

# SiNaRaMe: Integración de una Red de Radares Hidro-Meteorológicos en Latinoamérica

Andrés Rodríguez<sup>1,8</sup>, Carlos Lacunza<sup>2</sup>, Juan J. Serra<sup>4,5</sup>, Celeste Saulo<sup>3,6,8</sup>, Héctor Ciappesoni<sup>3</sup>, Giorgio Caranti<sup>7</sup>, Juan Carlos Bertoni<sup>1</sup>, Agustín Martina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina*

<sup>2</sup> *Subsecretaría de Recursos Hídricos, Argentina*

<sup>3</sup> *Servicio Meteorológico Nacional, Argentina*

<sup>4</sup> *Instituto Nacional del Agua, Argentina*

<sup>5</sup> *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional San Juan Bosco, Argentina*

<sup>6</sup> *Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina*

<sup>7</sup> *Facultad de Matemática, Astronomía y Física, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina*

<sup>8</sup> *Conicet, Argentina*

Fecha de recepción del manuscrito: 30/05/2016

Fecha de aceptación del manuscrito: 22/12/2016

Fecha de publicación: 15/03/2017

**Resumen**— Pocos países en Latinoamérica poseen radares meteorológicos operativos y, menos aún, han logrado la integración de estos mediante una red, junto a otros instrumentos y sensores remotos para monitoreo hidro-meteorológico. Definitivamente esto constituye una meta de suma importancia para cualquier país; en especial para aquellos tan extensos como la Argentina. Por esta razón, en 2009, se inició en la República Argentina un proyecto denominado Sistema Nacional de Radares Meteorológicos (SiNaRaMe) cuya meta principal fue lograr la cobertura completa del territorio nacional mediante la integración y modernización de la dispersa infraestructura disponible, como así también el desarrollo y provisión de once modernos sistemas de radar de fabricación nacional (la serie de Radares Meteorológicos Argentinos, RMA). SiNaRaMe, actualmente siendo llevado a cabo con éxito, coloca a la Argentina como pionera en tecnologías para hidro-meteorología, a nivel regional. El presente trabajo describe este ambicioso proyecto incluyendo uno de los más importantes aspectos a considerar en la búsqueda de una red de radares meteorológicos completamente funcional: su proceso de calibración. También se presentan los primeros resultados de la detección de eventos naturales como la erupción del volcán Calbuco y de una tormenta severa en Anizacate (Córdoba) medidas con el RMA0 y el RMA1, respectivamente.

**Palabras clave**— Banda C, Calibración, Doble-polarización, Integración Institucional, Red de Radares Meteorológicos.

**Abstract**— Very few countries in Latin America have Weather Radars in operation and even less have managed to integrate them as a network along with some other remote sensing instruments for hydro-meteorological monitoring. Certainly, this is of paramount importance for any country, especially for those as extensive as Argentina. In 2009, Argentina founded the National Weather Radars System (SiNaRaMe). Its purpose was to completely cover Argentina's territory by integrating and upgrading existing infrastructure and more importantly, by fully manufacturing eleven modern weather radar systems (the RMA series). SiNaRaMe, currently being developed with a measure of success, constitutes a pioneering experience for the region. This paper describes this project including one of the most important aspects to consider in the pursuit of a fully functional weather radar network: its calibration process. Also first results are included, such as Calbuco volcano eruption and a severe storm in Anizacate (Córdoba), measured by RMA0 and RMA1 respectively.

**Keywords**— C-Band, Calibration, Dual-Polarization, Institutional Integration, Weather Radar Network

## INTRODUCCIÓN

Para poder cubrir adecuadamente fenómenos hidrometeorológicos sobre áreas extensas tales como regiones o países, es necesario contar con un arreglo de instrumentos de sensores remotos: satélites, estaciones meteorológi-

cas, sistemas de radares meteorológicos, drones, etc. Si además se pretende extraer información valiosa de todos estos componentes y mostrarla de la manera más integrada, intuitiva y eficaz posible, se requiere desarrollar una red compleja de monitoreo. Esta es la meta a largo plazo del Sistema Nacional de Radares Meteorológicos (SiNaRaMe, [www.sinarame.gob.ar](http://www.sinarame.gob.ar)) en Argentina: un proyecto hidrometeorológico nacional, fundado en 2009, centrado en la integración, desarrollo y calibración de una red de radares meteorológicos.

Dirección de contacto:

Andrés Rodríguez, Avenida Vélez Sarsfield 1611 Ciudad Universitaria, X5016 CGA. Tel: +5491159864114, [ingandresrodriguezallen-de@gmail.com](mailto:ingandresrodriguezallen-de@gmail.com)

Existe una amplia variedad de sistemas de radar clasificados según sea su frecuencia de operación. Los más utilizados para observaciones meteorológicas son aquellos correspondientes a las bandas de frecuencia X, C, y S. La Tabla 1 ofrece una sucinta descripción de los mismos y los compromisos asociados a la elección de cada una de estas bandas. Teniendo en cuenta los aspectos detallados en dicha tabla se dieron los primeros pasos de SiNaRaMe, encaminados en la elección de una banda de frecuencia para sus sistemas de radar.

Habiendo analizado las ventajas y desventajas que ofrece cada banda de operación, se optó por la banda C como mejor opción para la red argentina. Si bien las razones para esta elección se explican más adelante en este trabajo, es importante destacar que no existe un criterio único para esta selección. Por ejemplo, países como Brasil y Estados Unidos utilizan banda S en sus sistemas de radar, mientras que España, Reino Unido y Alemania, entre otros, han optado por banda C.

TABLA 1. Características principales de radares meteorológicos en banda s, c y x

Banda	Rango de frecuencias	Características principales
S	2.7 GHz ~ 2.9 GHz	Apropiado para la lluvia pesada a gran distancia (más de 300 km). Baja atenuación, pero requiere mucha potencia. Requiere antena y pedestal más grande, por lo que se elevan los requerimientos de infraestructura (mayor peso, mayores costos).
C	5.2 GHz ~ 5.7 GHz	Buena sensibilidad para el rango de observación (hasta 240 km) a un costo más bajo que el de banda S. Antenas y transmisores más pequeñas. Infraestructura más liviana. Decorrelación más rápida permite una mejor resolución en tiempo. Más propensos a la atenuación por lluvia que banda S. Hidrometeoros grandes entren en el régimen de resonancia.
X	9.3 GHz ~ 9.5 GHz	Su excelente sensibilidad y reducido tamaño permite tanto implementaciones fijas como móviles. Da un mejor detalle de partículas pequeñas. Alta absorción que limita su utilidad a 80 km de rango.

En cuanto a capacidades de potencia, los rangos máximos alcanzables con banda S y con banda C son comparables. Sin embargo, grandes distancias de cobertura (>300 Km) implican no sólo observaciones demasiado elevadas sobre las nubes respecto del terreno (debido a la curvatura terrestre) sino también bajo nivel de detalle, a causa de los efectos por ensanchamiento de haz. Por estas razones, mientras sea posible, es preferible diseñar una red de radares relativamente próximos. Esto garantiza mediciones más cercanas al nivel terrestre y con mejor resolución espacial.

Muy relacionado a la cobertura máxima está el factor de costo: los radares de banda C se consiguen a una fracción del costo respecto a los de banda S. Esto hace muy atractiva la opción de banda C, ya que posee mejor densidad de cobertura por el mismo costo.

En cuanto a las desventajas en la elección de esta banda de frecuencia, si bien su atenuación por lluvia es importante, el uso de doble polarización y de las variables polarimétricas asociadas (más adelante definidas) permite sobrellevar esta dificultad. Por estos motivos, desde el inicio de

SiNaRaMe, se consideraron imprescindibles las características de polarimetría y Doppler para los radares de la red.

## ANTECEDENTES

La Argentina, ya para el año 2006 y previo a la creación del SiNaRaMe, contaba con algunos sistemas de radar meteorológicos, los cuales pertenecían a un pequeño número de instituciones. La Armada Argentina e Hidrografía Naval contaban con dos radares en la provincia de Buenos Aires: uno en Bahía Blanca y otro en Capital Federal (marca EEC, polarización simple). El Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) contaba con tres radares Gematronik<sup>1</sup> (Doppler, de doble polarización) ubicados en tres ciudades diferentes: Paraná, Entre Ríos; Anguil, La Pampa y Pergamino, Buenos Aires. A su vez, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) poseía un radar (EEC<sup>2</sup>, Doppler) ubicado en el Aeropuerto Internacional Ezeiza, Buenos Aires. Por otro lado, la Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas (DACC<sup>3</sup>) de la provincia de Mendoza, contaba con tres ejemplares rusos: los MRL5 de doble frecuencia (bandas C y X). Finalmente, la empresa Latser<sup>4</sup> de la provincia de Jujuy tenía otro MRL5. La Figura 1 muestra el plan de despliegue de radares meteorológicos de Argentina, incluyendo las localizaciones (presentes y futuras) para la cuenca del Río de la Plata.

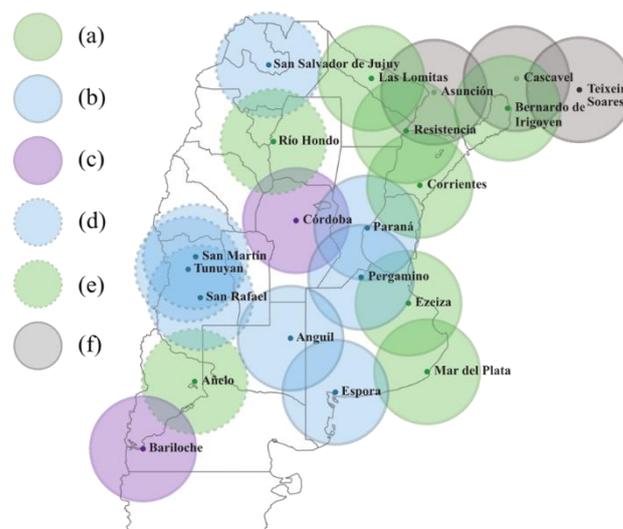


Fig. 1. Distribución orientativa de los radares en Argentina, Paraguay y Sudeste de Brasil: a) Radares de la etapa II de SiNaRaMe y su área de cobertura (240 km), b) Radares existentes en 2009, c) Radares de la etapa I de SiNaRaMe, d) Radares existentes, provinciales y privados, e) Lugar a confirmar, f) Radares existentes en Paraguay y estado de Paraná, Brasil, (el radar de Corrientes es indicativo).

Previamente a la creación de SiNaRaMe, podría decirse que existía una débil conexión entre los sistemas de radar mencionados en la Figura 1. Cada uno de estos sistemas estaba configurado de acuerdo a sus necesidades locales, de manera aislada. Es más, como las tecnologías de radar eran de alguna manera nuevas para la mayoría de los meteorólogos

1 <http://www.de.selex-es.com/capabilities/meteorology?WT.ac=Meteorology>

2 <http://www.eecradar.com/index.php>

3 <http://www.contingencias.mendoza.gov.ar/web1/>

4 <http://www.latser.com.ar/home/index>

gos y profesionales en el País, la calibración in-situ era llevada a cabo por especialistas extranjeros, quienes rara vez estaban familiarizados con las características hidrometeorológicas de la región de interés. Este aspecto crucial estuvo muy presente desde la creación de SiNaRaMe, dado que uno de los requerimientos más importantes en las mediciones de radar consiste en disponer de instrumentos confiables y calibrados. Dicho proceso de calibración está lejos de ser trivial, ya que, no sólo son complejas las relaciones que gobiernan las estimaciones de radar, sino que estas relaciones son funciones dinámicas de la temporada del año y las características geográficas de la región explorada.

Con respecto a este último aspecto, desde la contribución seminal de Marshall y Palmer (Marshall and Palmer 1948), ciertas relaciones entre la tasa de precipitación (R) y el factor de reflectividad de radar (Z) han sido propuestas. Más aún, se ha encontrado que las partículas dentro de las nubes tienen una gran variabilidad en su distribución de tamaños, tanto espacial como temporalmente (Ulbrich and Atlas 1998), razón por la cual no podría existir una única relación Z-R. La distribución de tamaños, incluso la más simple de las propuestas, tiene al menos dos parámetros (cantidad y tamaño medio de las partículas). La distribución más ampliamente utilizada corresponde a una función Gamma, la cual añade un parámetro más: la forma. Esto sugiere la necesidad de extraer más parámetros desde el radar para determinar R, lo cual hace a los radares de doble polarización muy útiles (Ryzhkov, Giangrande, and Schuur 2005; Kumjian 2013; Adachi, Kobayashi, and Yamauchi 2015). Las variables polarimétricas nos permiten encontrar nuevas relaciones:

$$R(Z_h) = aZ_h^b, \tag{1}$$

$$R(K_{DP}) = a|K_{DP}|^b \text{sign}(K_{DP}), \tag{2}$$

$$R(Z_h, Z_{DR}) = aZ_h^b Z_{DR}^c, \tag{3}$$

$$R(K_{DP}, Z_{DR}) = a|K_{DP}|^b Z_{DR}^c \text{sign}(K_{DP}), \tag{4}$$

En estas relaciones,  $Z_h$  es el factor de reflectividad para polarización horizontal, dado en  $\text{mm}^6/\text{mm}^3$ .  $K_{DP}$  es el cambio de fase específico entre polarización horizontal y vertical, dado en  $^\circ/\text{km}$  y  $Z_{DR}$  es la reflectividad diferencial adimensional (en realidad, el cociente entre factores de reflectividad horizontal y vertical, en escala lineal). En estas ecuaciones a, b y c son coeficientes a determinar. Como estos dependen de la localización geográfica y la estación del año en el que uno se encuentre, su determinación representa un importante trabajo de “calibración hidrológica”. Existe un número de trabajos en esta dirección (Sharma *et al.*, 2009) donde términos como convección, transición y lluvia estratiforme son combinados y los coeficientes (a, b y c) calculados para cada caso.

Cierto trabajo preliminar en cuanto a calibración hidrológica ya ha comenzado para algunos radares de la red de SiNaRaMe. Por ejemplo, el INTA ha llevado a cabo algunos estudios de caracterización de diversos tipos de precipitación a través de relaciones simples de Z y R, usando datos de estaciones meteorológicas (Hartmann, M.S. and Bareilles, 2010; Belmonte and Di Bella, 2012). El SMN, por otro lado, está desarrollando métodos para validar sus mediciones de Z, utilizando disdrómetros como así también de datos del satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission).

## COORDINACIÓN INSTITUCIONAL E INTEGRACIÓN INFRAESTRUCTURAL

Al igual que cualquier proyecto científico-tecnológico estratégico, una de las prioridades del SiNaRaMe es contribuir al desarrollo tecnológico e industrial del País. Hasta ahora, dicho proyecto comprende tres etapas sobre un período de ejecución de 15 años, con el objetivo final de conformar una red de 30 radares meteorológicos capaz de proveer una cobertura completa del territorio nacional. Para poder llevar a cabo semejante tarea, se conformó un consorcio de instituciones con intereses comunes. SiNaRaMe es un proyecto de gran escala que afecta a varios organismos a lo largo y ancho del País, que cooperan entre sí. La Figura 2 muestra las instituciones involucradas en el proyecto a fines de 2015.

La primera etapa del proyecto (recientemente concluida) logró integrar los ocho (8) sistemas de radar existentes junto a dos radares nuevos y fabricados en Argentina (la serie RMA desarrollada por INVAP SE), más la implementación de un Centro de Operaciones (COP). Este último fue terminado en Abril de 2015 (Figura 3) y está localizado en el nuevo edificio del SMN, adecuadamente diseñado y equipado para monitorear y coordinar todos los radares e instrumentos de sensado remoto presentes en la red de SiNaRaMe, actual y futura.

La segunda etapa, actualmente en curso, incorpora 10 nuevos RMA a la red junto a 5 sub-centros de procesamiento regional, más 55 estaciones meteorológicas con 11 disdrómetros. La tercera etapa logrará mayor densidad y calidad de cobertura, extendiendo la red a cerca de 30 radares meteorológicos.



Fig. 2. a) Distintos organismos que integran el consorcio de SiNaRaMe, b) Instituciones internacionales asociadas, a finales de 2015.

## DISEÑO NACIONAL Y SELECCIÓN DEL TIPO DE RADAR

En 2009, siguiendo una propuesta del Consejo Hídrico Federal (COHIFE) de la República Argentina, la Subsecretaría de Recursos Hídricos del Ministerio de Planificación Federal y la empresa estatal INVAP SE, firmaron un con-

trato para llevar a cabo la primera etapa del proyecto SiNaRaMe. Esta etapa consistió en el desarrollo y provisión del primer Radar Meteorológico Argentino (RMA) y del desarrollo y provisión de un Centro de Operaciones (COP), que integrara los radares existentes. Los radares de la serie RMA (Figura 4) son de tipo Doppler, doble polarización simultánea, en banda C, fabricados en Argentina, con especificaciones que se presentan en la Tabla 2.

Posteriormente en 2015 se acordó que el Consejo del SiNaRaMe estuviera coordinado por los representantes de Ministerios nacionales (los actuales ministerios de Interior, Obras Públicas y Vivienda, el de Defensa, el de Ambiente y Desarrollo Sustentable y el de Agroindustria).



**Fig. 3.** Centro de Operaciones SiNaRaMe (SMN sede Dorrego, Buenos Aires)

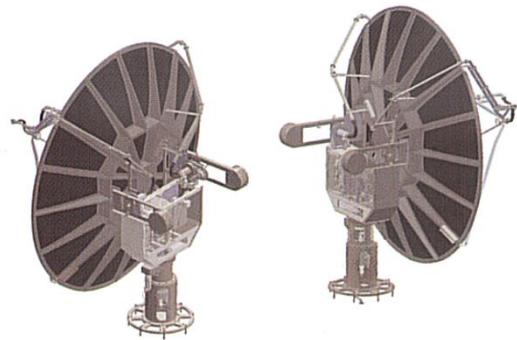
**TABLA 2.** Especificaciones técnicas de la serie RMA

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 geotale, máxima velocidad de viento 240 Km/h

Procesamiento digital	Receptor de múltiples canales con una frecuencia intermedia de 70 MHz y convertor A/D de 24 bits.
CPU	Sistema Operativo GNU/Linux, plataforma paralela y escalable con GPGPU en computador comercial.

## NUEVAS LOCALIZACIONES DE LOS RMA

Los radares RMA nuevos están siendo localizados según criterios técnicos que combinan requerimientos logísticos (seguridad, energía, conectividad a red de fibra óptica, existencia de interferencias, etc.), del tipo de meteorología local (existencia de tormentas severas, granizo, etc.) y visibilidad (orografía y bloqueo de la señal), principalmente. De acuerdo con esto, el RMA1 se instaló en Córdoba (Figura 5), RMA2 en Ezeiza (Prov. Buenos Aires) donde reemplaza al radar existente del SMN a ser relocado, RMA3 en Las Lomitas (Formosa), RMA4 en Resistencia (Chaco) y RMA5 en Bernardo de Irigoyen (Misiones) ya localizados en sus torres. Los siguientes se colocarán en: Mar del Plata (Prov. Buenos Aires), Añelo (Neuquén), Las Termas de Río Hondo (Santiago del Estero), Río Grande (Tierra del Fuego), Provincia de Corrientes (Mercedes o Pasos de los Libres) y Base Espora, Bahía Blanca (Prov. Buenos Aires). Algunas de estas localizaciones se presentan en la Figura 1.



a)



b)

**Fig. 4.** a) Vista de la antena y pedestal de los RMA. b) facilidad de prototipos para investigación en radares de INVAP (izquierda) y RMA 0 (derecha), Aeropuerto de San Carlos de Bariloche, Argentina.



Fig. 5. Vista aérea del sitio del RMA1, en el predio de la Universidad Nacional de Córdoba

### ETAPA DE CALIBRACIÓN

La Segunda etapa del proyecto SiNaRaMe, incluye el inicio del proceso de calibración electrónica, e hidrológica de los distintos radares meteorológicos RMA para diferentes tipos de meteoros. Estas tareas no son triviales y, si bien hay numerosos antecedentes (Li, Schmid, and Joss 1995; CSIM 1989; Gómez and Rodríguez 2010; Méndez-Antonio et al. 2014; Nan et al. 2010), su correcta implementación lleva cerca de diez años de pruebas y desarrollo de experiencia, tal como fueron los casos de Cataluña y Canadá (Sempere and Zawadzki 2012).

La confiabilidad de una red de radares meteorológicos está condicionada por la calidad de sus calibraciones. La calibración electrónica está a cargo del INVAP y algunos grupos de I+D de los nodos académicos del SiNaRaMe, siguiendo metodologías propias y otras como la presentada por Agilent Tech (Agilent Technologies 2014). Por otro lado, la calibración hidrológica es realizada en paralelo por distintos grupos, los ya mencionados del INTA (Hartman, Tamburrino, and Varellis 2011), SMN (Vidal, Salio, and Pappalardo 2011) y el Grupo Radar Córdoba GRC (Caranti et al. 2015) que inició los trabajos de calibración del RMA1 (Bertoni et al. 2014) en Córdoba. La metodología de calibración aplicada consiste esencialmente en correlacionar las mediciones de contenido de agua líquida en suspensión realizadas por el sistema radar, contra las obtenidas por una serie de estaciones meteorológicas en tierra. Estas últimas, proveen una medición cuantitativa confiable sobre precipitación de agua líquida a nivel de superficie, entre otras variables meteorológicas importantes (Furbato 2016).

### EJEMPLOS DE MONITOREO

En esta sección se muestran dos ejemplos de monitoreo utilizando los RMA, uno con el RMA0 y el otro con el RMA1.

El primer caso corresponde a una de las aplicaciones no convencional en radares hidro-meteorológicos: el seguimiento de plumas de erupciones volcánicas (Bignami et al. 2014). El volcán Calbuco entró en erupción el día 22 de abril de 2015 (Figura 6), liberando enorme cantidad de materiales a gran altura. Afortunadamente el volcán se encuentra dentro del rango del RMA0, el primer radar experimental instalado en la ciudad de Bariloche. Se pudo realizar el seguimiento de la pluma por un periodo prolongado de

tiempo y los detalles del evento han sido recientemente presentados por Vidal (Vidal et al. 2015). Ejemplos de dichas mediciones se presentan en las Figuras 7 y 8, (Poffo 2017).

Se presenta un segundo caso con una aplicación importante, especialmente para hidro-meteorología: el seguimiento de tormentas severas, tal como se muestra en Bertoni et al. (2016) a partir de las mediciones realizadas con el RMA1, localizado en Córdoba (Figuras 9 y 10), al que se le agrega los valores medidos por una Estación Meteorológica Automática (AWS), ubicada en cercanías de la tormenta (en Anizacate en S 31°43'25"; W 64° 24'17", ver ubicación en Figuras 9a y 12) a 473 m.s.n.m y es parte de la red INA CIRSA. El evento medido el 7 de noviembre de 2015, se trató de una tormenta intensa localizada sobre la localidad de Anizacate (Córdoba, Argentina) al sur oeste del radar.



Fig. 6. Erupción del Calbuco el 22 de Abril de 2015 (Brecas, 2015)

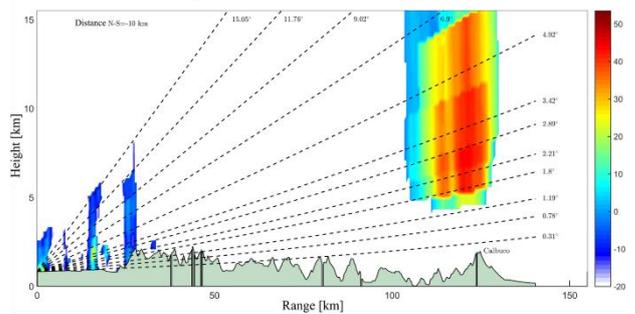


Fig. 7. Factor de reflectividad horizontal (ZH) de la pluma volcánica medida con el RMA0, localizado en San Carlos de Bariloche, Argentina. Las cenizas fueron emitidas por el volcán Calbuco el día 22 de abril de 2015 a las 21:45:53 (UTC).

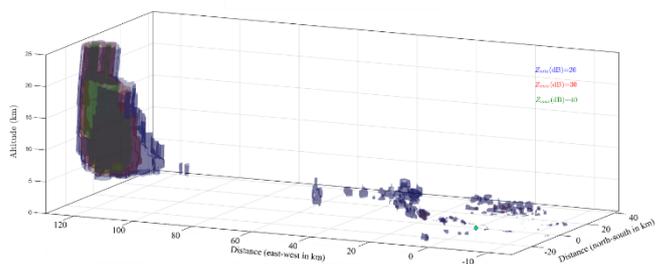
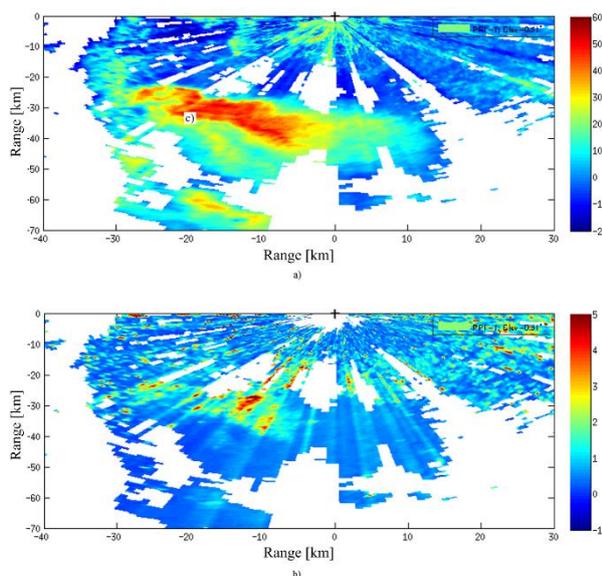
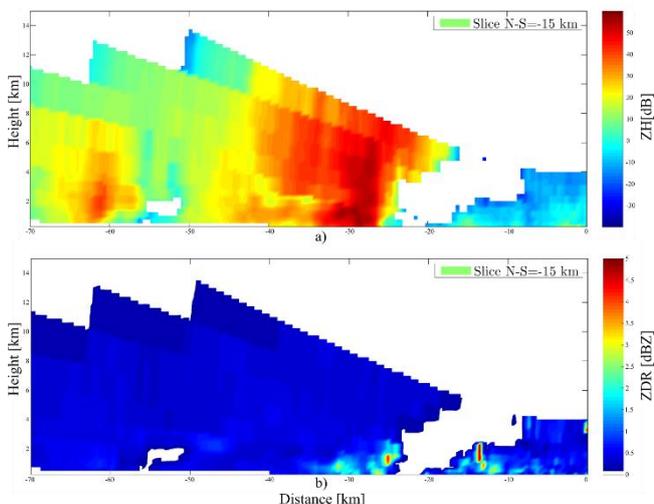


Fig. 8. Representación en tres dimensiones del contorno de la pluma volcánica emitida por el volcán Calbuco el día 23 de Abril de 2015 a las

5:11:18 (UTC), realizada a partir de las mediciones de ZH con el RMA0.

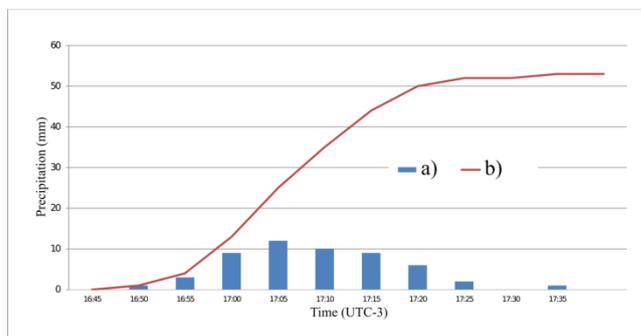


**Fig. 9a y 9b:** Productos del RMA1 tomados el día 7 de Noviembre de 2015 a las 20:02:18 (UTC). En la figura a) factor de reflectividad horizontal (ZH). Notar los ecos altos (>45 dBZ) a 30 km hacia el sur y 10 km hacia el oeste. En la figura b) se observan valores de reflectividad ZDR, que oscilan entre los 1 y 5dB. Del análisis de ambas figuras se puede inducir que en la zona en estudio existe una mixtura entre granizo (lugares de gran ZH y ZDR cercanos a la unidad) y gotas grandes (zonas con altos valores de ZH y altos valores de ZDR) (Bringi and Chandrasekar, 2001) c) Locación de la comuna de Anizacate.



**Fig. 10a y 10b:** Corte RHI (Range Height Indicator) realizado con el RMA1 de la misma tormenta de la Figura 9. En la figura a) se muestran los valores de ZH y en la figura b) se muestran los valores de ZDR. Se observa a 30 km al sur, un núcleo de niveles de ZH y valores de ZDR superiores a 1 dB en la misma ubicación, al igual que en la Figura 9.

Se observa en la Figura 11 la precipitación medida a intervalos de 5 minutos y la precipitación acumulada, medida en la estación de Anizacate. Se trató de un evento intenso y localizado, concentrado en los alrededores de la localidad, y con caída inicial de granizo. Se registró una lámina precipitada de 50 mm en 30 minutos.



**Fig. 11.** Precipitación medida con una estación meteorológica localizada en Anizacate, Córdoba. A) Precipitación medida cada 5 minutos. B) Precipitación acumulada.

## INTEGRACIÓN REGIONAL Y TRABAJOS FUTUROS

Adicionalmente a la integración nacional que SiNaRaMe realizó, se puso en marcha el proceso de integración con el equipamiento de otros países de la región. En el proyecto Global Environment Facilities (GEF) Programa Marco para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Plata en Relación con los Efectos de la Variabilidad y Cambio Climático (<http://proyectoscic.org/>), un proyecto regional de gestión de recursos hídricos (CIC-PM 2015). Recientemente se acordó la integración de los radares existentes en la cuenca del Plata: 4 iniciales de Argentina, 2 iniciales de Brasil y 1 de Paraguay) y su ampliación con 4 radares más de Argentina, 3 radares más de Brasil y algunos más de los 3 países restantes de la cuenca (Figura 1).

La calibración hidrológica del RMA1 se está realizando utilizando numerosas estaciones hidro-meteorológicas que están dentro de su área de cobertura, pertenecientes a diferentes redes: cinco (5) estaciones Väisälä de la red SiNaRaMe (Figura 12), aproximadamente veinticinco (25) estaciones Sierra Misco-SM de la red del INA CIRSA y cerca de veinticinco (25) estaciones (SM y Omixon) de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba.

Una de las estaciones de la red SiNaRaMe tiene acoplado un disdrómetro OTT Pasival II que mide distribución de tamaños de gotas de lluvia y velocidad (figura 13).

Para finalizar, el trabajo futuro se orienta a desarrollar más recursos humanos para aprovechar la nueva infraestructura existente y poder procesar la enorme cantidad de información que a partir de ella se genera. De esta manera se pretende adecuar los pronósticos y alertas a las particularidades climáticas de las distintas subregiones de la República Argentina. Para alcanzar estos objetivos se llevarán a cabo distintas acciones dentro del SiNaRaMe. Estas incluyen la puesta en marcha de 5 Sub-Centros Regionales de Procesamientos (CPR), para las regiones Norte, Noreste, Centro, Cuyo y Patagonia; la creación y puesta en marcha de programas de posgrado en Meteorología en la UBA y UNLP, posgrados en Radares y Meteorología Aplicada a Hidro-meteorología en la UNC e Instituto Universitario Aeronáutico (IUA) de la Fuerza Aérea Argentina (FAA), contando estas nuevas carreras con el valioso apoyo del SMN.



**Fig. 12:** Red asociada con el RMA1. a) Sitio del RMA1 en la Universidad Nacional de Córdoba (Córdoba), b) AWS-1 en Falda del Cañete, c) AWS-2 en Observatorio Astronómico de Bosque Alegre, d) AWS-3 en Miramar City e) AWS-4 en el Aeropuerto de Villa María, f) AWS-5 en la ciudad de Pilar y g) estación en Anizacate (red del INA CIRSA). La línea circular amarilla encierra el área de cobertura del RMA1 en modo intensidad (rango de 240 km).



**Fig. 13:** Disdrómetro OTT Parsival II, similar al instalado en estación de Falda del Cañete (Indicado como b en Figura 12).

## AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos especiales a INVAP SE y a todas las Instituciones pertenecientes al SiNaRaMe.

## REFERENCIAS

- [1]. Adachi, A., Kobayashi, T. and Yamauchi, H. (2015) 'Estimation of raindrop size distribution and rainfall rate from polarimetric radar measurements at attenuating frequency based on the self-consistency principle', *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Ser. II, Meteorological Society of Japan, 93(3), pp. 359–388.
- [2]. Agilent Technologies (2014) *Agilent Radar Measurements*, (Chap. 4). USA.
- [3]. Belmonte, L. and Di Bella, C. (2012) 'Primeras evaluaciones de estimación de la precipitación a partir del radar meteorológico de Anguil', in *XIV Reunión Argentina de Agrometeorología. RADA*

2012. Malargue, Argentina, pp. 17–19.
- [4]. Bertoni, J., 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. and Villa Uría, A. (2014) 'Puesta en marcha del Primer Radar Meteorológico Argentino RMA1 en la Universidad Nacional de Córdoba', in *XXV Congreso Nacional del Agua*. Paraná, Argentina.
- [5]. Bertoni, J., Caranti, G., Catalini, C., Comes, R., Dasso, C., Furbatto, C., Ingaramo, R., Martina, A., Menajovsky, S., Montamat, I., Poffo, D., Rico, A., Rodríguez, A., González, S. R., Saffe, J., Serra, J., Vicario, L. and Villa Uría, A. (2016) 'Empleo del Radar Meteorológico Argentino RMA1 para la detección de un evento severo', in *XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. IAHR, Lima, Perú.
- [6]. Bignami, C., Corradini, S., Merucci, L., De Michele, M., Raucoules, D., De Astis, G., Stramondo, S. and Piedra, J. (2014) 'Multisensor Satellite Monitoring of the 2011 Puyehue-Cordon Caulle Eruption', *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of. IEEE*, 7(7), pp. 2786–2796.
- [7]. Brecas, A. V. (2015) *Calbuco volcano erupts*, EPA. Available at: <http://www.chicagotribune.com/news/nationworld/chi-calbuco-volcano-erupts-20150422-photogallery.html> (Accessed: 3 October 2016).
- [8]. Bringi, N. V. and Chandrasekar, V. (2001) *Polarimetric Doppler weather radar: principles and applications*. Cambridge University Press.
- [9]. Caranti, G., Comes, R., Mathe, L., Montamat, I., Poffo, D., Rodríguez, A., Rodríguez Gonzalez, S., Saffe, J. and Martina, A. (2015) 'GRC en la radarización Meteorológica de Argentina', in *XVI Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control (RPIC-2015)*, IEEE- UTN. Córdoba, Argentina.
- [10]. CIC-PM (2015) 'Tercer Taller sobre Redes Hidrometeorológicas de la Cuenca del Plata, Brasilia-BR, 01 y 02 de septiembre de 2015', in *Comité Intergubernamental Cuenca del Plata*. Bs. As., Argentina, p. 10.
- [11]. CSIM (1989) 'Il Sistema di Monitoraggio Agro-Idro-Meteorologico realizzato dalla Regione Veneto', in *Centro Sperimentale per l' Idrologia e la Meteorologia*. Padova, Italia: Ed. Teolo, p. 161.
- [12]. Furbato, C. (2016) *Estimación de precipitación a partir del radar meteorológico RMA-1*. UNC.
- [13]. Gómez, R. P. and Rodríguez, J. M. (2010) *El empleo del Radar Meteorológico en los Sistemas de Alerta Temprana para la Predicción de Inundaciones*. Centro de Investigaciones Hidráulicas CIH, La Habana, Cuba.
- [14]. Hartman, T., Tamburrino, M. and Varellis, F. (2011) *Análisis preliminar de datos obtenidos por la red de radares del INTA para el estudio de precipitaciones en la región pampeana*.
- [15]. Hartmann, T., M.S., T. and Bareilles (2010) *Análisis preliminar de datos obtenidos por la red de radares del INTA para el estudio de precipitaciones en la región pampeana*. Available at: <http://inta.gov.ar/documentos/>.
- [16]. Kumjian, M. R. (2013) 'Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part I: Description of the polarimetric radar variables', *J. Oper. Meteor.*, 1(19), pp. 226–242.
- [17]. Li, L., Schmid, W. and Joss, J. (1995) 'Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over a complex orography', *Journal of applied meteorology*, 34(6), pp. 1286–1300.
- [18]. Marshall, J. S. and Palmer, W. M. K. (1948) 'The distribution of raindrops with size', *Journal of meteorology*, 5(4), pp. 165–166.
- [19]. Méndez-Antonio, B., Soto-Cortés, G., Rivera-Trejo, F. and Caetano, E. (2014) 'Modelación hidrológica distribuida apoyada en radares meteorológicos', *Tecnología y ciencias del agua*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 5(1), pp. 83–101.
- [20]. Nan, Z., Wang, S., Liang, X., Adams, T. E., Teng, W. and Liang, Y. (2010) 'Analysis of spatial similarities between NEXRAD and NLDAS precipitation data products', *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of. IEEE*, 3(3), pp. 371–385.
- [21]. Poffo, D. (2017) *Aplicaciones no convencionales del RMA0: detección, caracterización y seguimiento de plumas volcánicas*. UNC.
- [22]. Ryzhkov, A. V., Giangrande, S. E. and Schuur, T. J. (2005) 'Rainfall estimation with a polarimetric prototype of WSR-88D', *Journal of Applied Meteorology*, 44(4), pp. 502–515.
- [23]. Sempere, D. and Zawadzki, I. (2012) 'Comunicación personal', in *Símpoio Internacional de Radarización y Sistemas de Alertas Hidrometeorológicas del Cono Sur*. Bs.As., Argentina.
- [24]. Sharma, S., Konwar, M., Sarma, D. K., Kalapureddy, M. C. R. and Jain, A. R. (2009) 'Characteristics of rain integral parameters during tropical convective, transition, and stratiform rain at Gadanki and its

- application in rain retrieval', *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(6), pp. 1245–1266.
- [25]. Ulbrich, C. W. and Atlas, D. (1998) 'Rainfall microphysics and radar properties: Analysis methods for drop size spectra', *Journal of Applied Meteorology*, 37(9), pp. 912–923.
- [26]. Vidal, L., Nesbitt, S., Salio, P., Osoreo, S., Farias, C., Rodríguez, A., Serra, J. and Caranti, G. (2015) 'C-Band Dual-Polarization Observations of a Massive Volcanic Eruption in South America', in *Radar Conference of American Soc. of Meteorology AMS*. Norman (OK), USA.
- [27]. Vidal, L., Salio, P. and Pappalardo, L. (2011) *Uso combinado de datos TRMM/PR y disdrómetro para corrección de reflectividad de radares meteorológicos en Argentina*. Buenos Aires.