

# Evaluación de algoritmos de probabilidad de granizo con radar meteorológico adaptados a la región Pampeana

Marcos Benedicto<sup>1</sup> y Romina Mezher<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IANIGLA-CONICET

<sup>2</sup> Instituto de Clima y Agua, INTA

[mbenedicto@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:mbenedicto@mendoza-conicet.gob.ar)

[mezher.romina@inta.gob.ar](mailto:mezher.romina@inta.gob.ar)

**Resumen** Mediante el análisis de la base de datos de radares meteorológicos de INTA se aplicó una metodología de probabilidad de caída de granizo en el suelo desarrollada en el Servicio Meteorológico Suizo y se adaptaron dos métodos análogos en la zona central de Argentina. Los resultados de la implementación fueron exitosos para cada una de las técnicas, siendo contrastadas estadísticamente con reportes de granizo en superficie y con las metodologías entre sí. Finalmente se analizaron dos casos de estudio representativos del año 2015 que causaron un fuerte impacto tanto en la actividad agrícola como en la población del Sur de Santa Fe utilizando los radares INTA-Pergamino e INTA-Paraná.

**Keywords:** Riesgo Agrometeorológico · Reflectividad · Daño en cultivos

## 1. Introducción

El fenómeno del granizo genera daños en zonas urbanas y rurales muy importantes, causando pérdidas materiales en diversos países del mundo. Solo en Estados Unidos, y de acuerdo a [3], para el período de 1994-2000 las pérdidas ocasionadas por este fenómeno ascendieron a más de *US*\$2,5 billones por año. En Argentina las tormentas que generan daños por granizo generan grandes pérdidas económicas en los cultivos dependiendo del tipo y su estado fenológico.

De aquí surge la necesidad de elaborar productos que sean capaces de determinar con la mayor precisión posible celdas convectivas con presencia sólo de precipitación líquida, y aquellas que contengan granizo (tanto dentro de la nube como aquel que sea capaz de llegar al suelo). Solamente así podrán tomarse decisiones más concretas a un tiempo óptimo para alertar sobre la ocurrencia de granizo o hasta incluso aplicar técnicas de mitigación. Sobre esto último existen diversos trabajos en la bibliografía, especialmente originados de experimentos en Rusia y utilizados en Argentina en algunas provincias como Mendoza o Jujuy [6], sobre la elaboración de criterios de siembra de nubes que se basan tanto en propiedades geométricas como polarimétricas de las celdas convectivas. La finalidad de estos criterios es determinar el momento justo en el cual debe realizarse

la siembra de núcleos glaciógenos artificiales para optimizar tanto la efectividad de la técnica como el mínimo gasto económico de insumos para la siembra. [7,2].

En particular, el algoritmo de probabilidad de granizo de Witt ([9]), que se basa en estudios previos realizados por [8], es comúnmente utilizado y emplea la altura de la capa de fusión y la altura del valor máximo de un determinado eco estimado por el radar meteorológico. Esta metodología será explicada en detalle en la sección 3.

En la actualidad existen diversas metodologías para obtener la probabilidad de granizo con radar, tanto de radares polarimétricos como de simple polarización ([1,4], entre otros). En este trabajo se decidió utilizar un algoritmo simple con el objetivo de testear su rendimiento y eficacia en la región Pampeana. En particular se analizó una de las metodologías propuestas por Witt ([9]) para la determinación de probabilidad de granizo en radares meteorológicos de simple polarización y realizar algunas modificaciones con el fin de adaptarlos a la región Pampeana.

## 2. Región de estudio y datos empleados

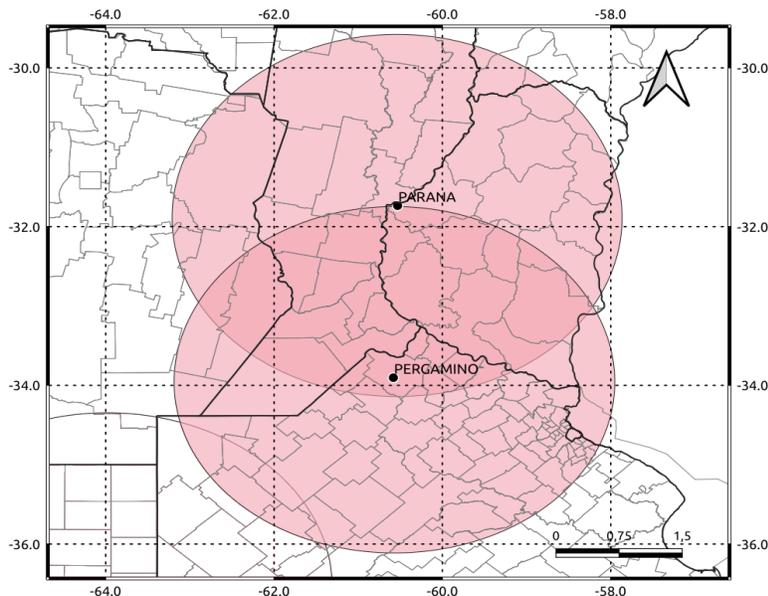
La zona en la cual se desarrolló la investigación comprende el área entre las ciudades de Paraná (Entre Ríos) y Pergamino en Buenos Aires (Figura 1). Se utilizaron los datos de la reflectividad horizontal ( $Z$ ) estimada a partir de los Radares Meteorológicos de la Red INTA, en el período de 2014 a 2018. El área de interés es la intersección entre los anillos de la Figura 1. Para la validación de la metodología fue necesario disponer de una base de datos de registros de daño de granizo, la cual fue provista por la empresa aseguradora argentina Sancor Seguros que comprende todo el año 2015.

Los métodos utilizados necesitan información de la altura de la isoterma de  $0^{\circ}\text{C}$ , por lo que fueron necesarios los radiosondeos de la estación más cercana, que en este caso es la de Ezeiza. Los mismos fueron extraídos del *Integrated Global Radiosonde Archive* (IGRA). En los casos donde la estación mencionada no dispuso de radiosondeo, se utilizó el reanálisis ERA 5 del ECMWF (European Center for Medium-Range Weather and Forecasts) para estimar la altura de dicha isoterma y el perfil vertical de temperatura. También se emplearon para analizar las condiciones sinópticas previas a cada caso de estudio.

## 3. Metodología

De acuerdo a lo estudiado por [8], uno de los procesos de crecimiento de granizo dentro de las nubes de gran desarrollo vertical se produce principalmente entre la altura de la isoterma de cero grados ( $H_0$ ) y la altura más elevada del eco de reflectividad de 45 dBZ ( $Z_{45}$ ) correspondiente a una celda convectiva. Es por ello que la diferencia entre ambas alturas (ecuación 1) es un buen indicador de la probabilidad de presencia de granizo y que éste pueda llegar al suelo.

$$\Delta H = H_0 - Z_{45} \quad (1)$$



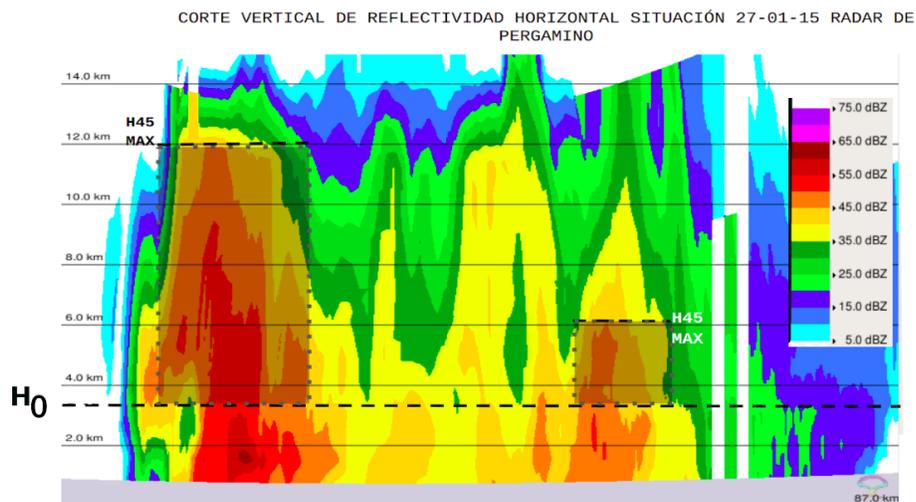
**Figura 1.** La región de estudio corresponde a la intersección del rango de cada radar (Norte de Buenos Aires, Sur de Entre Ríos y de Santa Fe, y Sudoeste de Córdoba), delimitado por los anillos rojos

[8] trabajó además con reportes de granizo a partir de impactómetros, que son planchas de telgopor recubiertas por papel de aluminio que, cuando son impactadas por el granizo, queda una marca fácilmente reconocible y medible. Estudió 150 celdas de tormentas durante una campaña para dar una alternativa a un método anterior de probabilidad más complejo, el cual era usado hasta ese momento pero resultaba poco operativo debido a su alto costo de tiempo y el uso de múltiples variables de difícil medición. Demostró que dicho modelo se podía simplificar trabajando solo con estas dos variables,  $Z_{45}$  y  $H_0$ . Mediante una relación estadística entre la presencia de granizo en el suelo y la diferencia de alturas para cada punto de grilla del dominio del radar, determinó que existía una probabilidad de presencia de granizo en el suelo cuando se cumplía la relación siguiente:

$$H_0 - Z_{45} > 1,4km \quad (2)$$

Esta nueva metodología, algoritmo de Waldvogel, posteriormente fue mejorada por [5] y [9] quien elaboró una escala porcentual de acuerdo a cada  $\Delta H$  denominada a partir de ahora Algoritmo de Witt. A mayor diferencia de altura, mayor probabilidad de presencia de granizo en el suelo. En este punto es importante mencionar que la metodología no discrimina tamaño sino una cierta probabilidad de presencia de granizo que logra llegar al suelo sin fundirse.

En la Figura 2 se muestra un ejemplo de cómo se representa gráficamente el algoritmo de Witt, en donde se realizó un corte vertical a un sistema convectivo multicelular en una de las situaciones analizadas. La isoterma de cero grados para ese día se encontraba a unos 3400 metros, mientras que la altura máxima de  $Z_{45}$  varía con el radio del corte. La celda de la derecha presenta una diferencia de alturas (zona sombreada) mucho menor que la de la izquierda. De esta manera, según el algoritmo de Witt ([9]) es mayor la probabilidad de caída de granizo en la celda de tormenta de la izquierda ya que la diferencia de alturas es mayor.



**Figura 2.** Ejemplo de un corte vertical de una sistema multicelular. La celda de la izquierda tiene una  $\Delta H$  (área sombreada) mayor que la de la derecha. La  $H_0$  corresponde a la isoterma de cero grados y la  $H_{45} \text{ MAX}$  la altura máxima de la  $Z_{45}$ . La mayor probabilidad corresponde a la de la izquierda de acuerdo a [9]

Por lo tanto, primero se realizó un análisis de variabilidad de la reflectividad horizontal ( $Z$ ) de los radares de INTA, estudiando la variación temporal de los valores medios y máximos de esta variable para eventos de convección seleccionados de acuerdo a la precipitación registrada y reportes de tormentas en Junín Aero y Paraná Aero entre 2011 y 2018.

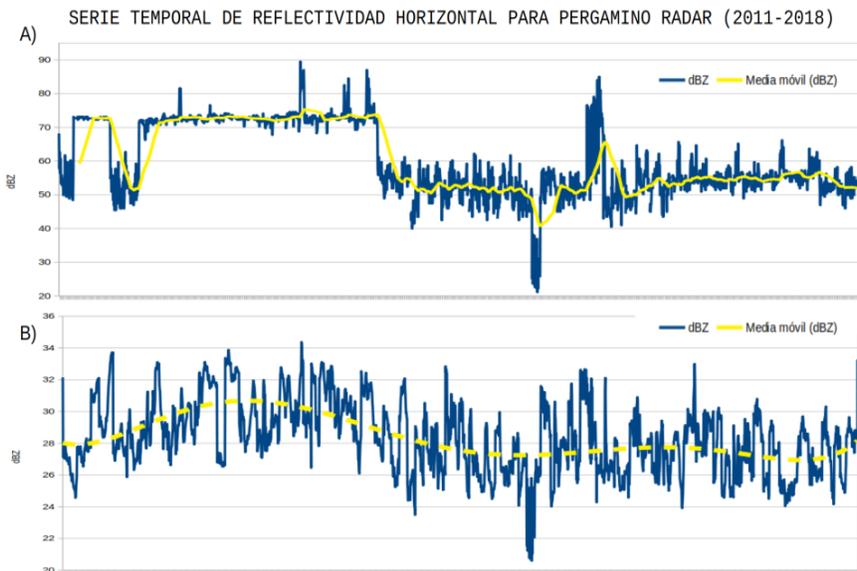
Con los resultados obtenidos del análisis estadístico se construyeron dos metodologías alternativas al algoritmo de probabilidad de Witt; y se aplicaron a todos los eventos encontrados del 2015 en el radar de Pergamino ya que fue el año con mayor disponibilidad de reportes. Además se utilizaron los valores de reflectividad que tuvieran al menos un reporte de granizo en zonas próximas a la misma (se tomó como radio 15 kilómetros desde el centro de la tormenta debido a la poca precisión de algunos reportes). Esta metodología implicó trabajar directamente con la verdad de campo.

Todos los desarrollos fueron realizados en lenguaje Python y se los pueden encontrar en el siguiente repositorio: [https://github.com/INTA-Radar/granizo\\_pol\\_simple](https://github.com/INTA-Radar/granizo_pol_simple)

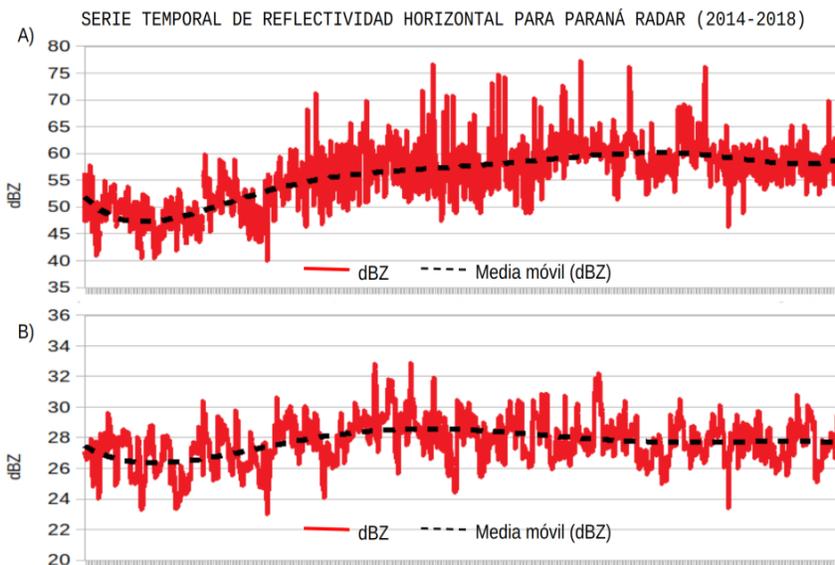
### 3.1. Estudio de la variabilidad de Z

Se utilizaron los datos de reflectividad horizontal del radar, calculando el valor medio en todo el dominio de medición con el fin de evaluar la evolución de la reflectividad a lo largo del tiempo para los días seleccionados durante el periodo 2011-2018. Se quiere buscar si durante ese periodo hubo cambios marcados en los valores medios de la reflectividad.

En la figura 3 se muestran en (A) los valores máximos de la variable y en (B) los valores medios para el radar de Pergamino. Se observa un marcado cambio en el valor máximo de reflectividad entre 2011-2012, posiblemente dado por un cambio de instrumental y falta de calibración. Para el caso del radar de Paraná, figura 4, durante el periodo analizado no hubo una variación significativa, salvo una leve tendencia positiva entre 2014 y 2015. En ambos radares se han encontrado también periodos extensos sin información, especialmente en el radar de Paraná.



**Figura 3.** A): serie temporal de valores máximos de  $Z_H$ ; B) serie temporal de valores medios de  $Z_H$  para el radar de Pergamino



**Figura 4.** A): serie temporal de valores máximos de  $Z_H$ ; B) serie temporal de valores medios de  $Z_H$  para el radar de Paraná

El estudio de la serie temporal de valores de reflectividad máxima a lo largo del período 2014-2018 para ambos radares arrojó una media de alrededor de 52 dBZ. Este valor es superior a la reflectividad medida obtenida por el algoritmo de Witt, que para sus estudios se basó en tormentas registradas en los Alpes Suizos. Por lo tanto se analizaron las diferencias entre la altura de la isoterma de cero grados y la máxima altura de la  $Z$  dentro de un rango alrededor del valor mencionado, entre 42 y 52 dBZ.

Una vez obtenidas las diferencias de alturas con el nuevo valor de reflectividad, se calculó para un tiempo fijo y para un mismo punto de coordenadas la diferencia máxima de alturas. Con todos los valores de  $\Delta H_{mod}$  se elaboraron estadísticas para saber de su distribución en la zona central de Argentina (Tabla 1).

La media de las diferencias de altura es inferior a la mediana de su distribución con lo cual la misma tiende a presentar diferencias más grandes. Esto podría indicar que la zona de potencial formación de granizo de las celdas convectivas es muy amplia verticalmente en la zona de estudio. Incluso se detectaron situaciones en las cuales esta diferencia fue superior a los 8 km, ampliamente superiores a lo encontrado por [9] en las tormentas que se producen en Suiza. Este es un aspecto a investigar en un futuro ya que no es claro el mecanismo ni la justificación de estas diferencias. Debido a las mismas es que se procedió a determinar un criterio adaptado con respecto a Witt, que tuvo en cuenta las diferencias de

altura para las celdas convectivas de la zona de estudio. Los valores de probabilidad se eligieron de acuerdo a los deciles, del 10 al 100, de la distribución anterior y se muestran en la Tabla 2.

En las probabilidades bajas, el nuevo método arroja diferencias de alturas inferiores al algoritmo de Witt pero en las probabilidades más altas el algoritmo modificado muestra valores de diferencias de alturas mayores.

Luego se propuso un método basado en solamente los cuartiles de la distribución de alturas analizada para analizar su rendimiento. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Todos estos cálculos se realizaron inicialmente para el radar de Pergamino ya que con el radar de Paraná se observó una leve tendencia positiva durante el periodo analizado como así también menor faltante de datos.

**Tabla 1.** Resumen estadístico de las diferencias de alturas máximas para el Radar de Pergamino.

ESTADÍSTICO	$\Delta H_{mod}$ (km)
MEDIA	3.69
DESVÍO ESTÁNDAR	2.86
MÍNIMO	0.20
PERCENTIL 25	1.89
PERCENTIL 50 (MEDIANA)	3.90
PERCENTIL 75	6.22
MÁXIMO	8.33

**Tabla 2.** Valores de probabilidad para el algoritmo de Witt y para el algoritmo modificado en base a los deciles

PROB (%)	$\Delta H_{witt}$ (km)	$\Delta H_{deciles}$ (km)
10	1.80	0.24
20	1.97	1.28
30	2.17	1.81
40	2.40	2.74
50	2.70	3.65
60	3.07	4.36
70	3.55	5.77
80	4.20	6.41
90	5.00	7.48
100	5.80	8.33

**Tabla 3.** Valores de probabilidad para el algoritmo modificado en base a los cuartiles.

<b>PROB (%)</b>	<b><math>\Delta H_{cuartiles}</math> (km)</b>
25	1.89
50	3.90
75	6.22
100	8.33

#### 4. Resultados

Una vez definidas las nuevas tablas de probabilidad para la región, se testearon los algoritmos de probabilidad de granizo para distintos eventos de 2015 para verificar tanto la efectividad como la distribución espacial de probabilidades. Se analizaron las zonas correspondientes a los reportes de granizo conjuntamente con un campo de reflectividad horizontal en 0.5 de elevación de antena del radar para distintas horas del día. De este modo, como no se mencionan las horas en las que fueron hechos los reportes, se observó que los mismos coincidían con zonas potenciales de presencia de granizo (eliminando así los falsos positivos). Se realizaron las estadísticas para cada uno de los algoritmos mostrándose en la Tabla 4. Los aciertos se verifican cuando el algoritmo muestra probabilidad de granizo en un dado píxel que coincide con el punto de daño de los reportes. Es decir, en este caso no se tiene en cuenta el valor de la probabilidad sino que si la misma es mayor a 0 %, se lo considera acierto. Dicho análisis se deberá ajustar en futuros estudios de este algoritmo con el fin de mejorar esta técnica y tener verificaciones más robustas.

**Tabla 4.** Aciertos y falsas alarmas de cada una de las técnicas.

<b>MÉTODO</b>	<b>ACIERTOS (%)</b>	<b>FALSAS ALARMAS (%)</b>
Algoritmo de Witt	85.64	14.36
Algoritmo modificado (deciles)	83.51	16.49
Algoritmo modificado (cuartiles)	72.34	27.66

Si bien el algoritmo de Witt muestra el mayor porcentaje de aciertos, se observa que las probabilidades obtenidas con el mismo son mayores (Tabla 5), y eso puede ocasionar una sobreestimación en el método.

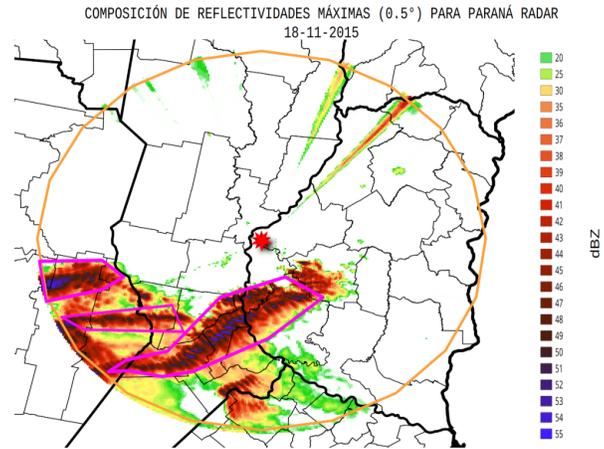
**Tabla 5.** Estadísticas de las probabilidades arrojadas para cada una de las técnicas sobre todas las situaciones analizadas del 2015 para las mediciones del radar de Pergamino

<b>PARÁMETRO</b>	<b>POH (Witt)</b>	<b>POH (percentiles)</b>	<b>POH (cuartiles)</b>
MEDIA (%)	61.97	48.37	41.46
DESVÍO ESTÁNDAR (%)	29.77	22.65	23.53

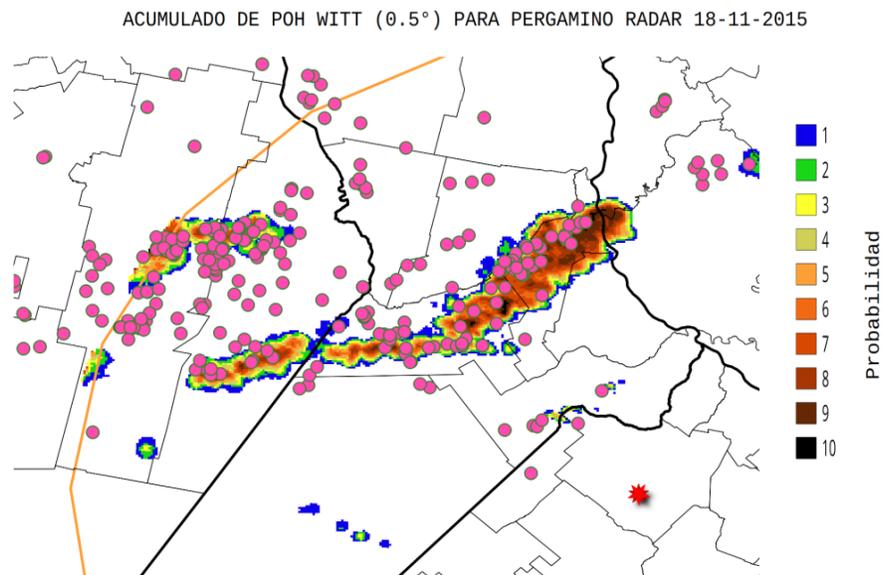
#### 4.1. Evento del 18 de noviembre de 2015

En esta sección se muestra un ejemplo del avance de unas tormentas intensas ocurridas el 18 de noviembre de 2015 sobre la región central del país que ocasionaron daños importantes sobre el sur de Santa Fe y Córdoba. En la figura 5 se observan los valores de reflectividad integrados entre las 17 y 20UTC con el radar de Pergamino donde se registran zonas con valores de Z superiores a los 55 dBZ asociadas con celdas convectivas de posible precipitación abundante y granizo. En particular la celda de tormenta que se origina sobre Córdoba y llega hasta Entre Ríos, avanzó sobre la autopista Rosario-Córdoba, afectando seriamente al tránsito vehicular con numerosos automóviles generando grandes daños, especialmente también en los cultivos del área.

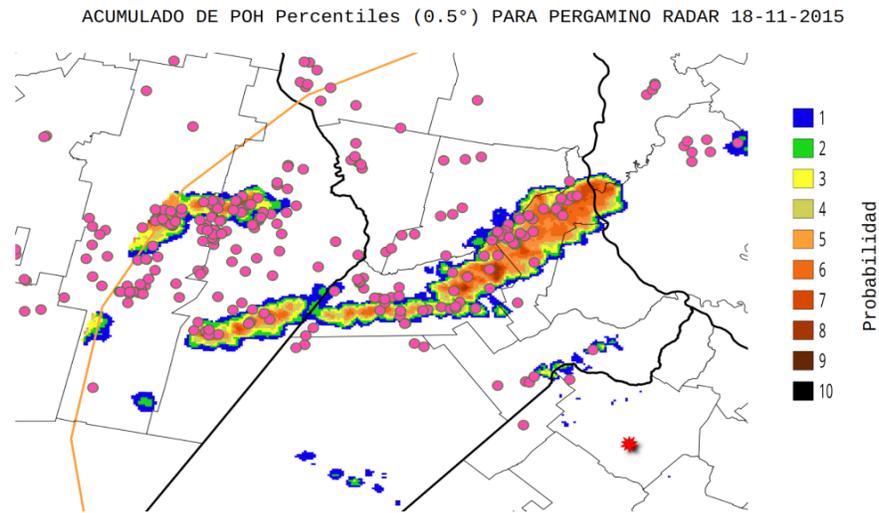
Por lo tanto, utilizando los valores de reflectividad del radar de Pergamino correspondientes al rango horario 17 a 20 UTC se computaron los tres algoritmos. Se ha utilizado este radar ya que los valores medios se han calculado para el mismo en la sección 3. Cabe recordar que los reportes de granizo no poseen los datos de la hora de ocurrencia del evento por lo tanto en la figuras que se mencionarán a continuación aparecen puntos de daño que no coinciden con esas horas, por lo que corresponden a eventos aislados de celdas convectivas no asociadas con esa línea intensa. El algoritmo de Witt presentó los valores más altos, superiores al 80 % en toda la zona correspondiente a los reportes (Figura 6). Los algoritmos modificados con los deciles y cuartiles mostraron en esa misma región valores de probabilidad entre 55 % y 75 %, menores a los observados por Witt (Figuras 7 y 8 respectivamente). La POH de deciles arroja valores altos de probabilidad sólo en aquellas zonas donde está la máxima densidad de reportes (Figura 7), a diferencia de la POH de Witt que ya sobreestima en los bordes de la zona de máxima densidad (Figura 6). Por lo tanto, con cualquiera de las tres metodologías se detectó con gran eficacia la región que fue afectada por las tormentas con elevada reflectividad que se observaron entre las 17 y 20UTC con el radar tanto de Paraná como con el de Pergamino en concordancia con reportes de daño observados.



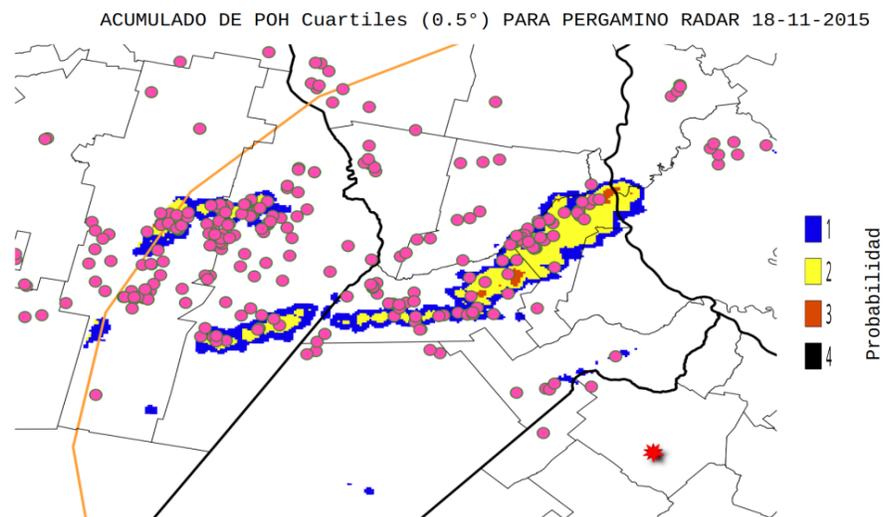
**Figura 5.** Integración de valores máximos de  $Z_H$  entre las 17 y 20 UTC. Los polígonos marcan las tres celdas de tormenta que más reportes generaron, con valores centrales de  $Z_H > 50$  dBZ.



**Figura 6.** Acumulado de valores de probabilidad del algoritmo de Witt entre 17-20 UTC (1 = 10% - 10 = 100%) junto con los reportes (puntos rosa). La estrella roja es el centro del Radar Pergamino y el borde naranja su límite de medición.



**Figura 7.** Acumulado de valores de probabilidad del algoritmo de deciles entre 17-20 UTC (1 = 10% – 10 = 100%) junto con los reportes (puntos rosa). La estrella roja es el centro del Radar Pergamino y el borde naranja su límite de medición.



**Figura 8.** Acumulado de valores de probabilidad del algoritmo de cuartiles entre 17-20 UTC (1 = 25 %, 2 = 50 %, 3 = 75 %, 4 = 100 %) junto con los reportes (puntos rosa). La estrella roja es el centro del Radar Pergamino y el borde naranja su límite de medición.

## 5. Discusión y conclusiones

En este trabajo se ha adaptado en una región de gran importancia agropecuaria un algoritmo de probabilidad de granizo para radares meteorológicos de simple polarización definido originalmente por Witt [9], utilizando datos de los radares de INTA Paraná e INTA Pergamino. Se analizaron datos del periodo 2011-2018 para el radar de Pergamino y del periodo 2014-2018 para el radar de Paraná y luego se evaluó el comportamiento del algoritmo adaptado para la región en un caso de estudio. Los resultados obtenidos fueron alentadores aunque aún se debe desarrollar con mayor detalle la técnica propuesta para mejorar la precisión de los sectores afectados por granizo como así también las probabilidades que las metodologías muestran.

Los tres algoritmos lograron clasificar con probabilidades elevadas las regiones donde se registraron los daños por granizo dados por los reportes. El algoritmo de Witt, al trabajar con diferencias de alturas menores que las adaptadas, tiende a mostrar valores cercanos al 100 % de probabilidad, posiblemente sobreestimando los eventos y como consecuencia aumentando la tasa de falsas alarmas comparando con las otras técnicas, aunque se necesita realizar un estudio con mayor detalle para analizar estas verificaciones. El algoritmo con cuartiles subestimó la probabilidad de granizo aumentando los errores.

Contar con reportes de daño de granizo en superficie es fundamental para poder verificar estas técnicas y metodologías desarrolladas. Por otro lado, además de los reportes, pueden usarse por ejemplo imágenes satelitales en canales infrarrojos o de microondas para determinar la temperatura de los topes nubosos o la estructura de la tormenta, o bien índices de vegetación (como el NDVI o SWIR) en base a canales reflectantes para determinar zonas de daño de vegetación.

Como trabajo a futuro queda pendiente la implementación en forma operativa de estos algoritmos adaptados en los radares para que también puedan utilizarse como productos tanto de prevención como de análisis post evento.

## 6. Agradecimientos

A la Fundación ArgenINTA y su programa PROCAGRA por la posibilidad de realizar esta investigación, especialmente a la Lic. Natalí Flamenco y al Ing. Agr. Pablo Mercuri por la coordinación del mismo y al Instituto de Clima y Agua Castelar por brindar el lugar físico para llevar a cabo el proyecto.

## Referencias

1. DOLAN, B., RUTLEDGE, S. A., LIM, S., CHANDRASEKAR, V., AND THURAI, M. A robust c-band hydrometeor identification algorithm and application to a long-term polarimetric radar dataset. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 52, 9 (2013), 2162–2186.
2. FEDERER, B., WALDVOGEL, A., SCHMID, W., HAMPEL, F., ROSINI, E., VENTO, D., ADMIRAT, P., AND MEZEIX, J. Plan for the swiss randomized hail suppression experiment. design of grossversuch iv. *pure and applied geophysics* 117, 3 (1978), 548–571.
3. FOOTE, G. B., KRAUSS, T. W., AND MAKITOV, V. Hail metrics using conventional radar. In *Proc., 16th Conference on Planned and Inadvertent Weather Modification* (2005).
4. HEINSELMAN, P. L., AND RYZHKOV, A. V. Validation of polarimetric hail detection. *Weather and forecasting* 21, 5 (2006), 839–850.
5. KESSINGER, C. J., BRANDES, E. A., AND SMITH, J. W. A comparison of the nexrad and nssl hail detection algorithms. In *Conference on Radar Meteorology, 27 th, Vail, CO* (1995), pp. 603–605.
6. SANCHEZ, J., DESSENS, J., DINEVICH, L., AND SIMEONOV, P. Hail suppression in mendoza (argentina). *The Journal of Weather Modification* 30, 1 (1998), 79–84.
7. SULAKVELIDZE, G. K., BIBILASHVILI, N. S., AND LAPCHEVA, V. F. Formation of precipitation and modification of hail processes.
8. WALDVOGEL, A., FEDERER, B., AND GRIMM, P. Criteria for the detection of hail cells. *Journal of Applied Meteorology* 18, 12 (1979), 1521–1525.
9. WITT, A., EILTS, M. D., STUMPF, G. J., JOHNSON, J., MITCHELL, E. D. W., AND THOMAS, K. W. An enhanced hail detection algorithm for the wsr-88d. *Weather and Forecasting* 13, 2 (1998), 286–303.