en la serie de tiempo de cl-a satelital, se muestra en la figura 5 que presenta un gráfico de torta de los porcentajes de cada estado trófico para la totalidad de las fechas. Se observa claramente que el embalse fue clasificado mayormente como hipertrófico (90.43%) para este período de tiempo.



**Figura 5.-** Gráfico de torta que representa los porcentajes de fechas según estado trófico para el lapso de tiempo de estudio.

Finalmente, se utilizó la serie de cl-a para determinar qué fechas se identificaban como eventos de floración y cuáles eran las características de las mismas. Para esto se utilizó el umbral desarrollado en German, A. et al (2017) que se logró a partir de un modelado de la serie calculada en el mismo trabajo citado, utilizando el algoritmo de HANTS. Éste es un algoritmo desarrollado para tratar series de tiempo de observaciones irregularmente espaciadas (Roerink et al., 2000). En la reunión ICES (1984) se concluye que las floraciones de fitoplancton excepcionales deben ser definidas en términos de la desviación del ciclo normal de la biomasa fitoplanctónica (Parker 1987). En nuestro caso, utilizamos como el ciclo normal de la biomasa en el agua del embalse esta serie modelada, construida a partir de 14 años de datos (2001 – 2014) de concentración de cl-a estimadas en el agua del Embalse (figura 6).



**Figura 6.-** Gráfico que representa la concentración de Cl-a en el centro del embalse para todos los días sin nubes en la temporada primavera-verano 2016-2017

A partir de este análisis podemos cuantificar la cantidad e intensidad de los eventos de floración y caracterizarlos estadísticamente. En primer medida, 144 fechas fueron clasificadas por encima del umbral de un total de 209, es decir un 69% del período de estudio. El valor máximo de concentración de cl-a registrado fue de 1047  $\mu\text{g/l}$ , mientras que el mínimo fue de 59  $\mu\text{g/l}$  con una media de 191,5  $\mu\text{g/l}$ . Estos valores caracterizan las floraciones específicas del embalse, mostrando que el rango es muy amplio dependiendo de la época del año, ya que el mínimo se da en octubre (12-10-2016) y el máximo en enero (01-01-2017). Además, si analizamos las floraciones por mes (figura 7) podemos ver que en noviembre ocurrieron las mayores cantidades de eventos (29), seguido por octubre (26), mientras que el resto de los meses se mantuvo aproximadamente constante entre 15 y 20 fechas por mes.

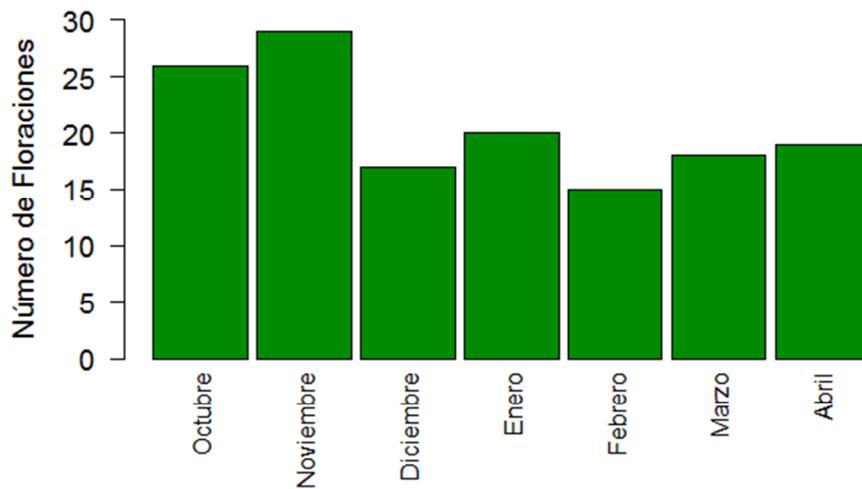


Figura 7.- Gráfico de barras que representa la cantidad de floraciones ocurridas por mes en el período de estudio

Por otro lado, se observa en la figura 8 el resultado de calcular el índice espectral NDVI (Índice Diferencial Normalizado de Vegetación) en el cuerpo de agua de estudio a partir de todas las imágenes Landsat 8 OLI sin nubes disponibles en el lapso de tiempo analizado. Los valores de verdor alto en las costas del Embalse corresponden a presencia de vegetación terrestre que no está cubierta por agua en algunos momentos del año según la cota del Embalse.

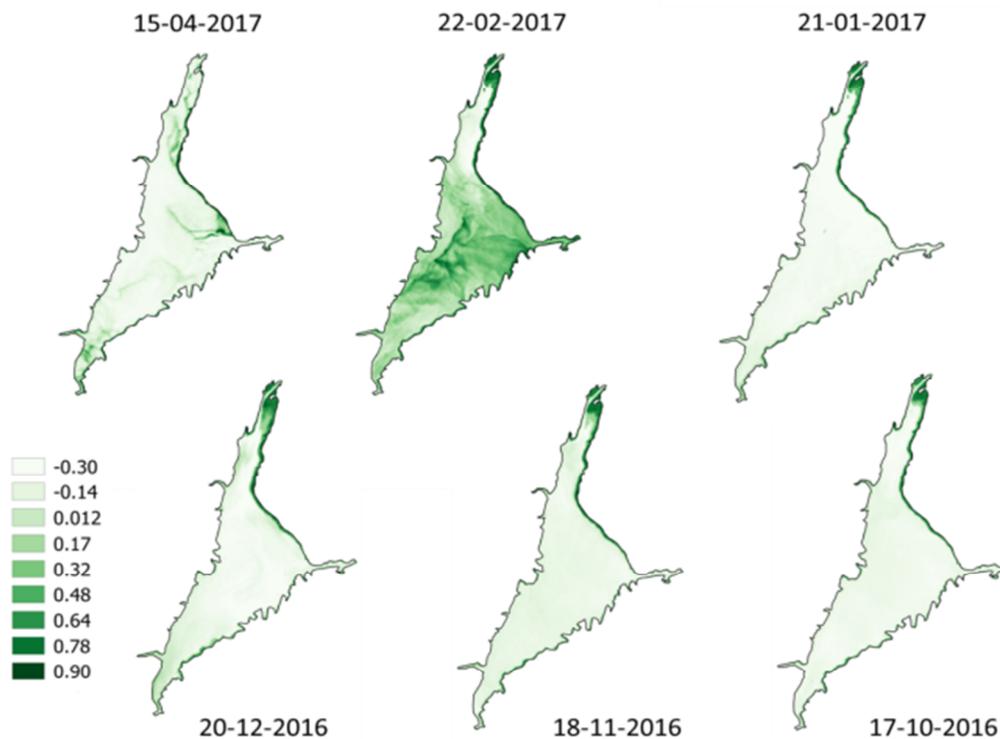


Figura 8.- Figuras que muestran los resultados del cálculo del NDVI para distintas fechas en el Embalse San Roque.

Observando la figura anterior, se detectan valores más altos en algunas fechas, principalmente el 22 de Febrero de 2017, mostrando la distribución de mayores concentraciones de organismos fotosintéticos en el espejo de agua. Esto coincide con evidencias tomadas *in situ* por personal calificado de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba, durante una fecha de muestreo que se realizó (figura 9).



**Figura 9.-** Fotografías tomadas el día 22/2/2017 durante actividades de monitoreo por personal calificado de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba.

## CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, pudo describirse y caracterizarse la variabilidad temporal de las floraciones algales en el Embalse San Roque para el período de Octubre 2016 a Abril de 2017. Podemos concluir que las concentraciones de *chl-a* han sido altas durante gran parte de tiempo estudiado, lo que ha generado que el umbral desarrollado con datos hasta 2014 haya quedado inferior al comportamiento medio que ha tenido el embalse en este último período analizado, detectando de esa manera múltiples fechas como eventos de floración. Esto denota no solo una situación de empobrecimiento en la calidad del agua del embalse con respecto a su tendencia anterior, sino que según el índice de Carlson el cuerpo de agua debería ser clasificado actualmente como hipertrófico. Esto tiene como consecuencia que las floraciones algales provoquen cada vez más problemas para los usos que se le da al Embalse. Para los usos recreativos, el olor, color y posible producción de toxinas por parte de las cianofíceas, que se saben predominan en la composición del fitoplancton del Embalse (Rodríguez et. al., 2008) son consecuencias directas de este fenómeno. Además, el alto consumo de oxígeno por parte de las algas, genera fenómenos de mortandad de peces. Otro problema es la decantación de las masas de algas muertas que contribuyen al fenómeno de colmatación del embalse. Por otro lado, el proceso de potabilización también se complejiza generando mayores costos.

Otra conclusión que se desprende de los resultados presentados, es que frente al uso de sensores para monitorear fenómenos tan dinámicos como son las floraciones algales la resolución temporal de los mismos se vuelve primordial frente a la resolución espacial que se suele priorizar para entender dinámicas dentro del cuerpo del embalse.

Se pudo observar *in situ* y a través de ambos sensores utilizados el evento de floración extraordinaria que sufrió el embalse durante el 22 de Febrero de 2017. Pero según la detección realizada con el algoritmo de MODIS, en el período Noviembre - Enero se desarrollaron eventos aún más severos que no hubiesen sido detectados de otra manera, ya que las imágenes sin nubes disponibles en ese período para Landsat 8 – OLI no muestran este comportamiento. El muestreo *in situ* demanda muchos insumos de tiempo, personal y gasto económico como para realizarlo en forma tan periódica, por lo que se vuelve necesario un monitoreo más constante como el aquí presentado que complementa los monitoreos tradicionales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bernasconi I, Alensinko A, Fuster M, Herrera M, Orueta A, Plomer E, Montachini G, Cossavella A, Brito R, Ferreyra N, Hunziker L, Echeverría F., Melian J., and Bresciano J.C (2009). Desestratificación térmica del embalse San Roque por el método de circulación-aireación artificial. Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba, pages 1-37.
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and oceanography*, 22(2), 361-369.
- Ferral, A (2013). Análisis espacio-temporal del efecto del sistema de aireación artificial en el Embalse San Roque. Integración de datos de campo y técnicas geoespaciales. FaMAF - UNC.
- German A., Tauro C., Andreo V., Bernasconi I., Ferral A. (2017). “Detección y caracterización de floraciones algales en un embalse Eutrófico a partir de una serie temporal de clorofila-a obtenida de imágenes MODIS.” Libro de Actas de XVII Simposio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica; editado por Walter F. Sione [et al.]. – 1a ed. – Luján: EdUnLu, 2017. Libro digital, PDF: <https://selperargentina2016.org/actas/>
- Kutser, T. (2004). Quantitative detection of chlorophyll in cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. *Limnology and Oceanography*, 49(6), 2179-2189.
- Parker, M., & Tett, P. (1987). Exceptional plankton blooms.
- Rantajarvi, E., Olsonen, R., Hallfors, S., Leppanen, J. M., & Raateoja, M. (1998). Effect of sampling frequency on detection of natural variability in phytoplankton: unattended high-frequency measurements on board ferries in the Baltic Sea. *ICES Journal of Marine Science: Journal du conseil*, 55(4), 697-704.
- Rodríguez, M. I., Bustamante, M. A., Ruibal, A. L., Ruíz, M. A., & Busso, F. (2008). Estudio del fitoplancton en el marco de monitoreo del Embalse San Roque (Cba). In *IV Congreso Argentino de Limnología* (Vol. 27).
- Rodríguez, M. I., Ruiz, M., Vilchez, G., Crema, N., Ruibal Conti, A. L., Bustamante, M. A., & López, F. (2006). MONITOREO INTEGRAL DE UN CUERPO DE AGUA EUTRÓFICO EMBALSE SAN ROQUE (CÓRDOBA, ARGENTINA). En *I Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua*.
- Roerink, G. J., Menenti, M., & Verhoef, W. (2000). Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series. *International Journal of Remote Sensing*, 21(9), 1911-1917.
- Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering (1973) 'Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS', *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351 I, 309-317.
- U.S. EPA.(1990) Monitoring Lake and Reservoir Restoration. Office of Water (WH-553), 440(4-90-007).
- Vermote, E., Justice, C., Claverie, M., & Franch, B. (2016). Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, 185, 46-56.

Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: lake and river ecosystems*. Gulf Professional Publishing.

## DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO PARA EL MONITOREO DE EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS

D. Ibarlucía<sup>1, 2</sup>, R. Rivas<sup>1, 2</sup>, C. Mancino<sup>1, 2</sup>, F. Carmona<sup>1, 3</sup>, G. Cazenave<sup>1, 2</sup>, M. Bayala<sup>1, 2</sup>, Mauro Holzman<sup>1, 3</sup>, F. Degano<sup>1, 2</sup>, A. Faramiñán<sup>1, 2</sup>, P. Olivera<sup>1, 2</sup>, M. Silicani<sup>1, 2</sup> y L. Vives<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA), Tandil, Argentina

<sup>2</sup> Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (CIC)

<sup>3</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

[danielaibarlucia@gmail.com](mailto:danielaibarlucia@gmail.com)

### Introducción

La importancia del monitoreo y la recolección de datos hidrológicos e hidrometeorológicos reside en que los eventos naturales como las precipitaciones, las temperaturas, las velocidades del viento, y los caudales, entre otros, son acontecimientos irrepetibles en la naturaleza. Por ello, contar con una base de datos de este tipo es relevante al momento de generar una red de medición con el fin de predecir eventos extremos como lo son inundaciones y sequías. A su vez, las redes de monitoreo permiten contar con una serie de antecedentes de estas variables hidrológicas e hidrometeorológicas (mediante su disponibilidad, ya sea en tiempo real o publicaciones periódicas) para utilizar estos datos como soporte a otros proyectos, tanto gubernamentales como industriales [Fattorelli y Fernández, 2011].

El criterio de diseño para una red hidrométrica está relacionado con las necesidades de controlar los procesos que tienen lugar en la cuenca mediante el seguimiento de los hechos en tiempo real [Fattorelli y Fernández, 2011]. Para ello se utilizan puntos estratégicos para la calibración y posterior operación de las estaciones. Mediante los criterios de la OMM (Organización Meteorológica Mundial) la cual especifica el área (en km<sup>2</sup>) por estación según el tipo de región y variable, es posible diseñar una red de medición óptima para la zona de estudio contando con un número representativo de estaciones que conformarán la red [Guía de prácticas hidrológicas, 1994].

Para el desarrollo del proyecto presentado en este trabajo, denominado "Desarrollo e implementación de un sistema automático para el monitoreo de eventos hidrológicos extremos", se formó el CAPP que es una Asociación Público Privada entre el Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA), la Autoridad del Agua (ADA) de la provincia de Buenos Aires y REDIMEC SRL (empresa) ([www.ihreda.com.ar](http://www.ihreda.com.ar)). El objetivo del mismo fue disponer de estaciones de monitoreo ambiental con asistencia técnica Argentina, para responder a una necesidad nacional frente a los problemas de inundaciones y sequías que enfrenta el país. Con este fin, se cuenta con estaciones automáticas de bajo mantenimiento equipadas con sensores de alta precisión, las cuales tendrán control y operación a distancia. Los dataloggers empleados para la recolección de datos y el software utilizado son de alto nivel tecnológico y de origen nacional abierto. Toda la información obtenida en las estaciones que conforman la red serán transmitidas en tiempo real (radio) y diferido (fibra óptica, GPRS y satélite ARGOS), y será de acceso libre con certificación y validación de datos.

### Área de aplicación

El área de aplicación de esta red de monitoreo es el área sur de la cuenca del río Salado, que comprende 39.324 km<sup>2</sup> y está ubicada en la llanura Pampeana de la provincia de Buenos Aires (Figura 1). Esta zona es una región agro-productiva donde

residen unos 500.000 habitantes. Presenta características propias de llanura, con pendientes casi nulas y un deficiente drenaje superficial, por lo que en las zonas más bajas abundan sistemas de lagunas y hay reducidos arroyos de gran caudal. El clima es templado cálido, con heladas en invierno y primavera. Las precipitaciones disminuyen hacia el sur-oeste de 1000 a 700 mm anuales. Estas son más intensas en primavera y otoño, pudiendo producirse déficit hídrico durante el verano [Ministerio del interior, 2017].

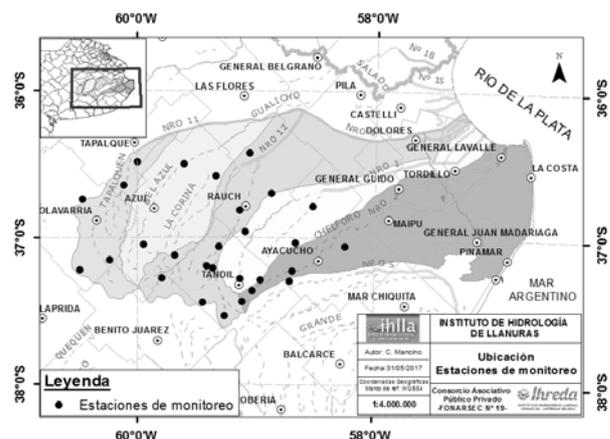


Figura 1: Área de aplicación del proyecto indicando los puntos de monitoreo.

### Configuración de las estaciones

Las estaciones que forman la red de monitoreo se ubican en predios y en construcciones ad hoc. Se clasifican en: Estaciones de Monitoreo Meteorológico (EMM); Estaciones de Monitoreo Limnigráfico (EML); Estaciones de Monitoreo Químico (EMQ); Estaciones de Monitoreo de Balance de Energía (EMBE) y Estaciones de Monitoreo Freatimétrico (EMF), y se están construyendo teniendo en cuenta las normas de la OMM. En la Tabla 1 se mencionan los sensores que pertenecen a cada tipo de estación (Figuras 2, 3, 4 y 5).

Tabla 1: Sensores que conforman cada tipo de estación

EMM	Precipitación
	Velocidad y dirección del viento
	Temperatura y Humedad relativa del aire
	Presión atmosférica
EML	Presión de la columna de agua *Ultrasónico nivel de agua (opcional)
EMQ	pH
	Conductividad eléctrica y temperatura del agua
	Potencial redox
	Turbidez

EMBE	Radiación neta
	Radiación global
	Humedad y temperatura del suelo
	Reflectancia espectral
	Flujo de calor en el suelo
	Temperatura radiativa
EMF	Presión atmosférica
	Presión de la columna de agua

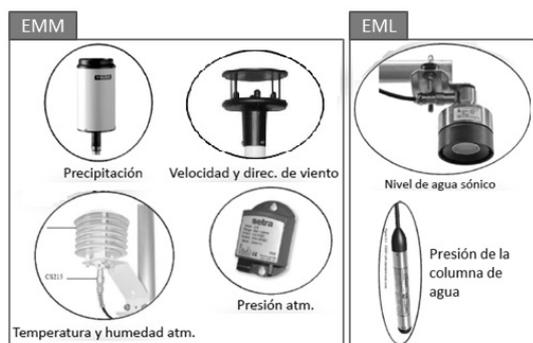


Figura 2: Sensores de las estaciones meteorológicas y limnigráficas

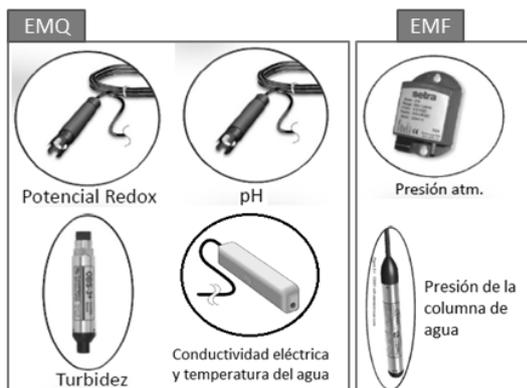


Figura 3: Sensores de las estaciones química y frearimétrica

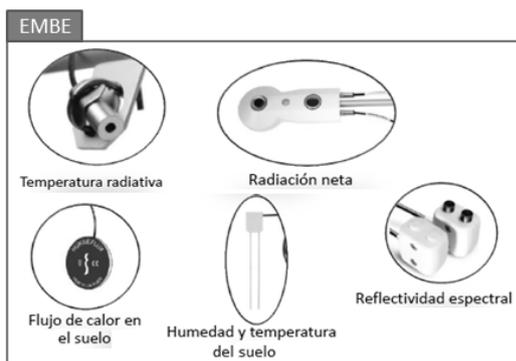


Figura 4: Sensores de la estación de balance de energía

## Resultados esperados

El resultado de este proyecto es contar con estaciones autónomas de bajo mantenimiento a partir de las cuales se logren datos confiables que permitan tomar decisiones y modelar el comportamiento del sistema de manera más precisa.

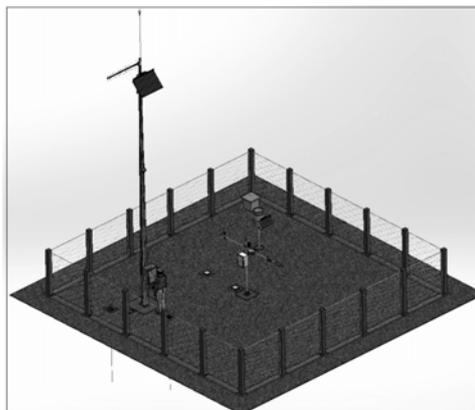


Figura 5: Parcela donde se encuentran las estaciones de monitoreo incluyendo la ubicación de los sensores.

Los datos obtenidos (temperatura y humedad del aire, velocidad y dirección del viento, precipitaciones, nivel de agua, radiación neta y global, temperatura y humedad del suelo, calidad del agua) serán datos validados y certificados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) aquellos que monitorean las condiciones ambientales. La ventaja de la transmisión de los mismos en tiempo real y diferido es permitir la alerta temprana de los eventos extremos y la rápida toma decisiones ante los mismos. De esta manera la autoridad competente podrá alertar a la población de la zona y a su vez, al ser datos de libre acceso, la información será de utilidad para aquellos productores y empresarios que se verían afectados por dichos eventos. También, estos datos estarán disponibles para conformar una base nacional, siendo un aporte importante para el país ya que se trata de la primera red de monitoreo de alerta de inundaciones y sequías en Argentina.

Además, el monitoreo de la calidad del agua en los arroyos Tapalqué, del Azul y Langueyú es una contribución importante en cuanto al estado de calidad ambiental de las aguas que conforman la vertiente sur del río Salado.

## Agradecimientos

El presente proyecto es financiado por la ANPCyT a través de la herramienta FONARSEC (FITS MAYCC 19/2013).

## Referencias

Fattorelli S. y Fernández P. "Diseño hidrológico" (2011), 2<sup>da</sup> edición, Edición digital, pp. 80-87. Fecha de consulta 19/05/17 a las 10:15 hs desde

[http://www.ina.gov.ar/pdf/Libro\\_diseno\\_hidrologico\\_edicion\\_digital.pdf](http://www.ina.gov.ar/pdf/Libro_diseno_hidrologico_edicion_digital.pdf)

Guía de prácticas hidrológicas "Adquisición de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones", Organización Meteorológica Mundial (OMM), OMM-N°168, 5<sup>ta</sup> edición (1994), pp. 273-303

Ministerio del interior, Obras públicas. Fecha de consulta 22/05/17 a las 14:41 hs desde <http://www.mininterior.gov.ar/obras-publicas/pdf/49.pdf>

## **TELECONEXIONES DEL RÉGIMEN DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES DEL RÍO CHUBUT**

**Malnero H.A., Kaless G., Brandizi L.**

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Argentina.  
9 de Julio 25. Trelew. Chubut. TE:(0280)4428403.  
E-mail:hmalnero@hotmail.com

### **RESUMEN**

El pronóstico de los caudales de un río es una información de suma importancia relacionada con la gestión y el aprovechamiento del recurso, más aún si los de usos actuales o futuros, sumados a la variabilidad climática, generan escenarios de competencia y prioridades excluyentes que puedan producir condiciones de escasez para el abastecimiento humano, aumento del riesgo de inundación de las poblaciones o dificultades en la disponibilidad para riego.

En el presente trabajo se analiza la posible relación causal entre fenómenos de escala hemisférica como: la oscilación del sur (SOI), la oscilación de la Antártida (SAMI), el dipolo de Océano Índico (IOD) o el número de manchas solares (SSN), con los caudales medios mensuales del río Chubut medidos en la estación de aforo de la Subsecretaría de Recursos Hídricos en Los Altares.

Como resultado del trabajo se presentan las principales relaciones obtenidas, que permiten establecer la posible influencia de los fenómenos hemisféricos mencionados sobre el régimen de caudales medios mensuales, como primer paso necesario para obtener una nueva generación de modelos matemáticos de pronóstico que tengan en cuenta esta información espectral y la complejidad no lineal del sistema analizado.

### **ABSTRACT**

The forecast of the flows of a river is a very important information related to the management and the use of the resource, more so if the current or future uses, added to the climatic variability, generate scenarios of competence and exclusive priorities that can produce conditions of scarcity for human supply, increased risk of flooding of populations or difficulties in availability for irrigation.

In the present work the possible causal relationship between hemispheric scale phenomena such as Southern Oscillation (SOI), Antarctic Oscillation (SAMI), Indian Ocean Dipole (IOD) or number of sunspots (SSN) ) With the average monthly flows of the Chubut River measured at the Los Altares station.

As a result of the work, we present the main relationships obtained to establish the possible influence of the mentioned hemispheric phenomena on the regime of average monthly flows, as the first necessary step to obtain a new generation of mathematical forecasting models that take this spectral information into account And the nonlinear complexity of the analyzed system.

### **INTRODUCCIÓN**

En la actualidad existen algunos modelos de pronóstico de caudales para el río Chubut en la estación de aforo de Los Altares, basados en criterios estadísticos y correlaciones con variables continentales y marítimas, cuyos resultados tienen importantes desvíos entre los valores observados y los pronosticados.

El análisis que se plantea en el trabajo, está basado en la utilización de la técnica de procesamiento de señales de tiempo denominada transformada rápida de Fourier (FFT), que permite obtener el espectro de frecuencias características de las series de tiempo, y mediante un posterior análisis, calcular la fase de adelanto y el grado de relación de las señales consideradas como causales respecto del régimen de caudales en estudio.

Esta forma de tratamiento de las series temporales fue introducida por Blackman & Turkey(1958) e inicialmente se aplicó al tratamiento de señales relacionadas con la ingeniería

de comunicaciones.

La técnica transforma las series temporales, modificando las variables de análisis del dominio del tiempo al dominio de las frecuencias, obteniéndose el espectro de frecuencias, que constituye una valiosa información para el análisis y pronóstico de la componente periódica de la serie analizada

## OBJETIVOS

- Analizar el espectro de frecuencias de los caudales medios mensuales del río Chubut en los Altares (QMM), en relación con la oscilación del sur (SOI), la oscilación de la Antártida (SAMI), el dipolo de Océano Indico (IOD) y el número de manchas solares (SSN).
- Establecer la coherencia de las frecuencias características y las fases de adelanto entre la serie de caudales medios mensuales y las series enunciadas anteriormente.
- Analizar la estructura de datos de entrada de una nueva serie de modelos de pronósticos de caudales medios mensuales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización del trabajo, se consideraron:

- La serie de caudales medios mensuales en la estación de aforo de Los Altares de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación entre Abril de 1943 y Marzo de 2016.
- El Índice de la Oscilación del Sur (SOI), entre Abril de 1933 a Febrero de 2017.
- El Índice del Modo Anular del Sur (SAMI), entre Enero de 1957 y Febrero de 2017.
- El número de manchas solares (SSN), entre Enero de 1749 y Marzo de 2017.
- El Dipolo del Océano Indico (IOD), entre Enero de 1950 y Diciembre de 2016.

De la información recopilada se seleccionó una ventana de datos en común, comprendida entre Enero de 1957 y Marzo de 2016.

Sobre los datos seleccionados, se aplicaron distintas herramientas numéricas provenientes del análisis de series temporales y de señales, según lo propuesto por Blackman & Turkey(1958), mediante la utilización del software Matlab.

En general, una serie temporal  $y(t)$  puede representarse como una suma lineal de una tendencia a largo plazo  $y_{tr}(t)$ , una componente periódica  $y_p(t)$  y un ruido aleatorio  $y_n(t)$ .

$$y(t) = y_p(t) + y_{tr}(t) + y_n(t) \quad (1)$$

La componente a largo plazo es una tendencia lineal o de grado superior que puede aproximarse aplicando un polinomio de cierto grado, mientras que la parte periódica puede aproximarse por una combinación lineal de ondas de coseno (o seno) que tienen amplitudes diferentes  $A_i$ , frecuencias  $f_i$  y ángulos de fase  $\psi_i$ .

$$y_p(t) = \sum_i A_i \cos(2\pi f_i t - \psi_i) \quad (2)$$

El ángulo de fase  $\psi_i$  ayuda a detectar cambios temporales entre señales de la misma frecuencia. Dos señales  $y_1(t)$  e  $y_2(t)$  de la misma frecuencia están desfasadas si la diferencia entre  $\psi_1$  y  $\psi_2$  no es cero.

Para obtener el espectro de frecuencias de cada señal, se realizó el análisis autoespectral, que tiene como objetivo describir la distribución de la varianza contenida en una única señal  $y(t)$

sobre la frecuencia o la longitud de onda. Una manera simple de describir la varianza en una señal sobre un retardo de tiempo  $k$  es la autocovarianza de la señal  $y(t)$  con  $N$  puntos de datos muestreados a intervalos de tiempo constantes  $\Delta t$ , expresada por la ecuación:

$$\text{cov}_{yy}(k) = \frac{1}{N-k-1} \sum_{t=1}^{N-k} (y_t - \bar{y})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad (3)$$

La serie de autocovarianza depende claramente de la amplitud de  $y(t)$ . Normalizando la covarianza por la varianza  $\sigma^2$  de  $y(t)$  se obtiene la secuencia de autocorrelación, que implica correlacionar una serie de datos con ella misma, dependiendo de un lapso de tiempo  $k$ .

$$\text{corr}_{yy}(k) = \frac{\text{cov}_{yy}(k)}{\text{cov}_{yy}(0)} = \frac{\text{cov}_{yy}(k)}{\sigma_y^2} \quad (4)$$

Un método para computar el espectro de frecuencias es el introducido por Blackman y Tukey (1958), que utiliza la transformada de Fourier compleja  $X_{yy}(f)$  de la secuencia de autocorrelación  $\text{corr}_{yy}(k)$ .

$$X_{yy}(f) = \sum_{k=0}^M \text{corr}_{yy}(k) e^{i2\pi f k / f_s} \quad (5)$$

Donde  $M$  es el retraso máximo y  $f_s$  la frecuencia de muestreo. La densidad espectral de potencia (PSD) de Blackman-Tukey es estimada mediante la ecuación:

$$\text{PSD}_{yy}(f) = |X_{yy}(f)| \quad (6)$$

El cálculo real de PSD puede realizarse sólo a un número finito de puntos de frecuencia empleando una Transformación Rápida de Fourier (FFT), que es un método para calcular una Transformada de Fourier discreta con un tiempo de ejecución reducido. La mayoría de los algoritmos FFT dividen la transformada en dos intervalos de tamaño  $N/2$  en cada paso. Por lo tanto, se limita a bloques de una potencia de dos. En la práctica, la PSD se calcula utilizando un número de frecuencias próximo al número de puntos de datos en la señal original  $y(t)$ .

Para analizar la correlación de dos series de tiempo en el dominio de las frecuencias se utiliza el análisis cruzado espectral. La covarianza cruzada es una medida para la varianza en dos señales sobre un retraso de tiempo  $k$ . Un estimador no sesgado de la covarianza cruzada de dos señales  $x(t)$  e  $y(t)$  con  $N$  puntos de datos muestreados a intervalos de tiempo constantes  $\Delta t$  es:

$$\text{cov}_{xy}(k) = \frac{1}{N-k-1} \sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad (7)$$

La serie de covarianza cruzada depende de las amplitudes de  $x(t)$  e  $y(t)$ . La normalización de la covarianza por las desviaciones estándar de  $x(t)$  e  $y(t)$  produce la secuencia de correlación cruzada.

$$\text{corr}_{xy}(k) = \frac{\text{cov}_{xy}(k)}{\text{cov}_{xy}(0)} = \frac{\text{cov}_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (8)$$

En la práctica, se utilizan los mismos métodos y modificaciones anteriores para calcular la densidad espectral cruzada. Además de los dos espectros de  $x(t)$  e  $y(t)$  y el espectro cruzado, la transformada de Fourier compleja  $X_{xy}(f)$  también contiene información sobre la relación de fases  $W_{xy}(f)$  de las dos señales:

$$PSD_{xy}(f) = |X_{xy}(f)| \tag{9}$$

$$W_{xy}(f) = \arg[X_{xy}(f)] \tag{10}$$

La diferencia de fase es importante en el cálculo de los adelantos y los retrasos entre dos señales, un parámetro utilizado con frecuencia para proponer causalidades entre los dos procesos documentados por las señales. Un valor negativo de  $W_{xy}(f)$ , indica que la señal  $y(t)$  está adelantada respecto de la  $x(t)$  para la frecuencia  $f$ .

En el caso particular de análisis, se ha considerado siempre a la señal  $x(t)$  como la serie de caudales medios mensuales QMM, mientras que las  $y(t)$  son las distintas series de tiempo correspondientes con SAMI, SOI, IOD y SSN.

La correlación entre los dos espectros se puede calcular por medio de la coherencia:

$$C_{xy} = \frac{|X_{xy}(f)|^2}{X_{xx}(f)X_{yy}(f)} \tag{11}$$

La coherencia es un número real entre 0 y 1, donde 0 indica que no hay correlación y 1 indica la correlación máxima entre  $x(t)$  e  $y(t)$  a la frecuencia  $f$ . Un grado significativo de coherencia es una precondition importante para calcular las diferencias de fase entre las dos señales consideradas.

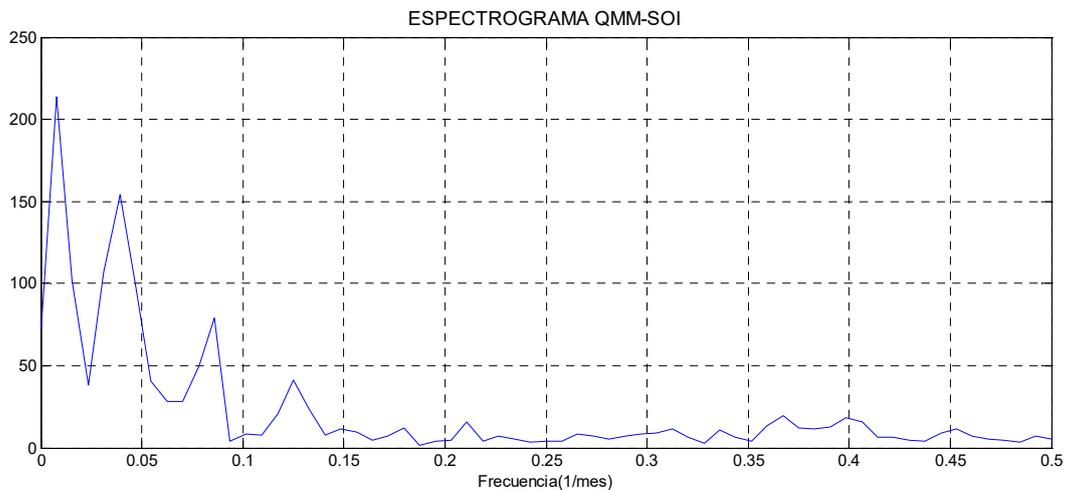
**RESULTADOS**

A continuación, se presentan los principales resultados derivados del análisis de frecuencias aplicado a las series temporales en estudio.

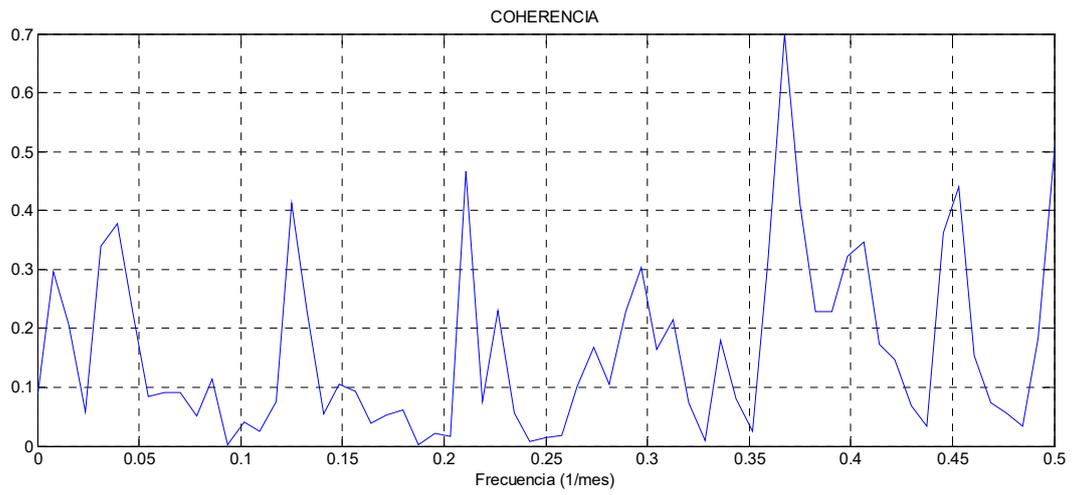
En las Figuras 1, 4, 7 y 10 se presentan los espectros cruzados entre QMM y SOI, SAMI, SSN y IOD, calculados según la ecuación (9).

En las Figuras 2, 5, 8 y 11 se presentan los valores de coherencia entre QMM y SOI, SAMI, SSN y IOD, calculados según la ecuación (11).

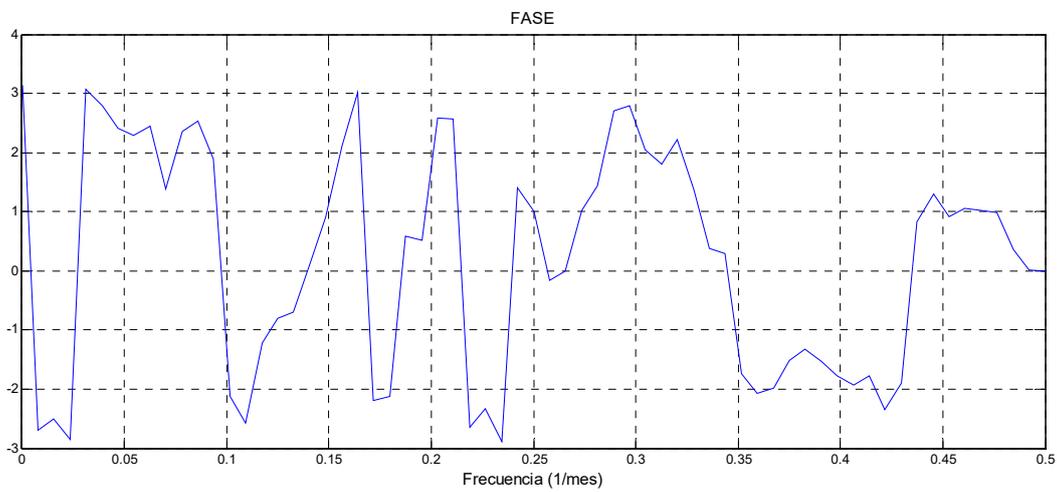
En las Figuras 3, 6, 9 y 12 se presentan los valores de desfasaje entre QMM y SOI, SAMI, SSN y IOD, calculados según la ecuación (10). Los valores negativos indican un adelanto en el tiempo de la señal analizada respecto de los caudales medios mensuales.



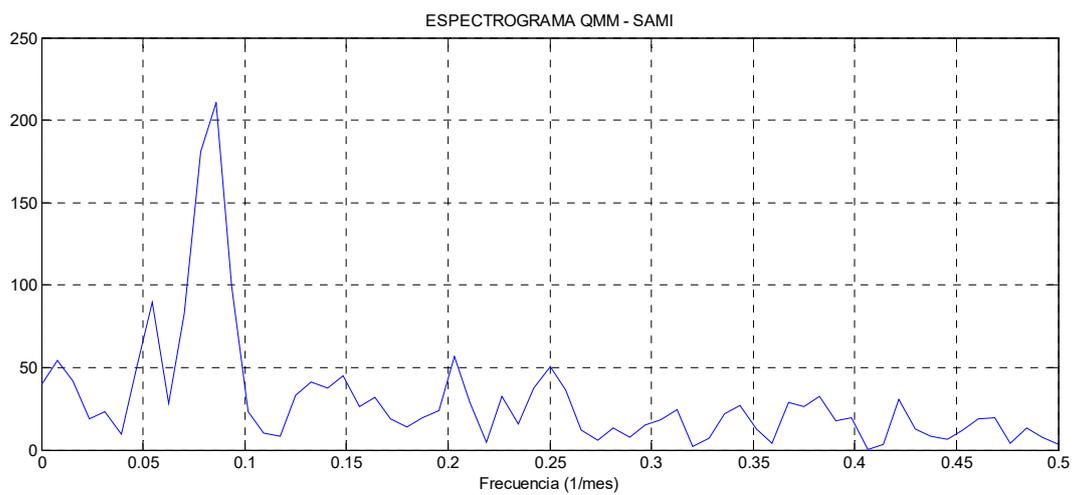
**Figura 1.-** Espectro cruzado entre QMM y SOI.



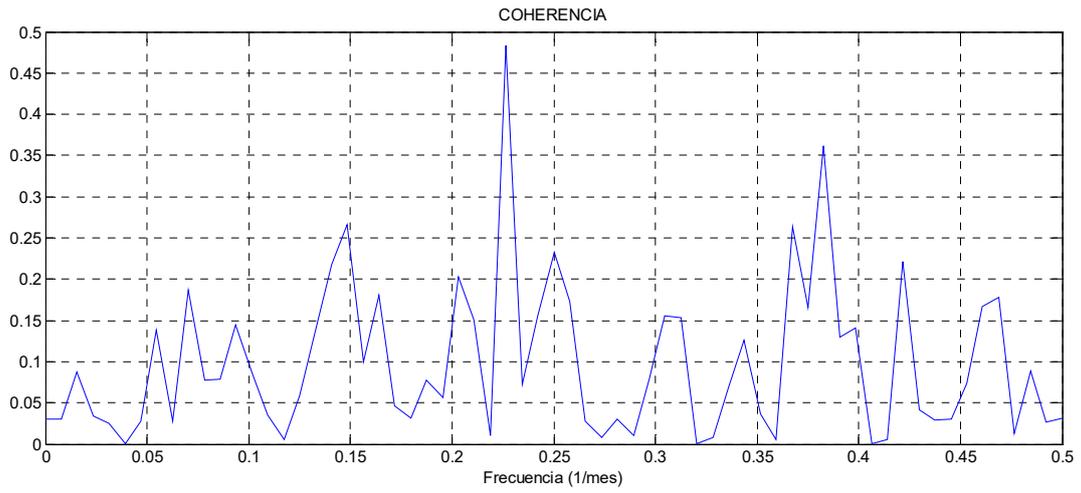
**Figura 2.-** Valores de coherencia entre QMM y SOI.



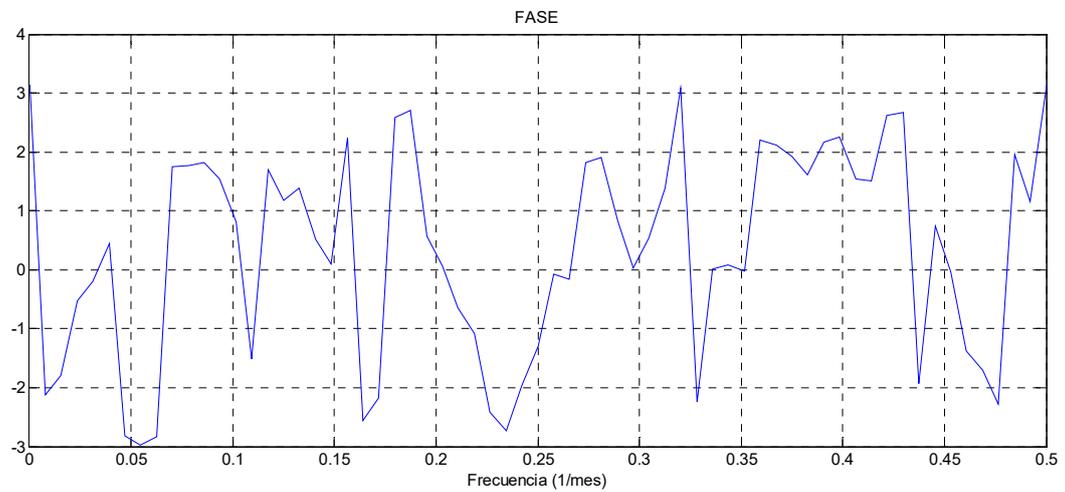
**Figura 3.-** Valores de desfase entre QMM y SOI.



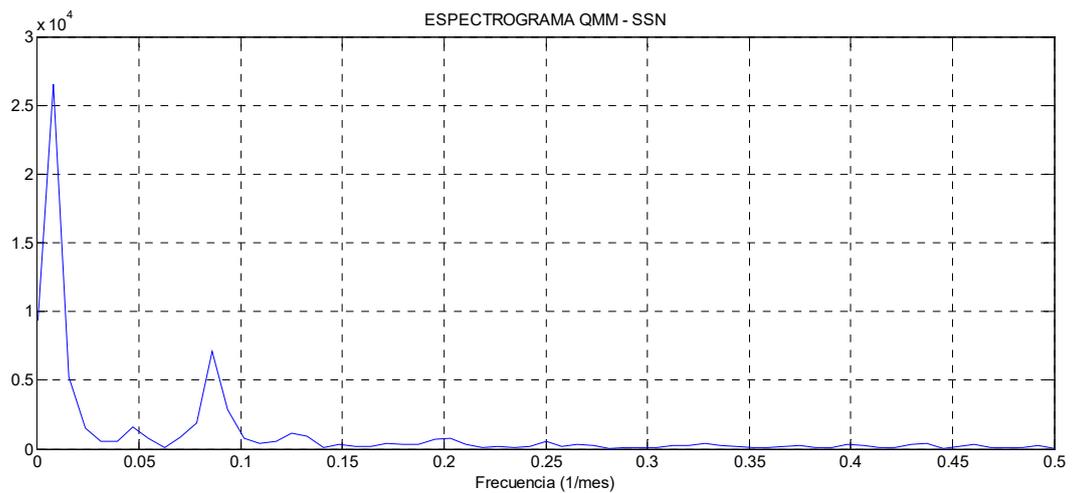
**Figura 4.-** Espectro cruzado entre QMM y SAMI.



**Figura 5.-** Valores de coherencia entre QMM y SAMI.



**Figura 6.-** Valores de desfaseaje entre QMM y SAMI.



**Figura 7.-** Espectro cruzado entre QMM y SSN.

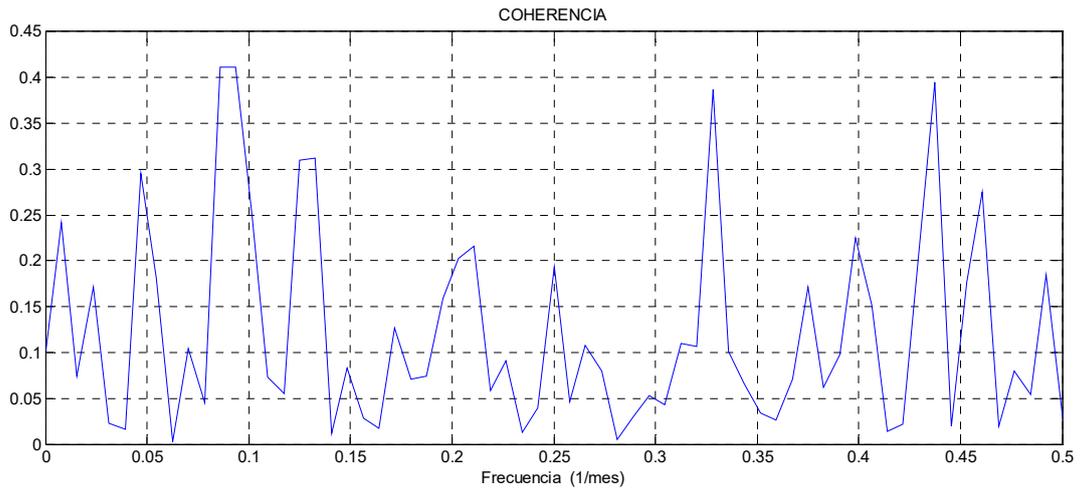


Figura 8.- Valores de coherencia entre QMM y SSN.

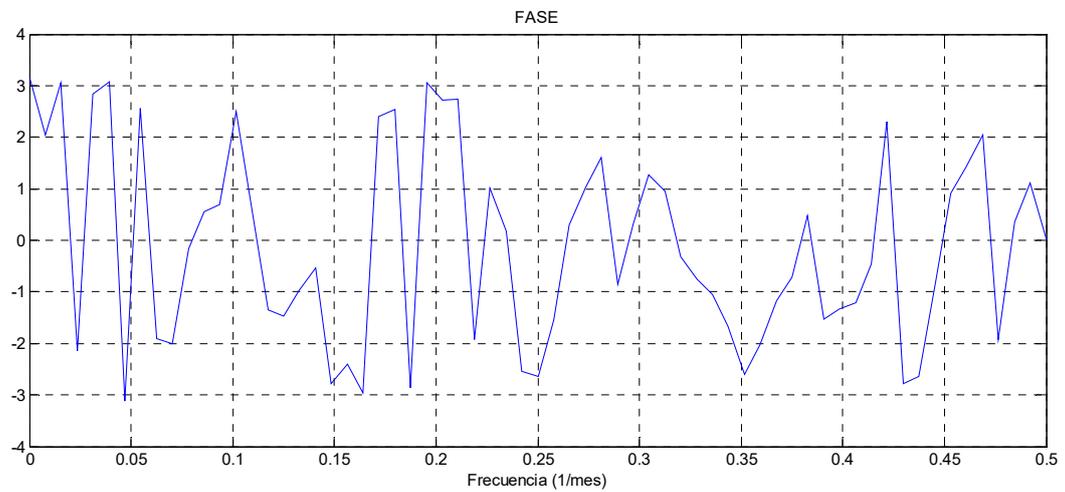


Figura 9.- Valores de desfaseaje entre QMM y SSN.

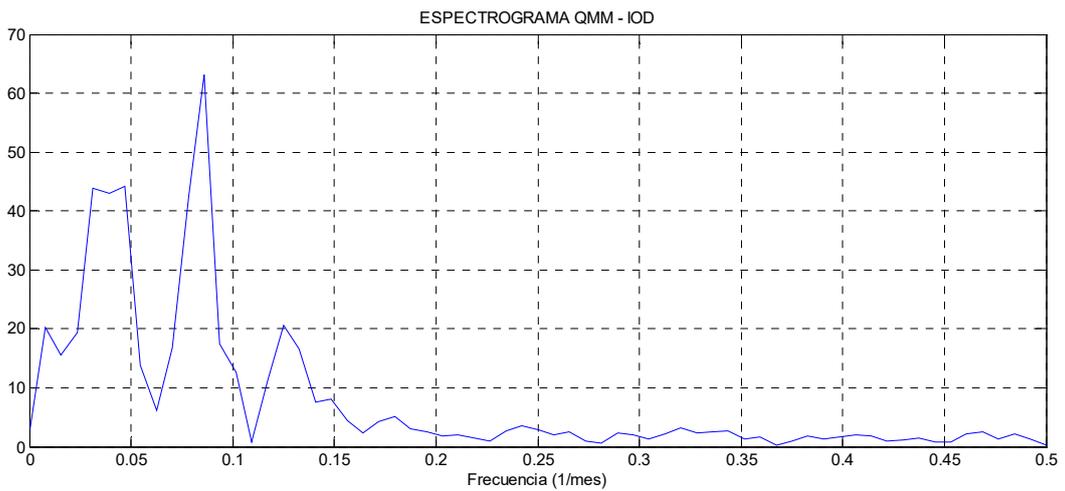


Figura 10.- Espectro cruzado entre QMM y IOD.

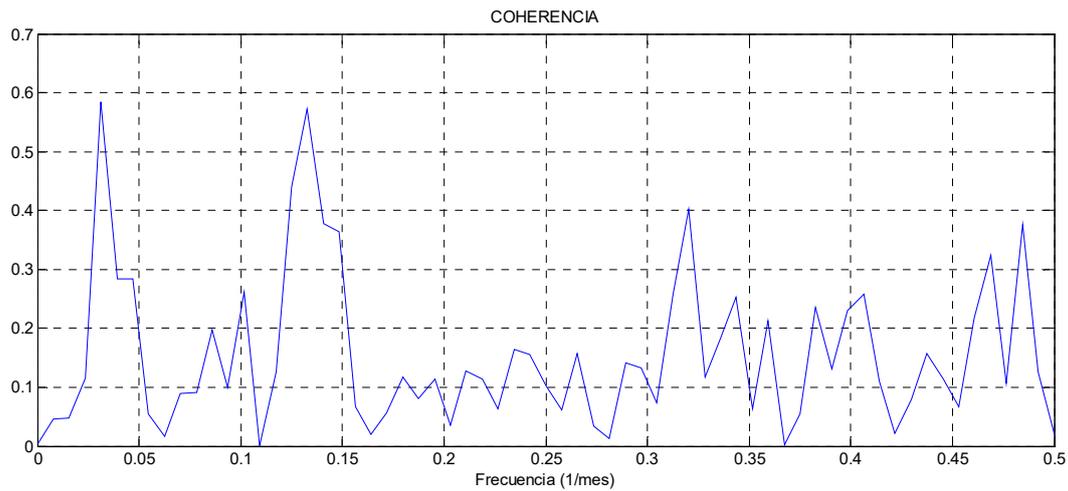


Figura 11.- Valores de coherencia entre QMM y IOD.

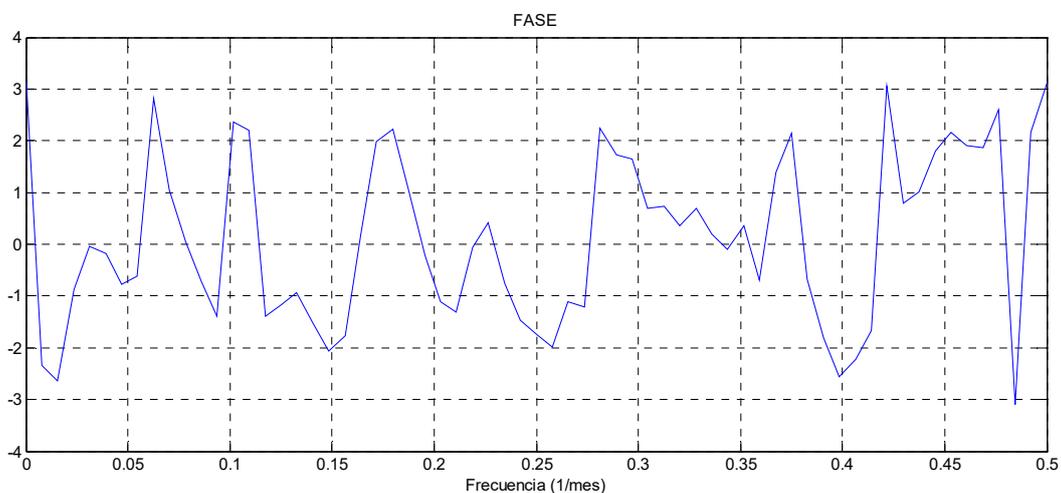


Figura 12.- Valores de desfase entre QMM y IOD.

En la Tabla 1, se presentan las primeras cinco frecuencias características de la serie de caudales medios mensuales (QMM), conjuntamente con la indicación de la coincidencia de las frecuencias con los espectros de las series de datos analizadas, calculadas de acuerdo a la ecuación (6).

Del análisis de Tabla 1, se observa que el periodo  $T= 64$  meses no se encuentra en la serie de QMM, mientras que el periodo  $T=26$  meses se encuentra presente en todas las señales.

SOI es la única señal que contiene a todas las frecuencias en el rango considerado, mientras que los periodos  $T=128$  meses,  $T=43$  meses y  $T=32$  meses no se encuentra en SAMI, por su parte IOD y SSN no contienen los periodos  $T=32$  meses y  $T=21$  meses.

Tabla 1.- Frecuencias y periodos característicos

frecuencia	T(meses)	QMM	SOI	SAMI	SSN	IOD
0.008	128	X	X		X	X
0.016	64		X	X	X	X
0.023	43	X	X		X	X
0.031	32	X	X			
0.038	26	X	X	X	X	X
0.048	21	X	X	X		

En la Tabla 2 se presenta el resultado del análisis de coherencia entre la serie de caudales y las series consideradas como causales, para sintetizar la información, se ha considerado las frecuencias con valores de coherencia mayores que 0.30 y fases negativas, que indican un adelanto en el tiempo respecto de los caudales.

**Tabla 2.-** Coherencia y fase respecto de los Caudales medios mensuales

f	T	IOD		SSN		SAMI		SOI	
		Coher.	Fase	Coher.	Fase	Coher.	Fase	Coher.	Fase
	meses		meses		meses		meses		meses
0.031	32.00	0.58	-0.18	0.31	-1.87				
0.125	8.00	0.44	-1.50					0.41	-1.02
0.133	7.53	0.57	-1.11	0.31	-1.17				
0.141	7.11	0.38	-1.72						
0.148	6.74	0.36	-2.22						
0.227	4.40					0.48	-1.70		
0.328	3.05			0.39	-0.36				
0.359	2.78							0.32	-0.92
0.367	2.72							0.70	-0.86
0.375	2.67							0.41	-0.65
0.438	2.29			0.40	-0.96				
0.484	2.06	0.38	-1.02						

Del análisis de la Tabla 2, se observa que IOD tiene altos valores de coherencia para los periodos T=32 meses y T=7.5 meses, mientras que el mayor desfase es de 2 meses para un periodo de aproximadamente 7 meses. Para SOI se produce el mayor valor de coherencia (Coher=0.70), con un desfase de cercano al mes y un periodo de aproximadamente 3 meses. Por su parte SAMI tiene un valor alto de coherencia (Coher=0.48) para un periodo de aproximadamente 4 meses con un desfase de casi 2 meses. Respecto de SSN, se observa que el mayor desfase es cercano a los dos meses, con un valor de coherencia de 0.31 para el periodo de 32 meses.

## CONCLUSIONES

- Del análisis de coherencia y fase con los caudales medios mensuales, se concluye que las series analizadas tienen teleconexiones, en particular IOD está relacionado con los periodos entre 6 y 8 meses, las manchas solares SSN y SOI con los periodos entre 2 y 3 meses, mientras que SAMI está relacionada con los periodos entre 4 y 5 meses.
- Las fases de adelanto están entre 1 y 3 meses respecto del registro de datos de caudales, pero debe tenerse en cuenta que todas las series analizadas como causales poseen pronósticos que permitirían considerar fases de adelanto de al menos 6 meses respecto de los caudales medios mensuales.
- Las series IOD y SSN tienen altos valores de coherencia para los periodos superiores a siete meses, mientras que las series SAMI, SSN y SOI están más relacionadas con las variaciones de periodos inferiores a cuatro meses.
- La información obtenida a través de esta técnica de análisis, permite establecer varias opciones de configuración de estructuras de datos de entrada para una nueva generación de modelos de pronóstico de los caudales medios mensuales del río Chubut en Los Altares.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**Blackman, R.B. & Turkey, J.W.** (1958). "The Measurement of Power Spectra from the Point of View of Communications Engineering". *Bell Labs Technical Journal*, Vol. 37, Issue I, January 1958, pp. 185-282.

## **RECONSTRUCCIÓN DE EVENTOS METEOROLÓGICOS DE MAGNITUD PARA LA CALIBRACIÓN HIDROLÓGICA DEL RADAR METEOROLÓGICO ARGENTINO RMA1 - CÓRDOBA**

**Gastón Petroli, Ricardo Ingaramo, Jorge Saffe, Agustín Martina, Ignacio Montamat, Andrés Rodríguez, Celina Furbatto, Denis Poffo, Sergio Menajovsky, Mariana Pagot y Alberto Villa Uría**

Laboratorio de Hidráulica – Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

Av. Filloy s/n, Córdoba, Argentina – 0351 4332098

E-mail: [gaston.petroli@gmail.com](mailto:gaston.petroli@gmail.com) - Web: [http://www.inv.lab\\_hidraulica.efn.uncor.edu/](http://www.inv.lab_hidraulica.efn.uncor.edu/)

### **RESUMEN**

La reconstrucción de eventos meteorológicos, particularmente la estimación de la tasa de precipitación a partir de mediciones de un radar meteorológico, es un tema de interés para una amplia gama de aplicaciones hidrológicas.

La Provincia de Córdoba se caracteriza por la ocurrencia de eventos extremos, como las tormentas tipo convectivas desarrolladas en época estival de gran variabilidad espacial y temporal, con picos de lluvia de gran intensidad.

El empleo de los radares permite generar pronósticos a corto y muy corto plazo con adecuada definición espacial y temporal, pero producen estimaciones poco precisas de la intensidad de lluvia caída. Por esta razón, es necesario integrar los datos de esta herramienta con registros pluviométricos de superficie y con información proveniente de otros sensores remotos, a fin de ajustar los algoritmos que permiten realizar transformar los ecos medidos por el radar en precipitación.

En este trabajo se presenta la reconstrucción de eventos pluviométricos de diferente extensión espacial y temporal, detectados por el Radar Meteorológico (RMA1) de Córdoba, perteneciente al Sistema Nacional de Radares Meteorológicos, medidos simultáneamente por estaciones meteorológicas automáticas en superficie administradas por distintos organismo, complementada con imágenes satelitales.

### **ABSTRACT**

The reconstruction of meteorological events, in particular the estimation of rate of precipitation from measurements of meteorological radar, is a topic of interest for a wide range of hydrological applications.

Córdoba province is characterized by the occurrence of extreme events, such as convective storms developed in summer, with considerable spatial and temporal variability, with high rainfall peaks.

The use of radars allows the generation of forecasts in the short and very short time adequate spatial and temporal definition, buy produce inaccurate estimates of rainfall intensity. For this reason, it is necessary integrate radar's data with information from other remote sensors, in order to adjust the algorithms that allow to transform the echoes measured by the radar in precipitation.

In this paper the reconstruction of rainfall events of different spatial and temporal extent, detected by the Meteorological Radar (RMA1) of Córdoba, belonging to the National Meteorological Radar System, measured simultaneously by automatic surface meteorological stations administered by different organisms, with satellite images is presented.

**Palabras Clave: Radar Meteorológico, Estaciones Meteorológicas, Imágenes Satelitales, Calibración Hidrológica.**

## **INTRODUCCIÓN**

La distribución espacial de la precipitación es un dato muy importante para las aplicaciones hidrológicas. Sin embargo, el éxito de las simulaciones de este tipo depende fuertemente de una adecuada cuantificación de la precipitación y de un apropiado modelo de distribución en el terreno. Si bien los radares meteorológicos se han transformado en una herramienta ideal para el monitoreo de lluvia debido a la cobertura especial de gran escala que permiten, la calidad de las estimaciones sigue siendo aún un desafío para este tipo de herramientas (Gerstner, M. y Hernemann, G. et al., 2016).

Los radares meteorológicos permiten generar pronósticos con una elevada resolución espacial y temporal, pero producen estimaciones poco precisas de la intensidad de lluvia caída en un punto dado (Comes et al., 2016. Petroli et al., 2016. Rodriguez et al., 2016). Por esta razón, es necesario integrar los datos del radar con registros pluviométricos de superficie y con información proveniente de otros sensores remotos, como por ejemplo, los satélites, a fin de ajustar los algoritmos que realizan la transformación de los ecos electromagnéticos medidos por el radar en precipitación (Comes et al., 2016). Esto permite, mediante la utilización de varios instrumentos y herramientas, concretar el proceso de calibración (hidrológica) del Radar Meteorológico.

La instalación del Radar Meteorológico Argentino (RMA1) en la Ciudad de Córdoba se enmarca dentro del Proyecto SINARAME (Sistema Nacional de Radares Meteorológicos), cuyo objetivo es el desarrollo de radares de última generación, su fabricación en el país y su integración a un Centro de Operaciones dependiente del Servicio Meteorológico Nacional que opere los nuevos radares y los ya existentes, para optimizar las prestaciones del Sistema (Bertoni et al., 2015).

Se espera que el RMA1 genere información a corto y muy corto plazo para la previsión de eventos hidrometeorológicos, como lluvia, granizo y nubes de polvo, entre otros. Para un uso apropiado de la información obtenida por el RMA1 se requiere iniciar un proceso de calibración "electrónica" que garantice la medición de datos precisos de reflectividad, y otro de calibración "hidrológica", que permita una adecuada transformación de los datos de reflectividad en precipitación (Comes et al., 2016)

El propósito de este artículo es presentar los lineamientos utilizados para el relevamiento de eventos pluviométricos registrados por las estaciones meteorológicas de superficie en la Provincia de Córdoba que se encuentran dentro del área de cobertura del Radar Meteorológico Argentino RMA1-Córdoba, necesarios para iniciar el proceso de la calibración hidrológica del mismo.

## **OBJETIVOS**

El objetivo general del trabajo es describir las primeras tareas realizadas orientadas a la calibración hidrológica del RMA1. Para lo cual, se pueden enumerar los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar las estaciones meteorológicas automáticas con registros de precipitación

para tormentas que fueron medidas simultáneamente por las mismas y por el RMA1;

2. Describir el relevamiento de datos pluviométricos en estaciones de superficie;
3. Identificar los eventos meteorológicos de mayor interés para la calibración hidrológica del RMA1;
4. Presentar dos casos de estudio relacionados con el relevamiento y análisis de datos pluviométricos, mostrando, a su vez, una comparación entre estos registros y los valores de factor de reflectividad medidos por el radar.

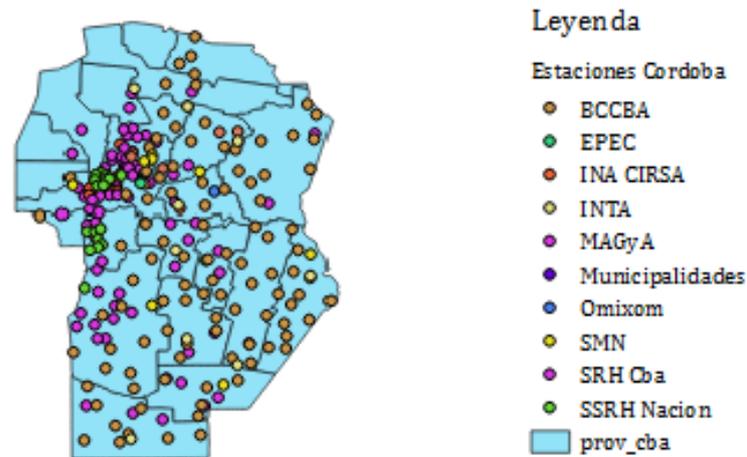
## MATERIALES Y MÉTODOS

La Provincia de Córdoba cuenta con una extensa red de estaciones meteorológicas, tanto automáticas como convencionales, que operan con distinta tecnología y miden diversas variables meteorológicas y con distinta frecuencia. Las estaciones son administradas y operadas por distintos organismos provinciales y nacionales, públicos y privados: Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba, Instituto Nacional del Agua – Centro de la Región Semiárida (INA-CIRSA), Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Córdoba, Sub Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Bolsa de Cereales de la Provincia de Córdoba, algunos organismos municipales e instituciones privadas.

La Tabla 1 resume la cantidad de estaciones meteorológicas por institución, con una distribución espacial en la provincia ilustrada en la Figura 1.

**Tabla 1. - Estaciones de Córdoba por institución**

INSTITUCION	ESTACIONES
SRH Cba	49
INA-CIRSA	21
Municipalidades	7
EPEC	3
Omixom	1
MAGyA	30
BCCBA	104
INTA	10
SMN	9
SSRH Nacion	17
<b>TOTAL</b>	<b>251</b>

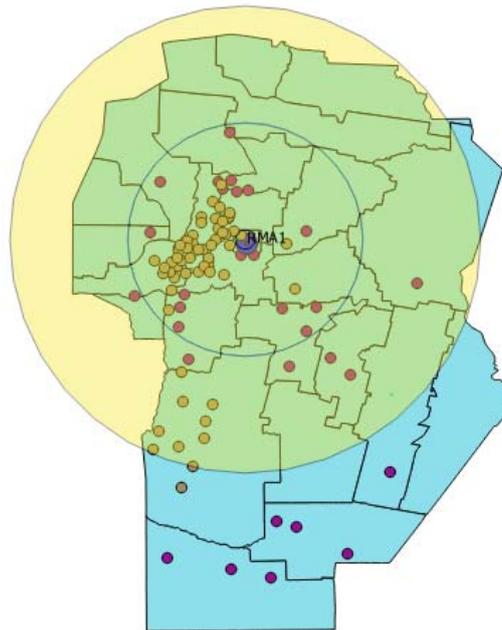


**Figura 1.-** Red de estaciones de la Provincia de Córdoba

Sin embargo, si bien hay disponibles más de 200 estaciones meteorológicas telemétricas, no todas pueden ser utilizadas a los fines de la calibración hidrológica del radar. Esto es debido a dos razones: no se tiene acceso a los datos o bien el propietario de la estación sólo proporciona datos diarios, lo que en una primera instancia no es de utilidad para cumplir con los objetivos propuestos ya que el RMA1 provee valores del factor de reflectividad en un intervalo más pequeño, acorde a los avances en la calibración electrónica del sensor y de la estrategia de barrido, actualmente cada 7 minutos aproximadamente.

Por otro lado, el radar trabaja con distintas estrategias de operación de acuerdo a la distancia al fenómeno meteorológico y tipo de variable polarimétrica que se desea obtener, por ejemplo puede ser configurado para medir en un rango máximo de: 120 km (Doppler), 240 km (convencional) y 480 km (vigilancia). Este último se utiliza para la detección temprana de frentes de tormenta que se acercan a la zona de cobertura. Por consiguiente, las estaciones que se encuentren fuera de los 240 km de cobertura del radar también fueron descartadas del análisis.

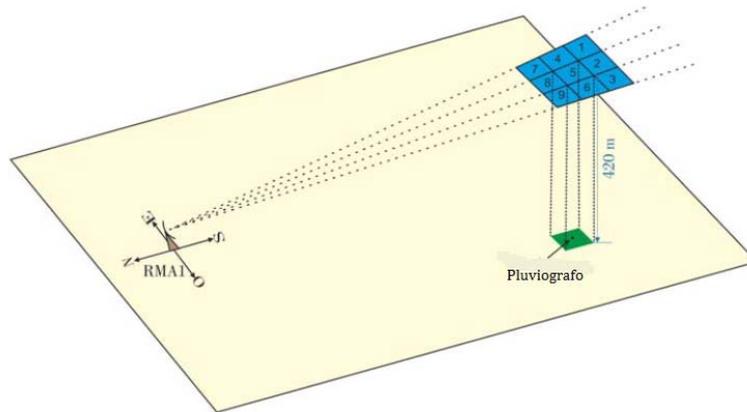
Debido a las razones planteadas en los párrafos anteriores, solo 84 estaciones van a ser consideradas para la calibración del radar RMA1, que pueden observarse en la Figura 2.



**Figura 2.-** Red de estaciones meteorológicas de la Provincia de Córdoba empleadas para la calibración hidrológica del RMA1

El primer trabajo orientado a la calibración hidrológica del RMA1 consistió en el análisis de un evento de lluvia y granizo que azotó a la localidad de Anizacate (y sitios aledaños), ubicada aproximadamente a 40 km al Sur del lugar de emplazamiento del radar, el día 7 de noviembre de 2015. Dicho evento se caracterizó por ser un fenómeno del tipo convectivo, muy localizado espacialmente, con caída de granizo durante los primeros minutos de la tormenta (observación directa). Fue registrado por el sensor remoto entre las 19:50 y las 20:35 hs. (UTC). Los datos recibidos permitieron realizar el seguimiento de la tormenta y detectar el momento preciso de la caída de lluvia y de granizo, obteniéndose la duración e intensidad de la precipitación (Comes et al., 2016).

Con el fin de facilitar el análisis y correlación de los datos proporcionados por el RMA1 y un pluviógrafo ubicado en la zona de mayor impacto de la tormenta bajo estudio (Anizacate), se eligieron nueve celdas para una elevación del radar a  $0,5^\circ$ . Estas celdas conforman un arreglo matricial de 3x3 elementos de manera la celda central está ubicada exactamente con la vertical que pasa por el pluviógrafo, como se observa en la Figura 3. Con los datos disponibles de alcance y las coordenadas geográficas tanto del RMA1 como de la estación meteorológica se pudo determinar que la celda central se encontraba a unos 420 m de altura sobre el pluviógrafo.



**Figura 3.-** Esquema de emplazamiento relativo a los instrumentos de observación de la precipitación en la zona de Anizacate

El siguiente trabajo destinado a la calibración hidrológica del radar consistió en un relevamiento de datos pluviométricos y de vientos de las estaciones meteorológicas con disponibilidad de información y que se encuentren dentro del área de cobertura del RMA1. De esta manera, con los datos de precipitación se realizaría la correlación de los mismos con los valores de factor de reflectividad determinado por el radar, ajustando el modelo matemático correspondiente. Con los registros de viento se intenta analizar su influencia en la dirección de caída de gotas de lluvia, ajustando las mediciones del radar y las estaciones meteorológicas en superficie.

Para seleccionar las estaciones a considerar en cada evento, se superponen las estaciones meteorológicas en superficie con imágenes geolocalizadas de variables polarimétricas (típicamente es utilizado el Factor de Reflectividad Horizontal (ZH)) generadas por el radar en los sucesivos barridos durante el transcurso del evento (formando aproximadamente la "mancha" de la tormenta), tal como se muestra en la Figura 4. La intersección de esta información determina las estaciones a relevar, seleccionándose así los datos pluviométricos que van a ser comparados con las mediciones realizadas por el RMA1.



**Figura 4.-** Mosaico de la tormenta y estaciones involucradas

La información de las variables meteorológicas fueron obtenidos de las bases de datos online del Servicio de información web del Sistema Telemétrico INA-CIRSA-SSRHyC cuyas estaciones operan con tecnología denominada ALERT, pertenecientes al INA-CIRSA y a la Secretaría de Recursos Hídricos de Córdoba, y del servidor web OMIOM de las estaciones que utilizan esta tecnología, algunas pertenecientes a la Secretaría de Recursos Hídricos de Córdoba y otras al Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia. En esta última base de datos fue posible adquirir los datos de viento.

Para un evento determinado, como primera medida se buscaron reseñas históricas relacionadas con la ocurrencia de la tormenta. Esto brinda una referencia de la magnitud de la misma y en qué lugares se tuvo mayor repercusión, lo que ayuda en la identificación de las características del fenómeno hidrometeorológico.

Posteriormente, se realizó la búsqueda de datos medidos para el evento. Los mismos se almacenaron en una planilla Excel, la cual contiene fecha y horario en que se registraron los datos de lluvia, y en el caso de las estaciones que utilizan tecnología OMIOM se relevaron además de velocidad de viento, consistente en un promedio de la magnitud en el intervalo considerado, velocidad de ráfaga máxima y dirección del viento. Adicionalmente, se encuentra disponible información referida a temperatura ambiente, presión atmosférica, humedad relativa, radiación, etc., que por el momento no se ha tomado en cuenta para el análisis.

Para compatibilizar los datos del Radar (que vienen en horario UTC) con los de las estaciones (que vienen con la hora oficial de Argentina), fue necesario plantear un horario común a ambas fuentes de medición, optándose por expresarlo en Hora UTC (Tiempo Universal Coordinado).

## EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Se identificaron un total de 12 tormentas monitoreadas simultáneamente por el radar RMA1 y las estaciones meteorológicas en superficie, en el período que va desde Septiembre de 2015 hasta Marzo de 2017.

La Tabla 2 resume para estos eventos la fecha de ocurrencia, la cantidad de estaciones involucradas y la estación que registró la máxima precipitación acumulada para el evento.

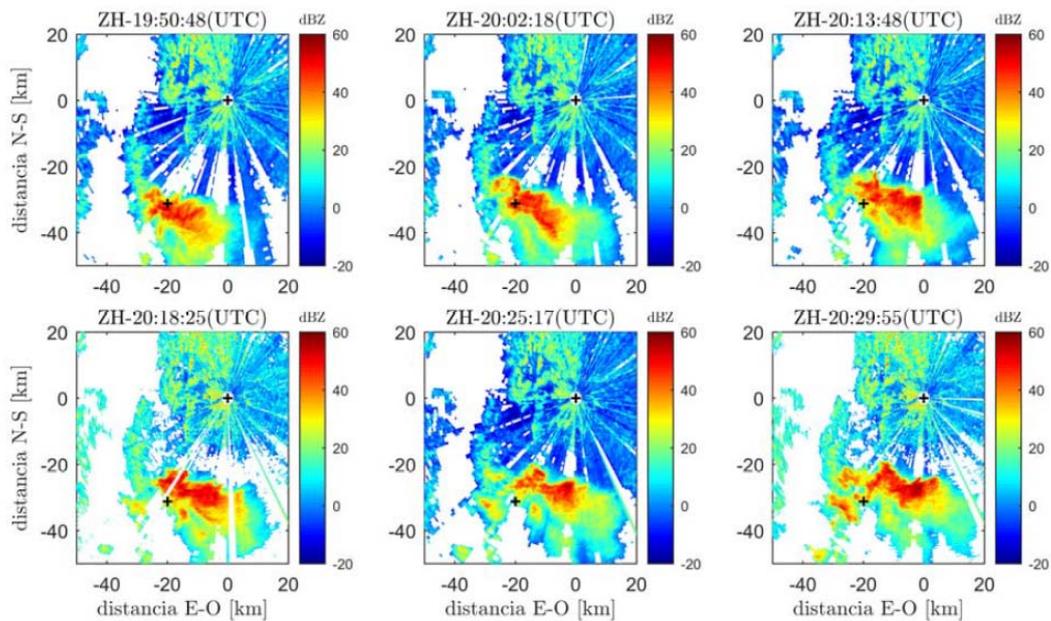
**Tabla 2.** - Resumen de eventos relevados

Fecha del evento	Estaciones	Máxima Precipitación Acumulada	Estación correspondiente a la Precipitación Máxima
8-sep-2015	16	37	Los Chañaritos (SRH 5200)
4-nov-2015	49	202	Tres Arboles (SRH 5060)
7-nov-2015	19	65	Anizacate (SRH 1600)
10-nov-2015	67	83	Puerto Garay (INA CIRSA 900)
17-nov-2015	67	95	Santo Tomas (INA CIRSA 100)
15-feb-2016	39	60	La Posta (INA CIRSA 3400)
23-feb-2016	54	116	COSAG (SRH 3800)
24-feb-2016			
29-feb-2016	25	88	COSAG (SRH 3800)
7-mar-2016	68	144	Tres Arboles (SRH 5060)
4-oct-2016	77	59	Marcos Juarez (INTA)
28-mar-2017	15	52	Anizacate (SRH 1600)

Entre los diversos eventos analizados, resultan de interés las tormentas del 7 de noviembre de

2015 por ser un evento muy localizado de tipo convectivo, como ya se ha mencionado en párrafos anteriores, y la ocurrida el 7 de marzo de 2016, por su extensión temporal y espacial.

En el caso de la primera tormenta, se realizó un seguimiento completo del evento observado a través del RMA1. La Figura 5 muestra una secuencia de seis registros de factor de reflectividad medidos. En la imagen se identifica la posición del radar con una cruz negra en el punto (0,0) y la posición de la estación meteorológica con otra cruz negra que se encuentra en las inmediaciones donde se acusa mayor actividad del evento (sector rojo intenso).



**Figura 5.-** Registros de factor de reflectividad medidos como una secuencia temporal de izquierda a derecha. Con la posición del RMA1 en la posición (0,0) y la posición de la estación meteorológica con cruces negras

Se analizaron y procesaron los registros de precipitaciones en la fecha de ocurrencia del evento, en la estación de Anizacate y en el resto de las estaciones dentro de la misma cuenca, encontrándose registros distintos de cero solo en el sensor de la estación mencionada. Se elaboraron los hietogramas en intervalos de 1 a 15 minutos. Luego, se analizó la información cada 5 minutos por considerarse un intervalo pertinente para observar características de interés y ser coherente con la duración aproximada de 45 minutos del evento.

El registro de superficie asociado al evento estudiado también presentó una duración de 45 minutos con una precipitación acumulada de 53 mm. La máxima lámina registrada fue de 12 mm en 5 min, lo que implica una intensidad media máxima en dicho intervalo de 144 mm/h, como se observa en el hietograma de la Figura 6. Se observa una importante variabilidad temporal de las intensidades a pesar de su corta duración. En relación a su distribución espacial, se verificó la ocurrencia localizada en la región de Anizacate, constituyendo un evento considerado como intenso.

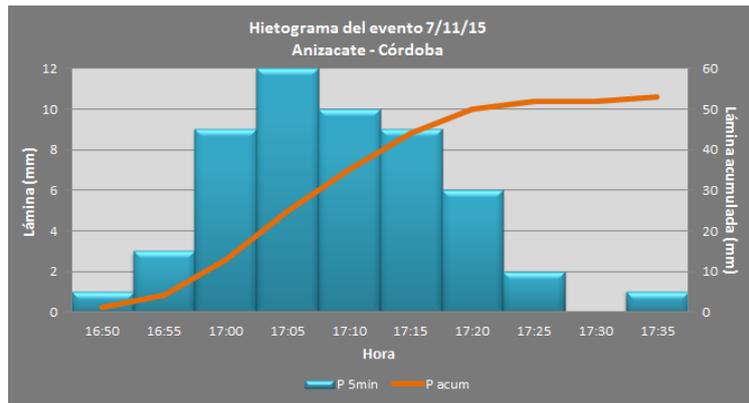


Figura 6.- Hietograma y precipitación acumulada del evento del 7/11/2015. Estación Anizacate

En la Figura 7 se muestran los datos del factor de reflectividad obtenidos a partir de las observaciones del RMA1 sobre los nueve sectores explicados, que fueron procesados y ordenados para producir las representaciones graficas que superponen dichos datos con la tasa de precipitación registrada por el sensor de Anizacate a lo largo del periodo de desarrollo del evento hidrometeorológico.

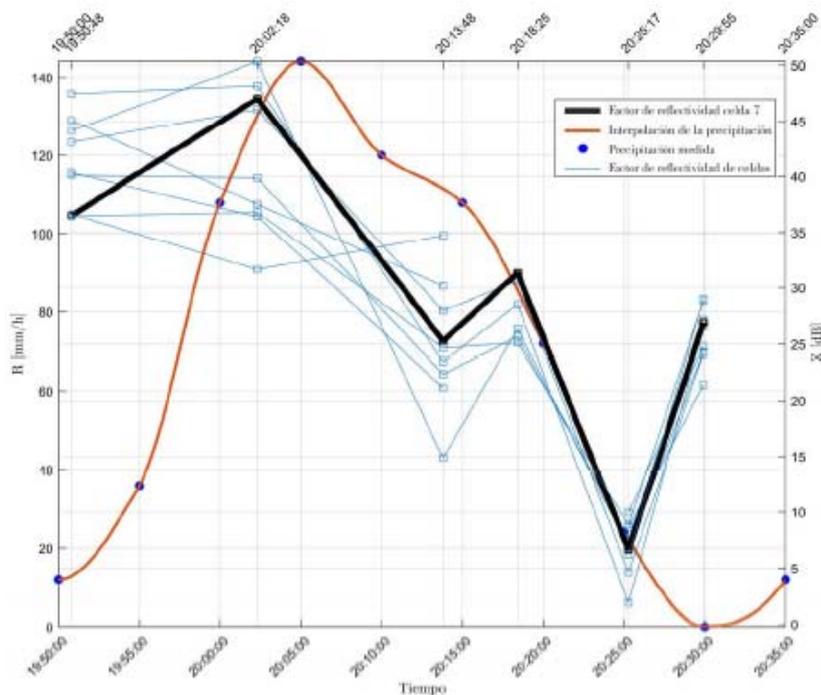


Figura 7.- Intensidad de la precipitación R (mm/h) y factor de reflectividad Z (dB) vs tiempo para el evento del 7/11/2015. Estación Anizacate

Una primera observación de las gráficas revela un retraso de la escala de tiempo en las abscisas. Este comportamiento es indicativo de una relación causa-efecto debido a que la tasa de precipitación registrada por el pluviógrafo resulta de la caída de los hidrometeoros que previamente fueron registrados por el radar cuando se encontraban por encima del sensor.

Lo segundo que se puede observar es una clara correlación entre las partes descendentes de las curvas, tanto de las celdas registradas por el RMA1 como de los datos registrados por el sensor de precipitación. Este paralelismo en el comportamiento de las curvas no se observa tan claramente en los tramos iniciales, observándose que cuando el factor de reflectividad

crece ligeramente o decrece, la tasa de precipitación comienza un rápido ascenso con un retraso del mismo orden observado en el tramo decreciente. La interpretación del repentino aumento en la tasa de precipitación corresponde al derretimiento de granizo acumulado sobre el embudo de la boca del pluviógrafo que había caído anteriormente cuando el radar registraba el valor más elevado del factor de reflectividad.

También es notoria la mayor coincidencia del comportamiento de las curvas del factor de reflectividad en función del tiempo para las nueve celdas que componen el área barrida por RMA1 sobre la estación meteorológica de Anizacate en los estadios finales de la tormenta. Esta coincidencia se explica por la mayor uniformidad en la distribución de tamaños de las partículas de precipitación que aún subsisten en las celdas observadas.

En el caso de la tormenta del 7 de marzo de 2016 se realizó un relevamiento de datos de las variables meteorológicas que tuvieron lugar en el evento de gran extensión espacial y temporal. Para este relevamiento se tuvo en cuenta un período de tres días centrado en el evento, debido a que en general no se conoce ni la duración, ni el momento exacto de ocurrencia de la tormenta, ni el de su máxima intensidad.

Se esquematizaron los hietogramas de la lluvia registrada en los sensores de precipitación para un intervalo de 10 minutos, compatibilizando la frecuencia de medición de ambas tecnologías involucradas (ALERT y OMIKXOM). En forma superpuesta se graficó la precipitación acumulada del evento en la estación. Se muestra como ejemplo, en la Figura 8, el hietograma de la estación Tres Arboles, donde se registró la máxima precipitación para esta tormenta.

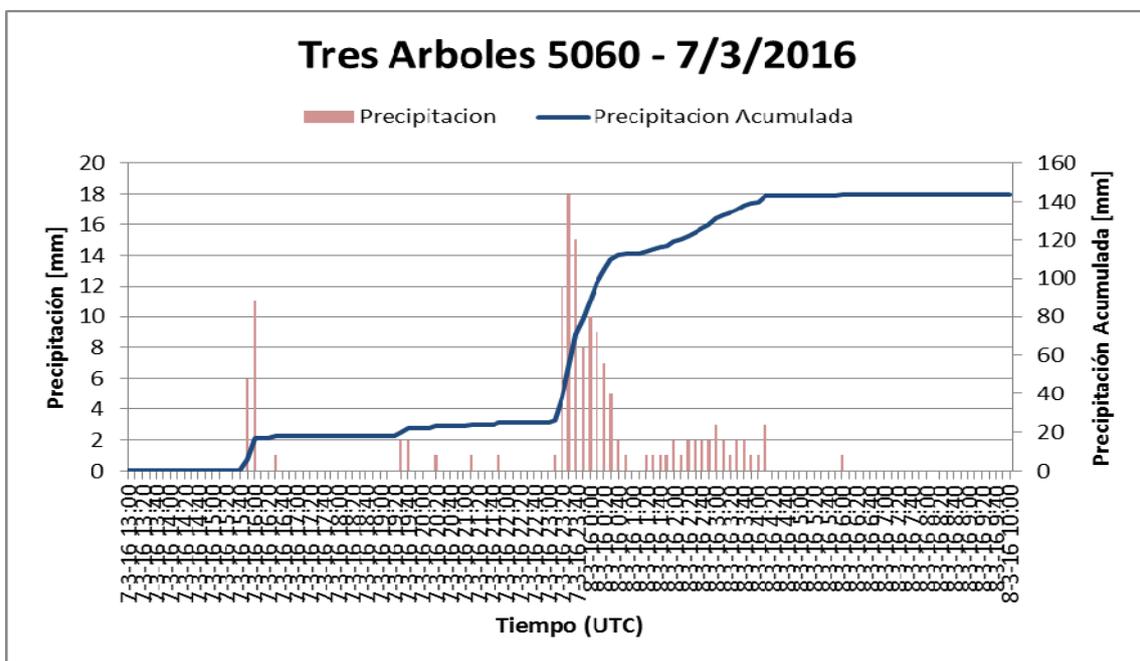


Figura 8.- Hietograma de la Estación Tres Arboles - Tormenta 07/03/2016

Por otro lado, para analizar los vientos se plantearon diferentes herramientas. La primera consistió en graficar en forma superpuesta la velocidad promedio en el intervalo de 10 minutos, la ráfaga máxima y la dirección del viento en el intervalo. La Figura 9 muestra este análisis para la estación de 60 Cuadras.

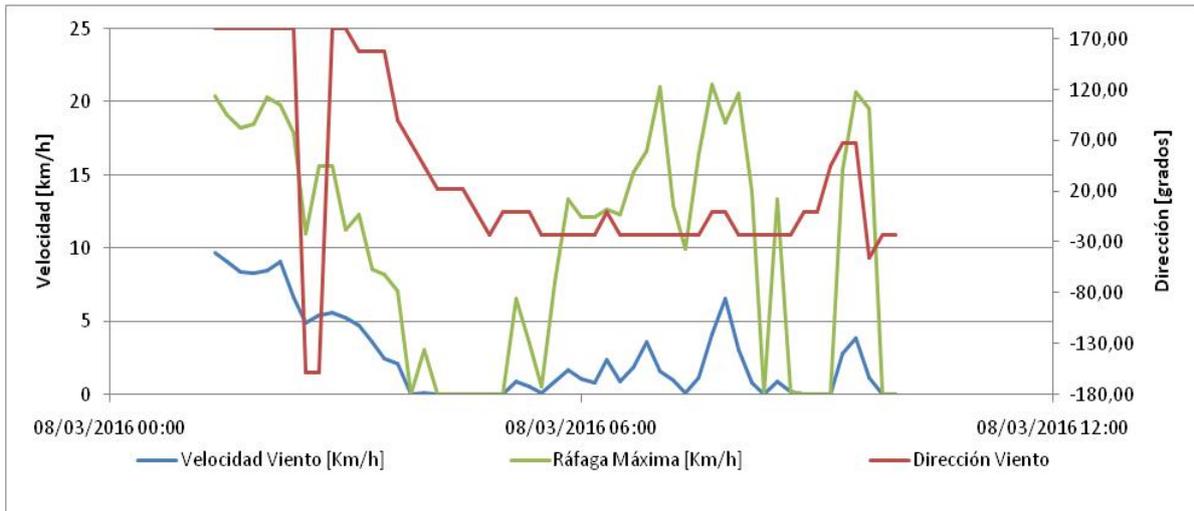


Figura 9.- Análisis de vientos de la tormenta del 7/3/2016 para la estación de 60 cuadras

Otra opción fue trasladar los datos a coordenadas polares y graficar velocidad y dirección, tal como se muestra en la Figura 10. En este caso se puede ver con mayor claridad la dirección predominante representada por la cantidad de datos en esa dirección. También se observa claramente la velocidad máxima registrada por el sensor de la estación meteorológica.

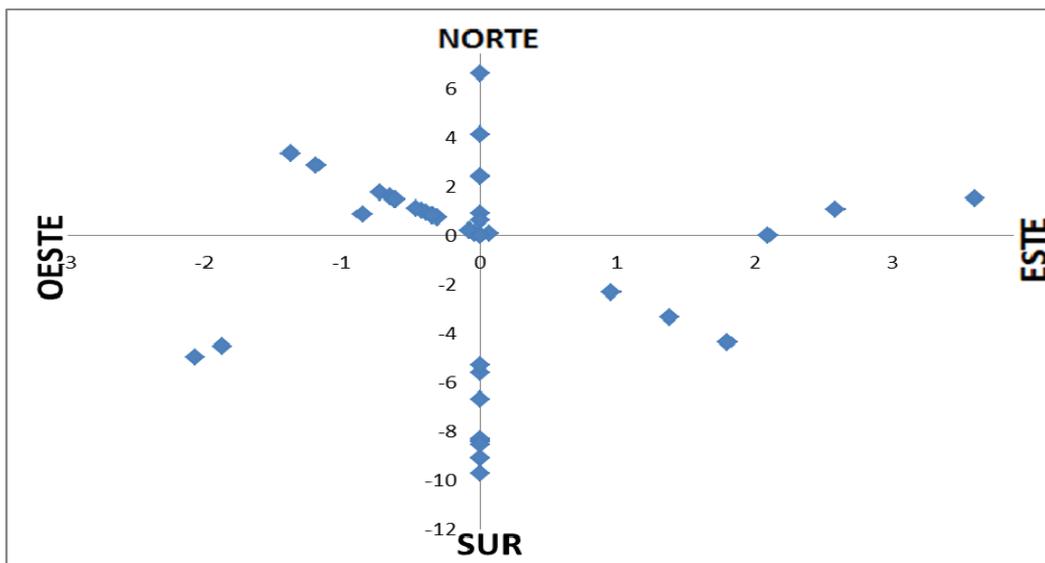
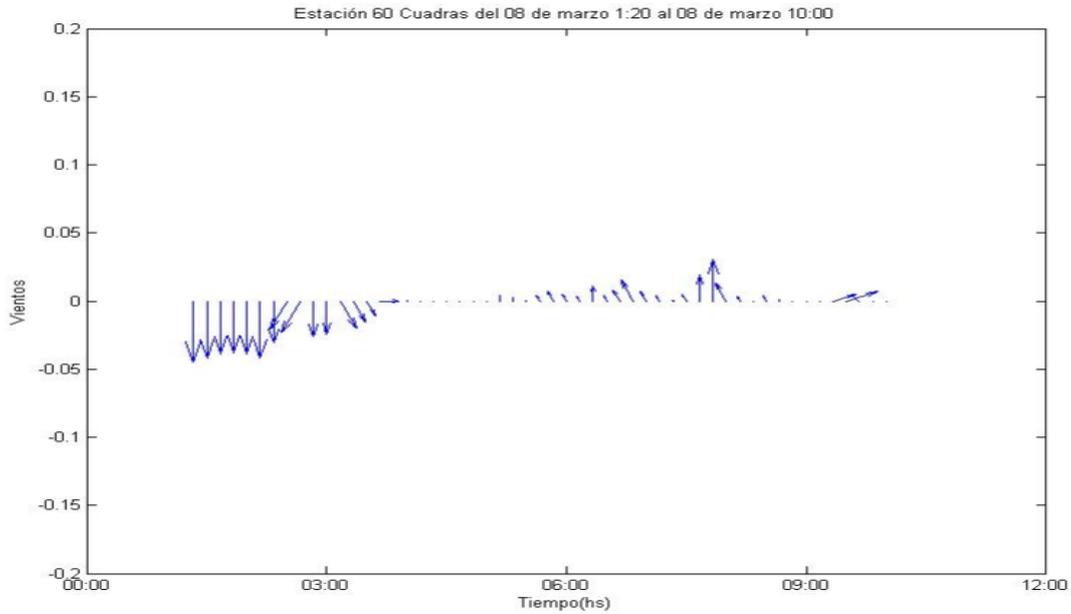


Figura 10.- Análisis de vientos de la tormenta del 07/03/16 para la estación de 60 Cuadras

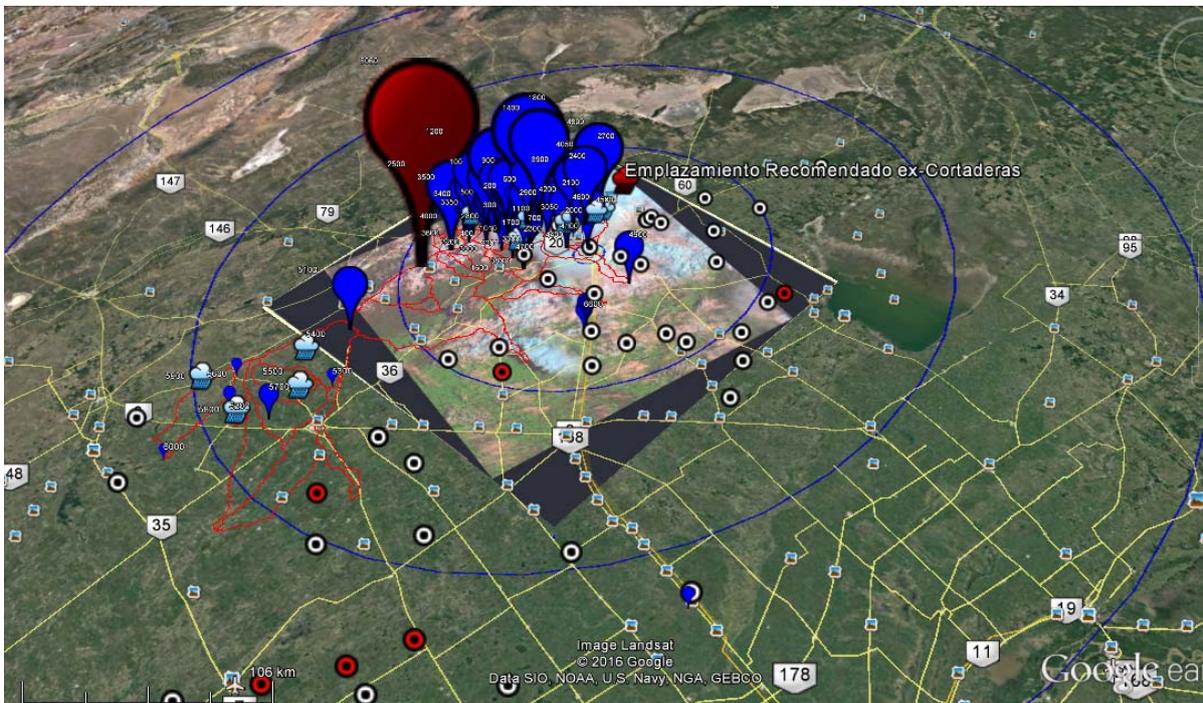
Por último, en lo referente a vientos, se muestra en la Figura 11 la evolución temporal de los mismos, representando la intensidad y dirección por medio de vectores utilizando el software MATLAB, para lo cual fue necesario calcular previamente las coordenadas cartesianas del vector viento.



**Figura 11.-** Evolución temporal del viento de la tormenta del 07/03/2016 para la estación 60 cuadras

Las diferentes representaciones gráficas de vientos se efectuaron con la intención de encontrar la herramienta que permita la mejor descripción del comportamiento de este fenómeno.

Para obtener mejor perspectiva a la hora de comparar el comportamiento de las tormentas, se volcaron los datos pluviométricos en gráficos como el de la Figura 12, donde se muestra la precipitación acumulada en las estaciones que se encuentran dentro de la cobertura del radar, superpuestas con una imagen satelital de la serie Landsat 8, lo cual da una intuición de la evolución temporal de la tormenta.



**Figura 12.-** Precipitación acumulada - Tormenta 07/03/2016

Como puede observarse, dentro de un mismo evento se verifica una gran variabilidad tanto temporal como espacial. Los resultados muestran las estaciones que revelan precipitaciones de mayor importancia, que van a ser utilizadas para la posterior comparación con las medidas de reflectividad arrojadas por el radar.

## CONCLUSIONES

Este trabajo muestra el procedimiento general de relevamiento de tormentas monitoreadas simultáneamente por el RMA1 y estaciones meteorológicas de superficie. En primer lugar fue necesario identificar la red de estaciones de superficie que brindan información de utilidad para la calibración hidrológica del radar y posteriormente determinar los eventos de interés.

Uno de los mayores inconvenientes de este trabajo es la falta de acceso público a los datos de algunas instituciones, como los de la Bolsa de Cereales de Córdoba, que son de carácter privado y poseen una gran cantidad de estaciones en la Provincia. Actualmente se está trabajando sobre la posibilidad de adquirir esos datos, los cuales serían de gran utilidad para cumplir los objetivos planteados en el proceso de calibración hidrológica del RMA1.

El evento ocurrido el 7 de noviembre de 2015, analizado con el RMA1 y la estación meteorológica ubicada en la localidad de Anizacate, es el primer antecedente específico en la integración de datos de reflectividad medidos por un radar y de precipitación medida en superficie, corroborando que el RMA1 posee la capacidad de detectar eventos severos de precipitación dentro de su área de cobertura. Sin embargo, el trabajo muestra el comienzo de un largo proceso conducido a la calibración hidrológica del radar, durante el cual se debe analizar distintos tipos de hidrometeoros, en diferentes épocas del año y en distintas regiones del área de cobertura.

Por otro lado, está prevista la incorporación del uso de disdrómetros que permitirán la medición del tamaño de gotas que caen en la superficie. Toda esta información será de gran utilidad para la optimización de los algoritmos de cálculo de precipitación implementados en el RMA1.

Por último hay que tener presente que tanto la calibración electrónica del radar como el análisis de consistencia de datos pluviométricos a corto plazo están aún en proceso de ejecución, los cuales son aspectos fundamentales para mejorar la calidad de la información relevada que alimentarán los algoritmos de transformación de las mediciones del radar en tasa de precipitación, haciendo del radar una herramienta que proporcione resultados confiables para las aplicaciones previstas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Bertoni, J.C., Caranti, G., Catalini, C., Cioccale, M., Comes, R., Furbatto, C., Ingaramo, R., Martina, A., Menajovsky, S., Poffo, D., Rodríguez, A., Saffe, J., Smrekar, M., Vicario, L., Villa Uría, A. (2015) "Puesta en marcha del primer Radar Meteorológico Argentino RMA1 en la Universidad Nacional de Córdoba" *XXV Congreso Nacional del Agua - CONAGUA 2015*. ISBN 978-987-27407-4-0.**

**Comes, R. - Ingaramo, R. - Poffo, D. - Furbatto, C. - Saffe, J. - Vicario, L. - Dasso, C. - Rodríguez, A. - Bertoni, J. - Caranti, G. - Catalini, C. - Martina, A. - Menajovsky, S. -**

**Montamat, I. - Rico, A. - Rodríguez González, S. - Serra, J. - Villa Uría, A. (2016).** “Empleo del Radar Meteorológico Argentino RMA1 para la detección de un evento severo”, *XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Lima, Perú.

**Gerstner, E. y Heinmann G. (2016).** “Real-time areal precipitation determination from radar by means of statistical objective analysis”, *Journal of Hydrology*, Pages 296-308.

**Petroli, G. – García, M. – Masin, F. – Corral, M. – Ingaramo, R. – Rodríguez, A. (2016).** “Análisis de tormentas medidas en superficie para la calibración hidrológica del Radar Meteorológico Argentino RMA1 – Córdoba”, *III Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos*, Ezeiza, Argentina.

**Rodríguez, A. – Ingaramo, R. – Caranti, G. – Comes, R. – Bertoni, J. - Martina, A. – Saffe, J. – Montamant, I. – Poffo, D. – Rodríguez Glez., S. – Furbatto, C. – Petroli, G. - Sonn, P. – Díaz, E. – VillaUría A. – Herrero, H. – Tarrab, L. (2016).** “Integración de sensores hidrometeorológicos para monitoreo y alerta en la Región Centro de Argentina”, *V Taller sobre Diseño Hidrológico*, Salta, Argentina.

# IMPLEMENTACIÓN PROGRESIVA DEL CANON DE APROVECHAMIENTO AGRÍCOLA DE AGUAS PÚBLICAS EN LA PROVINCIA DE CORRIENTES RESULTADOS PRELIMINARES

**Natalia Pianalto, Mariana Sosa, Mario Rujana y Carlos Gauna**

Instituto Correntino del Agua y del Ambiente  
Bolívar 2275. CP w3400 – Corrientes – Argentina. Tel. 0379-4460960  
E-mail: npianalto@icaa.corrientes.gov.ar - Web: <http://icaa.gov.ar/>

## RESUMEN

El Instituto Correntino del Agua y del Ambiente, autoridad de aplicación del Código de Aguas que establece: “los concesionarios de derecho de aguas públicas, (...), pagarán un canon anual (...) el que será fijado anualmente por la Autoridad de Aplicación...”. Mediante la Resolución N° 293/12 y su modificatoria, Resolución N° 502/15, el ICAA estableció el Reglamento de Canon para Uso de las Aguas Públicas, cuya implementación fue progresiva desde la campaña agrícola 2012/2013 (25% del valor) hasta la campaña agrícola 2015/2016 (100% del valor). La última etapa se encuentra a la fecha del presente trabajo, en proceso de efectivo pago; por lo que se hace un análisis preliminar de la respuesta ante la herramienta de gestión aplicada. El canon es actualizado anualmente con el precio del arroz cáscara y rendimiento por zona en la provincia de Corrientes. Así mismo la Resolución N° 653/12, establece “...los concesionarios que totalicen una superficie equivalente o menor a 600 hectáreas quedan exceptuados del pago de canon...”. La respuesta ha sido variada, con aceptación del 95-93% en las dos primeras etapas, al 62% y 47% en las tercera y cuarta respectivamente. Hasta Marzo 2017, se han recaudado \$ 2.286.251,78. Serán invertidos en instrumental que ayude a mejorar el conocimiento del recurso y su gestión. El número de concesionarios que no han abonado canon deberá ser disminuido apelando a medidas no estructurales de gestión.

## ABSTRACT

The Instituto Correntino del Agua y del Ambiente, the enforcement authority of the Water Code that establishes: "Public water concessionaires, (...), will pay an annual fee (...) which will be fixed annually by the Enforcement Authority ..." Through Resolution No. 293/12 and its amendment, Resolution No. 502/15, the ICAA established the Canon Regulation for the Use of Public Waters, which was implemented progressively from the 2012/2013 agricultural season (25% of the value) to the Agricultural campaign 2015/2016 (100% of value). The last stage is at the date of the present work, in process of effective payment; So a preliminary analysis of the response to the applied management tool is done. The fee is updated annually with the price of paddy rice and yield per area in the province of Corrientes. Likewise Resolution No. 653/12, establishes "... concessionaires that total an area equivalent to or less than 600 hectares are exempt from the payment of canon ...". The response has been varied, with acceptance of 95-93% in the first two stages, to 62% and 47% in the third and fourth respectively. As of March 2017, \$ 2,286,251.78 has been collected. They will be invested in instruments that help improve the knowledge of the resource and its management. The number of concessionaires who have not paid canon should be reduced by appealing to non-structural management measures.

## INTRODUCCIÓN

La Provincia de Corrientes forma parte de la llamada Mesopotamia Argentina, y por su ubicación en el territorio argentino está comprendida dentro del grupo de las provincias del litoral, al nordeste de la República Argentina, como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1.-** Ubicación Geográfica de la Provincia de Corrientes en la República Argentina (Fuente: IGN).

En la Provincia de Corrientes, el Instituto Correntino del Agua y del Ambiente (ICAA), organismo autárquico del Estado Provincial, es autoridad de aplicación en los temas concernientes a Recursos Hídricos y Gestión Ambiental, constituido como tal mediante Decreto Ley N° 212/01 el 6 de diciembre de 2001. Su autoridad es el Administrador General.

El gobierno y la administración de las aguas de jurisdicción provincial están a cargo del ICAA. Es órgano ejecutor del Código de Aguas de la provincia (Decreto Ley N° 191/01) y de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental (Ley N° 5.067). Tiene entre sus funciones la de procurar una administración racional y adecuada de los recursos hídricos.

Dicha normativa en su título VII, del Régimen Financiero de los Recursos Hídricos, Capítulo II del Canon y otros gravámenes, establece en su artículo 257° que “los concesionarios de derecho de aguas públicas, cualquiera sea la utilización a la que se la destine, pagarán un canon anual de acuerdo a las disposiciones de este Código el que será fijado anualmente por la Autoridad de Aplicación, determinando la fecha en que los usuarios deberán efectuar dicho pago”.

La instrumentación de la percepción del canon y derechos de aguas establecidos en la normativa vigente se halla en concordancia con lo establecido en los Principios Rectores de la Política Hídrica de la República Argentina plasmados en el ámbito del Consejo Hídrico Federal (COHIFE) y adoptados por el “Acuerdo Federal del Agua”, suscripto por el titular del ICAA el 17 de septiembre de 2003 en la ciudad de Buenos Aires.

El canon es concebido como contraprestación dineraria por el uso especial de un bien que pertenece a toda la comunidad, y cuya recaudación se destinará a la reinversión en el sector hídrico de forma directa para la gestión del agua.

De acuerdo al DL 191/01, el pago del canon en razón de la concesión obtenida constituye una de las obligaciones de los concesionarios.

Con vistas a lograr la efectiva implementación de los artículos mencionados del DL 191/01, el

ICAA dictó la Resolución N° 293 (R293/12) con fecha 13 de junio de 2012 y su modificatoria Resolución N°502 (R502/15) con fecha 04 de agosto de 2015, mediante la cual se establece la metodología de cálculo del canon a aplicar a los concesionarios de Uso Agrícola de Aguas Públicas.

Hasta el mes de octubre del año 2012 los derechos de uso de aguas públicas registradas y en efectivo ejercicio del derecho alcanzaron un total de 80 concesiones de aguas superficiales, 7 concesiones subterráneas y 1 permiso provisorio de aguas superficiales. De estos 88 derechos, 80 fueron otorgados para el riego del cultivo de arroz, y 8 para el riego de cultivo cereales y forrajeras. Razón por la cual el canon de aprovechamiento agrícola se basa exclusivamente en el cultivo mencionado de arroz.

La R293/12 establece la reglamentación básica de aplicación del canon, caracterizada por:

- Actualización anual
- Zonificación de las concesiones
- Implementación progresiva, en cuatro etapas de incremento gradual

La actualización anual se realiza en base al precio de arroz cáscara pagado al productor en chacra. Esta información es provista por el Servicio de Información Agroeconómica del Ministerio de Producción del gobierno provincial. Asimismo, se tiene en cuenta el informe de cosecha que se emite anualmente dando a conocer los rendimientos medios por zona productiva. Las cuatro zonas productivas del cultivo de arroz en la Provincia de Corrientes se muestran en la figura 2.

La implementación progresiva se estableció en cuatro etapas sucesivas y progresivas aplicándose a partir de la campaña agrícola 2012/2013 (25% del valor de canon), la segunda etapa se aplica en la campaña agrícola 2013/2014 (50%) y se alcanzará el 100% del valor del canon en la campaña agrícola 2015/2016.



Figura 2.- Zonas productivas de arroz de la Provincia de Corrientes.

El cálculo de monto anual de canon, siguiendo lo establecido en el reglamento se realizó en base a la ecuación (1).

$$\text{Canon} = \frac{D}{R} \times S \times PU \times C \quad (1)$$

Donde,

S, Superficie a irrigar, expresado en hectáreas.

R, Rendimiento, expresado en toneladas por hectárea.

D, Dosis de riego, expresado en litros por segundo

PU, Precio unitario promedio anual del arroz cáscara, proporcionado por el Servicio de Información Agroeconómica del Ministerio de Producción de la Provincia de Corrientes, expresado en pesos por tonelada.

C, Coeficiente que depende de la obra hidráulica que se emplea para la captación y riego.

- Coeficiente presas: 0,035
- Coeficiente de estaciones de bombeo: 0,040
- Coeficiente de perforaciones: 0,045

El rendimiento que se considera para el cálculo corresponde al informe de fin de cosecha que anualmente emite la Asociación Correntina de Plantadores de Arroz (ACPA), para cada zona de producción arroceras según la figura 2.

El canon puede ser abonado en un único pago con una reducción del 15% (quince por ciento), o bien en 12 (doce) cuotas mensuales consecutivas con vencimiento el día 10 (diez) de cada mes a partir del mes de julio del año, aplicándose a campaña agrícola vencida.

Hasta tanto se realicen los estudios definitivos para la determinación de la unidad económica de producción de arroz, se encuentran exceptuados de aplicación de canon los concesionarios que totalicen una superficie menor o igual a 600 hectáreas (según la Resolución N° 651/12).

## **OBJETIVOS**

En virtud de la normativa que implementa el canon, se desarrolló el presente trabajo a fin de valorar la implementación del canon de aprovechamiento agrícola de aguas públicas en la Provincia de Corrientes habiéndose cumplido las etapas de la implementación progresiva.

## **MATERIALES Y METODOS**

Para la realización del presente trabajo se han empleado:

- Registros de Concesiones y Permisos de Usos de Aguas Públicas de la Provincia de Corrientes.
- Base de datos de pagos percibidos.

### **1.1 Usuarios a abonar canon**

Para establecer los concesionarios a abonar canon por aprovechamiento agrícola de aguas públicas se tomó del registro de concesiones la siguiente información:

- a) Tipo de derecho
- b) Número de registro
- c) Titular o Beneficiario
- d) Superficie concesionada o permitida
- e) Tipo de obra hidráulica vinculada al derecho de uso otorgado

## f) Zona productiva donde se emplaza la actividad vinculada al uso de agua

A partir de esta información se confeccionaron las nóminas de concesionarios y permisionarios. Posteriormente se identificaron los usuarios que se encuentran exceptuados de pago de canon y los que se encuadran según la normativa vigente en pasibles de pago. En la tabla 1 se discriminan los usuarios identificados por campaña agrícola que deben abonar canon.

**Tabla 1.-** Cantidad de Usuarios de Aguas Públicas que deben abonar canon por campaña agrícola

	Campaña Agrícola			
	2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016
Concesiones Superficiales	56	60	53	64
Permisos Superficiales	0	9	10	10
Permisos Subterráneos	0	1	1	1

### 1.2 Precio del arroz cáscara

De acuerdo a los registros del Servicio de Información Agroeconómica del Ministerio de Producción del Gobierno de Corrientes, el precio promedio anual del arroz cáscara se calcula de julio del año anterior a junio del año posterior (ejemplo: período de julio 2011 a junio 2012) ; teniendo en cuenta eso el precio por tonelada (\$/tn) para los distintos períodos fue de 2011/2012 917\$/tn, 2012/2013 de 1.151 \$/tn, 2013/2014 1.743,1 \$/tn, 2014/2015 2.202,78 \$/tn, 2015/2016 2.070,83 \$/tn.

### 1.3 Rendimiento promedio por zona productiva

De acuerdo a los informes de cosecha por campaña agrícola emitidos en forma conjunta por el Ministerio de Producción y la Asociación Correntina de Plantadores de Arroz (ACPA) los rendimientos medios por zona son:

**Tabla 2.-** Rendimiento medio por zona productiva

Zonas	Rendimiento T ha-1 por Campaña			
	2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016
1 Centro Sur	7,34	7,21	7,07	7,4
2 Costa río Uruguay	6,86	6,58	6,37	6,6
3 Paraná Sur	6,23	6,42	6,44	6,4
4 Paraná Medio	5,67	5,81	5,65	5,7
Promedio Provincia	6,73	6,50	6,38	6,53

### 1.4 Cálculo del canon a aplicar

Con las nóminas de concesionarios y permisionarios obtenidas se confeccionó una planilla de Excel para realizar el cálculo del monto de canon a aplicar en cada caso y el valor a abonar en las diferentes etapas de implementación de acuerdo a lo establecido en la R293/12 y su modificación R502/15.

El valor de canon así calculado para las diferentes campañas agrícolas varía dependiendo de la zona productiva y del tipo de obra hídrica que abastece al sistema de riego entre los valores máximos y mínimos que se indican en la tabla 3.

**Tabla 3.-** Valores Mínimos y Máximos calculados para canon por campaña.

Valores extremos de Canon por Campaña Agrícola (\$ ha-1)			
2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016

Mínimo	8,74	11,17	17,26	20,84
Máximo	12,94	15,85	24,68	30,98
Año de pago	2014	2015	2016	2017

**RESULTADOS**

El resumen de pagos y deudas de canon por aprovechamiento de aguas públicas registrados en el ICAA, correspondientes a las diferentes campañas agrícolas, se presentan en la tabla 4.

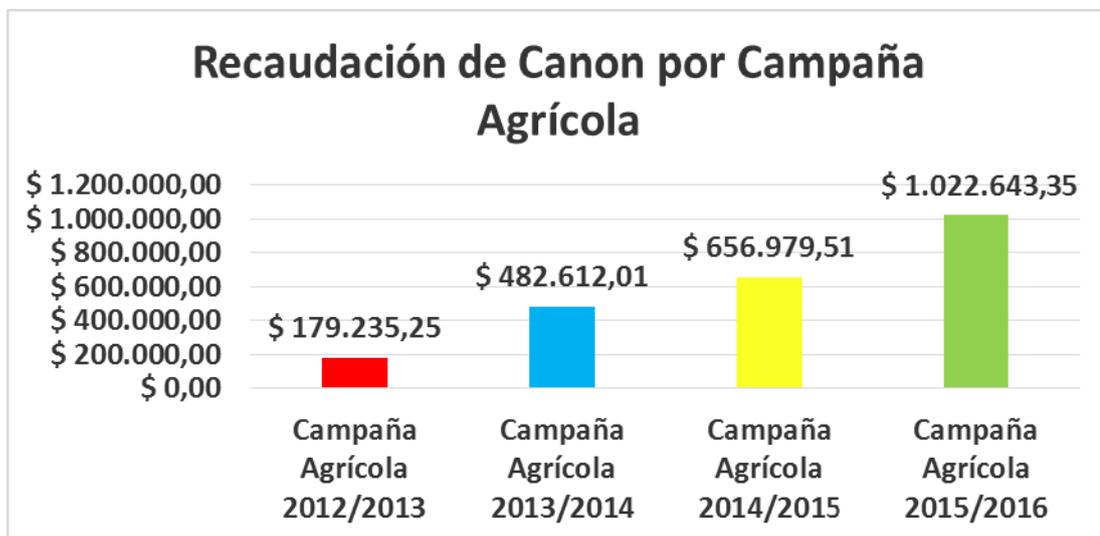
**Tabla 4.-** Resumen de pagos y deudas de canon.

	Campaña Agrícola			
	2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016
Cantidad de Usuarios al día	53	66	40	36
Cantidad de Usuarios deudores	3	4	24	39

En las últimas dos campañas se observa una merma en los pagos registrados en el ICAA correspondientes a canon.

Cabe destacar que en numerosos casos se han detectado usuarios que realizan el pago, pero no remiten el correspondiente comprobante para la verificación pertinente y el efectivo registro.

Las recaudaciones realizadas mediante la implementación de esta herramienta de gestión se muestran en detalle para cada campaña agrícola en la figura 3. Hasta el mes de Abril de 2017 la recaudación total alcanzó: \$ 2.341.470,12.



**Figura 3.-** Recaudaciones obtenidas por el ICAA en concepto de canon por aprovechamiento agrícola de aguas.

Estos fondos son utilizados en compras de instrumental que ayuda a mejorar el conocimiento del recurso y de este modo mejorar su gestión.

Del resultado obtenido se denota una aceptación razonable de la norma aplicada. A pesar de la diferencia entre el número de usuarios de aguas públicas a abonar el canon, el nivel de aceptación general se ha mantenido constante.

El ICAA se encuentra desarrollando tareas de identificación de las causas de falta de pago, así como la implementación de instrumentos regulatorios para facilitar la incorporación de la cultura de pago en los usuarios.

## CONCLUSIONES

Las dos primeras etapas de implementación del canon resultaron de nivel de aceptación por parte de los usuarios de aguas públicas muy buena, mientras que para la tercer y cuarta etapa de implementación se han detectado demoras en el pago y en la comunicación de pago, por lo que los resultados se muestran menos favorables.

Será necesario recurrir a herramientas de gestión, tales como medidas no estructurales para mejorar la aceptación del canon tales como la difusión de la información de los destinos de los fondos recaudados a partir de los mismos y los objetivos que con ello se persigue, y contribuir así a la formación de la cultura de pago por el uso del recurso hídrico.

## LISTA DE SÍMBOLOS

ICAA: Instituto Correntino del Agua y del Ambiente

DL: Decreto Ley

COHIFE: Consejo Hídrico Federal

R293: Resolución N°293

R502: Resolución N°502

S: Superficie a irrigar, expresado en hectáreas.

R: Rendimiento, expresado en toneladas por hectárea.

D: Dosis de riego, expresado en litros por segundo

PU: Precio unitario promedio anual del arroz cáscara, proporcionado por el Servicio de Información Agroeconómica del Ministerio de Producción de la Provincia de Corrientes, expresado en pesos por tonelada.

C: Coeficiente que depende de la obra hidráulica que se emplea para la captación y riego.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Asociación Correntina de Plantadores de Arroz.** 3er. Informe Campaña 2011/2012: Fin de Cosecha. [http://www.acpaarrozcorrientes.org.ar/Informes\\_arroceros.html](http://www.acpaarrozcorrientes.org.ar/Informes_arroceros.html)

**Asociación Correntina de Plantadores de Arroz.** 3er. Informe Campaña 2012/2013: Fin de Cosecha. [http://www.acpaarrozcorrientes.org.ar/Informes\\_arroceros.html](http://www.acpaarrozcorrientes.org.ar/Informes_arroceros.html)

**Asociación Correntina de Plantadores de Arroz.** 3er. Informe Campaña 2013/2014: Fin de Cosecha. [http://www.acpaarrozcorrientes.org.ar/Informes\\_arroceros.html](http://www.acpaarrozcorrientes.org.ar/Informes_arroceros.html)

**Asociación Correntina de Plantadores de Arroz.** 3er. Informe Campaña 2014/2015: Fin de

Cosecha. [http://www.acpaarrozcorrientes.org.ar/Informes\\_arroceros.html](http://www.acpaarrozcorrientes.org.ar/Informes_arroceros.html)

**Decreto Ley N° 191/01** Código de Aguas de la Provincia de Corrientes.  
[http://www.icaa.gov.ar/?page\\_id=678](http://www.icaa.gov.ar/?page_id=678)

**Decreto Ley N° 212/01** Instituto Correntino del Agua y del Ambiente.  
[http://www.icaa.gov.ar/institucional/DecretoLey\\_212\\_01\\_CreacionICAA.pdf](http://www.icaa.gov.ar/institucional/DecretoLey_212_01_CreacionICAA.pdf)

<http://www.ign.gov.ar/areaservicios/descargasgratuitas/mapamudos>

**Principios Rectores de Política Hídrica Nacional.** Consejo Hídrico Federal. Año 2003.

**Registro de Concesiones de Uso de Aguas Públicas de la Provincia de Corrientes.** (2015)  
Instituto Correntino del Agua y del Ambiente.

**Registro de Permisos de Uso de Aguas Públicas de la Provincia de Corrientes.** (2015)  
Instituto Correntino del Agua y del Ambiente.

**Resolución N° 293/12** Instituto Correntino del Agua y del Ambiente, Reglamento de Canon de Aprovechamiento Agrícola de Aguas Públicas.  
[http://www.icaa.gov.ar/Documentos/Ingenieria/res293\\_12.pdf](http://www.icaa.gov.ar/Documentos/Ingenieria/res293_12.pdf)

**Resolución N° 502/15** Instituto Correntino del Agua y del Ambiente, Reglamento de Canon de Aprovechamiento Agrícola de Aguas Públicas. Modificatoria.

**Resolución N° 651/12** Instituto Correntino del Agua y del Ambiente, Regula la superficie mínima pasible de canon.

**Servicio de Información Agroeconómica, Ministerio de Producción, Gobierno de Corrientes.** Precios Promedios Mensuales Pagados al Productor en Chacra en la Provincia de Corrientes.

## **EVQ4000 – SISTEMA DE ADQUISICIÓN, ALMACENAMIENTO Y VISUALIZACIÓN DE PARÁMETROS HIDROMETEOROLÓGICOS**

**S. Prenna, N. D. Secco, M. A. Ferrer, L. R. Perazzolli**

EVARSA - Evaluación de Recursos S.A.  
San Martín 161, Cipolletti, Río Negro. Tel: (0299) 477-2091 / 1843  
sprenna@evarsa.com.ar, nsecco@evarsa.com.ar, mferrer@evarsa.com.ar, rperazzolli@yahoo.com.ar - Web:  
www.evarsa.com.ar

### **RESUMEN**

El Sistema EVQ4000 desarrollado por EVARSA es un conjunto de elementos de hardware y software destinado a la adquisición, transmisión, almacenamiento y publicación de datos hidrometeorológicos y medio ambientales a través del sistema de satélites de órbita baja Orbcomm y la red celular GSM/GPRS.

El presente trabajo se centra en la descripción del sistema en su conjunto y las capacidades del mismo, comenzando por una descripción general y abarcando luego la descripción de los dataloggers/transmisores con que se puede implementar y la variedad de sensores con que éstos son compatibles. Seguidamente se presentan las características de los distintos módulos de software que componen el sistema, los cuales son los encargados de configuración de las unidades remotas, la recepción y almacenamiento de datos, y la visualización y extracción de los mismos. Se abarca con mayor detalle el módulo de visualización de datos, dado que cuenta con diversidad de formatos y funcionalidades.

En la actualidad el Sistema EVQ4000 se encuentra integrado a diversas Redes de Alerta y Monitoreo de la República Argentina, con lo cual se muestran, a modo de conclusión y demostración de las capacidades del mismo, ejemplos de aplicación, estadísticas de funcionamiento y posibles configuraciones para la visualización de datos en Centros de Alerta y Monitoreo.

### **OBJETIVOS**

El objetivo del presente trabajo es mostrar las posibilidades que ofrece el Sistema EVQ4000 en cuanto a la variedad parámetros que es posible medir en las estaciones remotas desarrolladas, y modos de visualización gráfica de los datos recibidos, demostrando aquí la capacidad de análisis a partir de estos.

Además, dado que para algunas redes es importante conocer la latencia del sistema en cuanto a la disponibilidad del dato para el usuario a partir de la toma del mismo en la estación, se analizan los tiempos de respuesta de los distintos sistemas de comunicación que soporta el sistema en la actualidad.

### **DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA**

El sistema EVQ4000 desarrollado por EVARSA es un conjunto de elementos de hardware y software destinado a la adquisición, transmisión, almacenamiento y publicación de datos hidrometeorológicos y medio ambientales a través del sistema de satélites de Órbita Baja Orbcomm y la Red Celular GPRS y/o SMS.

Está basado en los comunicadores Q4000 de la firma Quake en sus versiones Orbcomm y/o GPRS/GSM, aunque el software desarrollado es totalmente compatible con los comunicadores anteriores ST2500 de la desaparecida firma Stellar, aunque para estas últimas los sistemas GPRS/SMS no son aplicables ya que no son soportados por las mismas.

Básicamente las estaciones remotas transmiten reportes a una casilla de correo electrónico, mediante el sistema de transmisión adoptado; donde son leídos, decodificados y almacenados

centralizadamente por un servidor. Externamente se accede a dicha información mediante el componente monitor del sistema.

### DATALOGGERS / TRANSMISORES

Las estaciones remotas del sistema integran equipos de comunicación Q4000 de Quake con componentes electrónicos desarrollados por EVARSA, constituyendo un datalogger con transmisión incorporada. De esta forma la adquisición, almacenamiento y transmisión de las lecturas de los sensores son llevadas a cabo por esta serie de dataloggers/transmisores denominados EVQ4000-XX, los cuales dependiendo del modelo particular cuentan con comunicación GSM/GPRS, Orbcomm o ambas; y 2 o 16 entradas para sensores analógicos. Todos los modelos constan de 2 entradas digitales (ampliable hasta 8 entradas). En la Tabla 1 se detallan las características particulares de cada modelo.

Los modelos de equipos poseen una gran variedad de sensores con los que son compatibles, dado que las entradas analógicas admiten sensores con salidas estándar en los rangos 0 – 5 V ó 0 – 20 mA (más comúnmente 4 – 20 mA). Para las entradas digitales se tiene una funcionalidad especial asociada a un contador, para la conexión directa de sensores de precipitación a cangilones basculantes.

Para los modelos de 16 entradas analógicas, las mismas pueden ser configuradas de a pares, de manera de obtener, a partir de 2 entradas analógicas, una entrada de tipo diferencial para sensores con salidas de éste tipo.

**Tabla 1.- Modelos de transmisores de la serie EVQ4000-XX**

Modelo	Transmisión		Entradas		Conversor A/D
	Orbcomm	GSM/GPRS	Analógicas	Digitales	
EVQ4000-O2	X		2	2	12 bits
EVQ4000-G2		X	2	2	12 bits
EVQ4000-OG2	X	X	2	2	12 bits
EVQ4000-O16	X		16	2	16 bits
EVQ4000-G16		X	16	2	16 bits
EVQ4000-OG16	X	X	16	2	16 bits

En las Figuras 1 y 2 se muestran los dos modelos básicos de datalogger/transmisor, a saber: de 2 y 16 entradas analógicas respectivamente. Los modelos generados a partir de los diferentes modos de transmisión difieren solamente en el tipo y/o cantidad de conectores en el lateral del equipo.



Figura 1.- Datalogger y transmisor EVQ4000-O2

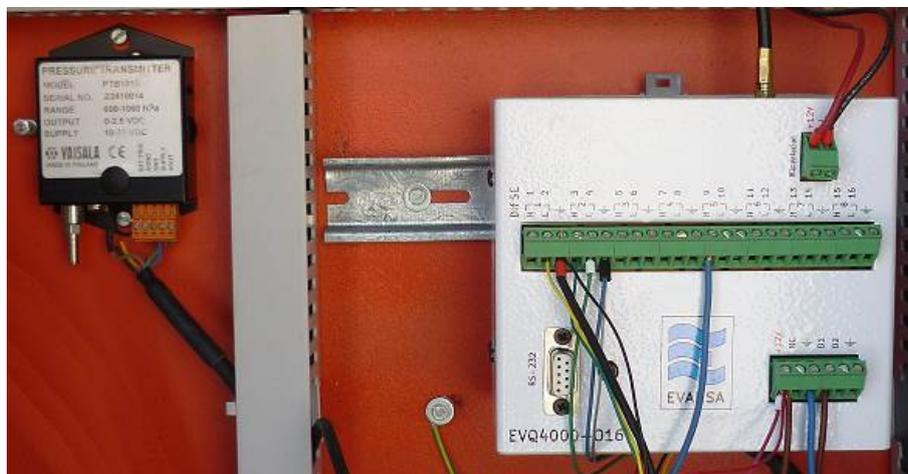


Figura 2.- Datalogger y transmisor EVQ4000-O16 instalado

## SOFTWARE CONFIGURADOR

Todos los transmisores/dataloggers expuestos anteriormente se configuran mediante un software específico, el cual presenta una serie de pantallas destinadas a configurar el modo de transmisión, los horarios de transmisión y almacenamiento de datos, el tipo de sensor a instalar, etc.

Cabe destacar que para todos los sensores existen opciones especiales de tratamiento de las lecturas, como pueden ser cálculo de máximos, mínimos, promedios, alisados, además de la adición de transmisiones excepcionales ocasionadas por alarmas de incremento, decremento, o valores de umbrales máximos y mínimos. En la Figura 3 se muestran distintas pantallas pertenecientes al módulo de software Configurador.

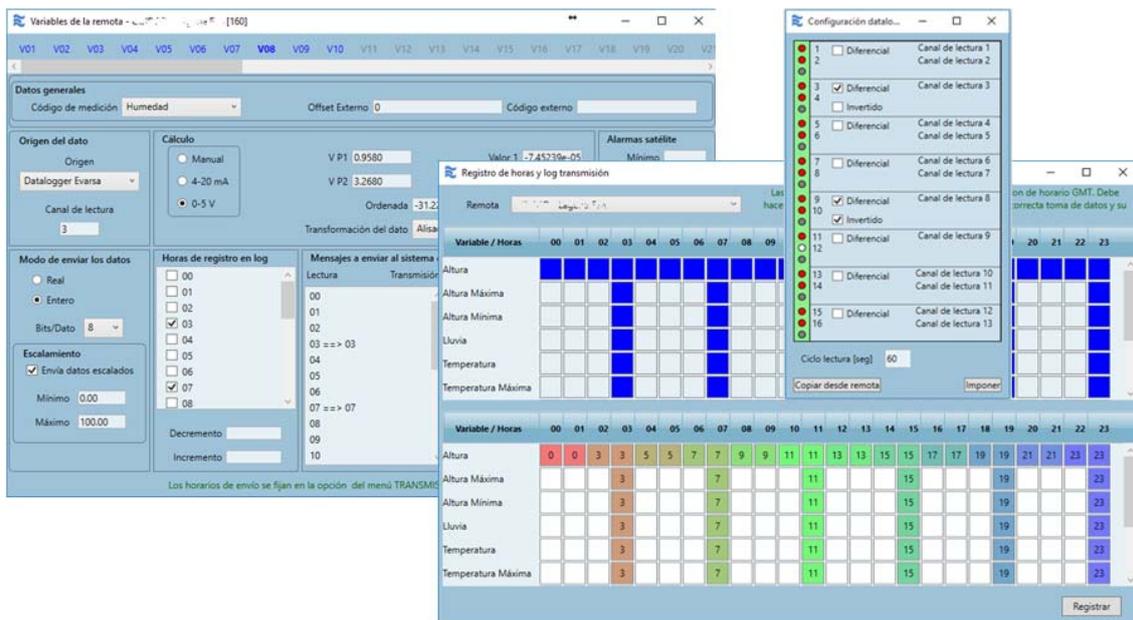


Figura 3.- Pantallas de configuración de sensores, horarios de transmisión y registro

### RECEPCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE DATOS

Los datos transmitidos por la estación remota recorren diferentes caminos dependiendo del modo de transmisión adoptado, como se puede apreciar en la Figura 4. En todos los casos, los reportes de datos son recibidos por un servidor central, el cual contiene un módulo de software dedicado a la decodificación de mensajes y almacenamiento de los valores recibidos en una base de datos SQL Server u Oracle.

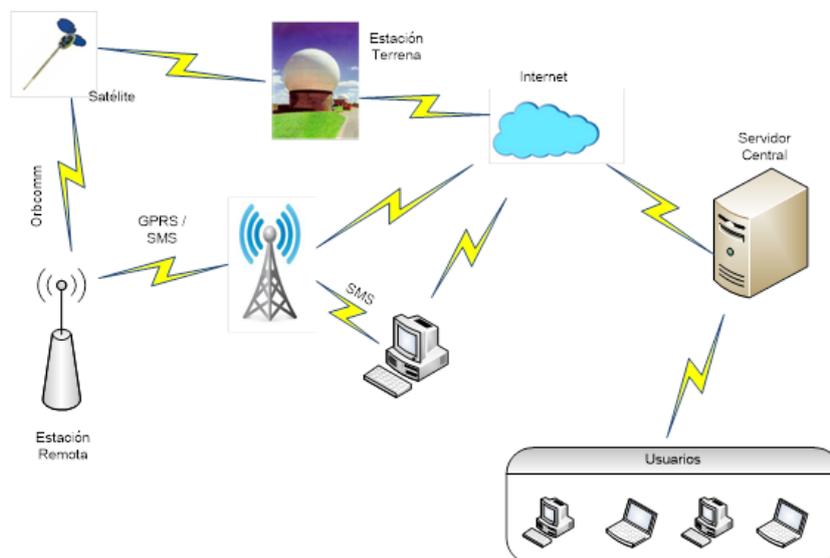


Figura 4.- Diagrama de flujo de información a través de las distintas redes de datos

El acceso a los datos almacenados en la base centralizada desde otra PC puede ser mediante el software Monitor (desarrollado en el apartado a continuación), o mediante consultas a un Webservice, el cual le permite al cliente desarrollar software propio que utilice los datos de la Red, para procesarlos y visualizarlos de manera personalizada. También desde el servidor

central se pueden generar reportes automáticos con datos en formato Excel que son enviados vía e-mail, en caso que se desee transmitir los mismos a agentes que no posean instalado el software Monitor.

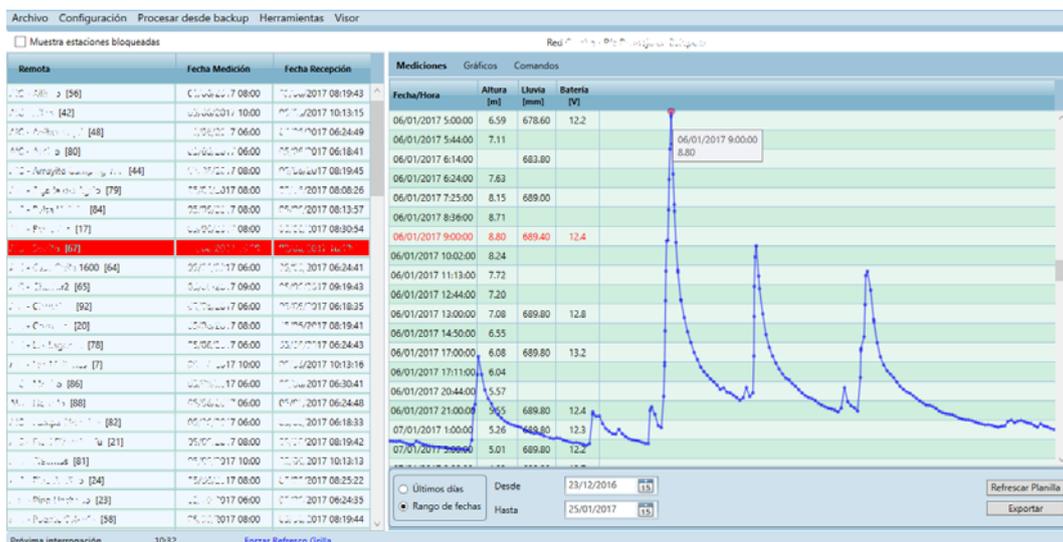
**SOFTWARE MONITOR**

Este módulo de software permite la visualización de datos almacenados en la base centralizada desde cualquier PC que posea conexión a internet.

Para la demostración de capacidades de publicación y análisis del sistema se utilizaron datos de estaciones con medición de lluvia y nivel de río ubicadas en una cuenca particular, y utilizando datos correspondientes a eventos de lluvia y crecidas sucesivas ocurridas en la cuenca durante el mes de Enero de 2017. En la Figura 5 se muestra la pantalla principal del Monitor, desde el cual se pueden visualizar a la izquierda la lista de estaciones del sistema, con información del estado de cada una. El color indica si la estación presenta un estado de servicio normal (celeste) o si presenta demoras en la recepción del dato, o bien ha quedado fuera de servicio por alguna causa (amarillo, naranja, rojo).

El sistema permite la creación de grupos de estaciones denominados Redes Hidrológicas, y de usuarios del sistema, pudiendo administrar, restringiendo o habilitando el acceso a los datos de las redes a diferentes usuarios del sistema.

Seleccionando cualquiera de las estaciones de la lista de estaciones, se despliegan en el panel de la derecha los últimos datos recibidos, pudiéndose modificar la cantidad de días a desplegar o el rango de fechas deseado. Como se muestra en la Figura 5 también es posible superponer gráficos de alguna variable sobre los datos listados, a fin de apreciar el comportamiento general de la misma en el intervalo seleccionado. Como otra característica de esta sección, los datos listados pueden ser exportados a archivos de texto plano o a planillas Excel.



**Figura 5.-** Pantalla principal del software Monitor

En otra pestaña del mismo software Monitor se encuentran las funciones dedicadas a graficar las distintas variables de la estación. En esta sección se permite la superposición de distintas variables, la utilización de escalas diferentes para cada una de ellas, funciones de zoom o, para el caso de lluvia, la visualización de la misma como intensidad o valores acumulados.

A modo de ejemplos, en las Figuras 6 y 7 se presenta un hidrograma de escorrentía para una estación de medición de niveles hidrométricos con sensor de precipitación representativa de una cuenca de llanura. Esta es una de las alternativas de visualización más prácticas para el análisis del comportamiento de una estación hidrometeorológica. En la primera imagen se visualiza la variable lluvia con valores acumulados, y en la siguiente con valores de intensidad.



**Figura 6.-** Relación Lluvia-Nivel de una Estación - Enero 2017



**Figura 7.-** Relación Lluvia-Nivel de una Estación - Enero 2017

**SOFTWARE MONITOR – VISOR**

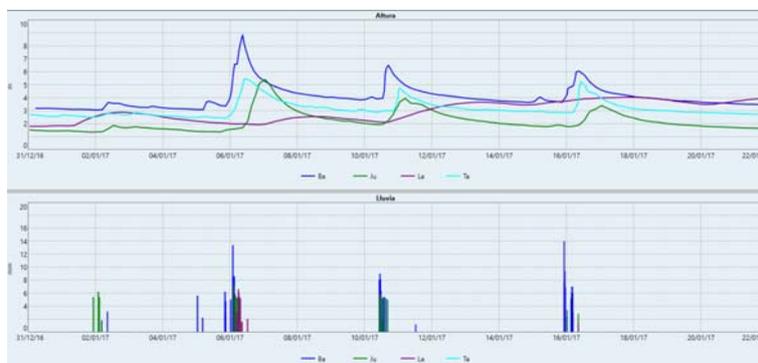
El software Monitor del sistema desarrollado en el apartado anterior posee también una funcionalidad que permite generar una serie de pantallas que se muestran cíclicamente y a pantalla completa para apreciar de manera fácil y rápida el estado de un grupo de estaciones que compongan una cuenca para su análisis o diagnóstico, característica deseable por ejemplo en Centros de Alerta, donde se cuenta a menudo con pantallas dedicadas a ésta funcionalidad.

Las distintas pantallas del Visor son totalmente configurables, pudiéndose definir la cantidad de pantallas diferentes, la cantidad de gráficos incluidos en cada una de ellas y las variables que serán mostradas en cada gráfico, las cuales pueden pertenecer a la misma o a distintas estaciones remotas. También se puede añadir a los gráficos niveles de referencia, que pueden actuar como niveles de Precaución y Riesgo para el caso de inundaciones en Redes de Alerta. Se destaca la capacidad de visualización del Sistema de Monitoreo para una Red de Estaciones definidas por el usuario, quien es el encargado a su vez de definir los criterios de selección de variables y estaciones a presentar en el gráfico descrito según las necesidades particulares de la Red.

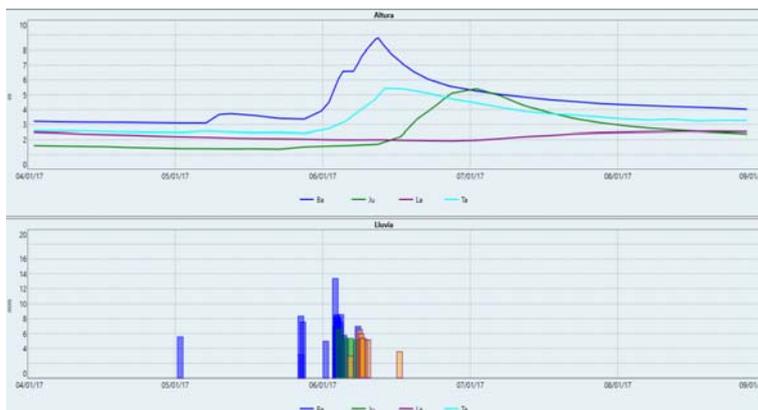
Como ejemplo de las funcionalidades del Visor, se muestra en las Figuras 8, 9, 10 y 11 una configuración particular para una Red determinada, en la cual se definieron 4 pantallas diferentes, en las cuales se muestran:

- Primer pantalla (Figura 8): Comportamiento de los niveles hidrométricos en cuatro estaciones pertenecientes a la misma cuenca, en relación con la intensidad de precipitación de cada una de las estaciones.
- Segunda Pantalla (Figura 9): Mismo gráfico que el caso anterior, con un intervalo de tiempo menor, que permite apreciar las crecidas con mayor detalle.
- Tercer Pantalla (Figura 10): Niveles de rio de un grupo de estaciones diferente, pero pertenecientes a la misma Red, con niveles de referencia para Precaución y Riesgo.
- Cuarta Pantalla (Figura 11): Gráficos con las distintas variables medidas por una estación meteorológica perteneciente a la Red.

Una vez configuradas las pantallas, al activar la funcionalidad del Visor éstas se muestran cíclicamente, mostrando los últimos datos recibidos.



**Figura 8.- Visor – Primer Pantalla**



**Figura 9.- Visor – Segunda Pantalla**

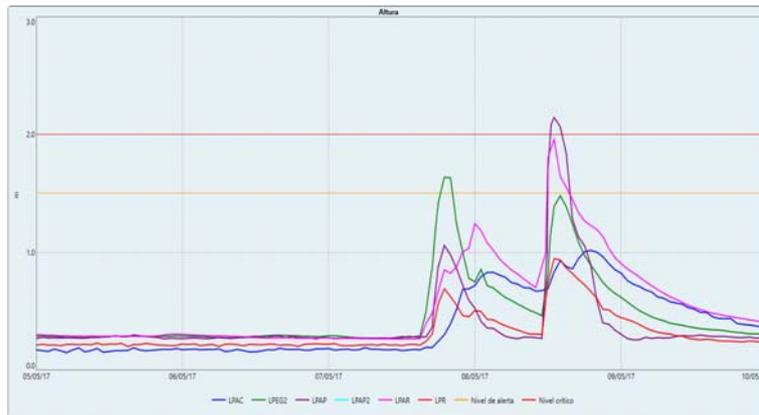


Figura 10.- Visor – Tercer Pantalla

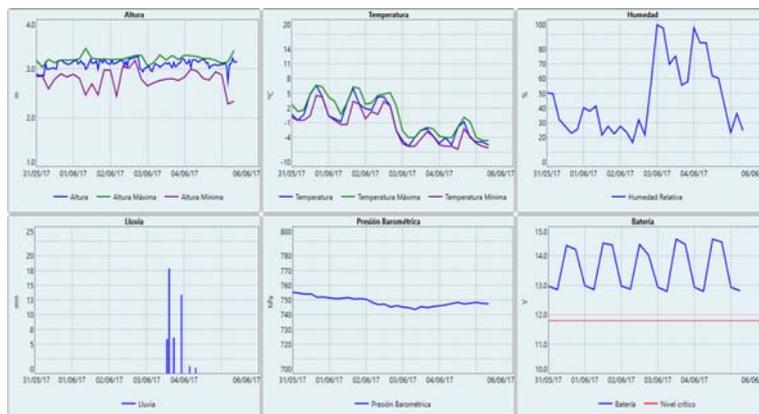


Figura 11.- Visor – Cuarta Pantalla

**ANÁLISIS DE MEDIOS DE TRANSMISIÓN**

Si bien se analizan en el presente trabajo solo los valores correspondientes a lluvia y nivel, algunas de las estaciones corresponden a estaciones meteorológicas completas que integran además la medición de temperatura, humedad, velocidad y dirección de viento, radiación solar y otras.

Los datos extraídos para el análisis de rendimiento y muestra de capacidades del sistema corresponden a Redes de Monitoreo y Alerta instaladas y actualmente en funcionamiento. Para el análisis estadístico de tiempos de retardo en la transmisión y publicación de información, el bloque de análisis comprende todos los mensajes enviados por estaciones durante el año 2016, seleccionando al azar un número determinado de estaciones para cada sistema de transmisión. El bloque de mensajes analizado corresponde a una cantidad de aproximadamente 10.000 mensajes recibidos por la red satelital, y una cantidad similar de mensajes provenientes de la red celular.

A continuación se pueden apreciar las figuras correspondientes a los resultados arrojados por el análisis estadístico de los tiempos que demora el transmisor en enviar efectivamente un mensaje generado, y el tiempo que demora el sistema en conjunto para la visualización del dato en el software, contado a partir de la generación del mensaje en la estación remota.

En la Figura 4 se muestran comparativamente las latencias correspondientes a la transmisión de mensajes, es decir, el tiempo comprendido entre que el mensaje está listo para ser transmitido en la estación y la confirmación de recepción efectiva por parte del sistema

considerado (base terrena del sistema satelital, o estación base del sistema celular). En la misma se puede apreciar que para el caso de la red celular casi el 90% de los mensajes son transmitidos en un intervalo de 6 minutos, y una alta concentración de tiempos en torno a los 4 – 6 minutos, mientras que para el sistema satelital si bien la mayoría de los mensajes tienen una latencia similar, la dispersión de tiempos es notablemente mayor.

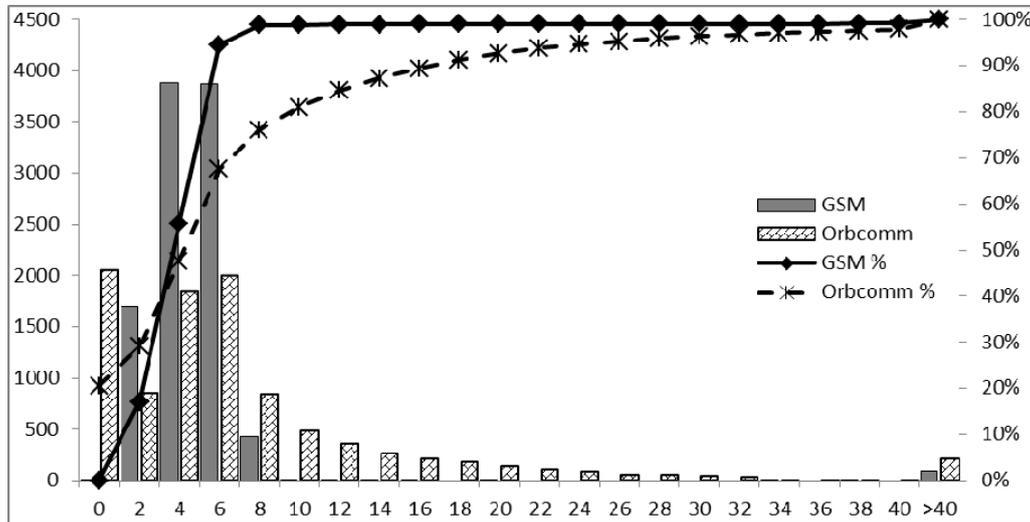


Figura 4.- Latencia para la transmisión de datos. Año 2016

En la Figura 5 se muestran los tiempos de latencia para la publicación del dato en el software, es decir, el tiempo transcurrido desde la generación del mensaje en la estación remota y su disponibilidad al usuario en el software visualizador. Se puede apreciar en el gráfico la misma tendencia que en el caso anterior pero con una demora adicional proveniente de la lectura y decodificación de mensajes por parte del servidor. Cabe destacar que la configuración actual del servidor de donde se extrajeron los datos posee un periodo de lectura en búsqueda de nuevos mensajes de 5 minutos, parámetro que puede ser modificable en aplicaciones de redes de alerta, donde se necesita contar con el dato con mayor anticipación.

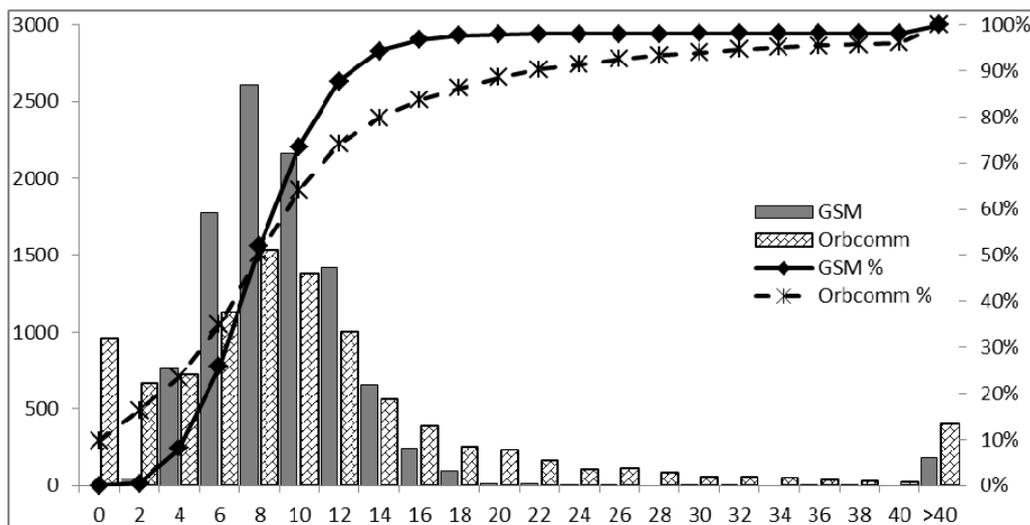


Figura 5.- Latencia para publicación de datos. Año 2016

## CONCLUSIONES

El conjunto de herramientas de hardware y software que comprende el Sistema EVQ4000 presenta una solución completa para la medición, publicación y análisis de datos hidrometeorológicos. Dada la alta compatibilidad de los dataloggers con sensores de salida estándar, y la posibilidad de configuración de nuevas variables en el sistema, es posible aplicar el mismo en diversas redes de monitoreo y alerta.

La configuración de cada variable de la Estación Remota en conjunto con la definición de criterios de visualización en el Software de Monitoreo dotan al Sistema de una cualidad relevante en el seguimiento y estudio de Redes Hidrometeorológicas a diferentes escalas, de acuerdo a los criterios definidos por el usuario.

En cuanto a los sistemas de comunicación analizados, se aprecia una marcada diferencia en los tiempos de transmisión de los mensajes, siendo sensiblemente inferior para el sistema celular. Igualmente debe tenerse en cuenta la disponibilidad del servicio de telefonía móvil en el lugar de emplazamiento de las estaciones, lo que limita su ámbito de aplicación a redes urbanas o sus cercanías. Como contraposición, el sistema satelital tiene aplicación independientemente de la ubicación geográfica de la estación, pero en este caso la latencia de los mensajes es mayor, lo que debe tenerse en cuenta ante la implementación de redes de alerta que utilicen dicho sistema de comunicación.

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y DE SENSORES REMOTOS EN EL MONITOREO DEL RIEGO SUPLEMENTARIO EN EL SUDESTE BONAERENSE

Quiroz Londoño Orlando Mauricio<sup>1,2</sup>, Donna Flavia<sup>1,3</sup>, Massone Héctor<sup>1</sup> y Romanelli Asunción<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario - CIC - Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Cs. Exactas y Naturales, Provincia de Buenos Aires, Argentina - <sup>2</sup>Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - IMMMyC, CONICET, Argentina - <sup>3</sup> FONCyT

Funes 3350, 0223 4754060 y e-mail ormaquiroz@mdp.com.ar - flaviadonnar@gmail.com - asuncionromanelli@gmail.com - massoneh@gmail.com

### Introducción

El sudeste de la provincia de Buenos Aires es reconocido como una zona de alta productividad agrícola en la Argentina. Adicionalmente, el recurso hídrico subterráneo es habitualmente la única fuente de aprovisionamiento. La alternancia de periodos climáticos secos y húmedos documentada inicialmente por Ameghino (1896), obliga a los productores de la región a utilizar herramientas que permitan adecuarse a las condiciones climáticas en cada temporada. Es aquí donde el riego suplementario aparece como la solución más frecuente en épocas de déficit de lluvias convirtiéndose en una práctica cada día más común. El control o monitoreo de esta actividad es difícil de realizar, desconociéndose a menudo, su impacto sobre el agua subterránea. Hasta la fecha no se cuenta con un inventario completo de pozos destinados a este fin ni la calidad como la cantidad de agua utilizada en el riego en el Sudeste Bonaerense.

Las herramientas suministradas por los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los Sensores Remotos permiten evaluar de una manera continua e integrada la información hidrogeológica relevada. A partir de imágenes de sensores remotos con diferentes resoluciones temporales y espaciales es posible realizar un seguimiento de las áreas irrigadas, pudiendo caracterizar la respuesta espectral de las diferentes superficies mediante análisis especiales o aplicaciones de índices preestablecidos. El objetivo de este trabajo es monitorear las superficies regadas por pivote central y estimar su tasa de crecimiento en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires.

### Área de estudio

La zona de estudio comprende los Partidos de Balcarce, Gral. Pueyrredón, Gral. Alvarado, Lobería y Necochea, localizados en el Sudeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. La zona corresponde a un área húmeda, con bajas a muy bajas pendientes topográficas (en su gran mayoría menores al 1%) acompañadas de una muy baja densidad de drenaje y donde el recurso hídrico subterráneo es habitualmente la única fuente de aprovisionamiento

El acuífero presente en la zona es el Pampeano, de carácter libre, con espesores que pueden alcanzar los 200 m, constituido por sedimentos limo-arenosos cuaternarios (Varela y Teruggi, 2001). El basamento hidrogeológico está conformado por las ortocuarcitas de la formación Balcarce (Amos et al., 1972), que afloran en las sierras que limitan la zona al norte y/o por rocas ígneo-metamórficas del basamento cristalino precámbrico (Dalla-Salda et al., 2005). Este acuífero además de ser fuente de abastecimiento de agua potable para la gran mayoría de las ciudades y localidades de la región, presenta una gran injerencia sobre los arroyos y ríos, ya que la

mayoría de ellos poseen un comportamiento efluente en su rerecorrido (Quiroz Londoño et al 2008; Romanelli et al 2014). Además, actúa como una fuente importante de recarga de muchos humedales (principalmente lagunas), los cuales a su vez proporcionan servicios ecosistémicos.

### Materiales y Métodos

Se realizó un censo de pozos de riego durante el año 2016. Se colectaron muestras de agua subterránea mediante un Bailer a la profundidad media del agua en el pozo. Se midió in situ el pH, la conductividad eléctrica y la temperatura del agua, y en laboratorio se determinaron los iones mayoritarios, nitratos, alcalinidad total, dureza y sólidos totales disueltos siguiendo la metodología detallada por APHA (1992). También se tomaron muestras para la determinación de isótopos estables del agua (<sup>18</sup>O y <sup>2</sup>H). Cuando se pudo, se obtuvo información referida a la litología del pozo. Adicionalmente, en los pozos que se pudo, se midió la conductividad eléctrica cada 1 metro con una sonda conductímetro para realizar perfiles de este parámetro.

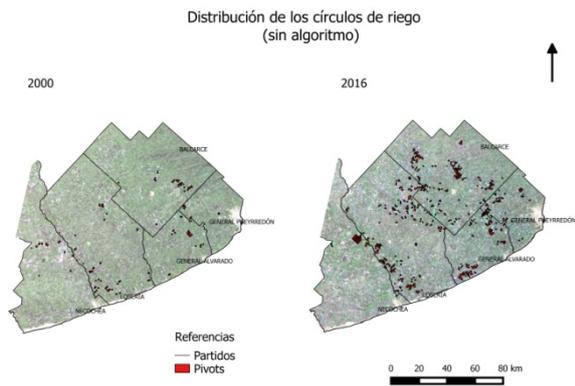
Para el inventario de pozos de riego se realizó un análisis multitemporal de imágenes de satélite. Con este fin, se procesaron 24 imágenes satelitales (Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+SLC y Landsat 8 OLI/TIRS; Path 224 y Row 86-87) del periodo 2000-2016, correspondientes al verano, estación donde se aplica con mayor intensidad el riego suplementario. Se realizaron combinaciones de bandas y filtrados digitales que permitieron resaltar los círculos de riego (pivote central). Luego, se digitalizaron y vectorizaron. Se calcularon los Índices diferencial de Vegetación Normalizada (NDVI) y el índice diferencial de Agua Normalizada (NDWI). La temperatura superficial fue calculada usando el complemento Land Surface Temperature Estimation. Todos los procesamientos digitales se realizaron con el software QGIS (Quantum Gis Development Team, 2016). Se obtuvo para cada círculo detectado un valor promedio de NDVI y de temperatura superficial terrestre (LST).

A su vez, para cada una de las fechas analizadas se determinó la temperatura máxima, mínima y promedio, usando para esto las estaciones climatológicas dentro de la zona de estudio (5 en total). Por último, se aplicó un algoritmo, el cual se basa en que aquellos círculos cuyos valores de NDVI son mayores a 0.5 (vegetación sana) y con valores de LST menores a las temperaturas máximas de la fecha de imagen, habían sido utilizados para riego ese verano.

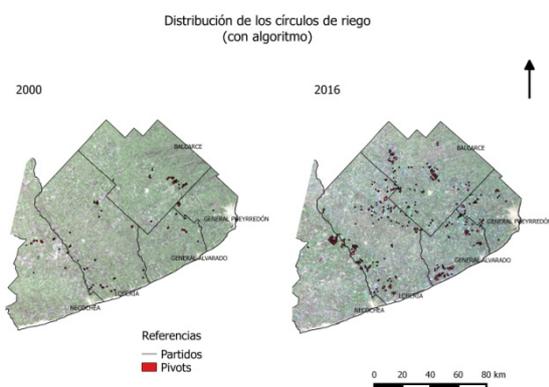
### Resultados

La distribución de los círculos de riego en el sudeste bonaerense en el verano del año 2000 y del 2016 se muestra en las figuras 1 y 2 sin aplicar el algoritmo y aplicándolo.

respectivamente.



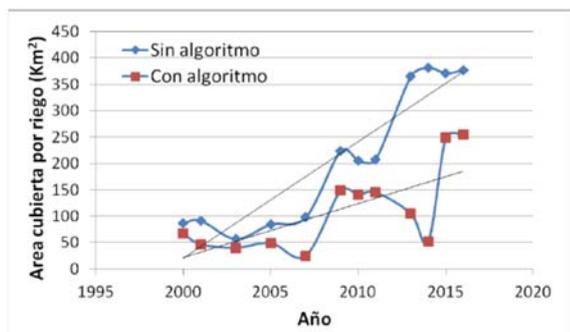
**Figura 1.** Inventario de pivotes centrales sin algoritmo en el Sudeste Bonaerense.



**Figura 2.** Inventario de pivotes centrales con algoritmo en el Sudeste Bonaerense.

En la Figura 3 se observa que la superficie irrigada varió de 84.01 a 376.29 km<sup>2</sup> y de 24.99 a 254.55 km<sup>2</sup> sin aplicar algoritmo y aplicándolo, respectivamente, para el período analizado. Es evidente una tendencia lineal de aumento del área irrigada por pivotes, aunque estabilizándose en los últimos años. La tasa anual de crecimiento de la superficie regada para el Sudeste Bonaerense calculada durante 2000-2016 fue de 13.04 y 11.71 %, sin algoritmo y con algoritmo, respectivamente.

Se destaca, además un marcado descenso en el área bajo riego para el año 2014. Dicha diferencia podría deberse al marcado aumento en las precipitaciones para ese verano o quizás a una diferencia significativa entre la temperatura máxima registrada en las estaciones meteorológicas (sólo 2 para este año) y la temperatura calculada a partir de la imagen de satélite.



**Figura 3.** Área irrigada por pivote central, con y sin aplicación del algoritmo.

Un aspecto de relevancia en la temática en cuestión es la ausencia de un sistema de información integrado, actualizado y de acceso público con información referida a los pozos de riego existentes. En concordancia con la *Ley Nacional 26899 de Repositorios digitales institucionales de acceso abierto*, se avanzó en la construcción de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para poder integrar toda la información recopilada y generada. Esta información, de modo preliminar, puede accederse a partir del siguiente link: <http://www.mdp.edu.ar/hidrogeologia/index.php/sig>.

## Conclusiones

El uso del riego en el sudeste de la provincia de Buenos Aires ha tenido un crecimiento continuo en los últimos 16 años, alcanzando un área de 250 km<sup>2</sup>. Este valor debe tomarse como valor mínimo, ya que sólo considera la aplicación a través del sistema de pivote central.

El algoritmo aplicado redujo en un 44% promedio el área identificada como de riego en el análisis visual. Este algoritmo podría ajustarse utilizando una mayor cantidad de estaciones climatológicas y verificación de campo.

El SIG generado permitirá un análisis espacial y temporal de los datos, su visualización en forma de mapas para obtener información derivada, constituyendo así una herramienta útil para la toma de decisión en relación al recurso hídrico subterráneo con fines de regadío. Asimismo, toda la información geográfica que se ha creado en forma de datos, mapas y modelos analíticos se puede combinar y ofrecer como mapas y aplicaciones en línea y compartirse con otros usuarios.

## Bibliografía

- Ameghino, F.** (1896). "Notas sobre cuestiones de geología y paleontología argentinas". *Boletín del Instituto Geográfico Argentino* 17: pp. 87–119.
- Amos, A. J., B. J. Quartino y R. A. Zardini** (1972). "El Grupo de La Tinta, Provincia de Buenos Aires; Argentina. Paleozoico o Precámbrico?" *An. XXV Congr. Bras. Geología*, San Pablo, 211-221.
- APHA** (1992). "Standard methods for the examination of water and wastewater". 18th ed. American Public Health Association, Washington, DC, 1100 p.
- Dalla Salda, L., R.E. de Barrio, H.J. Echeveste y R. R. Fernández** (2005). El basamento de las Sierras de Tandilia. En: R.E. de Barrio, R.O. Etcheverry, M.F. Caballé y E. Llambías (Editores), *Geología y Recursos Minerales de la provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino* :31-50. La Plata.
- Quantum Gis Development Team** (2016). Quantum GIS. Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project.
- Quiroz Londoño, O.M., D.E. Martínez, C. Dapeña y H. E. Massone** (2008). "Hydrogeochemistry and isotope analyses used to determine groundwater recharge and flow in low-gradient catchments of the province of Buenos Aires, Argentina". *Hydrogeol. J.* 16, 1113-1127.
- Romanelli, A. Quiroz Londoño O. M., Martínez D. E. Massone H. E. & A. H. Escalante** (2014). "Hydrogeochemistry and isotope techniques to determine water interactions in groundwater dependent shallow lakes, Wet Pampa Plain, Argentina". *Env Earth Sci*, 71 (4):1953-1966.
- Varela, L. B. y L. B. Teruggi** (2002). "Caracterización hidrológica de la cuenca del río Quequén Grande, Provincia de Buenos Aires". En *Manejo integral de cuencas hidrográficas y planificación territorial*, editado por L. Teruggi, 19-29 pp.

## OMHM CBA PARA INTEGRACIÓN DE SENSORES HIDROMETEOROLÓGICOS PARA MONITOREO Y ALERTA EN LA REGIÓN CENTRO DE ARGENTINA

Rodriguez A (\*), Lopez F, Castello E, Vignetta C, Ingaramo R, Caranti G, Comes R, Bertoni J, Martina A, Saffe J, Montamat I, Poffo D, Nieves E, Lighezzolo A, Furbatto C y Petroli G.

\*: GRC, UNC y Conicet, Argentina  
E-mail androdmplan@gmail.com

### Introducción

La Región Centro de la Argentina (Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos) carece de una adecuada coordinación de acciones tendientes al monitoreo de variables hidrometeorológicas y ambientales que son de utilidad para la elaboración de pronósticos y alertas en una zona de gran importancia demográfica y económica para el país. Esto se traduce en un ineficiente tratamiento de las emergencias hidrometeorológicas y ambientales, con un alto costo en vidas humanas y recursos materiales, cada vez con mayor frecuencia por efecto de la Variabilidad Climática que caracteriza en la actualidad a los fenómenos relacionados con el clima. Además de tormentas e inundaciones es necesario el monitoreo de otros fenómenos ambientales presentes en Córdoba y la región, como son: los blooms algales (potencialmente tóxicos) en embalses destinados al suministro de agua potable; las tormentas de polvo severas en la autopista Rosario-Córdoba; las descargas por rayos y los incendios forestales. El propósito de esta presentación es introducir precisamente una propuesta de implementación de un Sistema Integrado de Monitoreo Hidro-Meteorológico y Ambiental (HMA), que integre los datos de variables de interés relacionados con la temática, relevados por organismos provinciales y nacionales en las tres provincias de la Región Centro, que permita generar información de utilidad para prevenir la ocurrencia de eventos extremos y tratar de reducir su impacto.

### Objetivos

Los objetivos de un Sistema de estas características son muy amplios y variados:

-Fortalecer el Nodo de la Región Centro del SiNaRaMe: Sistema Nacional de Radares Meteorológicos (Rodriguez et al 2017, Rodriguez y Ciappesoni 2011, Saulo y Rodriguez 2015) y promover la interdisciplinariedad de los grupos integrantes del mismo y su vinculación sinérgica con otros grupos de la Región y el País.

-Contribuir a la Calibración Electrónica y puesta a punto del primer radar de la serie de SiNaRaMe, RMA1 desarrollado por INVAP (Radar meteorológico Doppler en Banda C con doble polarización simultánea) más moderno de la República Argentina, así como a la Calibración Hidrológica y puesta en servicio de dicho radar.

-Facilitar la integración de los Sistemas de Monitoreo Hidro-Meteorológicos y Ambientales (actuales y futuros) de la Región Centro, entre los que se cuentan los Radares de Córdoba y Paraná (hoy existentes) y futuros RMA (e.g., Termas de Río Hondo, Corrientes, etc.), las estaciones hidrometeorológicas EMA terrestres existentes y futuras (hoy en Córdoba son cerca de 140, y aproximadamente 100 en Santa Fe y Entre Ríos), la incorporación de Disdrómetros a las EMA (2, con posibilidades de ampliar a 4), los sensores de detección de descargas eléctricas (3, con posibilidades de ampliar a 10), los sensores de detección de incendios (en desarrollo), los sensores de monitoreo de lagos (1 en desarrollo, con posibilidades de

ampliar a 10), la cuantificación experimental del escurrimiento superficial en los ríos de la región, mediante el uso de modernas técnicas de medición (ADCP y PTV), otros sensores: drones y cámaras remotas sobre red de fibra óptica (1 y 5 cámaras a ampliar), los productos de satélites (los que hoy recibe la CONAE, a ampliar con los que ANA/INPE de Brasil están integrando en la Región Centro como Mar Chiquita y los ríos Paraná y Uruguay, como parte del Proyecto ABC-FOAR), y la optimización de las comunicaciones entre las redes de sensores y el CPR 1. Un objetivo adicional pero no menos relevante es la formación de Recursos Humanos especializados en áreas de vacancia a nivel de Maestría y Doctorado (hidrometeorología y tecnologías avanzadas de comunicación, sensores remotos, medio ambiente y recursos hídricos), así como la difusión de resultados científico-tecnológicos alcanzados en el marco de esta propuesta. En definitiva, se propone el desarrollo de nuevos servicios de alerta específicos a las demandas presentes y futuras en la Región Centro necesarios ante la Variabilidad Climática, hoy no disponibles, para lo cual se van a integrar equipos disciplinares de distintos organismos como Defensa Civil, Universidades, INA, SMN, CONAE, entre otros.

### Materiales y Métodos

Para fortalecer el Nodo de la Región Centro del SiNaRaMe y promover la I+D+i interdisciplinaria de los grupos integrantes del mismo y su vinculación sinérgica con otros grupos de la Región, se realizarán reuniones y talleres ad hoc, la publicación conjunta de resultados y la codirección de becarios y tesis.

Para permitir la integración de los sistemas de monitoreo se aspira a concretar el primer Centro de Operación de Emergencias (COE) de la Región Centro (un núcleo de información para el manejo de emergencias ambientales y el pronóstico a corto plazo de alta especificidad para la región), incluyendo el Centro Regional de Procesamiento de datos hidrometeorológicos del País, el CPR 1. Este último recibirá, a tiempo real, la información proveniente tanto de las redes regionales de sensores existentes (e.g., estaciones hidrometeorológicas EMA del INA y las de la Prov. de Cba., Radares Meteorológicos de Córdoba y Paraná, imágenes satelitales, etc.), así como de las futuras redes (e.g., nuevas estaciones EMA con Disdrómetros del SiNaRaMe, estaciones de descargas eléctricas de Córdoba, detección de incendios de CBA, estaciones LDS en lagos de CBA, nuevos radares, etc.).

Para la Calibración Electrónica y puesta a punto del RMA1, es necesario trabajar sobre los subsistemas del radar: el transmisor (TX) que origina el pulso de microondas, receptor analógico (PRX) que recibe el eco devuelto a la antena, lo acondiciona filtrando ruidos electromagnéticos no deseados y lo amplifica a través de etapas de frecuencia intermedia que tiene incorporadas, y el receptor digital (DRX) el cual digitaliza la señal y finalmente la deriva al último subsistema involucrado en el sistema de medición constituido por la Unidad de Procesamiento. Al completar la calibración de cada una de

estos subsistemas, es posible determinar luego de transmitir un pulso de radar a un blanco meteorológico, por ejemplo, la clase de precipitación y su cuantía al relacionar la potencia del haz transmitido con la intensidad del eco devuelto.

La Calibración Hidrológica ya se encuentra en una fase inicial, vía GRC como Nodo Córdoba del SiNaRaMe, y busca caracterizar las funciones de transformación Reflectividad-Precipitación, en función del tipo de meteoro, altura del evento, y corrección por viento, etc. Este proceso se debe realizar contrastando los datos de reflectividad medidos por el radar con datos de lluvia registrados por una red de pluviógrafos en superficie con una alta resolución espacial y temporal. Con el fin de mejorar la calibración y complementar las observaciones de las redes meteorológicas convencionales, resulta conveniente incorporar además mediciones de disdrómetros, que permiten cuantificar la distribución de la precipitación proporcionando el tamaño real de gotas. En la zona de influencia del RMA1, más específicamente dentro de la Provincia de Córdoba, existe una red de cerca de 140 estaciones meteorológicas de superficie que brinda una alta densidad y los datos necesarios para la calibración hidrológica del radar, situación que no es común en el resto del país.

Con respecto a la formación de recursos humanos, la Universidad Nacional de Córdoba en asociación con el Instituto Universitario Aeronáutico está a punto de lograr la segunda cohorte de Especialistas y Magister en Sistemas de Radar e Instrumentación. Por esta razón estas carreras están siendo apoyadas no sólo por medio de la provisión de infraestructura y docentes desde las instituciones involucradas, sino además a través de la creación de un Laboratorio de Microondas y la adquisición de material bibliográfico y digital para el afianzamiento del conocimiento adquirido a través de la práctica profesional.

### Resultados Preliminares

En la actualidad en la Región Centro se encuentran operativos los radares de Paraná (operado por el INTA) y el de Córdoba (que será operado por el SMN). En la Figura 1 se puede ver un primer ejemplo de integración de ambos radares, en el monitoreo del evento del 10/11/2015. Como se puede apreciar, la complementación de ambos radares permitirá en un futuro una mejor descripción de las tormentas.



Figura 1.- Monitoreo simultáneo de un evento mediante los radares de Paraná y de Córdoba

Para la calibración hidrológica de los radares se dispone de una amplia red de estaciones meteorológicas de superficie dentro de la Región Centro. Está previsto la inminente incorporación de dos disdrómetros dentro del área de influencia del RMA1 en Córdoba. Para este radar se han relevado y procesado los datos

de precipitación registrados por las estaciones meteorológicas automáticas para las tormentas monitoreadas por el RMA1 desde que inició su operación, y se han realizado las primeras experiencias de integración de datos de reflectividad medidos por el radar con esos datos de lluvia (Comes et al, 2016). Ver un ejemplo en la Figura 2 sobre una pequeña cuenca al sur de Córdoba de 10 x 3 Km aproximadamente.

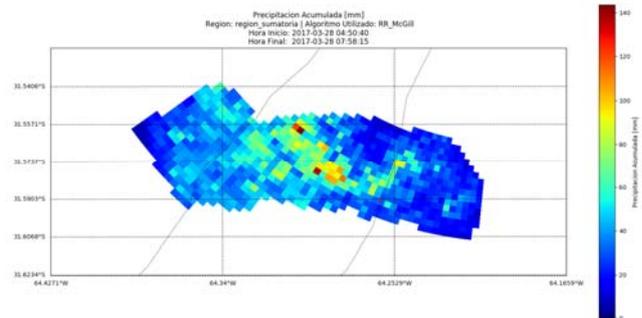


Figura 2.- Tormenta medida por RMA1, 28/03/17 (máxima intensidad 140 mm/h, Algoritmo de transformación R-Z McGill).

En relación a cuantificación de caudales de los ríos de la Región Centro, la cuenca del río Carcarañá (cuenca principal de la región) es monitoreada periódicamente desde el año 2012. Se ha realizado hasta el momento cuantificación del escurrimiento superficial con más de un centenar de aforos en 18 localizaciones incluyendo la cuenca alta, media y baja, y en los tres principales tributarios (ríos Ctalamochita, Saladillo y Tortugas). La cuantificación se lleva a cabo mediante el uso de modernas técnicas experimentales de medición in-situ, como es el caso del perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP) y a través del procesamiento de imágenes a gran escala para lo cual hay disponibles drones y cámaras de alta resolución.

### Conclusiones y Recomendaciones

La integración del monitoreo de variables hidro-meteorológicas y ambientales en la Región Centro del país constituye una iniciativa novedosa, de compleja implementación, pero que una vez lograda permitirá disponer de una valiosa herramienta para la elaboración de alertas y la prevención de eventos extremos en esa zona del país, potenciados en los últimos años por efecto de la Variabilidad Climática. Se cuenta con la ventaja de disponer de una amplia red de sensores de monitoreo ya disponibles y de recursos humanos altamente calificados.

### Referencias Bibliográficas

- Rodriguez A, C Lacunza, J Serra, C Saulo, H Ciappesoni, G Caranti, R Comes y A Martina (2017) *SiNaRaMe: El Primer Sistema Integrado de Radares Hidro-Meteorológicos de Latinoamérica* Rev. de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNC, Arg., Vol. 4, Nro.1, Pg. 41-48, ISSN 2362-2539.
- Comes, R., et al. (2016) "Empleo del Radar Meteorológico Argentino RMA1 para la detección de un evento severo" *XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, IAHR, Lima, Perú.
- Rodriguez, A. y Ciappesoni, H. (2011) "Red Nacional de Radares Meteorológicos" *Rev. Hydria*, Agosto, Año 7, Nro. 36, pg. 18-21, ISSN 1669-5119, Bs. As.
- Saulo C. y Rodriguez A. (2015) "Los avances en la información hidrometeorológica" *Rev. Hydria*, Año 11, Nro. 54, pg. 32-35.

## CARTOGRAFÍA DE SUSCEPTIBILIDAD HÍDRICA PARA DOS CUENCAS DE LA PROVINCIA DE CORRIENTES

Sepulcri María Gabriela, Herrera María Gabriela, Oricchio Patricio, Eduardo Adrián Flamenco, Espíndola Aimé, Barrionuevo Néstor, Podetti Gonzalo, Osorio Alejandra, Waldman Cynthia

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Agencia de Extensión Luján, Instituto de Clima y Agua. Argentina.  
Dr Negri s/n (6700) Luján, Buenos Aires Argentina. De Los Reseros y Las Cabañas s/n (1712), Castelar, Buenos Aires, Argentina.  
+5491160471715; sepulcri.maria@inta.gov.ar; herrera.maria@inta.gov.ar

### Introducción

La provincia de Corrientes está situada en la Región Mesopotámica Argentina, con una superficie de 88.924,31 Km<sup>2</sup> (Benedetti, 2000). Es una de las provincias argentinas con mayor riqueza en términos hidrológicos y se caracteriza por poseer una importante orografía la cual se encuentra enmarcada en 8 regiones fitogeográficas.

El río Corriente nace en la Laguna Itatí, la más austral de los esteros del Iberá y funciona como desagüe de sus 13 000 km<sup>2</sup> de humedales. Su curso se orienta desde el noreste hacia el sudoeste de la Provincia, desembocando finalmente en el río Paraná. (Fontán, et al. 2012).

La cuenca del río Miriñay se encuentra al sudeste de la provincia de Corrientes con desagüe al río Uruguay. Se orienta en sentido norte-sur correspondiéndole cerca del 12% del territorio correntino. Nace en los esteros del Iberá, en cercanías de la localidad de Colonia Carlos Pellegrini (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2016).

La principal actividad agrícola de esta zona corresponde al cultivo de arroz, aunque también adquieren importancia la producción de cítricos y hortícola bajo cubierta. Alrededor de estas cuencas se asienta la mayor proporción de la población rural y de productores. En su mayoría son áreas bajas de esteros y bañados, propensas a inundaciones.

Es importante contar con pronósticos estacionales de caudales confiables (Flamenco, 1998). Asimismo, es necesario conocer la distribución espacial del agua en superficie asociada al pronóstico. Para ello, los sensores remotos constituyen herramientas clave para generar cartografías de susceptibilidad hídrica (Sepulcri et al., 2015). De esta manera es posible estudiar a nivel regional la dinámica hídrica, mejorar la planificación del territorio y disminuir las pérdidas económicas.

### Objetivos

Obtener cartografías de susceptibilidad hídrica para las cuencas de los ríos Corriente y Miriñay utilizando imágenes satelitales de alta resolución para establecer anticipadamente las posibles áreas que podrían ser afectadas por el agua.

### Materiales y Métodos

El área de estudio correspondió a las cuencas de los ríos Corriente y Miriñay, localizadas en la provincia de Corrientes. Para elaborar las cartografías se utilizaron series históricas de caudales medidos en Los Laureles (río Corriente) y en Paso Ledesma (río Miriñay). Para cada año se calculó el caudal medio y se aplicaron funciones de distribución (Pearson y Gumbel) para establecer los umbrales de clasificación del régimen hídrico (seco, normal y húmedo). A partir de esta información, se seleccionaron imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8 con mínimo porcentaje de nubes, correspondientes al período octubre-marzo desde el año 1980 al 2014, las cuales se agruparon según el año hidrológico observado (Tabla 1).

Tabla 1: Imágenes obtenidas y período para cada cuenca de estudio

Escenario Hidrológico	Río Corriente path row 226-080		Río Miriñay path row 225-080	
	n° imágenes	período	n° imágenes	período
Seco	28	1988-2011	26	1985-2010
Normal	8	1985-2001	4	1987-1996
Húmedo	32	1986-2013	20	1986-2009

Las imágenes utilizadas fueron corregidas radiométrica, geométrica y atmosféricamente obtenidas del sitio Earth Explorer (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Cada imagen fue procesada calculándose tres índices: verde, de suelo y de agua, utilizando bandas del espectro visible (rojo y verde), IR cercano y medio, que luego fueron agrupadas en una imagen de tres bandas siguiendo la metodología propuesta por Takeuchi y Yasuoka, 2005. Cada una de estas imágenes fue clasificada según la técnica no supervisada ISODATA, estableciendo 30 clases máximo y 6 iteraciones. De esta manera se obtuvo una máscara de agua para cada fecha recodificando las clases en 1 (agua) y 0 (no agua). Posteriormente se calculó la frecuencia con que cada píxel estuvo ocupado por agua en todos los escenarios hidrológicos seco, normal y húmedo. Finalmente se aplicó el algoritmo de Jenks a la imagen de frecuencias final, con el objeto de separar las frecuencias en 5 rangos (Jenks, 1967) correspondientes a escenarios muy húmedo, húmedo, normal, seco y muy seco. De esta manera, obtener la cartografía de susceptibilidad hídrica como producto final.

### Evaluación de Resultados

A partir de la clasificación no supervisada de las imágenes se determinaron las clases agua y no agua asignando valores 1 y 0 respectivamente tomando como criterio los umbrales de índices publicados en el trabajo de Rodríguez *et al.*, 2009. La clase agua se encuentra en un valor medio de 0,22 de índice de agua. Sin embargo, los cursos de agua permanentes presentan valores que oscilan entre 0,6 y 0,8. El índice de vegetación suele ser negativo o próximo a cero a excepción de los márgenes ribereños, donde pueden coexistir valores positivos de índice de agua y vegetación. Las máscaras de agua obtenidas permitieron visualizar la superficie ocupada por agua en las distintas fechas, las cuales luego se reagruparon según escenario observado y se obtuvieron las frecuencias con que cada píxel estuvo ocupado por agua. Para obtener la cartografía de susceptibilidad hídrica para cada cuenca, se aplicó el algoritmo de Jenks a la imagen final de frecuencias, obteniendo una imagen resultante en escala colorimétrica con 5 rangos: muy húmedo, húmedo, normal, seco y muy seco (Figuras 1 y 2). La mancha de agua correspondiente al rango muy seco indica cursos de agua permanentes. Independientemente del período hidrológico, la frecuencia de

ocupación por agua es alta. Luego las áreas se van extendiendo a medida que el escenario progresa a mayor humedad.

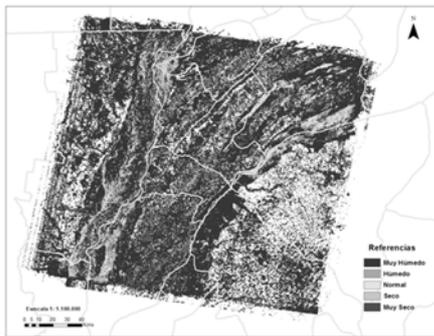


Figura 1.- Cartografía de susceptibilidad hídrica obtenida del path row 226-080. Abarca la cuenca del río Corriente.

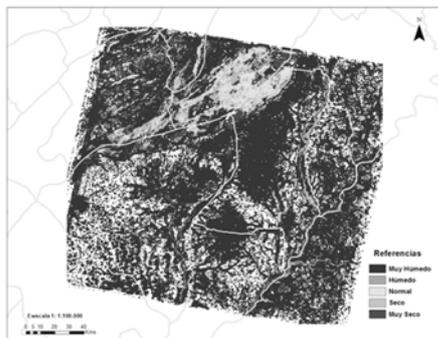


Figura 2.- Cartografía de susceptibilidad hídrica obtenida del path row 225-080. Abarca la cuenca del río Miriñay.

Asimismo, cada escenario hidrológico obtenido en forma aislada luego de clasificar las frecuencias en los 5 escenarios posibles (Figura 3), fue utilizado como insumo de una herramienta digital de acceso libre y gratuito, la plataforma GeoINTA. Este visor consta de una imagen de Google Earth sobre la cual se apoyan distintas capas de información hidrológica, pronósticos, agronómica, entre otras, que abarcan distintas regiones de la Argentina. Asimismo, en la página del Instituto de Clima y Agua de INTA (Sistema de información Clima y Agua), se publica un informe con el Pronóstico estacional de escurrimientos en el río Corriente en Los Laureles, período Octubre – Marzo y el Pronóstico estacional de escurrimientos en el río Miriñay en Paso Ledesma, período Octubre-Marzo. En este informe se brinda una estimación del caudal medio pronosticado ( $m^3/s$ ) y su clasificación correspondiente según los 5 posibles escenarios hidrológicos (muy húmedo, húmedo, normal, seco y muy seco). De esta manera, de acuerdo a la información proporcionada por el pronóstico, se puede conocer cual es el escenario hidrológico pronosticado y asociarlo a la imagen correspondiente en la página de GeoINTA para poder conocer la distribución espacial del agua probable.

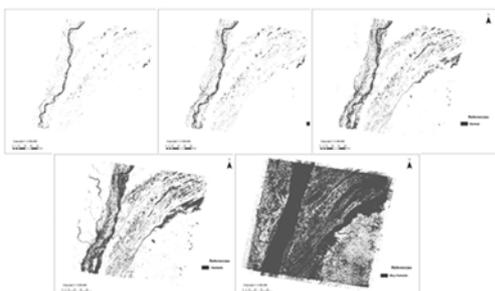


Figura 3.- Escenarios hidrológicos resultantes de la clasificación de los

rangos de frecuencias de píxeles ocupados por agua. En la fila superior, de izquierda a derecha escenarios muy seco, seco, normal. Fila inferior, húmedo y muy húmedo.

## Aplicaciones

Utilizando la información de pronóstico proporcionada por el informe mencionado en el apartado anterior es posible seleccionar la cartografía homóloga a tal escenario y de esta manera poder anticiparse a conocer la distribución espacial del agua estimada en las cuencas de los ríos Corriente y Miriñay. Esta herramienta digital permite a cualquier usuario acceder libremente con la ubicación de su interés y conocer el grado en que su establecimiento estará afectado por agua de acuerdo al escenario hidrológico pronosticado, seleccionando la cartografía correspondiente y ubicándose por medio de coordenadas en uno o varios sitios específicos, realizando zoom y pudiendo visualizar a nivel de lote con muy buena resolución. Este trabajo está planificado realizarse para las cuencas de los ríos Aguapey y Santa Lucía como parte de las actividades planificadas en el marco del Proyecto Nacional INTA: Estudio del impacto de escenarios futuros sobre los recursos hídricos, Módulo Pronóstico y Alerta.

## Conclusiones y Recomendaciones

A través de esta sencilla herramienta se espera llegar a un amplio rango de la población adyacente a las cuencas trabajadas, con el fin de que puedan planificar anticipadamente acciones referentes al manejo del cultivo de arroz o bien a cualquier otra actividad agrícola, ganadera, turismo y ordenamiento territorial.

## Referencias Bibliográficas

- Benedetti, J., (2000). Los Sistemas de Información Geográfica en el Instituto Geográfico Militar". X Congreso Nacional de Cartografía, Contribuciones Cienhttp://visor.geointa.inta.gob.ar/tíficas, IGM, Buenos Aires, Argentina, p. 314-322.
- Daniele, C. y Natenzon, C., (1994). Las Regiones Naturales de la Argentina: Caracterización y Diagnóstico. En Daniele, C., Bukart, R., Del Valle Ruiz, L., Natenzon, C. y Ardura, F. (Eds.). El Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas de la Argentina. Diagnóstico de su Patrimonio y su Desarrollo Institucional. Buenos Aires, Argentina.
- Flamenco, EA. (1998) Pronóstico de inundaciones en el río Paraná en Corrientes, basado en el fenómeno ENSO. Bulletin de l' Institut Français d' Études Andines, 27 (3): 807-818.
- Fontán, R. F., Acosta, G.A., Rolón, J.C. (2012). Represas para riego en Curuzú Cuatiá y Sauce. 1a ed. Buenos Aires: Consejo Federal de Inversiones. (Estudios y proyectos provinciales). ISBN 978-987-510-187-6.
- GeoINTA, <http://visor.geointa.inta.gob.ar/>
- Jenks, G.F. (1967). The Data Model Concept in Statistical Mapping. International Yearbook of Cartography 7, 186-190.
- Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda, (2016). <http://www.mininterior.gov.ar/obras-publicas/pdf/43.pdf>. Revisado 04/10/2016.
- Sepulcri, MG., Flamenco, EA., Pizarro, MJ., Herrera, MG., Borus, J., Giordano, L. (2015). Cartografía de susceptibilidad hídrica en el delta del río Paraná. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y el Ambiente. Vol. 34. 10 pp.
- Sistema de información Clima y Agua, [http://climayagua.inta.gob.ar/estacional\\_de\\_caudales\\_en\\_rios](http://climayagua.inta.gob.ar/estacional_de_caudales_en_rios)
- Takeuchi, W. y Yasuoka, Y. (2005). Development of normalized vegetation, soil and water indices derived from satellite remote sensing data. Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 43 (6): 7-19.

# FUNDAMENTOS DEL EMPLEO DE RADARES METEOROLÓGICOS PARA LA PREVENCIÓN Y ALERTA HIDROMETEOROLÓGICA Y DE OTROS EVENTOS SEVEROS EN ZONAS PATAGÓNICAS

**Serra, Juan(1), Rodríguez, Andrés(2), Sainz Trápaga José (1), Ingaramo, Ricardo(2), Chachero, María Jesús (1), Bertoni, Juan Carlos(2) y Brandizi Laura [1]**

(1)Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, (2) Universidad Nacional de Córdoba  
Av. 9 de Julio 25, +54-0280-4428403, juanjoseserra@hotmail.com

## RESUMEN

La Patagonia Argentina tiene 2,4 millones de habitantes y superficie cercana al millón de km<sup>2</sup>. En su mayor parte las precipitaciones son de escasa frecuencia y bajo módulo pluviométrico, de clima árido a semiárido y predominancia de paisajes esteparios.

El comportamiento es diferente al caracterizar sus regiones. Hay diversidad climática con zonas de gran pluviosidad en la franja cordillerana norte, o nevadas en la cordillera sur. Su geografía también lo es presentando paisajes tan diversos como cordillera, mesetas, valle, costa marina.

Las lluvias extremas son escasas, poco frecuentes y dispersas, pero ocurren eventos severos con capacidades de activar crecidas de cuencas medianas a grandes. Existen antecedentes de graves eventos como los de Trelew (mayo 1992, abril 1998), Arroyo Verde (abril 2013), Comodoro Rivadavia (abril 2017), entre muchos otros.

Lluvias y nevadas, fuertes vientos, rafagosidad cambiante, incendios forestales y de campos, plumas de cenizas, combinan diferentes amenazas y riesgos que requieren una mejor prevención y organización de la defensa civil.

La radarización meteorológica es fundamental en la prevención y alerta hidrometeorológica. Se analizan sus posibles aplicaciones en la región y sitios de mayor interés, concluyendo con recomendaciones para la ampliación de la red del Sistema Nacional de Radares Meteorológicos (SINARAME) en la región patagónica.

**Palabras Clave:** Radar Meteorológico, SINARAME, Patagonia, Alerta hidrometeorológica

## ABSTRACT

The Patagonia Argentina has 2.4 million inhabitants and an area close to one million km<sup>2</sup>. For the most part rainfall is low and infrequent, from arid to semi-arid climate and predominance of steppe landscapes.

The behavior is different when characterizing their regions. There is climatic diversity with zones of great rainfall in the strip of the north range, or snowed in the south mountain range. Its geography presenting landscapes as diverse as the mountain range, plateaus, valley, marine coast.

Extreme rains are scarce, infrequent and scattered, but severe events occur with capacities to activate floods from medium to large basins. There are antecedents of serious events such as Trelew (May 1992, April 1998), Arroyo Verde (April 2013), Comodoro Rivadavia (April 2017), among many others.

Rain and snow, strong winds, changing bursts, forest and fields fires, ash feathers, combine different threats and risks that require better prevention and organization of civil defense.

The meteorologic radar is fundamental in hydrometeorological warning and prevention. Its possible applications in the region and sites of major interest are analyzed, concluding with recommendations for the expansion of the National Meteorological Radar System (SINARAME) network in the Patagonian region.

**Keywords:** Meteorologic radar, SINARAME, Patagonia, Hydrometeorological alert.

## INTRODUCCIÓN

La región patagónica tiene una población de 2,4 millones de habitantes distribuidos en una superficie algo mayor al millón de km<sup>2</sup>. En la mayor parte de su extensa superficie las precipitaciones son de escasa frecuencia y bajo módulo pluviométrico, resultando un clima árido a semiárido, con predominancia de las grandes estepas.

Sin embargo el comportamiento es muy diferente al caracterizar sus regiones. Existe una gran diversidad climática, con zonas de gran pluviosidad en la franja cordillerana norte, o nevadas en la cordillera sur, de lo que resultan cuencas de características hidrológicas disímiles. Su geografía también lo es, presentando paisajes tan diversos como cordillera, mesetas, valles o costas marinas. Y un paisaje muy particular en las bardas o contacto meseta-valle, o meseta-costa: los “cañadones”.

Las lluvias extremas si bien son poco frecuentes y dispersas, suelen ocurrir bajo la forma de severos chaparrones de alta intensidad y corta duración, y en algunos casos, de mediana a larga duración (Chachero 2012, 2013, 2014) con capacidades de activar crecidas de cuencas medianas a grandes.

La creciente radarización meteorológica en el mundo constituye una herramienta fundamental en la prevención y alerta hidrometeorológicos. Este trabajo analiza las posibles aplicaciones de radar meteorológico en la región, los sitios de mayor interés, concluyendo con recomendaciones para la ampliación de la red del SINARAME a la Patagonia.

## OBJETIVOS

Este trabajo tiene como propósito fundamentar la conveniencia de extender la red nacional de alerta hidrometeorológica de eventos severos y pronóstico a corto plazo. El objetivo del trabajo es establecer fundamentos científicos, técnicos y operativos sobre la necesidad de ampliar la red de radares meteorológicos de la Etapa II del SINARAME en la Patagonia.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En el año 2004 la entonces Dirección Provincial de Agua y Saneamiento (DIPAS) de la Provincia de Córdoba y la Universidad Nacional de Córdoba (UNC), inician acciones tendientes a la compra de un Radar Meteorológico (RM). Posteriormente, en el año 2006, estas gestiones son proseguidas por la Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación, en contacto con la empresa estatal INVAP SE, para desarrollar un primer Radar Meteorológico Argentino (RMA).

Esta gestión culmina exitosamente en junio de 2011 con la firma del contrato por la Etapa I del SINARAME, que incluía el desarrollo del prototipo RMA0, la fabricación del primero de la serie, RMA1 (ubicado en la UNC), y el Centro de Operaciones (COP) que se instaló en el edificio del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en Aeroparque, Capital Federal.

En el año 2014 se suscribió el segundo contrato por la Etapa II SINARAME, con la compra, instalación y puesta en marcha de 10 RMAs y 55 estaciones meteorológicas automáticas para la calibración de los radares. La tabla 1 muestra las especificaciones técnicas del RMA. El primer RMA de esta segunda etapa y segundo de la serie (RMA2) fue instalado y puesto en servicios en el predio del Instituto Nacional del Agua en Ezeiza (figura 1).

Al año 2014 la distribución preliminar de RMAs cubría razonablemente el litoral atlántico, particularmente entre Viedma y Río Gallegos (figura 2).

La disposición actual de RMA instalados, o en avanzado estado de fabricación e instalación en sitio, comprenden: RMA02, Ezeiza, Buenos Aires; RMA3, Las Lomitas, Formosa; RMA4, Resistencia, Chaco; RMA5, Bernardo de Irigoyen, Misiones; RMA6, Mar del Plata, Buenos Aires. Los sitios restantes para completar la segunda etapa SINARAME son: Termas de Rio Hondo, Santiago del Estero; Mercedes, Corrientes; Base Rio Grande, Tierra del Fuego; Base Espora, Bahia Blanca, Buenos Aires; Neuquén, en Neuquén.

El mapa actual de disposición de sitios de RMA cubre gran parte del territorio nacional, pero no alcanza a una amplia extensión de la costa litoral atlántica entre las ciudades de Viedma y el sur de Comodoro Rivadavia, donde además del asentamiento de grandes conglomerados urbanos, está la navegación y la pesca como potenciales usuarios de los productos del radar meteorológico.

El desarrollo de este trabajo parte de las experiencias surgidas a partir del proyecto SINARAME, y de analizar los eventos hidrometeorológicos severos en la Patagonia, particularmente de los últimos años, en relación a la vulnerabilidad y riesgo hidrológico de los conglomerados urbanos. Asimismo se consideran otras posibles aplicaciones de interés de los radares meteorológicos.

**Tabla 1.** Especificaciones técnicas de la serie RMA (extraído de Rodríguez et al, 2017)

Subsistema	Característica
Tipo	Radar Meteorológico en banda C, Dual-pol Doppler
Frecuencia de operación	5450-5820 MHz
Ancho de pulso	0.4 a 3 $\mu$ s
Resolución	60m celda@ 0.4 $\mu$ s
PRF	300 a 2000 Hz
Rango máximo	480 Km
Rango operacional	240 Km
Filtro de clutter	>23 dB
Productos	DBZH a TH Factor de reflectividad horizontal VRAD Velocidad radial, WRAD Ancho espectral, ZDR Reflectividad diferencial PHIDP Desplazamiento de fase diferencial, KDP Fase diferencial específica, RHOHV Coeficiente de cross-correlación, Mapa de Clutter
Transmisor	Magnetron coaxial, modulador de estado sólido, potencia de pico de 350 kW
Receptor	Superheterodino, conversión dual, rango dinámico de 93 dB, -110dBm @ pulsos 3 $\mu$ s y 3 dB figura de ruido
Dimensiones de antenas	4.45 m de diámetro, 182 Kg, reflector Optimat/carbono + Cobre Níquel
Ganancia de antena	1° de ancho del pulso a potencia media, 45 dB ganancia mínima @5635 MHz
Mecanismo de movimiento	Rango de elevación de -1° a 90°, velocidad de escaneo max de 6 rpm. de, funciones PPI y RHI, control manual
Radomo	Paneles sándwich geotalc, máxima velocidad de viento 240 Km/h
Procesamiento digital	Receptor de múltiples canales con una frecuencia intermedia de 70 MHz y conversor A/D de 24 bits.

CPU	Sistema Operativo GNU/Linux, plataforma paralela y escalable con GPGPU en computador comercial.
-----	---

El enfoque metodológico se concentra en la relación entre las prestaciones existentes de RM, las prestaciones posibles de desarrollar en un futuro, y la vulnerabilidad urbana y rural frente a distintos eventos, como así también a las capacidades para proveer información sensible en la prevención, alerta y manejo de emergencias y contingencias (Tabla 2).

#### *Lluvias y tormentas severas, grandes nevadas*

En la zona de meseta en su región central, y en la costa atlántica, se acepta que en general las lluvias son escasas e infrecuentes, con tormentas que raramente alcanzan un desarrollo vertical importante.



**Figura 1.-** Vista del RMA2-Ezeiza, Instituto Nacional del Agua, durante las pruebas finales en sitio de diciembre 2014

Sin embargo, las grandes lluvias y nevadas por eventos meteorológicos severos, en las distintas regiones patagónicas, abundan en la historia. Así lo relata por caso Williams M.

Hughes, en “A orillas del Rio Chubut”, memorando las épocas de la gesta galesa, a las grandes lluvias y crecidas del Rio Chubut de los años 1899, 1901, 1902 (Hughes, 1926).

En la costa atlántica patagónica existen antecedentes de eventos extraordinarios, algunos con efectos catastróficos, como los de Trelew (1992, 1998), zona de Arroyo Verde y Telsen (2014), Puerto Madryn (enero 2016) Comodoro Rivadavia (2011, 2014, 2017), entre muchos otros.

A la ocurrencia de lluvias y nevadas severas se suman otros incidentes más frecuentes, derivados de tormentas de vientos fuertes, rafagosidad con direcciones cambiantes, incendios forestales y de campos, plumas de cenizas y cenizas volcánicas. Sus efectos dificultan la organización de la defensa civil en áreas urbanas y en zonas rurales, así como el combate y mitigación ante incendios, y afectan la navegación aérea y la navegación marítima de la flota pesquera amarilla que ha tenido en los últimos años decenas de naufragios.



**Figura 2.-** Mapa preliminar de ubicación de sitios de RMA, año 2014

En un documento titulado “Radares meteorológicos en Patagonia” (Serra, 2014), se introduce la conveniencia de disponer de RM de la red SINARAME en sitios patagónicos, con énfasis en la costa atlántica. Si bien la frecuencia y magnitud ordinaria de las lluvias en gran parte del

territorio de la Patagonia argentina es reducida, y su densidad poblacional media es baja, el documento refuta el uso de estos indicadores, poniendo el enfoque en los “eventos meteorológicos severos”, la alta concentración poblacional en conglomerados urbanos, las dificultades de comunicación vial y transporte en poblados rurales y en “la meseta” durante estos eventos. El documento muestra la ocurrencia de eventos severos históricos, y la alta frecuencia de ocurrencia en la región, particularmente la zona patagónica costera atlántica.

Estos eventos son analizados en mayor detalle en un trabajo presentado en este CONAGUA 2017 bajo el título de “Selección de eventos hidrometeorológicos severos en la Patagonia Argentina”, que incluye la tormenta excepcional producida en Comodoro Rivadavia entre el 29 de marzo y el 3 de abril, con una lluvia en 24 horas de 232 mm, y un acumulado de 301,3 mm, según datos proporcionados por el SMN (Serra et al., 2017).

Se refieren tormentas de lluvias y crecidas extraordinarias a excepcionales, particularmente en las dos últimas décadas, ocurridas en la costa atlántica del sur argentino.

**Tabla 2.** Prestaciones del radar asociados a posibles aplicaciones

<b>Prestaciones del RM asociadas a:</b>	<b>Aplicaciones</b>
<b>Precipitaciones</b> (lluvia, nieve, granizo): alertas de inicio, pronósticos de desarrollo y finalización del evento. Intensidad de lluvia en superficie, lluvia acumulada en “n” horas, periodos largos de acumulación; precipitación horaria en superficie; precipitación acumulada en cuencas; visualización de datos pluviométricos, líquido integrado verticalmente; etc	Información útil a defensa civil en zonas urbanas, producción agropecuaria en valles, actividad petrolera, programación de operación de embalses (Ameghino), programación de tomas para agua potable (Valle Inferior del Río Chubut), comunicación vial en rutas nacionales, urbanas, y entre poblados pequeños y los centros urbanos (zonas de meseta).
<b>Grandes nevadas:</b> alertas de inicio, pronósticos de desarrollo y finalización.	Información útil para la comunicación vial, centros de esquí, poblaciones aisladas, navegación, información radial al poblador rural, pobladores de la meseta, etc.
<b>Tormentas de vientos:</b> intensidad, rotación o cambio de dirección: vientos de corte; velocidad de acimut; perfil vertical de vientos; viento horizontal; cortantes radiales; cortantes en acimut; otros.	Información útil en áreas urbanas, rutas viales, aéreas y marítimas, áreas de pesca marítima de la flota amarilla y costera, combate de incendios forestales e incendios de campos y pastizales, actividades de campo de la explotación petrolera, y muchas otras.
<b>Cenizas</b> (deseable), volcánicas, por incendios, por vientos. Alerta de cenizas, comienzo, desarrollo, final.	Aeronavegación, comunicación vial, centros urbanos, productores agropecuarios.
<b>Cizalladuras / Aves</b>	Navegación aérea en aeropuertos

Los resultados muestran que la precipitación máxima y la probabilidad de ocurrencia de un evento severo en la costa atlántica son mucho más altos a los que suelen atribuirse si se analizan aisladamente en un punto o estación del territorio. Ese trabajo contribuyó a recomponer la falsa idea de ausencia de eventos severos por lluvias en la Patagonia, particularmente en la región de la costa atlántica, y de mesetas cercanas a la costa.

Se exploran además posibles aplicaciones en futuros productos relacionados a vientos, cenizas, polvo, incendios, nevadas, entre otros.

El trabajo concluye recomendando los sitios de Trelew, Comodoro Rivadavia y Río Gallegos/Río Grande, y que fueran oportunamente preseleccionados como posibles ubicaciones en mapas preliminares del SINARAME.

### *Tormentas de vientos, polvo, cenizas, incendios*

El efecto de los vientos en las distintas regiones de la Patagonia es una particularidad que tiene diversos enfoques. Pero en relación a los productos de RM Doppler, y los posibles productos que se pueden lograr, es importante destacar la prevención, alerta, seguimiento y manejo de incendios forestales y de pastizales en campos, plumas de polvo en grandes fondos de lagunas, o de cenizas volcánicas. La programación de contingencias y de manejo en las

situaciones emergentes resulta de gran utilidad para la organización de la defensa civil de importantes ciudades sureñas.

### *Cizalladuras*

La cizalladura de viento a baja altura es el cambio abrupto de su velocidad o dirección, en forma de remolinos o ráfagas turbulentas entre capas de aire, o corrientes ascendentes o descendentes (Katja y Hagen, 2004). Las “cizalladuras” o “micro-ráfagas” afectan mayormente la seguridad de las aeronaves en las operaciones de despegue y aterrizajes, por debajo de los 1.600 ft.

En estas operaciones las alturas de vuelo de una aeronave y sus velocidades aerodinámicas pueden acercarse a valores críticos, y su respuesta a cizalladuras es una maniobra de alta complejidad. Si bien los accidentes son poco frecuentes por esta causa, los vuelos son vulnerables en aeropuertos ventosos, como por caso los de Comodoro Rivadavia, Trelew o Rio Gallegos.

El 2 de agosto de 1985 un Lockheed L-1011 Tristar en vuelo 191 Delta Airlines, se accidentó en Aeropuerto Internacional de Dallas-Fort Worth durante el aterrizaje, por micro-ráfagas, con 137 víctimas fatales.

Con posterioridad el aeropuerto de Dallas y otros fueron equipados con Radares Meteorológicos Doppler banda C, para la detección temprana de cizallas (Osborne, 2016). Entre otros accidentes aéreos similares originados en micro-ráfagas en aterrizajes, pueden citarse casos como el vuelo 1420 de un MD 82 de American Airlines, en Little Rock, Arkansas (1/6/1999); el vuelo 1016 de US Airways, un McDonnell Douglas DC-9, en el aeropuerto de Columbia (2/7/1994); el vuelo 80 de FedEx, un MD11, en el aeropuerto de Narita, en Tokio (23/3/2009).

### *Aves y navegación aérea sobre aeropuertos*

Por caso, las redes de radares meteorológicos de aeropuerto TDWR (Terminal Doppler Weather Radar) de Estados Unidos, generalmente banda C, además del propósito meteorológico de detección temprana y alerta de precipitaciones, y de cizallamientos, incorpora productos para la detección y aviso de aves que presentan riesgo a las aeronaves en sus despegues y aterrizajes. En estos casos, la red fue financiada por la Administración Federal de Aviación, en los años '90. También hay en uso sistemas de radares móviles con este fin específico.

### *Navegación costera (flota amarilla)*

La flota costera que navega las primeras 3 millas de litoral marítimo, conocida como “flota amarilla”, ha sido afectada por tormentas en distintas circunstancias. Un informe producido por la “Fundación Histarmar” (Histarmar, 2017) alude a distintos naufragios históricos en el mar argentino, 66 en costa chubutense, de los cuales 24 son en el área de Puerto Madryn, 9 en Rawson, 33 en Comodoro Rivadavia. Se agregan 20 en costas de Rio Negro y 76 registros históricos en costas de Santa Cruz.

Solo desde el nuevo siglo, pueden citarse naufragios de las embarcaciones Don Roberto, Don Rosario G, Siempre Don Pablo, Santa Lucía, Don Víctor, Don Juan, Jesús del Camino.

La radarización meteorológica de las costas del litoral marítimo puede ser de gran utilidad en la prevención y alerta de la flota pesquera amarilla, y muchas otras pequeñas embarcaciones.

### EVALUACIÓN DE RESULTADOS Y APLICACIONES

El trabajo aportó a una mejor comprensión de la relación entre los productos de RM y sus aplicaciones, particularmente en la costa y litoral atlántico de nuestra Patagonia. Tormentas severas de lluvia y nieve, vientos, cizalladuras o micro-ráfagas, son eventos donde los productos del RM pueden contribuir en gran medida a la prevención, alerta temprana, y un mejor manejo de las contingencias derivadas. La organización de la defensa civil en áreas urbanas y rurales, la navegación marítima y aérea, la comunicación vial e intercomunicación con poblados del interior, entre otros mencionados, son sus posibles aplicaciones.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis que se realiza es demostrativo de la necesidad y conveniencia de contar con una red de radares meteorológicos, con tecnología Doppler, en la Patagonia Argentina, para el mejoramiento de la prevención y alertas por eventos meteorológicos con impactos severos, en particular en la zona costera atlántica. Los radares de la serie RMA presentan características técnicas apropiadas a los fines del monitoreo requerido en esta región del país.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Chachero, M.J.** (2012) “Estudio de Precipitaciones en la ciudad de Trelew- Análisis Estadístico y Ecuación de Lluvia”. Cuadernos del CURIHAM, UNR Editora, Vol 18, Año 2012, pp. 23-37.

**Chachero, M.J.** (2013) “Análisis de Precipitaciones Máximas en Comodoro Rivadavia” Cuadernos del CURIHAM, UNR Editora, Vol 20, Año 2014, URI:<http://hdl.handle.net/2133/7139>.

**Chachero, M.J.** (2014) “Precipitaciones Máximas en Puerto Madryn. Análisis de caso: Tormenta de abril de 2014”. Revista Argentina de Ingeniería (RADI), Año 2 Vol. IV, Octubre de 2014, pp. 65 a 72

**Fundación Histarmar** (2017) Historia y arqueología marítima. En Histarmar: <http://www.histarmar.com.ar/IndAccidentes.htm>

**Hughes, W. M.** (1926). “A orillas del Río Chubut en la Patagonia”. Ed. Martínez y Rodríguez.

**Katja Friedrich & Martin Hagen (2004).** On the use of advanced Doppler radar techniques to determine horizontal wind fields for operational weather surveillance. Institut fuer Physik der Atmosphaere, Deutsches Zentrum fuer Luft-und Raumfahrt (DLR), Oberpfaffenhofen, Wessling, Germany. Email: [Katja.Friedrich@dlr.de](mailto:Katja.Friedrich@dlr.de), [Martin.Hagen@dlr.de](mailto:Martin.Hagen@dlr.de).

**Osborne A.** (2016) Assessing the Impact of Non-Conventional Observation Types on High-Resolution 3DVAR Analyses and ARW-WRF Forecasts, School of Meteorology. National Weather Center. University of Oklahoma.

**Rodríguez A., Lacunza C., Serra J., Saulo C., Ciapessoni H., Caranti G., Bertoni J.C., MartinaA.** (2017) SiNaRaMe: El primer Sistema Integrado de Radares Hidro-

Meteorológicos de Latinoamérica. Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (UNC). ISSN 2362 - 2539 (Versión electrónica)

**Serra J.** (2014). Radares Meteorológicos en Patagonia: contribución a la evaluación y selección de sitios de emplazamiento. FI-14-IT-001.14.2.pdf. CD-DICH, CD-DICH, Facultad de Ingeniería, UNPSJB, Chubut.

**Serra J., Chachero M. J. y Brandizi L.** (2017). Selección de eventos hidrometeorológicos severos en la Patagonia Argentina.