



Universidad de Buenos Aires
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos

Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera:

**“Avances en la Detección de Granizo:
Un Enfoque basado en Radares de Banda C con
Polarización Doble”**

Tesista: Esteban Garuti

Directora: Paola Salio

Codirectora: Vito Galligani

-2024-

Resumen

En este trabajo se analizó la capacidad del algoritmo de identificación de hidrometeoros (HID, por sus siglas en inglés) presentado en Dolan y otros (2013) para detectar granizo en celdas convectivas de diferente organización en Argentina. Para ello se utilizaron datos de radares polarimétricos de banda C pertenecientes a la red del Sistema Nacional de Radares Meteorológicos de Argentina (SINARAME) y reportes de granizo provenientes de la Base de Datos de Amenazas Meteorológicas y sus Impactos de América del Sur (SAMHI, Salio y otros, 2024).

Se buscaron y filtraron los reportes de granizo disponibles dentro de la cobertura operativa de los radares en el periodo de 2018 a 2023, y se emplearon datos de radiosondeos coincidentes con las observaciones de radar para obtener el perfil vertical de temperatura más cercano tanto espacial como temporalmente a cada reporte.

Posteriormente, se procesaron los datos de radar para utilizarlos como información para calcular el HID. Los pasos incluyen la corrección de reflectividad horizontal y reflectividad diferencial por atenuación , y corrección del diferencial de fase para el cálculo del diferencial de fase específico.

Luego, se evaluó la probabilidad de detección del HID a través de una validación que comparó la salida del HID con las ubicaciones de los reportes de SAMHI. Asimismo, se clasificaron los eventos en cuatro categorías de convección según el modo de organización de las celdas convectivas y en tres categorías de tamaño de granizo según el diámetro máximo estimado.

El HID mostró una probabilidad de detección alta (cerca del 80%), el modo convectivo predominante fue multicelular (más del 70% de los casos) y la categoría de granizo predominante fue No Severo, con diámetro máximo inferior a 20mm.

Por último se analizaron casos de estudio para mostrar la metodología utilizada, la calidad de los datos y las limitaciones del HID. Uno de ellos involucra una comparación entre dos radares que operan en distinta frecuencia y que comparten área de cobertura, el RMA5 ubicado en Argentina (banda C) y el radar de Cascavel ubicado Brasil (banda S).

Abstract

This study analyzed the performance of the hydrometeor identification algorithm (HID) presented by Dolan et al. (2013) to detect hail in convective cells of different organization in Argentina. To do this, data from C-band polarimetric radars of the Argentine National Weather Radar System (SINARAME) and hail reports from the South American Weather Hazards and Impacts Database (SAMHI, Salio et al., 2024) were used.

Hail reports available within the operational coverage of the radars from 2018 to 2023 were collected and filtered, and radiosonde data coinciding with the radar observations were used to obtain the vertical temperature profile closest in both space and time to each report.

Subsequently, radar data were processed to be used as input information for the HID. The steps included the correction of horizontal reflectivity and differential reflectivity for attenuation (Z-PHI method), and the correction of the differential phase for the calculation of the specific differential phase.

Then, the detection probability of the HID was evaluated through a validation comparing the HID output with the locations of the SAMHI reports. Additionally, the events were classified into four convection categories according to the mode of organization of the convective cells and into three hail size categories according to the estimated maximum diameter.

The HID showed a high detection probability (around 80%). The predominant convective mode was multicellular (more than 70% of the cases) and the predominant hail category was Non-Severe, with a maximum diameter less than 20 mm.

Finally, case studies were analyzed to demonstrate the methodology used, the data quality, and the limitations of the HID. One of the cases involved a comparison between two radars operating at different frequencies and sharing coverage area: the RMA5 located in Argentina (C-band) and the radar in Cascavel located in Brazil (S-band).

Índice general

1. Introducción	9
1.1 Motivación y antecedentes	9
1.2 Objetivos	16
2. Datos y Metodología	17
2.1 Datos	17
2.1.1 Radares meteorológicos	17
2.1.2 Reportes de granizo	21
2.1.3 Perfiles verticales de temperatura	22
2.2 Metodología	22
2.2.1 Selección de casos	22
2.2.2 Procesamiento de datos de radar	24
2.2.3 Cálculo del nivel de fusión	28
2.2.4 Aplicación del HID	29
2.2.5 Validación del HID	30
2.2.5.1 Análisis 1: Caja de 3x3	33
2.2.5.2 Análisis 2: Método de vecindad Pixel-reporte ($t_0 \pm 10$ min, $r < 5\text{km}$)	34
2.2.5.3 Sensibilidad al modo convectivo y al tamaño de granizo reportado	36
2.2.5.4 Contorno de celda con umbral de Z_h	38
3. Resultados	39
3.1 Estudio de sensibilidad para el total de reportes	39
3.2 Estudios de caso	52
Caso 1: RMA1, 2018-11-12 18:00Z. Acierto. Significativo Severo durante MUN	52
Caso 2: RMA5, 2021-11-03-1840Z. Error. MCS con granizo de tamaño desconocido.	55
Caso 3: RMA5 y Cascavel, 2023-08-11 11:00Z	57
4. Conclusiones	62
Bibliografía	66
Anexo I	73

Índice de figuras

Figura 1: Ubicación de los radares listados en la Tabla 1.	18
Figura 2: Reportes de granizo de SAMHI, 2018-2024.	20
Figura 3: Ubicaciones de los radares utilizados y de los reportes según tamaño de granizo.	23
Figura 4: Paneles PPI 16-01-2022 a las 1953Z en la elevación de 0.5° (RMA1).	25
Figura 5: Transectas de polarimétricas para el RMA1 el día 16-01-2022 a las 1953Z.	26
Figura 6: Funciones de peso para variables polarimétricas para la categoría Rain (lluvia)	30
Figura 7: Funciones de peso para variables polarimétricas para la categoría Hail (granizo)	31
Figura 8: Funciones de peso para variables polarimétricas para la categoría Big Drops (gotas grandes)	31
Figura 9: Ejemplo de caja de 9 puntos alrededor del pixel de radar más cercano al reporte.	33
Figura 10: Histograma de frecuencias de distancias de cada reporte en superficie al pixel de radar con granizo más cercano.	34
Figura 11: Ejemplos de modos de convección: a) Multicelular no organizada (MUN), b) Multicelular organizada (MCS) , c) Discreta supercelda (DSC), d) Discreta no supercelda (DNS).	36
Figura 12: PPI contorno con umbral de Zh 0.55° para el 11-12-2018 a las 1802Z (RMA 1).	38
Figura 13: Gráfico de probabilidad de detección para cada categoría de tamaño de granizo según el modo convectivo asociado.	41
Figura 14: Histogramas de frecuencias de ocurrencia de tipos de convectivos por radar (aciertos)	42
Figura 15: Histogramas de frecuencias de ocurrencia de distintos tamaños de granizo por radar (aciertos).	43
Figura 16: Histograma de ocurrencias de cada tipo de tamaño de granizo según el modo convectivo (aciertos).	44
Figura 17: Histograma de ocurrencias de cada tipo de tamaño de granizo según el modo convectivo (errores)	47
Figura 18: Histograma de frecuencias de Zh y Zdr según especie HID dominante dentro del radio de 5km alrededor del reporte en los tiempos óptimos de las celdas convectivas (aciertos).	49

Figura 19: Histograma de frecuencias de Zh y Zdr según especie HID dominante dentro del radio de 5km alrededor del reporte en los tiempos óptimos de las celdas convectivas (errores).	49
Figura 20: Histograma de frecuencias de ROHV y Kdp según especie HID dominante dentro del radio de 5km alrededor del reporte en los tiempos óptimos de las celdas convectivas (aciertos).	50
Figura 21: Histograma de frecuencias de Zh y Zdr según especie HID dominante dentro del radio de 5km alrededor del reporte en los tiempos óptimos de las celdas convectivas (errores).	50
Figura 22: imagen del granizo caído en Arroyito, Córdoba el 11-12-2018 a las 1800z.	51
Figura 23: Campos PPI polarimétricas en la elevación de 0.5° para el día 11-12-2018 a las 1802Z (RMA1).	52
Figura 24: Zoom del campo PPI HID 0.5° RMA1 para el 11-12-2018 a las 1802Z.	53
Figura 25: Histograma de frecuencias según especie de HID en el contorno de dBZ para el 11-12-2018 1802Z en la elevación de 0.5° (RMA1)..	54
Figura 26: Campos PPI 0.5° de variables observadas y corregidas para el 03-11-2021 a las 1857Z (RMA5, caso atenuación).	55
Figura 27: Imagen del granizo caído en Integración, Misiones el 11-08-2023 a las 11:00Z.	56
Figura 28: Campos PPI 0.5° para el día 11-08-2023 a las 11:05Z.	58
Figura 29: Campos PPI 0,5° de polarimétricas del RMA5 y Cascavel para el día 11-08-2023 a las 11:05Z.	59
Figura 30: Histograma de variables polarimétricas según especie de HID para la celda del 11-08-2023 a las 11:05Z para el radar RMA5 en la elevación de 0.5°.	59
Figura 31: Histograma de variables polarimétricas según especie de HID para la celda del 11-08-2023 a las 11:05Z para el radar Cascavel en la elevación de 0.5°	60
Figura 32: Gráficos PPI 0.5° con los píxeles más cercanos entre RMA5 y Cascavel con especies de HID coincidentes para la celda del 11-08-2023 a las 11:05Z.	61
Figura 33: Diagramas de dispersión de polarimétricas comparando el RMA5 con Cascavel para los píxeles marcados en la Figura 32.	61

Índice de tablas

Tabla 1: Listado de radares utilizados	17
Tabla 2: Valores de offset de Zh por año para cada radar utilizado.	27
Tabla 3: Las ubicaciones de lanzamientos de sondeos utilizados	28
Tabla 4: Cantidad de reportes por radar, modo convectivo más probable y tipo de granizo más frecuente (excluyendo la categoría tamaño desconocido), aciertos, errores y probabilidad de detección para el análisis $t_0 \pm 10$ min, $r < 5\text{km}$.	40
Tabla 5: cantidad de eventos por tipo de convección y tamaño de granizo por radar para los 28 casos de error para el análisis $t_0 \pm 10$ min, $r < 5\text{km}$.	46

1. Introducción

1.1 Motivación y antecedentes

Los fenómenos meteorológicos de alto impacto social están asociados al desarrollo de tormentas intensas. Estas pueden generar actividad eléctrica, precipitaciones extremas en cortos períodos de tiempo, grandes volúmenes de granizo o granizo de gran tamaño, ráfagas intensas y tornados, ocasionando enormes impactos socio-económicos y ambientales con posibles pérdidas humanas y materiales en nuestra región (Altinger, 1988; Matsudo y Salio, 2011; Mezher y otros, 2012; Silva Dias, 2011; Rasmussen y otros, 2014, Kumjian y otros, 2020; Salio y otros, 2024; entre muchos otros). La Argentina es uno de los países donde se desarrollan las tormentas más intensas del planeta (Zipser y otros, 2006) favoreciendo los impactos enumerados previamente.

Con el objetivo de avanzar en la compresión de los procesos de mesoscala relacionados con las tormentas extremas que se dan en nuestra región, se llevaron a cabo durante la temporada cálida 2018-2019 las campañas de observación RELAMPAGO (Remote sensing of Electrification, Lightning, And Meso-scale/micro-scale Processes with Adaptive Ground Observations; Nesbitt y otros, 2021) y CACTI (Cloud, Aerosol, and Complex Terrain Interactions Experiment; Varble y otros, 2021). RELAMPAGO-CACTI permitió generar una base de datos sin precedentes en nuestro país gracias a la disponibilidad de diversos sensores e instrumental, tales como radares, radiosondeos y estaciones de superficie portables que, integradas con observaciones fijas y locales, lograron un aumento sustantivo en la información disponible.

Mezher y otros (2012) analizaron la frecuencia de ocurrencia de granizo en Argentina utilizando datos de estaciones de superficie pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Encontraron que existen dos regiones con máximos de frecuencia de granizo una de ellas en la región central del país extendiéndose por las provincias de Mendoza, La Pampa y norte de Córdoba y una segunda región extendiéndose en

la costa sudeste de la Patagonia. Sin embargo, los fenómenos convectivos son poco frecuentes en la Patagonia por lo que destacan que es posible que algunos de los eventos registrados como granizo en esta región puedan corresponder en realidad a graupel. Dado que el granizo es un fenómeno con alta variabilidad espacial y temporal, los eventos suelen ser muy localizados y su detección a través de las estaciones de superficie está limitada por la resolución espacial de la red de las mismas. En este sentido es valioso considerar e incluir fuentes de información adicionales como reportes ciudadanos , diarios digitales, redes sociales, entre otras. Este desafío es afrontado en la iniciativa para la creación de la Bases de Datos de Amenazas Meteorológicas y sus Impactos de América del Sur (SAMHI, <https://samhi.cima.fcen.uba.ar/>; Salio y otros, 2024) en donde integrantes de servicios meteorológicos, investigadores, y aficionados de la meteorología reportan de forma estandarizada fenómenos meteorológicos de alto impacto social en un esfuerzo conjunto por generar una base de datos de calidad en Argentina, Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay. Aún así existen limitaciones en los reportes de superficie ya que el granizo es frecuentemente reportado un tiempo posterior a su caída lo que genera cierta incertidumbre en el tiempo de ocurrencia del fenómeno. Además los reportes están influenciados por la densidad de población y la hora del día, ya que tormentas fuertes pueden producirse en lugares poco poblados resultando en pocos o ningún reporte mientras que si esa misma tormenta ocurre en una región densamente poblada habrá mayor disponibilidad de reportes (Kelly y otros, 1985; Allen y otros, 2015). Otro aspecto a tener en cuenta es que el tamaño del granizo es estimado en la mayoría de los casos (comparando con objetos cercanos) y pocas veces es medido con precisión. Es por esto que complementar las observaciones de superficie con datos provenientes de sensores remotos como satélites y radares meteorológicos es una buena forma de mejorar la detección de este fenómeno debido a la gran cobertura espacial y alta resolución temporal y espacial de estos instrumentos.

El radar meteorológico es un instrumento ampliamente utilizado para la detección y caracterización del granizo. Se trata de un sensor remoto activo que emite pulsos electromagnéticos en el espectro de las microondas los cuales interactúan en su camino con las partículas presentes en la atmósfera y parte de la energía es retrodispersada hacia el radar. El parámetro más importante medido por el radar es

el factor de reflectividad equivalente (Z) que bajo el régimen de dispersión de Rayleigh es proporcional a la sexta potencia del diámetro de las gotas dentro del volumen muestreado. El uso de radares meteorológicos de doble polarización ha mostrado una notable mejora en la capacidad de detección de granizo al obtener variables suplementarias que proporcionan información sobre diversas propiedades microfísicas de los elementos dispersores (Heinselman y Ryzhkov, 2006; Ryzhkov y Zrnic, 2019; Murillo y Homeyer, 2019). Los radares de doble polarización son esenciales para discriminar entre ecos meteorológicos y no meteorológicos, así como también para distinguir entre diferentes tipos de hidrometeoros como lluvia, granizo, graupel, nieve, entre otros. Este tipo de radares transmiten energía tanto en la polarización horizontal como en la vertical y gracias a ello permiten obtener las denominadas variables polarimétricas: factor de reflectividad equivalente en la horizontal (Z_h) y en la vertical (Z_v), reflectividad diferencial ($Z_{dr} = Z_h - Z_v$), coeficiente de correlación copolar (ROHV), diferencial de fase (PHI) y diferencial de fase específico (Kdp). Sin embargo, uno de los principales inconvenientes de la detección de granizo mediante radares meteorológicos es su limitada cobertura espacial y la necesidad contar con correcciones y un tratamiento estandarizado de sus observaciones. Este es el caso de la creciente red de radares de banda C (longitud de onda λ approx. 5.6 cm) en Argentina, que no cubre completamente la extensión del país.

El sensoramiento remoto desde el espacio, a través de las diversas plataformas satelitales, ofrece uniformidad en los métodos de detección a nivel global, suplementando y/o complementando las observaciones de radares meteorológicos y/o reportes de granizo en superficie. Diversos autores han propuesto y analizado métodos de detección utilizando datos de radares meteorológicos en combinación con datos de los canales visible e infrarrojo de satélites geoestacionarios: Merino y otros (2014) propusieron un método para identificar tormentas con granizo utilizando datos del satélite geoestacionario Meteosat Second Generation en combinación con datos de radares de banda C. Murillo y Homeyer (2019) utilizaron datos del satélite GOES tanto del espectro infrarrojo como visible para obtener productos para la detección de tiempo severo. También se han implementado algoritmos utilizando tanto instrumentos satelitales pasivos como activos de microondas para inferir la presencia de granizo en núcleos convectivos: Ni y otros (2017) utilizaron datos de

los sensores a bordo del satélite Tropical Rainfall Measuring Mission en conjunto con reportes de granizo en superficie para analizar su habilidad de detección de tormentas productoras de granizo de gran tamaño; Bang y Cecil (2019) utilizaron datos de satélite de microondas y reportes de granizo en superficie para desarrollar un algoritmo que estima la probabilidad de granizo a partir de distintos valores de temperatura de brillo usando la plataforma Global Precipitation Mission; similarmente, Laviola y otros (2020) utilizaron señales de disminución de temperatura de brillo en frecuencias de microondas altas para identificar celdas con granizo.

Si bien las diversas plataformas satelitales presentan una gran cantidad de información, los radares meteorológicos presentan algunas ventajas frente a los satélites para la detección de granizo, entre ellas podemos mencionar:

- los radares disponibles en la región proveen mayor resolución espacial (desde 100m a 500m) y temporal frente a las observaciones satelitales (desde 1 a 10min).
- las señales de radar pueden penetrar las nubes y precipitación permitiendo mejorar la comprensión de los hidrometeoros en las tormentas. Las observaciones satelitales en el infrarrojo están limitadas por los topes nubosos y las observaciones de radiación de microondas pasivas dependen de los efectos de dispersión y emisión integrados en toda la columna vertical, por lo que no es posible distinguir de qué nivel provienen los hidrometeoros y si la señal proviene de una capa con gran concentración de graupel/granizo pequeño o una capa con poca concentración de granizo de gran tamaño.

Diversos trabajos han abordado el estudio de detección de granizo utilizando datos de radares polarimétricos y reportes en superficie. Baldini y otros (2005) adaptaron con éxito un algoritmo de clasificación de hidrometeoros de lógica difusa originalmente implementado para la banda S (longitud de onda λ approx. 10.7 cm) a la banda C, y evaluaron su desempeño al aplicarlo en casos de tormentas severas utilizando datos de dos radares polarimétricos de banda C ubicados en Alabama, Estados Unidos y Roma, Italia. Las variables polarimétricas del radar medidas en presencia de granizo en la banda C son bastante diferentes de las de la banda S debido a los efectos más pronunciados de la dispersión por fuera del régimen de Rayleigh y al impacto mucho más fuerte de la atenuación. Heinselman y Ryzhkov

(2006) compararon la capacidad de detección de granizo de un algoritmo de simple polarización basado en la estructura vertical de Z_h y un algoritmo de clasificación de lógica difusa utilizando datos de radar de banda S y de reportes de granizo y lluvia en superficie en Oklahoma, Estados Unidos. Sus resultados muestran que el algoritmo que utiliza capacidades de doble polarización tiene un mejor desempeño frente al de simple polarización. Depue y otros (2007) analizaron la correlación entre un indicador que utiliza Z_h y Z_{dr} y las características de granizo observado mediante datos de un radar polarimétrico de banda S y reportes de granizo para tormentas en Colorado, Estados Unidos. Boodoo y otros (2009) utilizando datos de un radar de banda C ubicado en Canadá, compararon la capacidad de detección de granizo de un algoritmo basado en la estructura vertical de las celdas que utiliza la altura máxima del eco de 50 dBZ, frente a un algoritmo de clasificación de lógica difusa, la verificación se llevó a cabo utilizando reportes de granizo en superficie. Tabary y otros (2009) utilizando la red de radares de banda C de Francia y una red de 'hailpads' analizaron la performance de un algoritmo de clasificación de lógica difusa y el comportamiento de las variables polarimétricas en eventos de tormentas severas con caída de granizo mayor a 5mm. Kaltenboeck y Ryzhkov (2013) utilizaron datos de radares polarimétricos de banda C y S para estudiar las señales de las variables Z_h , Z_{dr} y ROHV en tormentas en Oklahoma, Estados Unidos, de las cuales se reportaron granizos de diferentes tamaños. Los resultados de estos trabajos coinciden en que los métodos de detección polarimétricos presentan mayor probabilidad de detección y menor tasa de falsas alarmas que aquellos de simple polarización, tanto para radares de banda C como S. A su vez en radares de banda C las fuentes de error encontradas son la corrección de atenuación de Z_h insuficiente y la resonancia causadas por gotas grandes en celdas que contienen mezcla de lluvia y granizo. Estos dos efectos impactan sobre los valores de Z_h y Z_{dr} llevando a una clasificación errónea en los algoritmos, y por ende disminuyendo su capacidad de detección. Por otro lado las verificaciones con reportes en superficie demuestran que Z_{dr} puede tomar un amplio rango de valores en celdas con granizo, desde valores negativos de -5dB hasta superiores a 6dB dependiendo del tamaño, la forma y la cobertura de agua que presentan, lo que dificulta la utilización de esta variable para su detección. Además esta variabilidad es significativamente mayor

en banda C que en banda S para todos los tamaños de granizo y la magnitud del ROHV es en general menor en banda C que en banda S.

Las señales de las variables polarimétricas en regiones con granizo puede variar significativamente entre radares de banda C y S. Estudios previos han abordado el uso de Zh en conjunto con Zdr y ROHV en elevaciones bajas para la detección y caracterización del tamaño del granizo con radares de banda S ya que existen señales características en esta frecuencia tales como píxeles con Zh alto en conjunto con valores de Zdr cercanos a 0 dB (Depue y otros, 2007; Kumjian y Ryzhkov, 2008; Ortega y otros, 2016). Sin embargo estos métodos no pueden ser directamente aplicados en radares de banda C debido a que los efectos de atenuación y resonancia afectan las variables dando lugar a señales muy distintas que las de banda S, como Zh muy elevados colocalizados con valores de Zdr muy elevados que pueden superar los 8 dB (Anderson, 2011).

Sin embargo en banda C la combinación de Zh con otras variables polarimétricas, como ROHV o Kdp, permite detectar la presencia de granizo (Boodo y otros, 2009; Tabary y otros, 2009; Kaltenboeck y Ryzhkov, 2013). Asimismo, la presencia de algunas señales como el TBSS (three-body scattering signature) se han utilizado como indicadores de granizo grande (Lemon, 1998), aunque estudios posteriores indican que la relación es ambigua y es necesario estudiar el fenómeno con mayor profundidad (Lindley y Lemon, 2007; Zrnić y otros, 2010). La principal dificultad a la hora de estudiar las propiedades electromagnéticas y de retrodispersión del granizo es su forma irregular, caracterizada por la presencia de protuberancias y lóbulos que modifican significativamente la energía retrodispersada respecto de una esfera (Jiang y otros, 2018, Cecchini y otros, 2022).

En Argentina, la red operativa de radares está compuesta a la fecha de la realización de este trabajo por 15 radares de banda C, 14 de ellos de doble polarización distribuidos a lo largo y ancho del país (De Elia y otros, 2017). Actualmente, 12 radares son administrados por Sistema Nacional de Radares Meteorológicos (SINARAME) dependiente de la Subsecretaría de Recursos Hídricos, Ministerio de Economía y 3 radares son administrados por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Estos radares son utilizados diariamente por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para emitir alertas y avisos meteorológicos a corto plazo por tormentas y eventos severos. Para los

próximos años se espera que este número aumente a más de 20 radares distribuidos por toda la Argentina lo que permitirá disponer de una cobertura del 70% del territorio argentino. Debido al gran volumen de información con el que se dispondrá, contar con herramientas que faciliten y mejoren la detección de fenómenos como el granizo es de gran importancia para que los pronosticadores puedan emitir avisos y alertas de mejor calidad.

Entre los productos de radar polarimétrico más utilizados y descritos en la bibliografía se encuentran los algoritmos de clasificación de hidrometeoro (HID). Los HID son herramientas estadísticas o de inteligencia artificial que buscan evaluar la presencia de diversas categorías de agua, hielo y ecos no meteorológicos en función del comportamiento de las variables obtenidas por el radar. La clasificación es aplicada en cada rango de radar de modo que un campo completo de hidrometeoro más probables puede ser mapeado como un PPI (Indicador de Posición en el Plano) o RHI (Indicador de rango y altura). Estos productos son útiles para detectar amenazas como granizo o regiones de banda brillante donde se da la fusión de la nieve en lluvia o diversos procesos microfísicos en la nube. Además tener conocimiento del tipo de hidrometeoro en un volumen de escaneo de radar es requerido para escoger apropiadamente la relación de estimación cuantitativa de precipitación.

Existen varios métodos que pueden ser utilizados para la clasificación de hidrometeoro, como árboles de decisión (e.g., Höller, 1995), teoría de decisión estadística, lógica difusa (Liu y Chandrasekar 2000), redes neuronales (Wang y otros, 2017), entre otros.

El método de árbol de decisión se basa en umbrales y lógica booleana para distinguir distintos tipos de ecos de radar. Este método no es eficiente para la detección de granizo porque la categoría determinada para diferentes tipos de hidrometeoro no es mutuamente excluyente. En otras palabras, las funciones de densidad de probabilidad para cierta variable de radar, por ejemplo reflectividad horizontal de lluvia y nieve pueden superponerse. Además el árbol de decisión no provee una tolerancia para errores de medición. Los algoritmos que utilizan redes neuronales son una opción que crece en adeptos en forma exponencial, sin embargo, estos requieren el uso de una base de datos para entrenamiento de gran tamaño. Otro método ampliamente utilizado es el método de lógica difusa dado que

permite identificar los dominios en el espacio de variables polarimétricas para cada hidrometeoro teniendo en cuenta los posibles errores de medición de las variables. Entre los algoritmos de lógica difusa se encuentra el presentado en Dolan y otros (2013), que utiliza funciones predefinidas para clasificar los datos polarimétricos en las distintas categorías de hidrometeoros para la banda C. Dichas funciones representan la probabilidad de que un rango de cierta variable polarimétrica pueda ser observada para cierto tipo de hidrometeoro. Este algoritmo ha sido implementado en la región para diferentes casos de estudio (e.g., Borque y otros, 2020, Bechis y otros, 2022, Galligani y otros, 2024). Pero para ser utilizado operativamente en Argentina requiere una evaluación sistemática como la que se plantea en el presente trabajo. A su vez, su validación es fundamental previo a su implementación en las oficinas operativas de la Coordinación de Pronósticos Inmediatos del SMN.

1.2 Objetivos

El **objetivo general** de la presente tesis es avanzar en la precisión espacial y temporal de la detección de eventos de alto impacto social asociados a tormentas severas. La concreción de este objetivo permitirá contribuir a mejorar el monitoreo y pronóstico a muy corto plazo de eventos de alto impacto social, vinculado con la ocurrencia de granizo.

Los **objetivos específicos** de esta tesis consisten en:

1. Generar una base de datos de eventos de granizo detectados a partir de la aplicación del algoritmo de identificación de hidrometeoros (HID, Dolan y otros, 2013) a los datos de radar de banda C disponibles en Argentina, y evaluar su confiabilidad frente a reportes de granizo en superficie utilizando la base datos SAMHI (Salio y otros, 2024).
2. Analizar la sensibilidad y capacidad de dicho HID para detectar la presencia de granizo en las celdas convectivas de distinta organización en Argentina.

2. Datos y Metodología

2.1 Datos

2.1.1 Radares meteorológicos

El Radar Meteorológico Argentino (RMA) es un radar Doppler de doble polarización fabricado en Argentina por INVAP S.E., operando en la banda C: 5450 a 5820MHz instalado a lo largo de la Argentina por la Subsecretaría de Recursos Hídricos, actualmente dependiente del Ministerio de Economía de la Nación. El proyecto SINARAME ha instalado estos radares en diversos puntos del país y al momento de la escritura de esta tesis son doce los radares funcionando en forma operativa. Para el presente análisis se utilizaron datos de **9 radares RMA**. Asimismo, se utilizaron datos del radar de banda S ubicado en Cascavel en el sur de Brasil gracias a una estrecha colaboración científica entre el Sistema de Tecnología e Monitoramento Ambiental do Paraná (SIMEPAR) y el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA) que permitió estudiar eventos observados tanto en banda C como banda S en simultáneo.

La Tabla 1 detalla los radares utilizados en este trabajo, sus coordenadas y sus respectivas fechas de instalación, mientras que la Figura 1 muestra la ubicación de los mismos y sus respectivos rangos de 200 km.

Los radares ubicados en Anguil (La Pampa), Pergamino (Buenos Aires) y Paraná (Entre Ríos) pertenecientes a la red del INTA no han sido utilizados debido a que las capacidades de doble polarización no están disponibles y por tanto no es posible aplicar el HID a sus datos. Tampoco se tuvieron en cuenta los siguientes radares del SINARAME: el RMA2 ubicado en Ezeiza, Buenos Aires debido a que presenta complicaciones con interferencias electromagnéticas y bloqueos de haz que disminuyen la confiabilidad de sus observaciones para la evaluación del HID; el RMA12 ubicado en Las Grutas, Río Negro tampoco fue utilizado debido a su reciente implementación operativa en la red (Junio de 2023) y falta de reportes de granizo asociados; el RMA9 ubicado en Río Grande, Tierra del Fuego ya que está ubicado en una latitud que no es favorable para el desarrollo de tormentas convectivas intensas capaces de generar granizo.

Radar	Ubicación (Ciudad y Provincia)	Banda	Latitud	Longitud	Fecha de instalación
RMA1	Córdoba, Córdoba	C	31.4413S	64.1919W	2015-05-04
RMA3	Las Lomitas, Formosa	C	24.7303S	60.5516W	2017-12-12
RMA4	Resistencia, Chaco	C	27.4517S	-59.0511W	2016-10-20
RMA5	Bernardo de Irigoyen, Misiones	C	26.2781S	53.6708W	2016-09-23
RMA6	Mar del Plata, Buenos Aires	C	37.9131S	57.5278W	2018-04-12
RMA7	Neuquén, Neuquén	C	38.8766S	68.1448W	2017-12-12
RMA8	Mercedes, Corrientes	C	29.1958S	58.0447W	2018-05-31
RMA10	Bahía Blanca, Buenos Aires	C	38.7342S	62.1654W	2018-12-05
RMA11	Termas de Río Hondo, Santiago del Estero	C	27.5025S	64.9058W	2019-03-27
Cascavel	Cascavel, Estado de Paraná, Brasil	S	24.8756S	53.5253W	2013-03-06

Tabla 1: Listado de radares utilizados

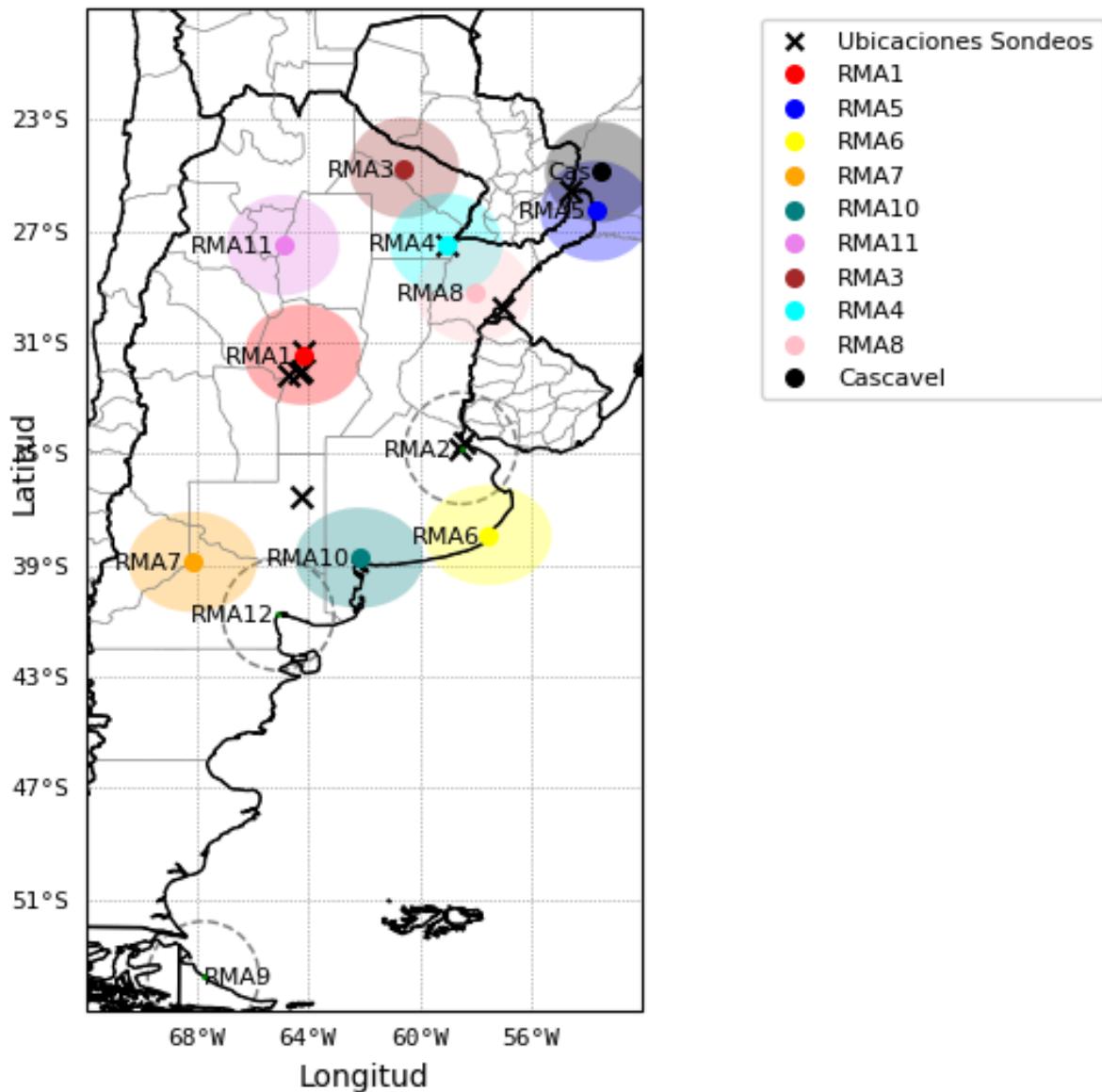


Figura 1: Los puntos de colores indican la ubicación de los radares listados en la Tabla 1, los círculos de colores indican radios de cobertura de 200km. Los círculos grises a rayas indican rango de 200km de radares RMA no utilizados, y las cruces negras las ubicaciones de lanzamiento de los radiosondeos del SMN y RELAMPAGO utilizados en el desarrollo de la tesis (ver Tabla 3).

Se utilizaron las siguientes variables polarimétricas disponibles en los radares:

- Factor de reflectividad horizontal (Zh): Se define como la potencia de retorno recibida en el canal horizontal de todas las partículas en el volumen

escaneado y depende (dentro del régimen de dispersión de Rayleigh) del diámetro y de la concentración de la precipitación.

- Reflectividad diferencial (Z_{dr}): Es la diferencia entre el factor de reflectividad horizontal y vertical $Z_{dr} = Z_h - Z_v$. Es un buen indicador de la forma de las gotas siempre que Z_h y Z_v se encuentren dentro del régimen de dispersión de Rayleigh. Por ejemplo, las partículas esféricas tendrán un Z_{dr} cercano a 0 porque Z_h y Z_v serán similares. Por otro lado Z_{dr} será positivo para objetos orientados horizontalmente y negativo para objetivos orientados verticalmente.
- Coeficiente de correlación copolar (ROHV): es la correlación entre pulso y pulso de retorno entre las polarizaciones horizontal y vertical para un volumen de radar dado. Es útil tanto para discriminar entre distintos tipos de precipitación como así también diferenciar entre ecos meteorológicos y no meteorológicos (insectos, aves, ecos de terreno, etc.)
- Diferencial de Cambio de Fase (PHI): es la diferencia entre el cambio de fase tanto en la polarización horizontal como en la vertical, entre distintos pulsos de radar.
- Velocidad radial Doppler (V_r): componente radial de la velocidad con la que se desplazan los ecos de radar. Valores positivos indican que el eco se aleja del radar mientras que valores negativos indican desplazamiento del eco hacia el radar.

Los datos de los radares RMA tienen una resolución temporal de 5 minutos y espacial (en el rango) de 250m para información de la Estrategia 1 de escaneo de 120km contando con tres elevaciones 0.51° , 1.3° y 2.26° . La Estrategia 2 dispone de una resolución temporal de 10 minutos y espacial de 500m para información de 240km, con 15 elevaciones (0.55° , 0.94° , 1.34° , 1.82° , 2.31° , 3.14° , 4.02° , 5.12° , 6.39° , 8.02° , 10° , 12.46° , 15.53° , 19.93° y 30.04°). Se utilizaron ambas estrategias debido a que no todos los datos de los escaneos de 240km estaban disponibles en los horarios más cercanos a todos los reportes, por lo que si algún reporte estaba ubicado a menos de 120km fue posible utilizar dicha estrategia en lugar de la de 240km. Se utilizaron los datos de velocidad radial Doppler (V_r) para distinguir superceldas.

2.1.2 Reportes de granizo

Los datos de reportes de ocurrencia de granizo en superficie fueron extraídos de la base de datos SAMHI (Salio y otros, 2024). Esta base de datos almacena reportes de amenazas meteorológicas (lluvia, granizo, ráfagas intensas, tornados, entre otros) y sus impactos asociados. En particular los reportes de granizo contienen información obligatoria acerca de la fuente del reporte (redes sociales, prensa, etc), ubicación espacial (latitud y longitud), fecha y hora de ocurrencia, control de calidad (datos crudos o verificados con datos de radar), precisión espacial (0,1 a 100km), y precisión temporal (10min a 3hs). La base de datos permite la carga opcional de información sobre diversos tipos de impactos que tuvo el evento (impactos en la población, en el sector agrícola - ganadero, urbanos, en el transporte, entre otros), fotos, diámetro máximo del granizo, entre otros parámetros. SAMHI contiene más de 16.000 reportes de granizo (Figura 2) en Argentina, Brasil, y Uruguay desde Febrero del 2018 hasta la fecha de escritura de esta tesis .

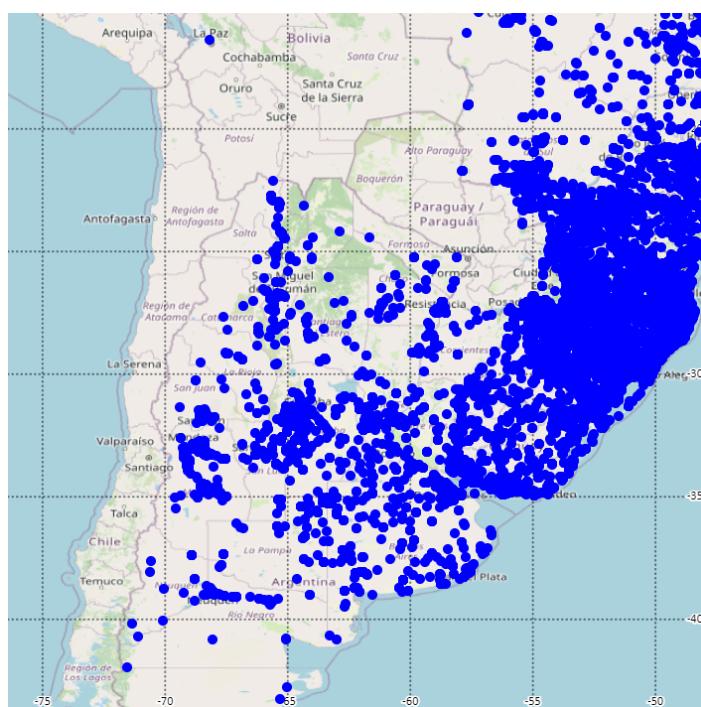


Figura 2: Reportes de granizo en SESA de SAMHI, período 2018-2024.

2.1.3 Perfiles verticales de temperatura

En este trabajo se utilizaron datos de perfiles verticales de temperatura observados (radiosondeos):

- Sondeos realizados por el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina y Instituto Nacional de Meteorología de Brasil (fuente: Global Telecommunication System, <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).
 - Sondeos realizados durante la campaña RELÁMPAGO (Schumacher, R. 2019. CSU Mobile Radiosonde Data. Version 1.0. UCAR/NCAR - Earth Observing Laboratory. <https://doi.org/10.26023/3QGG-JQKS-AF0G>)
- La ubicación de los mismos se detalla en la Figura 1.

2.2 Metodología

2.2.1 Selección de casos

En primer lugar, se buscaron reportes de granizo verificados en la base de datos SAMHI dentro del rango de cobertura de los radares de doble polarización de banda C de Argentina listados en la Tabla 1 para todo el periodo de tiempo disponible en la base de datos desde Febrero de 2018 hasta Diciembre de 2023. Se utilizaron los siguientes criterios de selección:

- La distancia del reporte al radar debería ser idealmente inferior a 120km para utilizar la estrategia de escaneo 1, ya que la calidad de los datos polarimétricos disminuye a medida que el rango aumenta. Sin embargo, dada la cantidad limitada de reportes, se decidió aumentar la distancia máxima a 180km. Por otro lado la distancia mínima del reporte al radar debe ser mayor a 40km para evitar la contaminación de los datos por ecos de terreno como ocurre cerca de los radares. Además se previene el efecto de submuestreo de la celda en las elevaciones más altas a la hora de analizar la estructura vertical de las tormentas.
- Se debe contar con los datos polarimétricos de Zh, Zdr, ROHV y PHI en una ventana aproximada de una hora anterior y posterior a la ocurrencia del reporte.
- En el caso de reportes asociados al RMA5 ubicado en la provincia de Misiones se buscaron además reportes ubicados dentro de la intersección de los rangos de vigilancia del RMA5 y del radar de Cascavel en Brasil con el objetivo de realizar una comparación entre los datos medidos en las

diferentes bandas. Esto resulta valioso ya que como se mencionó en la introducción los radares de banda S se mantienen en un entorno de Rayleigh para diámetros mayores que en la banda C, y pueden por ende encontrarse grandes diferencias en los valores de reflectividad medidos provenientes de una misma tormenta, lo que puede cambiar el resultado del algoritmo de clasificación de hidrometeoros.

Una vez obtenido un listado de casos con los criterios de selección mencionados previamente, se graficaron los PPI de Zh para cotejar la ubicación de la celda convectiva detectada por el radar y la ubicación del reporte. Los casos con mucha atenuación en Zh (radomo mojado por lluvias intensas sobre el radar), con bloqueo parcial o total del haz, con interferencias electromagnéticas en el azimuth del reporte y/o con ecos de terreno presentes que produjeran desconfianza en las mediciones fueron descartados, ya que en este trabajo no se realizó corrección de los ecos no meteorológicos previo a la implementación del algoritmo.

Luego del proceso de selección quedaron disponibles **143 reportes** distribuidos en toda la Argentina. En la Figura 3 se muestran graficadas las ubicaciones de los radares utilizados con sus respectivos radios de cobertura de 200km y las localizaciones los reportes asociados a cada uno de ellos junto con la categoría de tamaño de granizo según diámetro máximo estimado (D) siguiendo a Ortega (2018): No severo ($D < 25,4\text{mm}$), Severo ($25,4\text{mm} < D < 50,8\text{mm}$), Severo significativo ($50,8\text{mm} < D$) y Desconocido. También se añadió el rango de cobertura del radar de Cascavel utilizado para la comparación con el RMA5. En el Anexo I se encuentra listada la tabla con la información de todos los casos seleccionados.

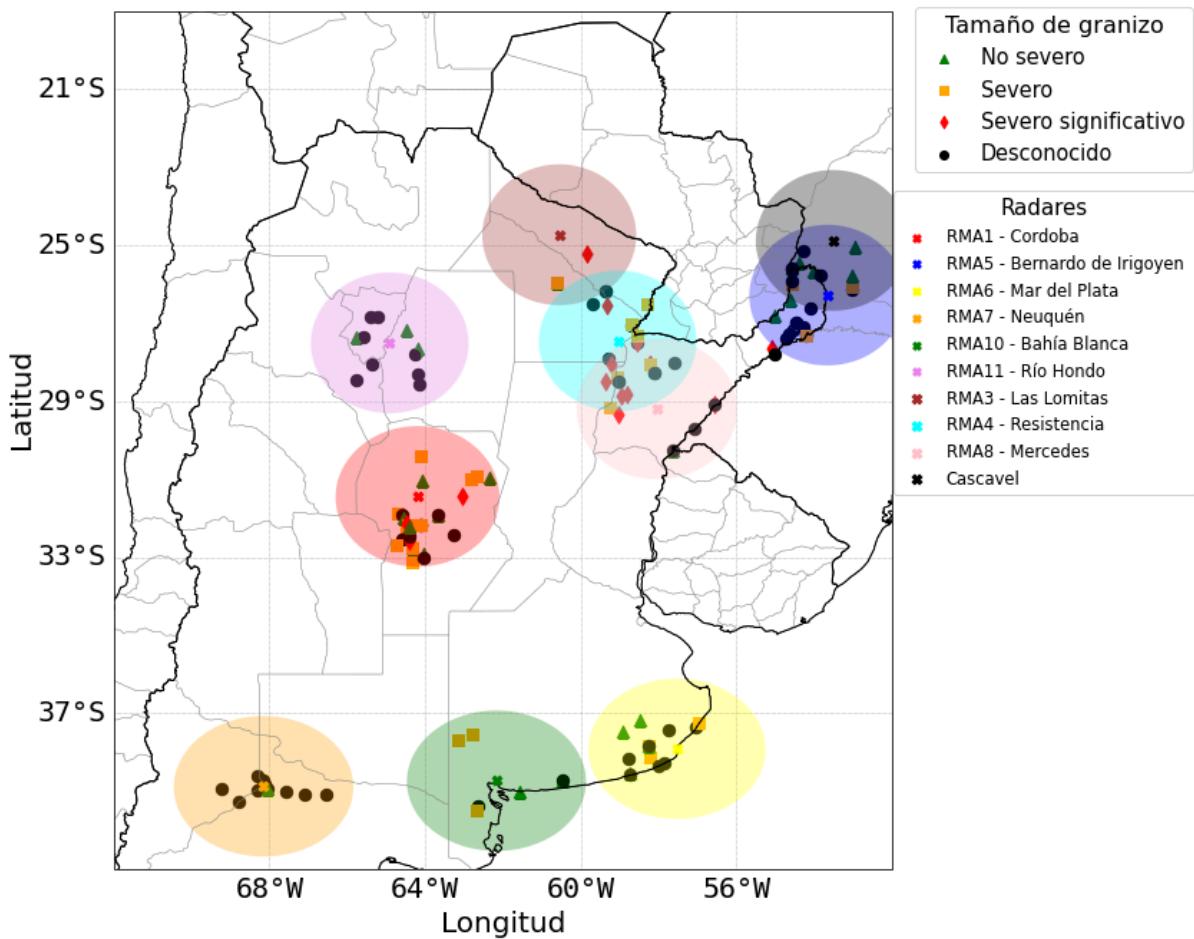


Figura 3: Las ubicaciones de los radares utilizados (cruces de colores) con el rango de cobertura de 200km (círculos de colores) y las ubicaciones de los reportes según tamaño de granizo.

2.2.2 Procesamiento de datos de radar

Una vez seleccionados los casos en los RMA para analizar, el siguiente paso fue el procesamiento de los datos de radar que luego servirían de input para el HID. Para aplicar el algoritmo HID utilizado en este trabajo se requieren las siguientes variables polarimétricas: Zh, Zdr, ROHV, Kdp y perfil vertical de temperatura. Sin embargo los datos de radar no pueden ser utilizados sin ser previamente procesados para corregir problemas de offset, atenuación, de filtros no deseados, entre otros problemas. En esta sección presentaremos el procesamiento necesario de los datos de radar:

- Procesamiento de PHI para luego calcular Kdp
- ZDR offset

- Corrección por atenuación de Zh

La corrección de PHI fue realizada con la librerías de Python ARM Radar Toolkit (py-ART, Helmus y otros, 2016) y *oradlib* (Heistermann y otros, 2013). Se aplica el método Z-PHI para corregir Zh por atenuación debido a lluvia intensa. Este método ha sido correctamente implementado en varios trabajos (Testud y otros, 2000; Bringi y otros, 2001; Ryzhkov y otros, 2006; Gourley y otros, 2007; Gu y otros, 2011; Overeem y otros, 2021, Cancelada y otros 2024). Seguidamente se procesa y suaviza PHI para eliminar posibles saltos de fase, discontinuidades y ecos no meteorológicos ficticios. Usando el PHI corregido se re-calcularó el Kdp con la librería de Python *oradlib* en base al método presentado en Vulpiani y otros, 2012. Además el Zdr es recalculado a partir del Zh corregido.

Para tener en cuenta el estado de calibración de los radares se calculó el offset de Zdr. Los valores se obtuvieron observando el valor de Zdr en regiones con predominio de gotas esféricas donde se espera que esta variable tenga valores cercanos a cero. Para ello se buscó a través de los PPI de Zh en elevaciones bajas zonas con precipitación estratiforme cercana al día de los reportes analizados donde se observara la señal de banda brillante. Luego graficando los cortes verticales de Zh y Zdr y observando el comportamiento de Zdr por encima de la banda brillante y se obtuvieron los valores que se muestran en la Tabla 2.

La Figura 4 muestra un ejemplo de las variables observadas y posteriormente corregidas con este método aplicado a un caso del RMA1. El evento mostrado corresponde al día 16-01-2022 a las 1953Z donde se reportó granizo de 60 mm en Berrotarán, Córdoba. Las transectas negras en la Figura 4 se muestran en la Figura 5. La curva de Kdp observada es bastante ruidosa en ciertos rangos pero si observamos el Kdp re-calculado a partir del PHI corregido con esta metodología el resultado es una curva adecuada para el análisis. En general, los valores de todo el dominio son menos ruidosos y más suaves en todos los rangos.

La curva roja de la Figura 5a muestra Zh y la curva azul Zh corregida por atenuación en el azimuth del reporte. Se observa que las curvas son muy similares, siendo el Zh corregido ligeramente superior en ciertos rangos de radar donde fue aplicada la corrección. A aproximadamente 120km del radar se observa la mayor diferencia entre Zh y Zh corregido, a la vez que se observa un aumento en PHI y Kdp indicando lluvia intensa, consistente con el fenómeno de atenuación de Zh en la banda C.

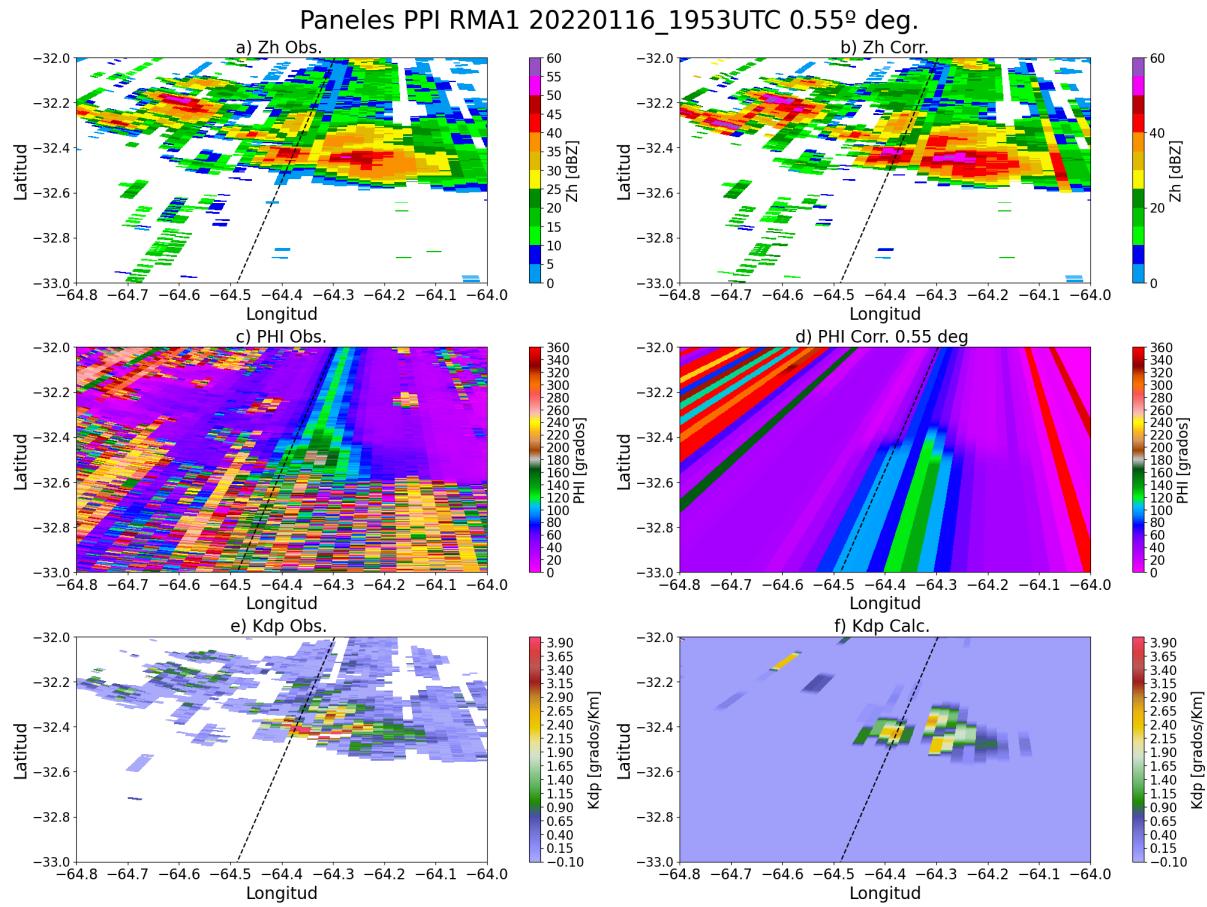


Figura 4: Paneles PPI para a) Zh observado, b) Zh corregido, c) PHI observado, d) PHI corregido, e) Kdp observado, e) Kdp calculado para el 16-01-2022 a las 1953Z en la elevación de 0.55 grados.

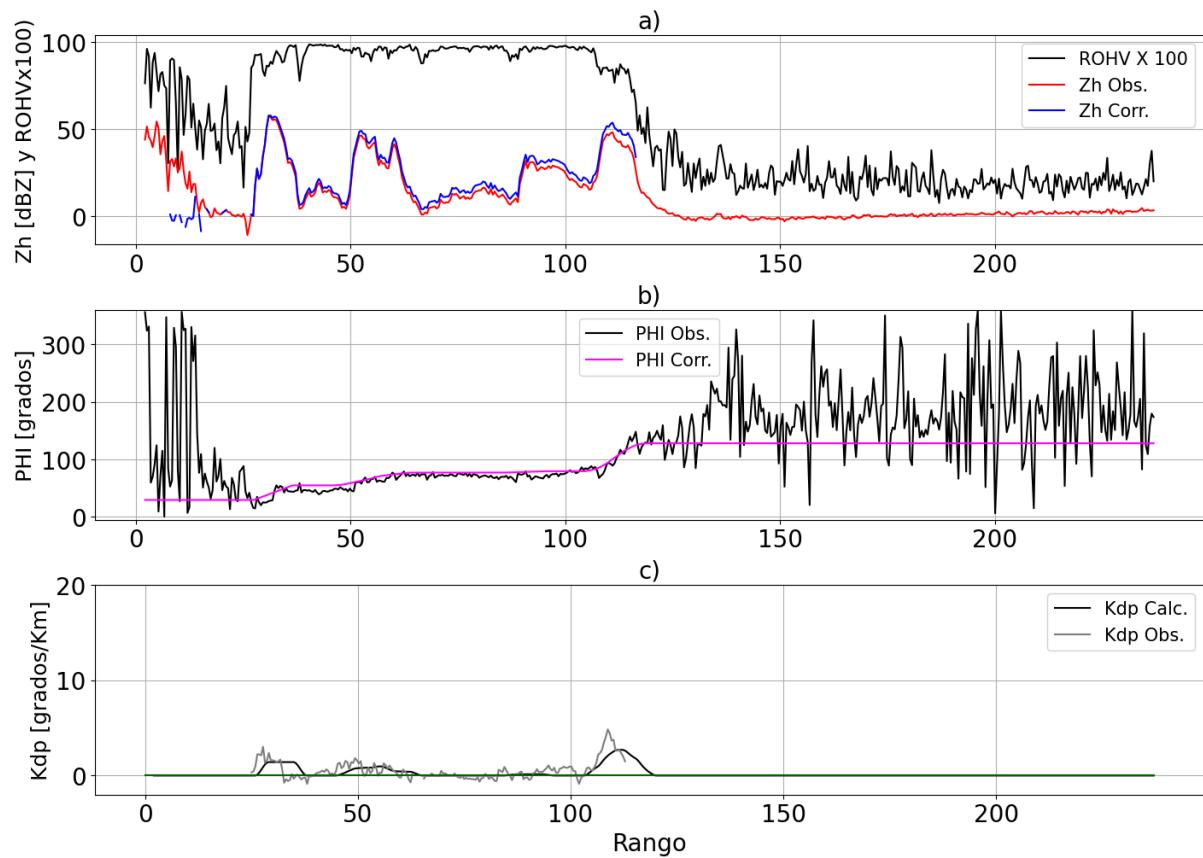


Figura 5: Observaciones sobre la transecta correspondiente a la línea discontinua de la Figura 4 para a): Zh observado (curva roja), Zh corregido (curva azul) y ROHV (curva negra, la observación fue multiplicada por 100 a fin de que se aadecue a la escala utilizada), b): PHI observado (curva negra) y PHI corregido (curva violeta), c) Kdp observado (curva gris) y Kdp calculado (curva negra) para el RMA1 el dia 16-01-2022 a las 1953Z.

Radar	Offset Zh por Año					
	2018	2019	2020	2021	2022	2023
RMA1- Córdoba	2dBZ	2dBZ	2dBZ	0dBZ	0dBZ	1dBZ
RMA3- Las Lomitas	-	-	1dBZ	-	1dBZ	-
RMA4- Resistencia	1dBZ	1dBZ	1dBZ	1dBZ	2dBZ	1dBZ
RMA5-	0dBZ	-	1dBZ	2dBZ	1dBZ	1dBZ

Bernardo de Irigoyen						
RMA6- Mar del Plata	-	0dBZ	-	0dBZ	0dBZ	0dBZ
RMA7- Neuquén	-	-	0dBZ	0dBZ	0dBZ	0dBZ
RMA8- Mercedes	-	-	-	1dBZ	0dBZ	0dBZ
RMA10- Bahía Blanca	1dBZ	1dBZ	0dBZ	-	-	0dBZ
RMA11- Termas de Río Hondo	-	2dBZ	-	2dBZ	2dBZ	2dBZ

Tabla 2: Valores de offset de Z_h por año para cada radar utilizado.

2.2.3 Cálculo del nivel de fusión

Como se mencionó en la introducción, el algoritmo usado en este trabajo considera datos de un perfil vertical de temperatura para calcular la altura de la isoterma de cero grados y así poder distinguir correctamente entre rangos con precipitación líquida y sólida. En este trabajo se utilizaron datos de temperatura observados que fueron obtenidos de los radiosondeos más cercanos en tiempo y espacio al lugar del reporte (Sección 2.1.3).

Para los reportes ubicados en Córdoba durante el periodo de la campaña RELAMPAGO-CACTI se utilizaron los sondeos disponibles en distintos puntos de la provincia, la mayoría lanzados a distancias entre 100 y 200km del lugar del reporte. Para el resto del periodo se utilizaron sondeos lanzados en el aeropuerto de Córdoba siempre que estuviesen disponibles o bien desde la estación Uruguiana en Brasil. Por otro lado, para los reportes ubicados en las áreas de cobertura del resto de radares se utilizaron sondeos lanzados desde distintos puntos de Argentina y Brasil listados en la Tabla 3. Las ubicaciones de los sondeos están graficadas en la Figura 1 marcadas con cruces negras.

Nombre Estación	Latitud	Longitud	Radar cercano
Resistencia	27.45S	59.05W	RMA11
Uruguaiana	29.78S	57.03W	RMA1
Foz de Iguacu	25.51S	54.58W	RMA5
Santa Rosa	36.56S	64.26W	RMA10
Córdoba	31.30S	64.21W	RMA1; RMA11
Aeroparque	34.56S	58.41W	RMA6
Ezeiza	34.81S	58.53W	RMA6

Tabla 3: Las ubicaciones de lanzamientos de sondeos utilizados

2.2.4 Aplicación del HID

Una vez corregidos los datos de radar y obtenidos los perfiles de temperatura, se aplicó el algoritmo de clasificación de hidrometeoros para radares de doble polarización presentado en el trabajo de Dolan y otros (2013). El algoritmo utiliza lógica difusa para clasificar los datos de cada volumen de radar en categorías de hidrometeoros, utilizando cuatro variables polarimétricas Zh, Zdr, Kdp y ROHV para cada una de las cuales una función de peso es definida (ver Figuras 6 a 8 donde se muestran ejemplos de funciones de peso para la banda C y la banda S de algunos hidrometeoros). Estas variables junto con temperatura clasifican las observaciones en 10 categorías de hidrometeoros: **Drizzle** (llovizna), **Rain** (lluvia), **Wet Snow** (nieve húmeda), **Dry Snow** (nieve seca), **Ice Crystals** (cristales de hielo), **Vertically Aligned Ice** (hielo alineado verticalmente), **High-Density Graupel** (graupel de alta densidad), **Low Density Graupel** (graupel de baja densidad), **Hail** (granizo), **Big Drops/Melting Hail** (gotas grandes/granizo en derretimiento). El algoritmo se aplicó con los datos polarimétricos de Zh corregido por atenuación, Kdp calculado y Zdr

calculado (y corregido por offset), este último fue calculado a partir del Zh corregido por atenuación y el Zv observado.

2.2.5 Validación del HID

Existen en la literatura distintos métodos de validación para los HID obtenidos por radares meteorológicos. Una técnica propone un acercamiento teórico donde se realiza una validación indirecta a partir de simulaciones de distribuciones de gotas y cristales (Dolan y otros, 2013). Esta información presenta importantes limitaciones causadas por las suposiciones hechas en las simulaciones para la fase hielo (e.g., granizo, nieve, graupel) aunque son muy robustas para gotas de lluvia. Otro tipo de verificación más directa es a través de observaciones *in situ* derivadas de sensores a bordo de aeronaves (cámaras de alta resolución, sondas, espectrómetros, etc.) que miden concentración, distribución y tipo de hidrometeoros (Plummer y otros, 2010, Ribaud y otros, 2015, Cecchini y otros, 2022) aunque es poco común en la literatura debido a la diferencia entre los sensores a bordo y los radares meteorológicos en términos de resolución espacial y temporal, y posibles alteraciones de las observaciones de radar resultado de la presencia de la aeronave. Asimismo es posible avanzar con el método de validación a través de la comparación de la salida del HID con observaciones *in situ* de superficie a través de información en superficie a través de “hailpads” y/o reportes de estaciones y/o reportes ciudadanos (Depue y otros, 2007; Boodoo y otros, 2009; Tabary y otros, 2009).

Para analizar la performance del algoritmo de HID se determinó el azimuth y rango más cercano al reporte en el radar de interés en la elevación más baja disponible (0.55° para la estrategia de 240km y 0.51° para la estrategia de 120km). Para ello se calculó la distancia cuadrada mínima entre la coordenada del reporte y un pixel de radar de interés.

Es importante mencionar las limitaciones que presenta este HID para plantear la metodología que será utilizada. En primer lugar depende de datos de Zh y Zdr calibrados y previamente corregidos por atenuación. Se esperaría que el Zdr sea

cercano a cero para hidrometeoros de forma esférica, sin embargo la atenuación diferencial en la banda C puede mostrar Zdr anómalamente altos que puede estar asociada con granizo (Yang y otros, 2019, Ryzhkov y otros, 2019). Asimismo la forma del granizo genera valores grandes de fase de retrodispersión diferencial (δ) apartando a PHI del crecimiento monótono y generando errores en las correcciones por atenuación. Otro punto a tener en cuenta es que las señales de doble polarización en llovizna y lluvia se asemejan con aquellas correspondientes a hielo, nieve o nieve derretida. Por esto los acercamientos al HID requieren un perfil vertical de temperatura para incorporar al algoritmo (datos de sondeo o reanálisis de modelos, por ejemplo) para determinar el nivel de fusión.

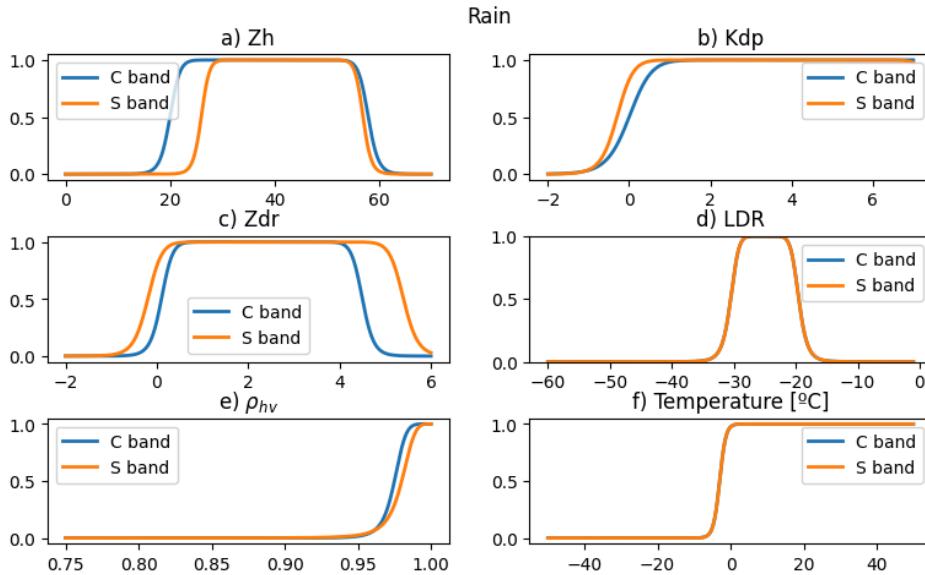


Figura 6: Funciones de peso para variables polarimétricas para la categoría Rain (lluvia). Los valores fueron obtenidos a través del software CSU RadarTools disponible en https://github.com/CSU-Radarmet/CSU_RadarTools

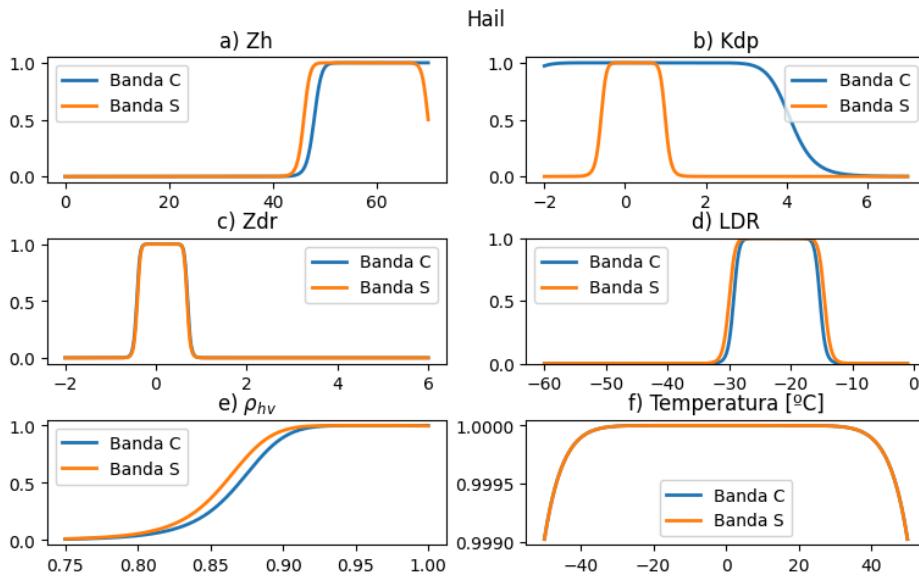


Figura 7: Funciones de peso para variables polarimétricas para la categoría Hail (granizo). Los valores fueron obtenidos a través del software CSU RadarTools disponible en https://github.com/CSU-Radarmet/CSU_RadarTools

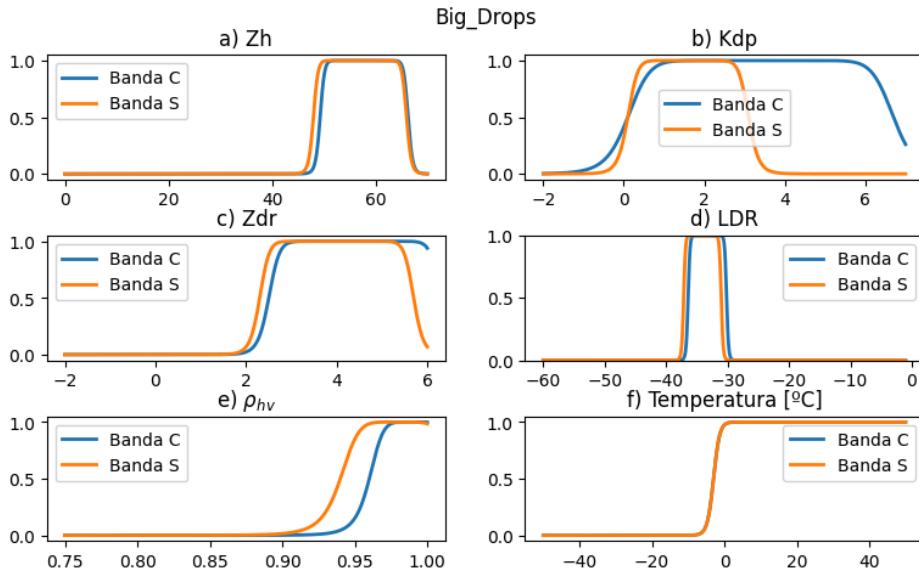


Figura 8: Funciones de peso para variables polarimétricas para la categoría Big Drops (gotas grandes). Los valores fueron obtenidos a través del software CSU RadarTools disponible en https://github.com/CSU-Radarmet/CSU_RadarTools

Se realizaron tres análisis diferentes para evaluar el HID. En los primeros dos se evalúa la Probabilidad de Detección (POD) definida como:

$$\text{POD} = \frac{a}{(a+c)} \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde a es cantidad de aciertos y c la cantidad de errores, a partir de la distancia cuadrada mínima del reporte y el pixel más cercano de interés donde el HID detecte granizo. En los primeros dos análisis la forma de definir aciertos y errores es diferente. El tercer análisis está orientado a evaluar el HID para los pixel que se encuentran dentro de la celda asociada al reporte, a fin de analizar la distribución de los hidrometeoros en la celda.

2.2.5.1 Análisis 1: Caja de 3x3

Se determinó el tiempo más cercano de observación (t_0) para cada reporte de interés analizando los datos de Z_h (recordar que se utilizaron las elevaciones más bajas) disponibles en una ventana de una hora anterior y posterior a la ocurrencia del reporte ($t_0 \pm 1$ hora), y seleccionando aquel escaneo en el cual la celda estuviera más cercana al punto de latitud/longitud del reporte (preferentemente que la celda hubiese pasado por el punto exacto). Una vez seleccionado el tiempo t_0 , se analizó la salida del algoritmo HID en el pixel de radar más cercano al reporte (az, gate en Figura 9) y en una caja de 3x3 pixeles alrededor, es decir en los azimuths contiguos (az+1 y az-1 en Figura 9), en el rango del reporte (gate en Figura 9) en el anterior (gate-1 en Figura 9) y en el siguiente (gate+1 en Figura 9). **En el análisis 1, si el HID indicaba granizo en la categoría más probable en alguno de los 9 píxeles, el caso se consideró como acertado, de lo contrario se tomó como error.**

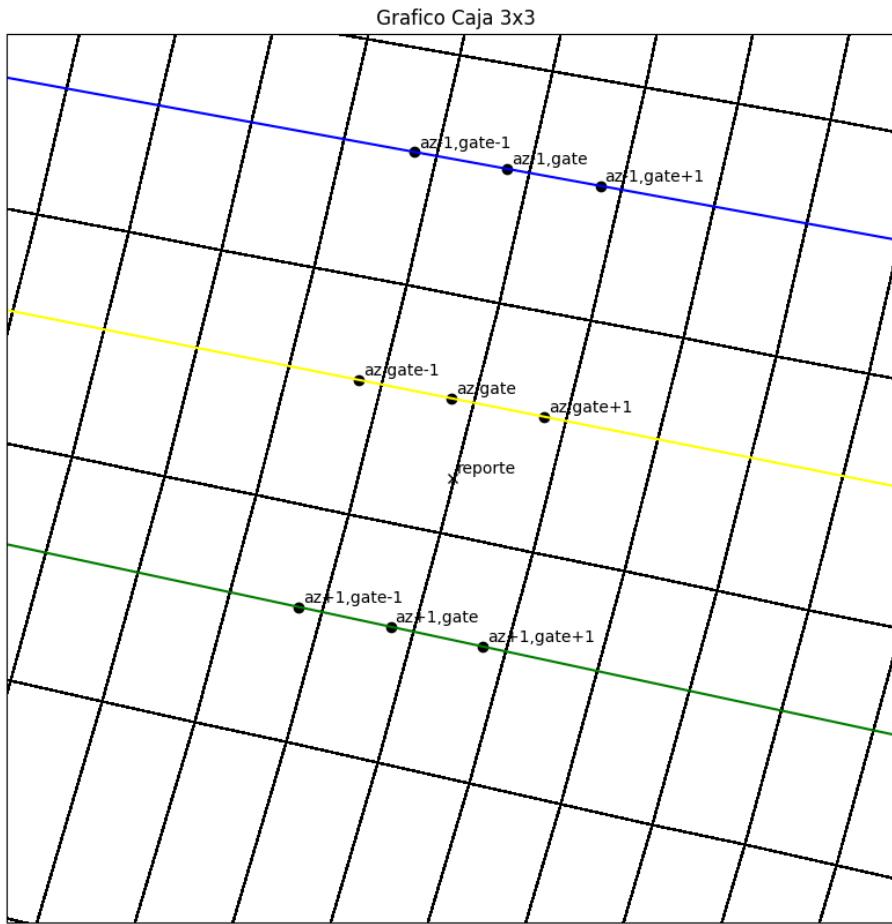


Figura 9: Ejemplo de caja de 9 puntos alrededor del pixel de radar más cercano al reporte. Con una cruz esta marcada la ubicacion del reporte, con puntos negros los 9 pixeles mas cercanos al mismo. Las líneas negras delimitan los pixeles de radar. A su vez están graficadas las transectas de los azimuths anterior (recta azul), central (recta amarilla) y posterior (recta verde).

2.2.5.2 Análisis 2: Método de vecindad Pixel-reporter ($t_0 \pm 10 \text{ min}$, $r < 5 \text{ km}$)

Los reportes en la base de datos SAMHI tienen una incertidumbre temporal asociada, que puede variar entre 10 minutos y 3 horas y depende del tipo de celda convectiva y de la subjetividad del reportero/a al momento de cargar el reporte en la base de datos. La Figura 10 muestra un histograma de las distancias que tienen los reportes seleccionados después de aplicar la metodología descrita en la sección 2.2.2 y calcular la distancia cuadrada mínima entre el reporte de granizo en superficie y el pixel de HID con la categoría granizo más cercano en el tiempo t_0 (143 reportes en total distribuidos en toda la Argentina). El 80% de los reportes se

encuentran a menos de 5km de un píxel de radar más cercano catalogado como granizo por el algoritmo.

A su vez, una revisión manual de la incertidumbre temporal de todos los casos muestra que en general las celdas convectivas no están a más de 10 minutos de distancia del horario t_0 . Consecuentemente, para tener en cuenta la incertidumbre temporal de los reportes se consideró una ventana de 10 minutos antes y después del horario más cercano identificado (t_0).

Los reportes cuentan con una incertidumbre espacial de entre 1 y 10km sin embargo el análisis 1 tiene en cuenta sólo 9 pixeles lo que equivale a aproximadamente 2km alrededor del reporte. Por lo que para tener en cuenta la incertidumbre temporal y espacial de los reportes se realizó el presente análisis 2. **El criterio fue considerar como acerto aquellos casos que tuviesen algún píxel del HID con granizo en la categoría más probable, en al menos alguno de los tres tiempos ($t_0 \pm 10\text{ min}$) y a una distancia r menor a 5 km de la ubicación del reporte, caso contrario se catalogó como error.** El umbral de 5km fue escogido en base al comportamiento de frecuencias de distancia del reporte al píxel de granizo más cercano discutido con la Figura 10.

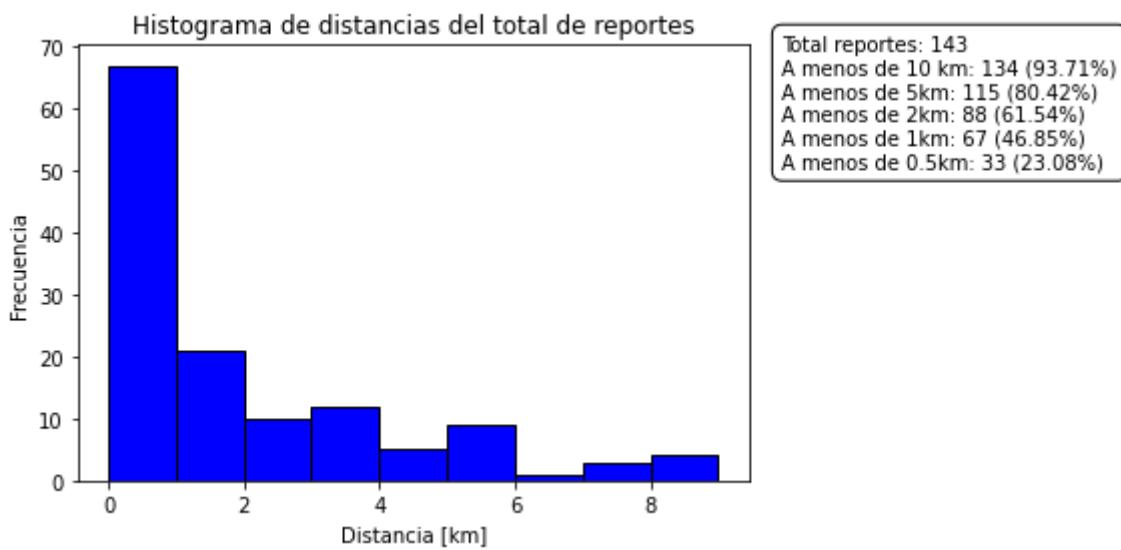


Figura 10: Histograma de frecuencias de distancias de cada reporte en superficie al pixel de radar con granizo más cercano.

2.2.5.3 Sensibilidad al modo convectivo y al tamaño de granizo reportado

Se separaron los reportes analizados teniendo en cuenta los modos de organización de la convección asociada y el tamaño de granizo a fin de analizar posibles diferencias presentadas en el HID frente a las distintas categorías.

Se propone usar la categorización utilizada por Mulholland y otros (2018). Para determinar las categorías propuestas se tiene en cuenta la velocidad doppler. Este análisis distingue entre 4 tipos de convección ejemplificados en la Figura 11 y listados a continuación:

- MUN: Multicelular No Organizada (Figura 11 a))
 - celdas a una distancia menor a 25km entre si y con $Zh \geq 30$ dBZ
- MCS: Multicelular Organizada (Figura 11 b))
 - regiones contiguas con $ZH \geq 30$ dBZ a lo largo de una distancia ≥ 50 km y al menos una de las celdas con un núcleo de $Zh \geq 50$ dBZ
- DSC: Discreta Supercelda (Figura 11 c))
 - rotación clara por > 10 min (al menos 2 escaneos consecutivos) en la elevación mas baja (0.5°) con $Zh > 30$ dBZ y típicamente asociado a eco en forma de gancho
- DNS: Discreta No Supercelda (Figura 11 d))
 - celdas no rotantes con más de 25km de distancia una de otra y Zh superior 30 dBZ.

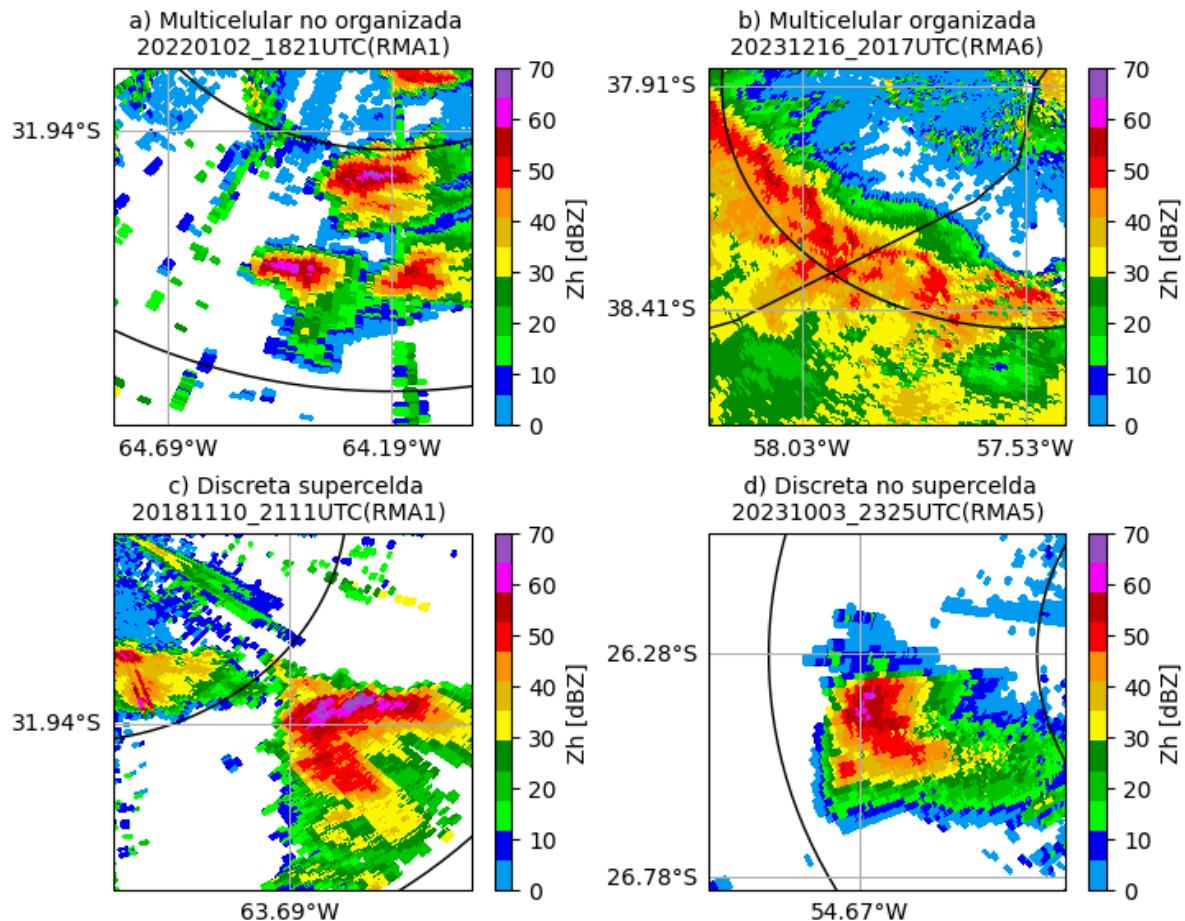


Figura 11: Zh en la elevación 0.5° indicando ejemplos de modos de convección: a) Multicelular no organizada (MUN), b) Multicelular organizada (MCS) , c) Discreta supercelda (DSC), d) Discreta no supercelda (DNS).

A fin de evaluar el desempeño del HID en función de la severidad del tamaño de granizo, se clasificaron los reportes siguiendo la nomenclatura utilizada en Ortega (2018), trabajo en el cual se distingue entre 4 tipos: **No severo** (Diámetro inferior a 25,4mm), **Severo** (Diámetro entre 25,4mm y 50,8mm), **Severo significativo** (Diámetro superior a 50,8mm) y **Desconocido** (no se cuenta con información del tamaño estimado).

2.2.5.4 Contorno de celda con umbral de Zh

Se realizó un análisis orientado a evaluar la cantidad de píxeles de granizo y la distribución de los hidrometeoros en la celda asociada al reporte. El HID utilizado pertenece a una categoría de algoritmos que clasifican pixel por pixel la categoría de hidrometeoro más probable, esto es, designa una clase de hidrometeoro basado en los datos colectados en un lugar específico (rango, elevación y azimuth), por lo que el resultado de un pixel de radar es independiente del resultado del pixel vecino. Esto puede llevar a resultados ruidosos debido a las imperfecciones en las mediciones y en el propio algoritmo, ya que no es lo mismo que haya una cantidad considerable de píxeles clasificados como granizo a que haya un solo píxel aislado por más que se encuentre a una distancia y tiempo aceptables del reporte en superficie. Para explorar esta limitación se decidió realizar un análisis de la totalidad de los píxeles que componen la celdas potencialmente asociadas a cada reporte. Para seleccionar el tiempo a utilizar se consideró dentro de la ventana **$t0 \pm 10 \text{ min}$** el escaneo en el cual el pixel con granizo más cercano estuviese a menor distancia de la ubicación del reporte.

Se graficaron los campos de Zh en los tiempos óptimos obtenidos y se asoció la celda convectiva más cercana a cada reporte. Para obtener una máscara de los datos contenidos solamente en la celda se buscó el contorno de Zh que definiera los límites de la celda convectiva. Para identificar las tormentas con este método se buscan regiones contiguas que presentan valores de reflectividad horizontal por encima del umbral de 35 dBZ y se agrupan sólo las secuencias que son adyacentes. Este método de identificación de las celdas permitió extraer los valores de las variables polarimétricas utilizando la máscara de Zh de la celda para realizar un análisis detallado de composición de hidrometeoros de la celda y sus respectivos valores polarimétricos. La Figura 12 muestra un ejemplo a través de los campos PPI de reflectividad que contienen graficado el azimuth central del reporte con una línea negra, la ubicación del reporte con un diamante negro y con puntos azules aquellos píxeles dentro del contorno de la celda identificada a partir del método descrito.

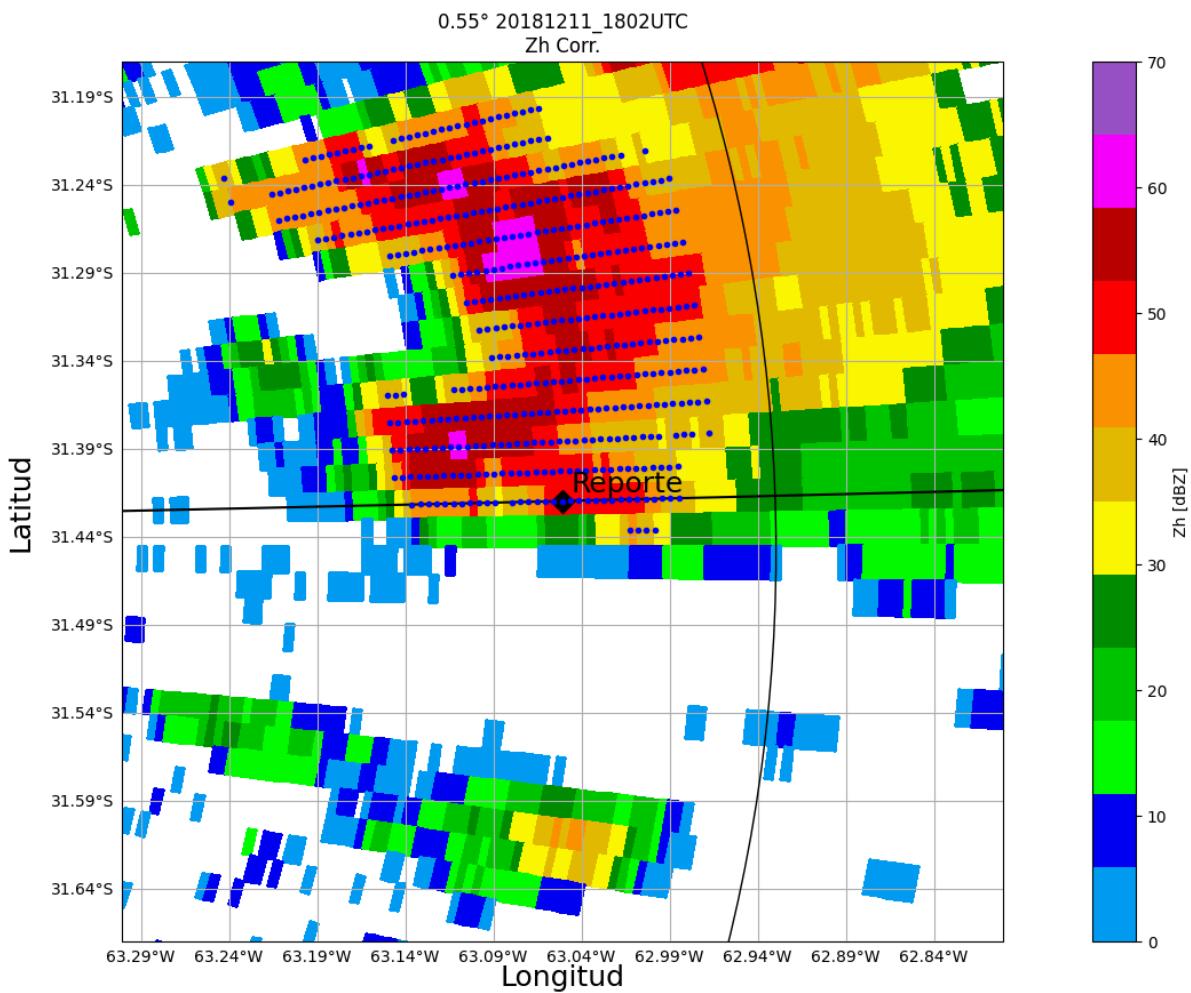


Figura 12: PPI de Zh 0.6° , línea negra: transecta del azimuth del reporte, puntos azules: región identificada como celda convectiva a partir del umbral de Zh de 35 dBZ, punto negro: ubicación del reporte (RMA 1, 11-12-2018 a las 1802Z).

3. Resultados

3.1 Estudio de sensibilidad para el total de reportes

Resumiendo lo discutido anteriormente, aplicando la metodología de la Sección 2 se obtiene un listado final con 143 reportes coincidentes con datos de radares meteorológicos distribuidos en las regiones de vigilancia de los 9 radares seleccionados. La mayor cantidad de reportes ocurren en Córdoba y Bernardo de Irigoyen (61 entre ambos, 42.6%), esto se condice con la distribución climatológica de eventos de granizo en Argentina (Mezher y otros, 2012). Es importante recordar

que la zona de Mendoza no es parte de este análisis dado que no dispone un radar de banda C doble polarización a la fecha de la escritura de la presente tesis, si bien en la etapa III del SINARAME se contempla una radar para San Rafael.

En primer lugar se evaluó la performance del algoritmo en el análisis de sensibilidad de la **caja de 3x3 píxeles** alrededor de la ubicación del reporte utilizando la metodología de la sección 2.2.5.1. Se encontró un total de **42 aciertos y 101 errores, dando la POD un valor de 0.29 (29%)**. La POD resultante de este primer análisis es baja a causa de que este método es bastante restrictivo. El granizo es un fenómeno muy puntual tanto espacial como temporalmente, y es por ello que considerar un solo tiempo y 9 pixeles resulta bastante restrictivo. Como se mencionó en la sección 2.2.5.2 la mayoría de los reportes contaban con una precisión temporal de 10 minutos y espacial de 5km, con lo cual se tomó esta ventana temporal y radio de tolerancia, siempre que fuese posible utilizar los datos de los escaneos consecutivos, caso contrario se tomó el escaneo siguiente y anterior más próximo disponible.

Al realizar el análisis de este segundo enfoque teniendo en cuenta una **incertidumbre temporal de 10 minutos y radio de 5km** en la totalidad de los reportes la **cantidad de aciertos asciende a 115** y sólo **28 de ellos son errores** dando como resultado **una POD de 0,80 (80%)**.

La POD mejora notablemente en el segundo análisis a comparación del primero y se ve que en la mayoría de los casos los reportes fueron cargados a la base de datos con una incertidumbre temporal aceptable de aproximadamente 10 minutos, sin embargo existen casos en los cuales la incertidumbre temporal o espacial fue el causante del error en el HID. Esto último se verificó de manera manual para los errores y será analizado en las siguientes secciones.

En la Tabla 4 se detalla la cantidad de reportes por radar junto con la categoría de modo convectivo y tipo de granizo más frecuente.

Radar	Cantidad de reportes (POD)	Tipo de Convección más Frecuente	Tamaño Granizo Más Frecuente	Aciertos	Errores
RMA1- Córdoba	33 (0,96)	MUN	Severo	32	1
RMA3 - Las Lomitas	4 (1)	MUN	Severo	4	0
RMA4 - Resistencia	17 (0,82)	MCS	Severo Sig.	14	3
RMA5- Bernardo de Irigoyen	28 (0,75)	MCS	No Severo	21	7
RMA6 - Mar del Plata	14 (0,78)	MCS	No Severo	11	3
RMA7 - Neuquén	13 (0,76)	MCS	No Severo	10	3
RMA8 - Mercedes	16 (0,75)	MUN	Severo Sig.	12	4
RMA10 Bahía Blanca	7 (0,42)	MCS	Severo	3	4
RMA11 - Termas de Río Hondo	11 (0,72)	MCS	No Severo	8	3

Tabla 4: Cantidad de reportes por radar, modo convectivo más probable y tipo de granizo más frecuente (excluyendo la categoría tamaño desconocido), aciertos, errores y probabilidad de detección para el análisis $t0 \pm 10 \text{ min}$, $r < 5 \text{ km}$.

De la tabla 4 podemos ver que en la mayoría de radares el tipo de convección dominante es MCS y la categoría de granizo más frecuente es No Severo. Por otro lado se observa que la categoría de convección más frecuente en el resto de radares es MUN por lo que la **organización multicelular ya sea organizada o no, es predominante en todos los radares**, lo que coincide con lo encontrado por Bruick y otros, 2019.

Cuando observamos la POD para cada tamaño de granizo según el modo convectivo dominante (Figura 13) se ve que el HID tiene una **capacidad de detección alta en casos asociados a superceldas discretas** ya que se obtiene una POD=1, es decir que en todos los casos catalogados como supercelda el HID observó granizo a menos de 5km del reporte. Además, siempre que hubo convección MUN y granizo Severo ($25.4\text{mm} < D < 50.8\text{mm}$) el HID observó granizo porque en este caso la POD también es 1. Por otro lado se destaca que los modos de organización discretos presentan en líneas generales una POD más alta que los modos multicelulares ya que los primeros tienen POD por encima de 0,7 en casi todos los tamaños mientras que para los segundos la POD ronda cercano a 0,6 o menor para todos los tamaños.

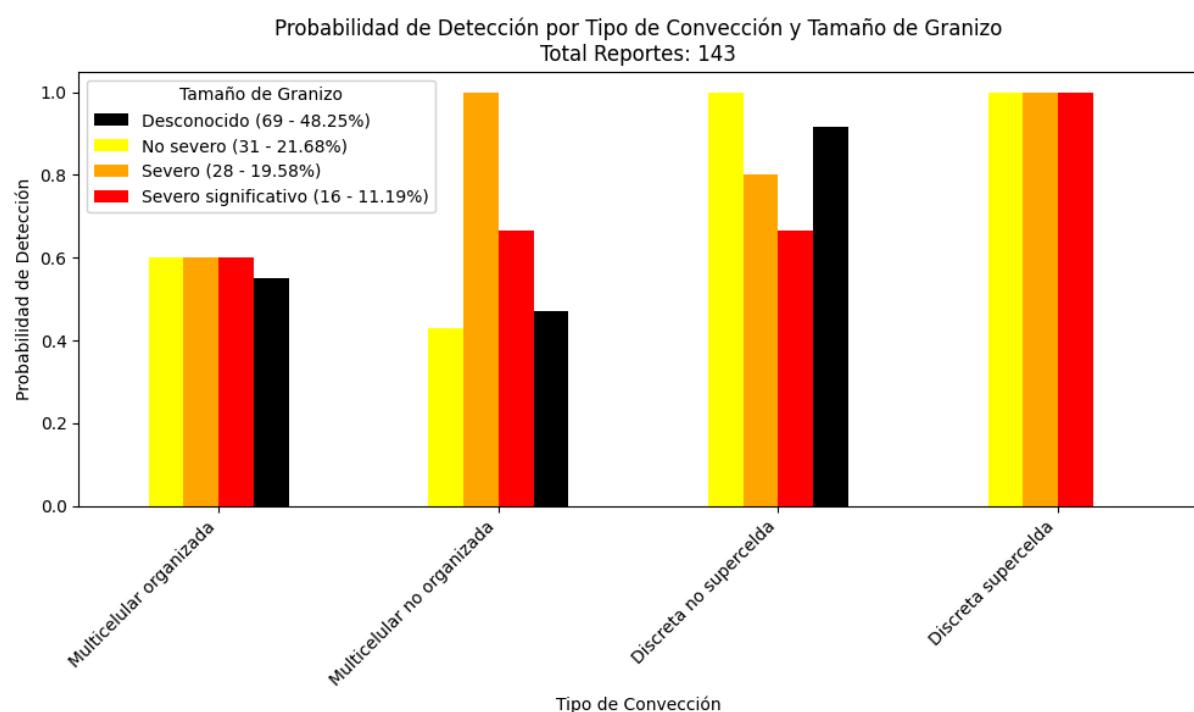


Figura 13: Gráfico de probabilidad de detección para cada categoría de tamaño de granizo según el modo convectivo asociado.

Hasta ahora vimos todos los reportes en conjunto, pero para analizar las posibles causas por las cuales el HID pudo fallar se separaron los reportes en dos grupos, uno de aciertos y otro de errores.

Casos de Acierto en el HID

Para un análisis gráfico en la Figura 14 se muestra el histograma de frecuencias de modo convectivos solamente tomando los casos de acierto. Tal como vimos en la Tabla 4, el histograma muestra que el modo convectivo más frecuente es MCS (43% de los casos), seguido por MUN (28%), luego DNS (21%) y DSC (8%). Por lo que la mayoría de reportes de granizo (cerca del 70% del total) están asociados a convección multicelular. Estos resultados son similares a lo encontrado por Mulholland y otros (2018). Las superceldas están asociadas a los radares RMA1 (Córdoba), RMA11 (Termas de Río Hondo) y RMA8 (Mercedes) y esto tiene sentido dado que este tipo de convección es bastante frecuente en la región (Piscitelli y otros 2021).

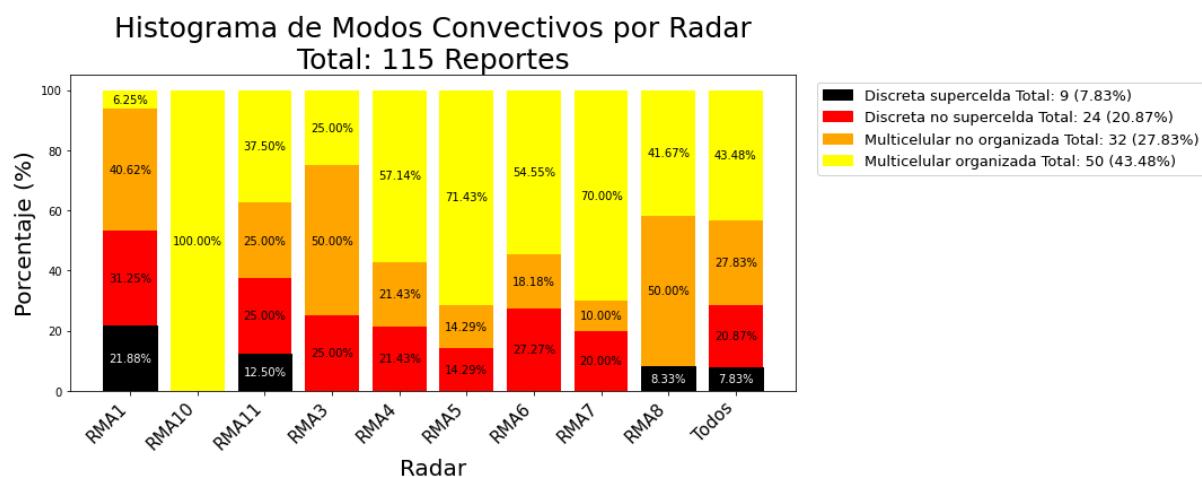


Figura 14: Histogramas de frecuencias de ocurrencia de tipos de convectivos para los reportes con acierto para cada radar utilizado

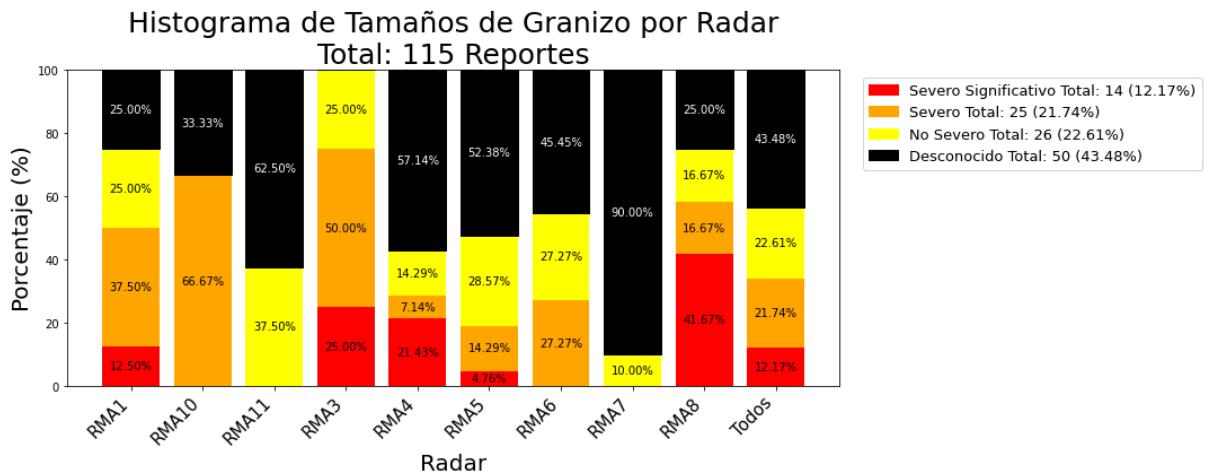


Figura 15: Histogramas de frecuencias de ocurrencia de distintos tamaños de granizo para los reportes con acierto para cada radar utilizado.

En la Figura 15 se muestra la frecuencia de reportes clasificados por tamaño de granizo y puede observarse que aproximadamente la mitad de los reportes contaban con un tamaño estimado. Un total de 26 reportes pertenecen a la categoría No Severo (<25mm), seguido de 25 reportes de granizo Severo (entre 25 y 50mm) y 14 casos de granizo Severo Significativo (>50mm). De este último grupo, 9 casos están asociados a los radares RMA3 (Las Lomitas), RMA4 (Resistencia), y RMA8 (Mercedes), y 5 de ellos asociados al RMA1 (Córdoba) y RMA5 (Bernardo de Irigoyen). Estas regiones de Argentina registran las mayores frecuencias de granizo acorde a climatologías realizadas con imágenes satelitales en el espectro de microondas (Bang y Cecil, 2019) y con reportes de estaciones de superficie (Mezher y otros, 2012). En la Figura 16 se muestra la distribución de frecuencias de ocurrencia de cada tamaño de granizo agrupado bajo el tipo de convección. Se puede observar que si se excluye la categoría de tamaño Desconocido, el granizo No Severo es la categoría más frecuente en los modos de organización de tipo MCS y DNS, mientras que para los eventos de DSC y MUN la categoría más frecuente es granizo Severo. Esto último puede estar relacionado con el hecho de que este tipo de tormentas se caracterizan por desarrollar ascensiones intensas que mantienen al granizo suspendido en zonas favorables para su crecimiento durante el tiempo suficiente para que alcance tamaños significativos antes de precipitar (Miller y otros, 1988).

Histograma de Frecuencias de Tamaño de Granizo según el Modo Convectivo
Total Reportes: 115

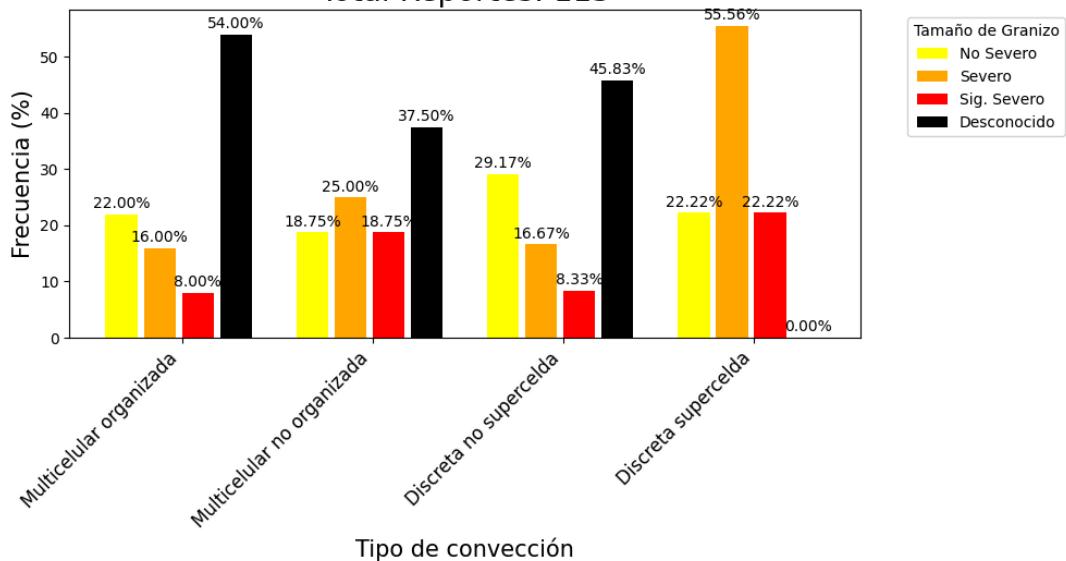


Figura 16: Histograma de ocurrencias de cada tipo de tamaño de granizo según el modo convectivo para el grupo de aciertos.

Casos de error en el HID

Hasta ahora vimos las características de los reportes en los que el HID detectó granizo, pero de los 143 reportes hay 28 casos en los cuales el HID no fue capaz de detectar granizo en la elevación de 0.5° con la metodología utilizada. Se encontraron principalmente 3 motivos que generaron el fallo en la detección de granizo por el HID:

Precisión espacial: en 19 reportes la celda convectiva causante de la granizada está ubicada por fuera del radio de 5km considerado. Cabe destacar que en todos estos reportes aumentando el radio de tolerancia de 5km a 10 km los casos pasan a ser aciertos según la metodología utilizada. **Con esto en mente y utilizando un radio de 10km se observa un aumento en la POD de un 80% a un 93% (134 aciertos y 9 errores) para el total de reportes.**

Precisión temporal: En 9 casos la celda convectiva atravesó el punto del reporte en un tiempo por fuera de la ventana de 10 minutos considerada en la metodología de detección. Esto es debido probablemente a la incertidumbre temporal con la que

se cargan los reportes en la base de datos. De los 9 casos, 7 pasan a ser acierto si se amplía la ventana temporal tolerada de 10 a 30 minutos manteniendo el umbral de 5km de radio de tolerancia, resultando en una POD de 85% (122 aciertos y 21 errores). **Si combinamos ambas (radio de 10km y rango de 30 minutos) se obtiene una POD de 96% (137 aciertos y 6 errores).** *Si bien la base de datos SAMHI posee un proceso de verificación, es evidente que la falta de precisión de la información debe ser mejorada en el futuro.*

Corrección de atenuación del Zh: El tercer motivo de fallo es causado por una corrección de atenuación insuficiente efectuada en el preprocesamiento de los datos. En algunos casos la metodología de corrección de atenuación de Zh por lluvias intensas no fue suficiente para obtener los mejores resultados y consecuentemente el Zdr calculado tampoco pudo ser correctamente recalculado por atenuación diferencial, por tanto el HID no fue capaz de detectar el granizo. Sin embargo esto ocurrió en solo **8 casos**, lo que representa un **6% del total**, por lo que se puede decir que la metodología de corrección funciona adecuadamente salvo para casos de atenuación extrema. En la sección “Estudio de Casos” se muestra con detalle un evento relacionado con atenuación por precipitación.

En la Tabla 5 se detallan los 28 casos de error por radar según modo convectivo y tamaño de granizo. Al igual que en los aciertos en este grupo de eventos predomina la convección multicelular, y en su mayoría son MCS habiendo solo 3 casos de convección discreta no supercelular. **Predomina el tamaño de granizo Desconocido y en segundo lugar No Severo y sólo 5 casos con granizo superior a 25mm fueron pasados por alto por el HID. Se trata de 3 eventos con granizo Severo y 2 con tamaño Severo Significativo.** Las causas de error en estos últimos fueron incertidumbre temporal y atenuación. La Figura 17 muestra la frecuencia de los tamaños de granizo agrupados por tipo convectivo. Se ve que los casos de MCS y MUN ambos están asociados a un predominio de granizo Desconocido y No Severo. Los casos con granizo Severo y Severo Significativo ocurrieron bajo eventos MCS y DNS.

En resumen, del total de reportes existen 28 casos con tamaño Severo (25 aciertos y 3 errores) y 16 con tamaño Severo Significativo (14 aciertos y 2 errores). Estos números indican que en la mayoría de los casos de los cuales el HID no observó

granizo es probable que este no haya tenido un tamaño importante para generar grandes impactos y el HID muestra una capacidad de detección alta en casos con granizo grande, con diámetro superior a 25mm.

Radar	M C S	M U N	D S C	D N S	No Severo	Severo	Severo Signif.	Desconocido
RMA1- Córdoba	1	-	-	-	-	-	-	1
RMA3 - Las Lomitas	-	-	-	-	-	-	-	-
RMA4 - Resistencia	3	-	-	-	-	2	1	-
RMA5- Bernardo de Irigoyen	5	2	-	-	2	-	-	5
RMA6 - Mar del Plata	3	-	-	-	1	-	-	2
RMA7 - Neuquén	1	1	-	1	-	-	-	3
RMA8 - Mercedes	2	1	-	1	-	-	1	3
RMA10 - Bahía Blanca	3	-	-	1	2	1	-	1
RMA11 - Termas de Río Hondo	2	1	-	-	-	-	-	3
Total	20	5	0	3	5	3	2	18

Tabla 5: cantidad de eventos por tipo de convección y tamaño de granizo por radar para los 28 casos de error para el análisis $t0 \pm 10 \text{ min}$, $r < 5 \text{ km}$.

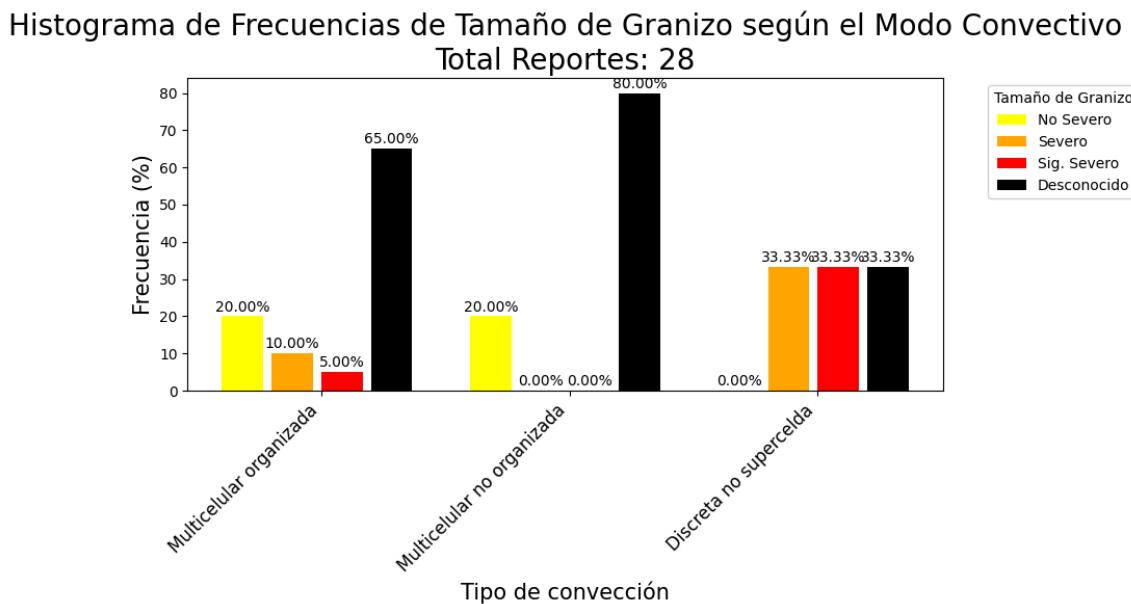


Figura 17: Idem Figura 16 para los casos de error en el HID

Análisis considerando el contorno de celda con umbral de Zh

Hasta aquí se ha desarrollado la capacidad de detección del HID en diversos análisis, su sensibilidad al tipo convectivo y tamaño de granizo, por lo que ahora vamos a centrarnos en las características de las celdas convectivas asociadas a cada evento. Para ello, a continuación se realiza un análisis de las variables polarimétricas correspondientes a las celdas convectivas centrandonos en un radio de 5km alrededor del reporte y para los tiempos definidos como óptimos en la sección 2.2.5.2 Los histogramas de frecuencias de Zh y Zdr en la elevación más baja y horario óptimo están graficados en la Figura 18 para los casos de acierto y Figura 19 para los casos de error en el HID. El color de cada barra indica la categoría de hidrometeoro que el HID clasificó como más probable para ese valor (solo se muestran las 4 especies más frecuentes). Se pueden observar diferencias entre los casos de acierto y error, tanto en los hidrometeoros presentes como en los valores asociados a cada variable polarimétrica. En los casos de acierto las especies predominantes son lluvia (46% del total de píxeles) y granizo (25%) mientras que en los casos de error lo son la llovizna (37%) y la lluvia (32%). En los casos de acierto los valores de Zh son mayores llegando a superar los 70 dBZ en algunos pixeles y las frecuencias máximas se alcanzan entre 40 y 60 dBZ tanto para

lluvia como para granizo y gotas grandes. Por el contrario para los casos de error Zh tiene valores máximos inferiores de hasta 50dBZ y sus frecuencias máximas se alcanzan en un rango de valores de entre 20 y 40 dBZ. El comportamiento de Zdr también difiere entre ambos grupos, en los casos de acierto los valores están distribuidos de manera más uniforme entre 2 y 8 dB, mientras que en los casos de error hay una tendencia a valores cercanos a 0 dB, entre -2 y 2 dB.

El histograma de Zdr en los casos de acierto para lluvia se asemeja a una distribución normal aunque ligeramente desplazada del cero, centrada en 3 dB. Las mayores frecuencias se corresponden con valores de entre 1-3 dB, mientras que los pixeles asociados con granizo presentan mayores frecuencias en valores de entre 3-6 dB y hasta 8 dB, al igual que la categoría de gotas grandes/granizo derretido. Debido al similar comportamiento en los valores de las variables correspondientes a las especies granizo y gotas grandes, es probable que estas dos están altamente ligadas pudiendo haber zonas con mezcla de gotas grandes y granizo (Gatlin y otros, 2015). La causa de las diferencias en Zh y Zdr se debe a los motivos de error mencionados previamente, los pixeles pueden estar afectados por atenuación por lluvias intensas no corregida o bien la región más intensa de la celda convectiva se encuentra por fuera de la ventana de $t \pm 10$ min y $r < 5\text{ km}$ y por ende no se alcanzan los umbrales para que el HID clasifique los pixeles como granizo.

De forma similar se graficaron los histogramas de ROHV y Kdp para los casos de acierto y error en las Figuras 20 y 21 respectivamente. La especie lluvia presenta valores similares tanto en los aciertos como errores, con frecuencias máximas de $\text{ROHV} > 0,95$. Por otro lado, en los aciertos los pixeles asociados a granizo y gotas grandes presentan su máxima frecuencia en valores inferiores a los de la lluvia, entre 0,9 y 0,95, esto tiene sentido debido a la irregularidad de la forma de las piedras del granizo y la mezcla de granizo y lluvia en el volumen escaneado por el radar que lleva a una disminución en la correlación entre los pulsos horizontal y vertical (Kaltenboeck y Rhyzhkov, 2013). Por último el Kdp presenta sus máximas frecuencias cerca del 0. Tanto los pixeles de lluvia como granizo tienen su pico en valores inferiores a $0.5^\circ/\text{km}$ y las frecuencias disminuyen gradualmente a medida que aumenta el valor de Kdp. Se puede decir que la lluvia y el granizo tienen un comportamiento similar en términos de esta variable, por lo que no pareciera ser un buen discriminador, es por esto que el HID requiere de todas las variables

polarimétricas en conjunto para identificar la categoría más probable con mayor confianza.

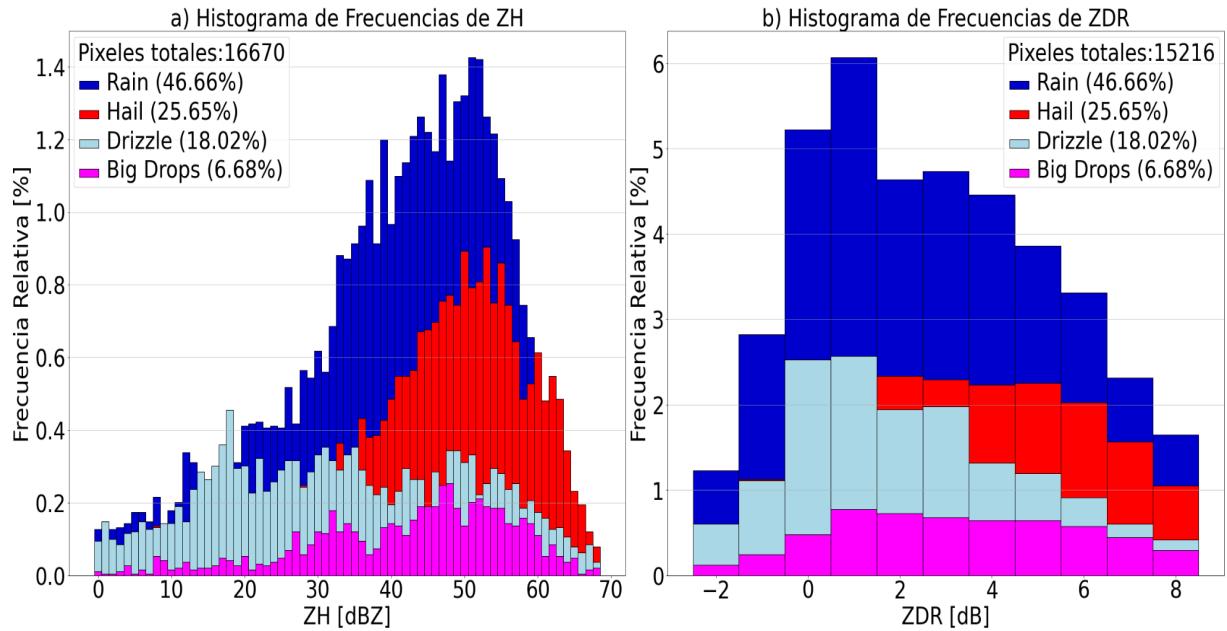


Figura 18: Histograma de frecuencias de a) Zh y b) Zdr de las variables presentes dentro del radio de 5km alrededor del reporte en los tiempos óptimos de las celdas convectivas para los casos de acierto.

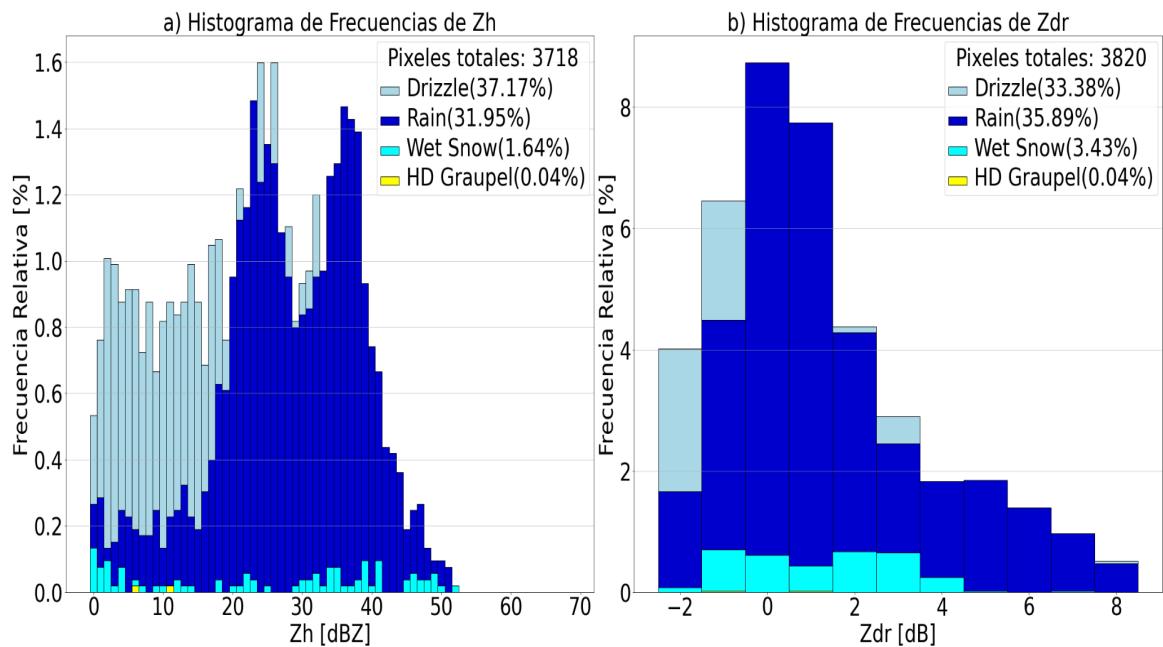


Figura 19: Idem Figura 18 para los casos de error del HID.

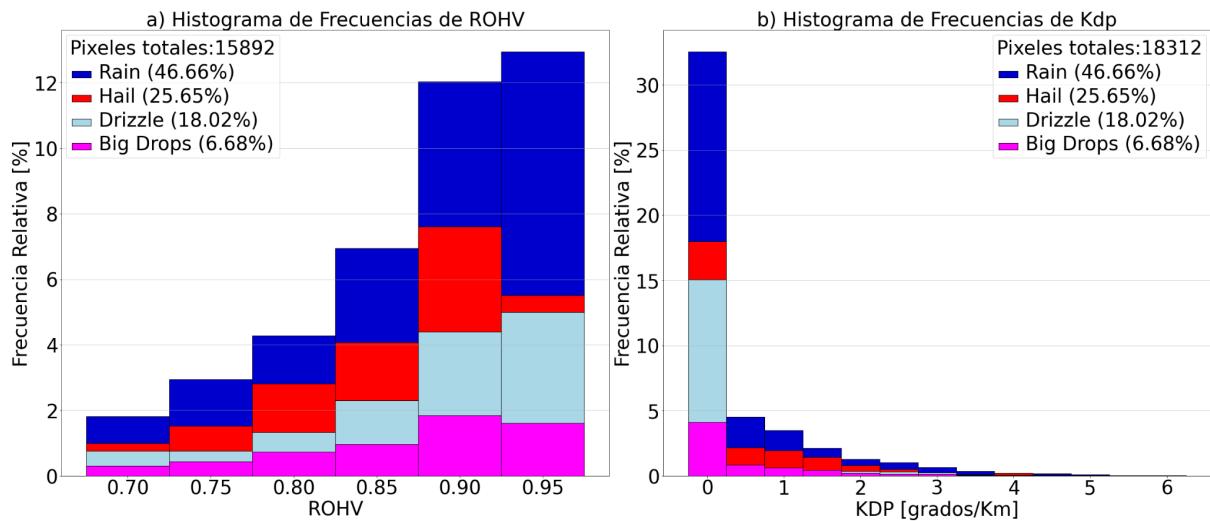


Figura 20: Idem Figura 18 para ROHV y Kdp.

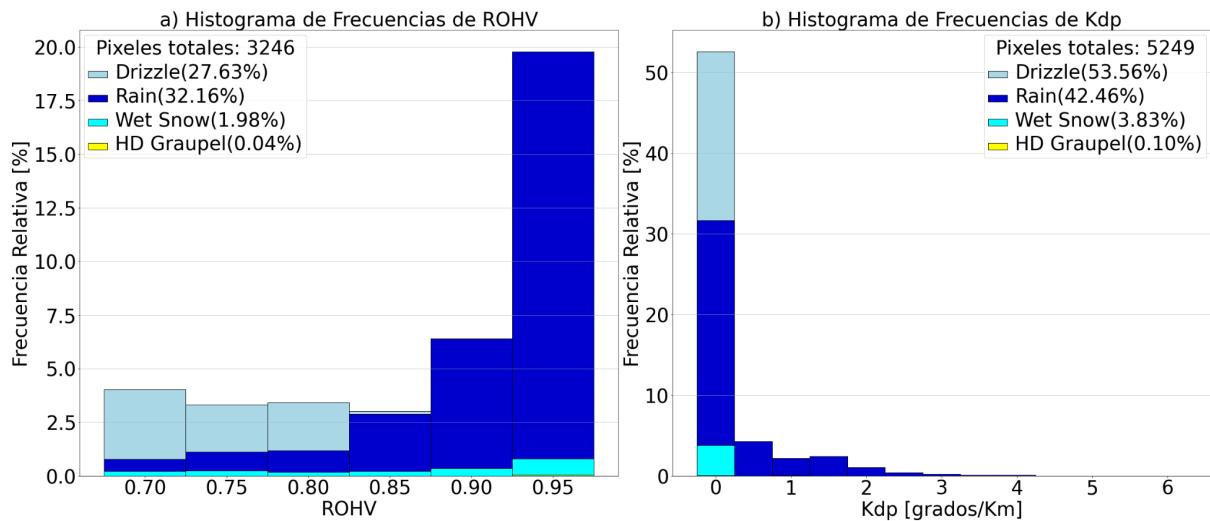


Figura 21: Idem Figura 19 para a) ROHV y b) Kdp.

3.2 Estudios de caso

En esta sección se analiza el comportamiento del HID en un caso de acierto y un caso de error en el radar de banda C y se exploran diferencias entre una radar de banda S y C en presencia de atenuación débil. Frente a distintos tipos de organización y tamaño de granizo reportados se mencionan posibles mejoras a tener en cuenta en el HID analizado y el impacto del tipo de información utilizada.

Caso 1: RMA1, 2018-12-11 18:00Z. Acierto. Significativo Severo durante MUN

El primer caso analizado corresponde al **11 de diciembre de 2018 a las 18:00Z**. La región noreste de la provincia de Córdoba fue afectada por convección de tipo **multicelular no organizada** y en la ciudad de Arroyito, a 110km del RMA1, se reportó granizo **significativo severo de hasta 80 mm** (Figura 22). La Figura 23 muestra los campos PPI de las variables polarimétricas en la primera elevación de radar en el tiempo más cercano al del reporte (marcado con un punto negro), a las 1802Z. En el campo de Zh corregido se observan núcleos con valores superiores a 60 dBZ, mientras que los valores del Zdr corregido alcanzan valores de hasta 10 dB en las regiones de gotas grandes (valores similares fueron encontrados por Anderson y otros, 2011), esto se condice con el fenómeno de resonancia que producen las gotas grandes en radares de banda C.



Figura 22: granizo caído en Arroyito el 11-12-2018 a las 1800z. Fuente SAMHI.

Paneles PPI RMA1 20181211_1802UTC 0.55° deg.

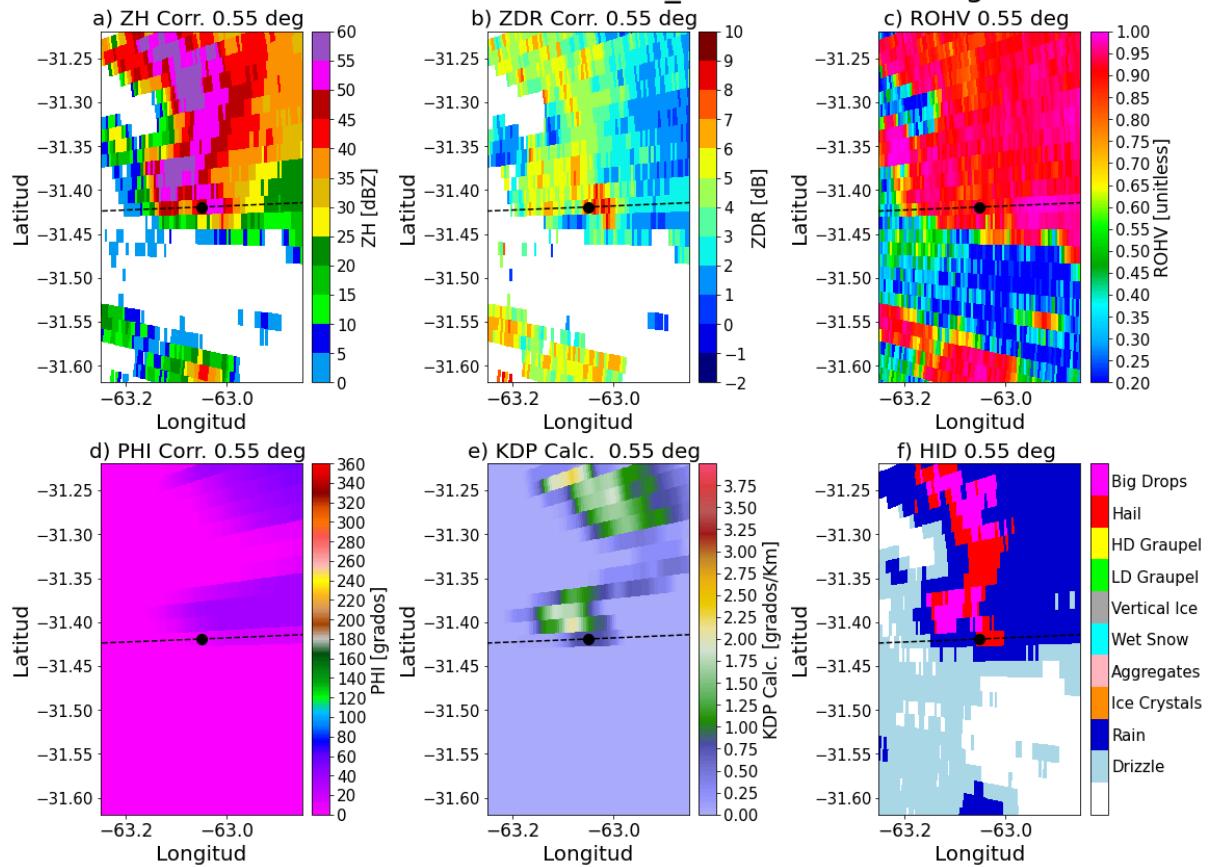


Figura 23: PPI de Z_h (a), Zdr (b), $ROHV$ (c), PHI (d), Kdp (e), HID (f) en la elevación de 0.5° para el dia 11-12-2018 a las 1802Z. Con un punto negro se muestra la ubicación del reporte y la línea de trazos el radial del mismo.

El $ROHV$ tiene valores cercanos a 1 en las regiones clasificadas como lluvia y entre 0,8 y 0,9 en las zonas clasificadas como gotas grandes y granizo. La disminución de esta variable en estas regiones se debe a las forma irregulares que tiene el granizo y/o a la no uniformidad de la distribución de hidrometeoro, pudiendo haber mezcla de gotas de distintos tamaños con granizo.

Si hacemos un zoom en el PPI de HID alrededor del reporte en el horario más cercano al mismo se obtiene la Figura 24. La caja contiene 3 píxeles (incluido el del reporte) clasificados como granizo, 3 píxeles como gotas grandes (que se ha mencionado previamente que puede contener mezcla de gotas con granizo en derretimiento) y 3 píxeles como lluvia. Es por este motivo que considerar un solo tiempo y 9 píxeles alrededor del reporte puede ser bastante limitante a la hora de hacer una verificación puntual.

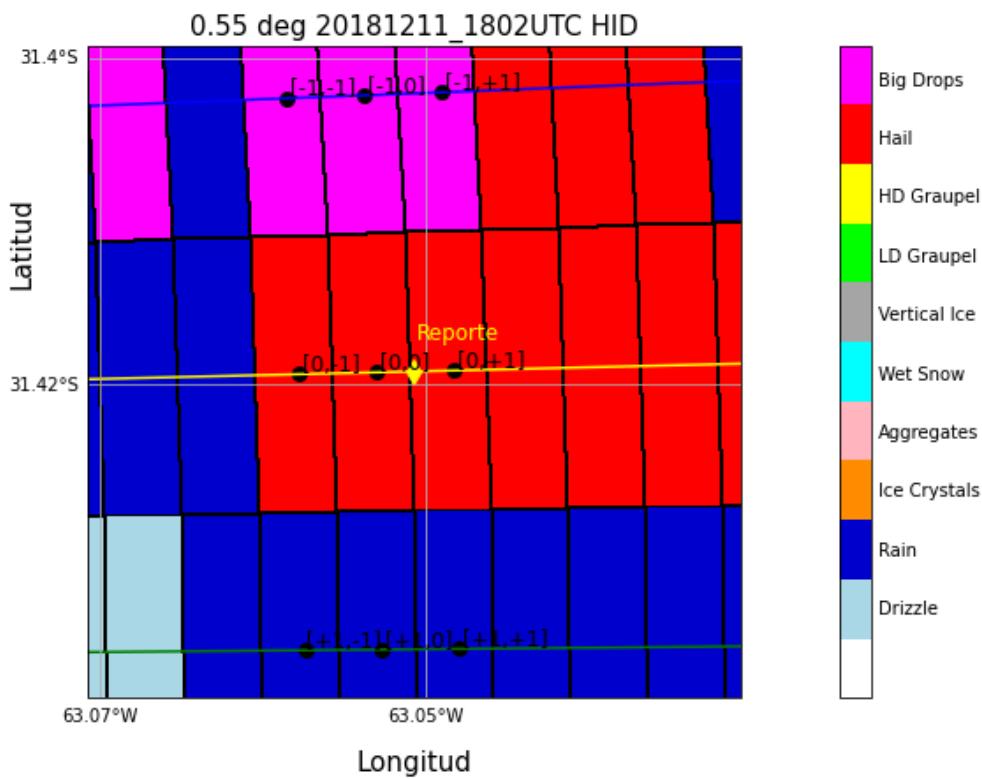


Figura 24: Campo PPI del HID para el 11-12-2018 a las 1802Z. El rombo amarillo denota la ubicación del reporte y los puntos negros marcan las ubicaciones de los pixels de radar que forman la caja de 3x3 alrededor del reporte. Se marcan las transectas del azimuth del reporte (línea amarilla), anterior (línea azul) y siguiente (línea verde).

Se identificó el contorno de 35 dBZ (ver como ejemplo la Figura 11) y con los valores obtenidos se graficaron los histogramas de distribución de Zh, Zdr, PHI, Kdp y el total de especies en la Figura 25.

En la elevación más baja (0.5°), el HID clasifica 3 especies en total: lluvia, granizo y gotas grandes. Del total de 567 pixeles de la celda cerca del 70% corresponde a lluvia, y la mayores frecuencias se encuentran en los valores de Zh de entre 35 y 45 dBZ. La reflectividad horizontal presenta su pico de frecuencias en valores cercanos a 1 dBZ, mientras que el ROHV los valores se acercan a 0,9 (valores típicos de lluvia y llovizna). Por otro lado hay un 17% de pixeles clasificados como granizo y un 13% como gotas grandes y su comportamiento es bastante similar en líneas

generales. La distribución de ambas especies muestra en Zh una tendencia hacia los valores más altos, por encima entre 50 y 65 dBZ. El Zdr presenta las mayores frecuencias alrededor de los 5 dB y el ROHV en valores que rondan entre 0,8 y 0,9, un poco menos que los valores de lluvia, lo cual es esperable debido a la forma irregular del granizo y gotas grandes. Los valores de Kdp varían entre 0 y 3 °/km tanto para lluvia como granizo y gotas grandes, sin embargo la lluvia presenta una mayor frecuencia de valores más cercanos a 0 y 1.

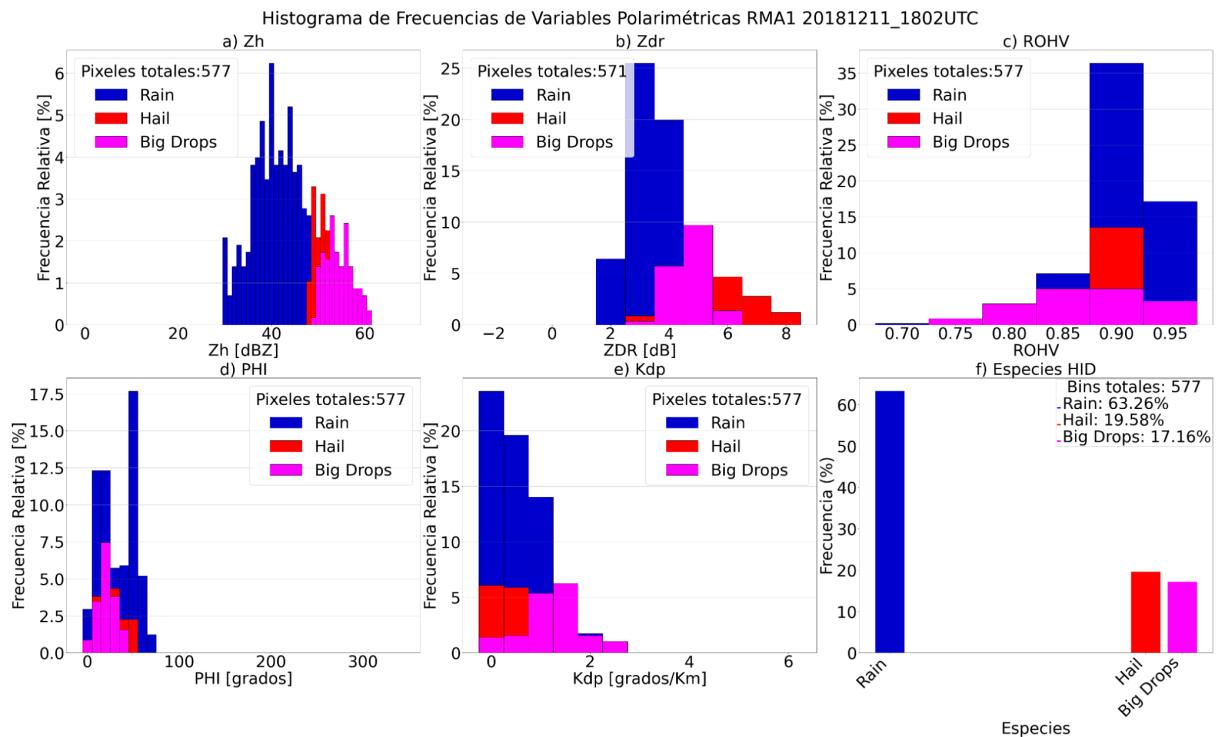


Figura 25: Histograma de frecuencias según especie de HID en el contorno de dBZ para a)Zh, b)Zdr, c)ROHV, d)PHI, e)Kdp y f) especies del HID para el 11-12-2018 1802Z en la elevación de 0.5°.

Caso 2: RMA5, 2021-11-03-1840Z. Error. MCS con granizo de tamaño desconocido.

El 3 de Noviembre de 2021 una línea de inestabilidad afectó gran parte de la provincia de Misiones. En las zonas rurales de las localidades de El Soberbio y San Vicente la intensa caída de granizo (de tamaño desconocido) causó daños a plantaciones y a viviendas. En la Figura 26 se muestran los PPI de las variables polarimétricas observadas y corregidas. La línea negra de trazos denota el azimuth del reporte y este último está marcado con un punto negro. Al noreste del reporte se

observan celdas convectivas muy intensas con núcleos de Zh que superan los 60 dBZ coincidentes con valores de Zdr superiores a 6dB.

A causa de la gran atenuación que estas celdas producen a mayores rangos hacia el SW, en la celda asociada al reporte (al sur de 27.2S) se registran Zh con valores bajos de entre 25 y 30 dBZ colocalizados con valores negativos de Zdr producto de la atenuación diferencial.

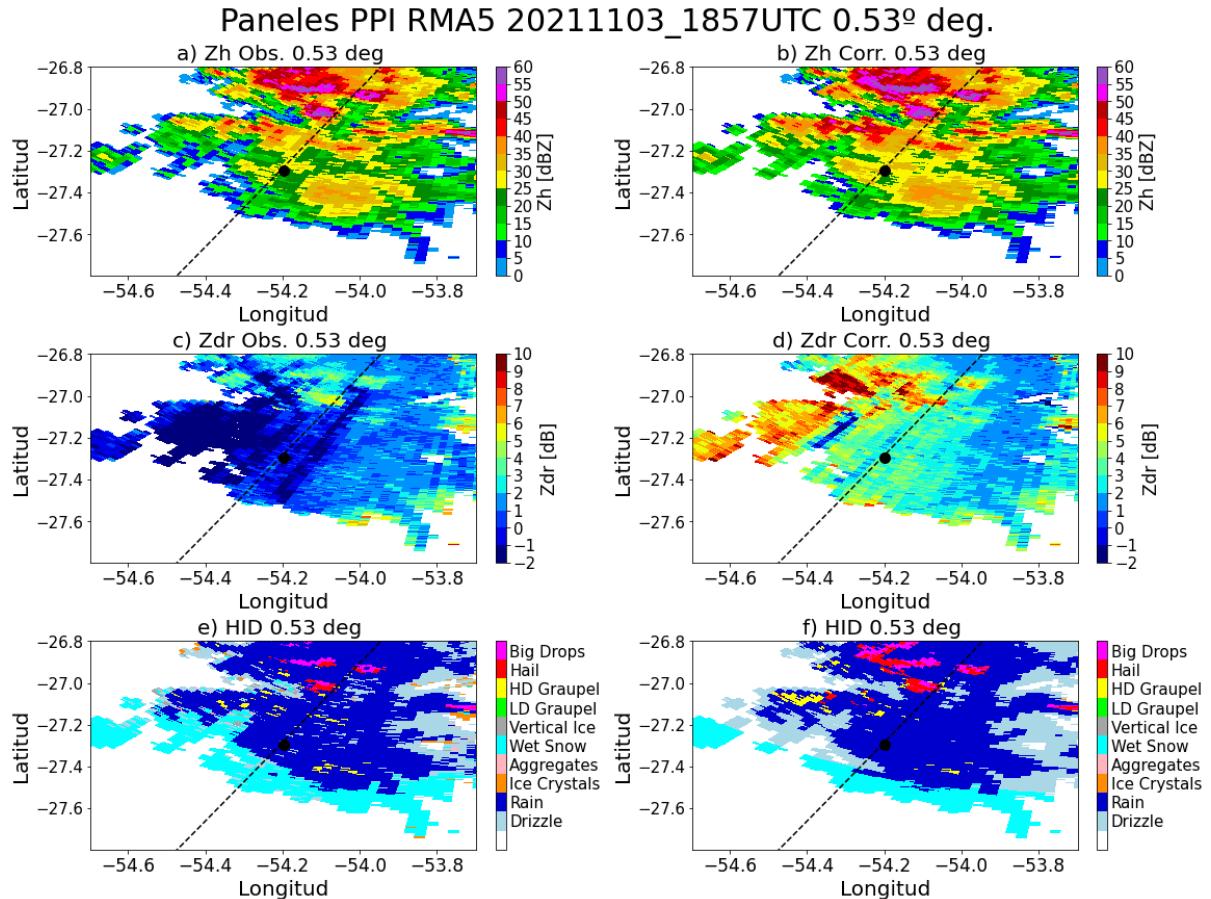


Figura 26: Campos PPI en la elevación de 0.5° para a) Zh observado, b) Zh corregido, c) Zdr observado, d) Zdr corregido, e) HID calculado con variables sin corregir y f) HID calculado con variables corregidas. Punto negro: ubicación del reporte, recta negra: azimuth del reporte para el 03-11-2021 a las 1857Z.

Luego de aplicar la corrección se observa que en las cercanías del reporte los valores de Zh continúan siendo bajos (entre 25 y 30 dBZ) y los valores de Zdr entre 3 y 4 dB, por lo que este es un ejemplo en el cual las variables no alcanzan los umbrales para ser clasificados como granizo por el HID debido de la atenuación causada por las lluvias y granizo al NE que el haz de radar atraviesa en rangos

menores al del reporte y por ende fue catalogado como error según esta metodología de verificación.

Caso 3: RMA5 y Cascavel, 2023-08-11 11:00Z

Por último se muestra un caso ocurrido en la región de intersección de vigilancia de los radares RMA5 de banda C y Cascavel de banda S (Cas de ahora en adelante) con el objetivo de comparar ambas bandas. El 11 de Agosto de 2023 a las 11:00Z se desarrolló convección de tipo multicelular organizada en el noreste de Argentina y sudeste de Brasil. Se reportó granizo en Integración, provincia de Misiones (Figura 27), a una distancia aproximada de 60 km al noreste del RMA5 y a 95 km al sudoeste de Cas. Los campos PPI de las variables polarimétricas en cada banda correspondientes de la primera elevación están plasmados en la Figura 28. Se observan grandes diferencias entre ambos radares. El RMA5 presenta un núcleo de Zh de mayor valor y mayor extensión que el de Cas. Los valores altos de Zh en el RMA5 están acompañados de valores altos de Zdr, de hasta 8 dB en algunos rangos , cosa que no se aprecia en Cas donde los valores de Zdr rondan entre 2 y 3 dB.



*Figura 27: granizo caído en Integración, Misiones el 11-08-2023 a las 11:00Z.
Fuente SAMHI.*

Esto ocurre porque hay gotas y granizo con diámetro lo suficientemente grande para que se genere el fenómeno de resonancia típico de radares de banda C dando como resultado Zh y consecuentemente Zdr muy elevadas.

Como se mencionó en la Introducción una de las principales diferencias que podemos encontrar es la atenuación que sufren los radares de banda C. Los lugares en los que buscamos que se produzca atenuación en general son zonas que están por detrás de una celda convectiva muy intensa. La radiación atenúa por detrás de una zona convectiva intensa porque en estas hay presencia de hidrometeoros grandes, que hacen que ocurra un cambio de régimen de dispersión (de Rayleigh al régimen de Mie). Dentro del régimen de Mie la dispersión toma direcciones preferenciales, entre ellas la dirección de propagación del haz, por lo que la potencia devuelta al radar es de menor magnitud que en el régimen de Rayleigh, y por ende Zh es menor. Este fenómeno se observa al noreste del reporte, si vemos el PPI correspondiente al RMA5 se ven valores de Zh menores y de Zdr negativos, consecuencia de la atenuación horizontal y por ende diferencial que ocurre cuando Zh se atenúa pero no Zv.

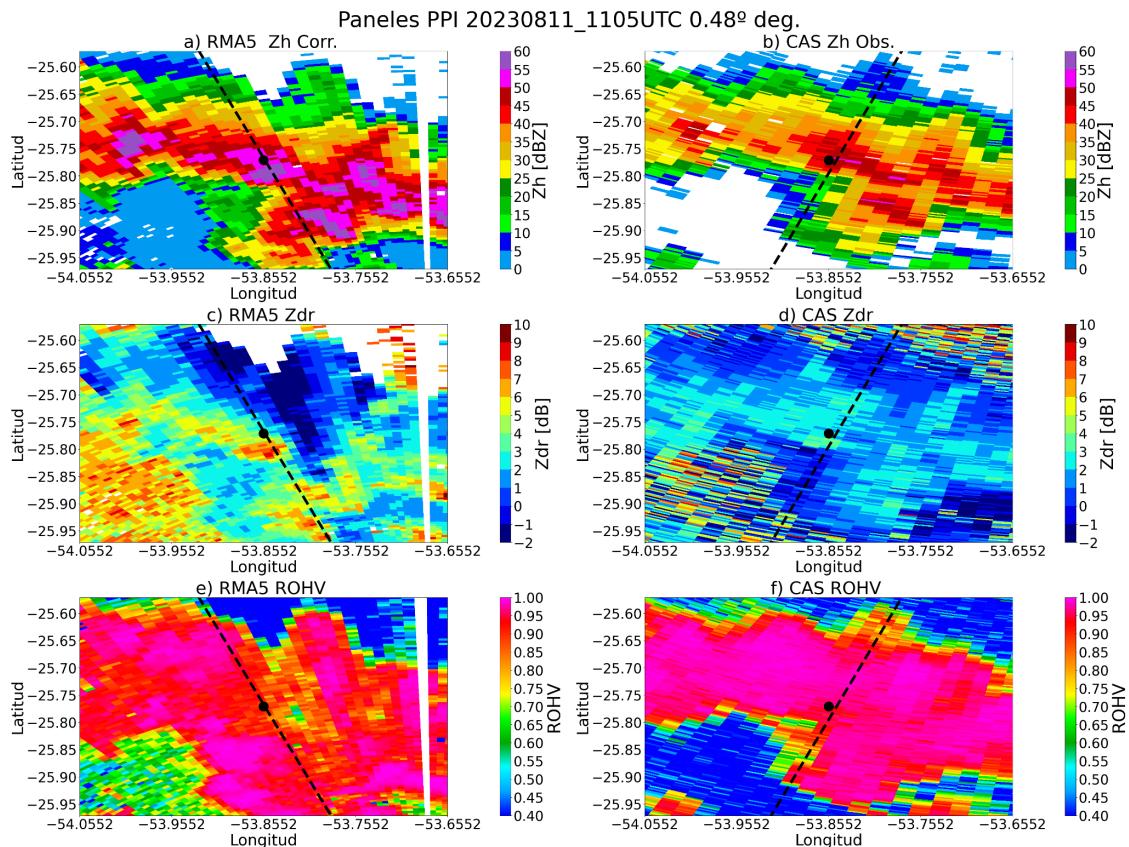


Figura 28: Campos PPI en la elevación de 0,5° correspondientes al RMA5 (Zh a), Zdr c) y ROHV d) y Cas (Zh b), Zdr d) y ROHV f)) para el dia 11-08-2023 a las 11:05Z. El punto negro marca la ubicacion del reporte y la linea de trazos el azimuth del reporte para cada radar.

La presencia de hidrometeoros de gran diámetro produce que Zh y Zv se desfasen llevando a un aumento en el PHI (Figura 29), y consecuentemente un incremento en los valores de Kdp. Por ello, se observa que el HID clasifica a la celda convectiva en tres especies principales. La amplia región con granizo tiene señales distintas en ambas bandas. El Zh es mucho mayor en el RMA5 (>55dBZ) que en Cas (hasta 50 dBZ), el Zdr tiene valores de hasta 10 dB en el RMA5 mientras que Cas alcanza un máximo de 3 dB. En ambas bandas se observa una disminución en los valores de ROHV en la región con granizo, sin embargo en el RMA5 esta disminución es mucho mayor (Kaltenboeck y Ryzhkov, 2013).

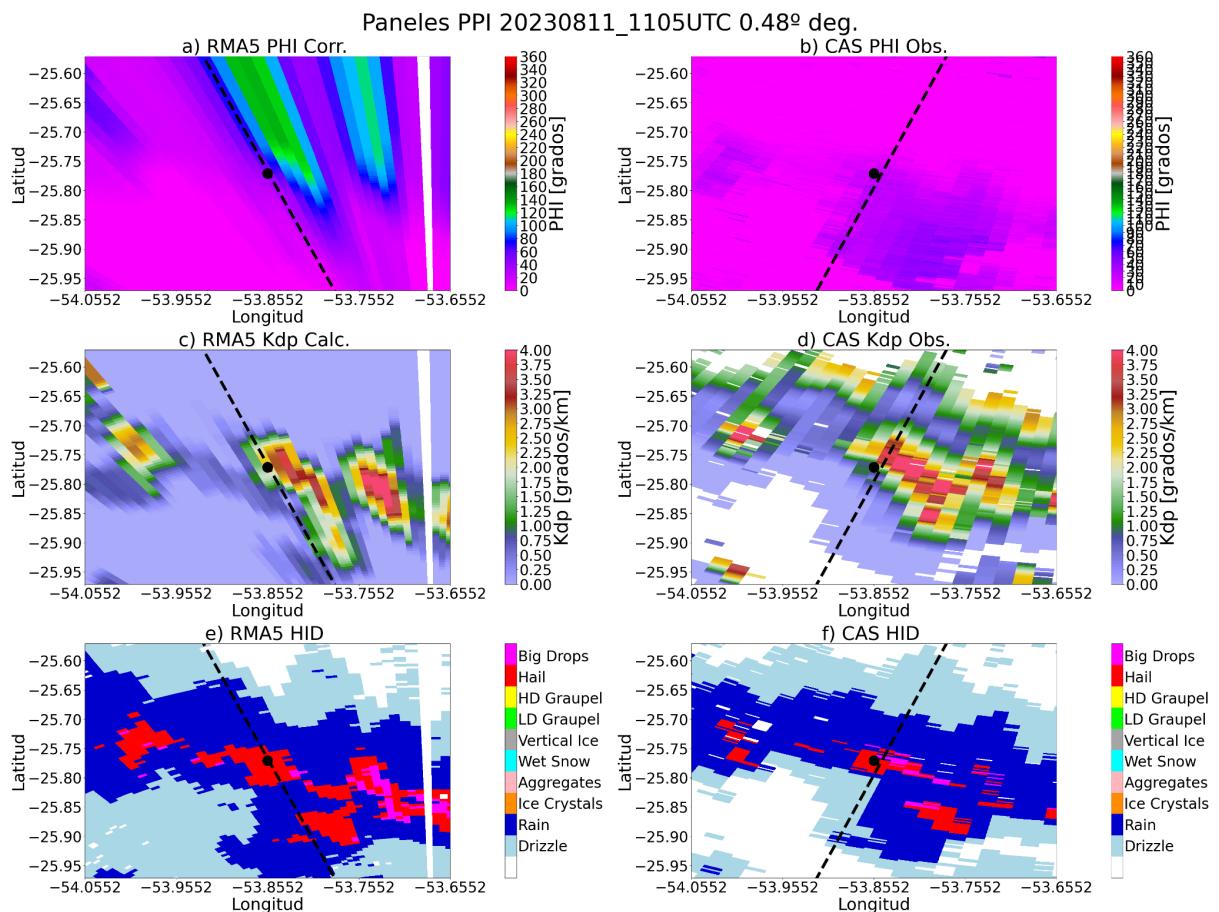


Figura 29: Campos PPI en la elevación de 0,5° correspondientes al RMA5 (PHI a), (Kdp c), (HID e) y a Cas (PHI b), (Kdp d), (HID f) para el dia 11-08-2023 a las 11:05Z. El punto negro marca la ubicacion del reporte y la linea de trazos el azimuth del reporte para cada radar.

Las distribuciones de frecuencias de las variables polarimétricas para cada radar están graficadas en los histogramas de la Figura 30 (RMA5) y 31 (Cas). Se ve que en líneas generales la cantidad de especies es similar, predomina la lluvia y en menor medida granizo y gotas grandes. Los valores de Zh asociados a lluvia tienen valores similares en ambos radares aunque la frecuencia máxima del RMA5 está en 45 dBZ mientras que en Cas en 37dBZ.

La principal diferencia entre ambos radares se encuentra en las mediciones de Zdr dado que el pico de frecuencia de Cas es mucho menor (cerca de 2 dB) que el del RMA5 (cerca de 6 dB), especialmente en granizo. Esto es lo que se observó en la discusión del fenómeno de resonancia de radares de banda C de los campos PPI de la Figura 28. Las otras variables, ROHV y Kdp tienen distribuciones similares en ambos campos PPI.

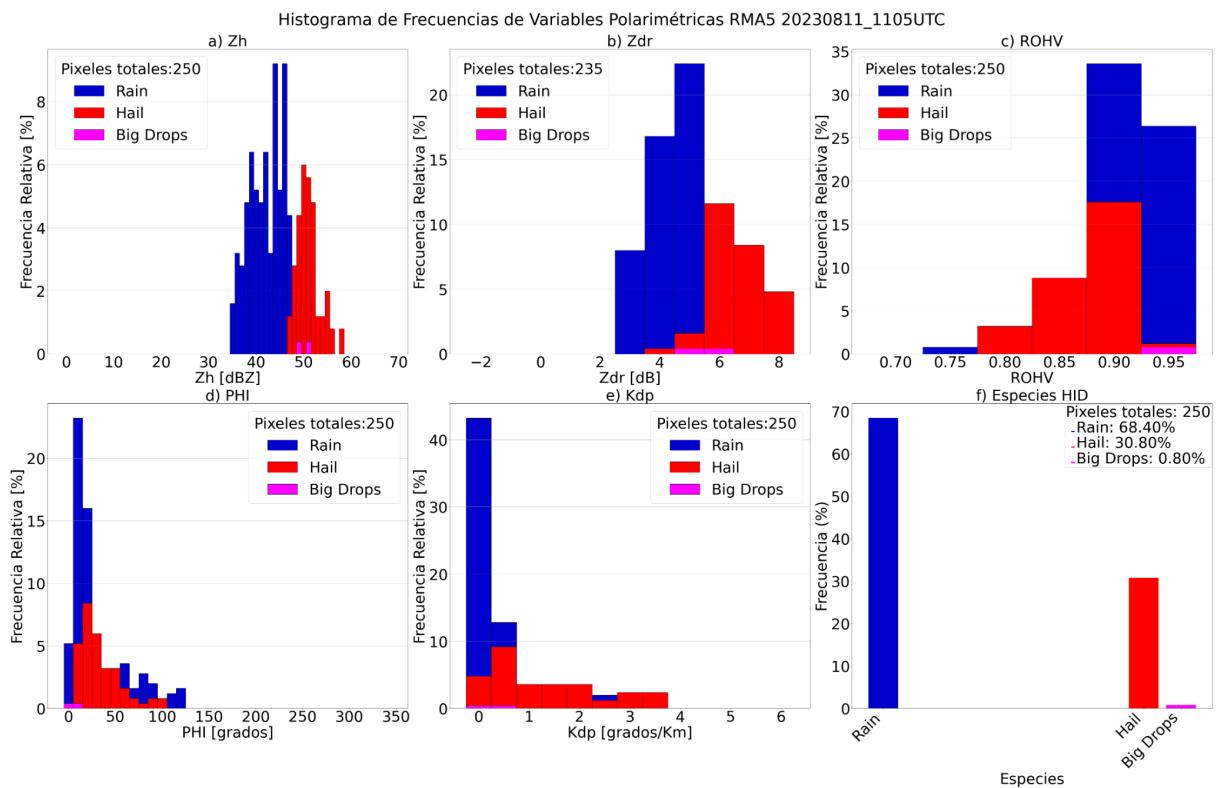


Figura 30: Histograma de variables polarimétricas según especie de HID para la celda del 11-08-2023 a las 11:05Z para el radar RMA5 en la elevación de 0.5°.

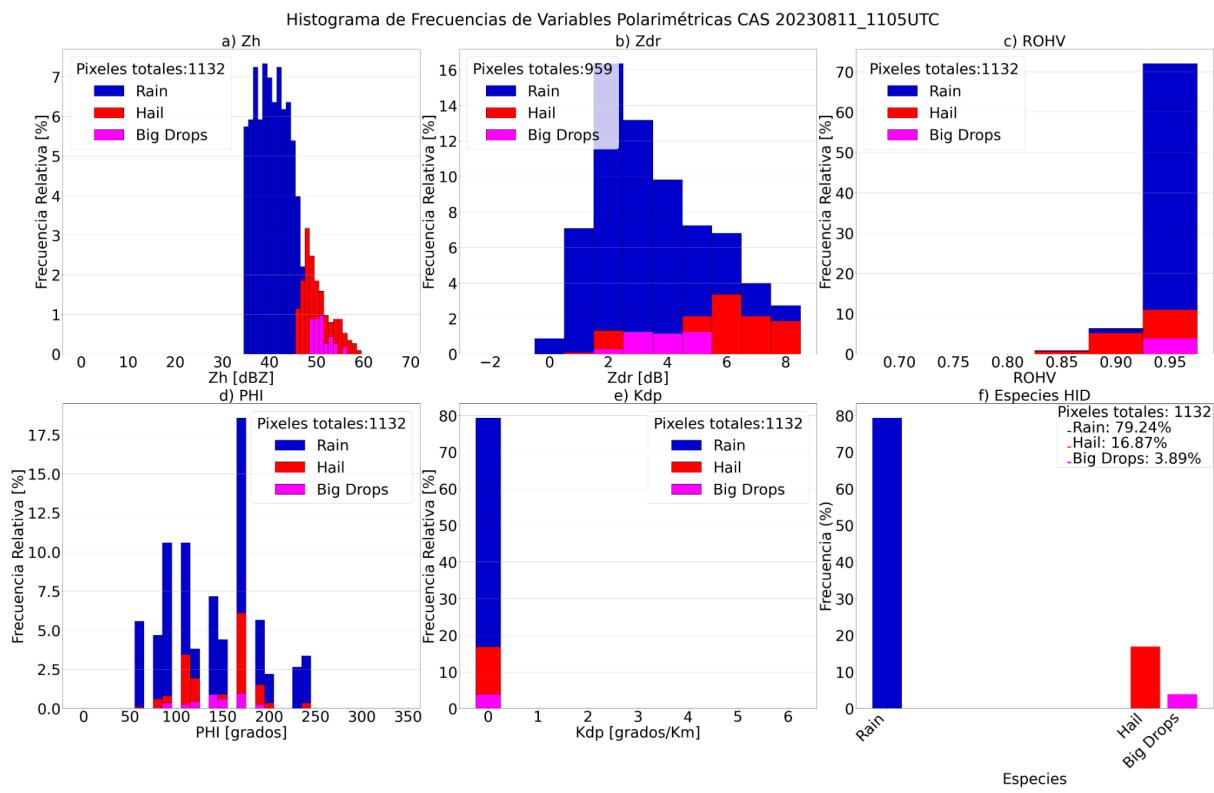


Figura 31: Idem Figura 30 para el radar de Cascavel

Para comparar la diferencia entre ambas bandas dentro del contorno de la celda de se interpolaron los puntos más cercanos coincidentes entre del HID entre ambos radares y se extrajeron las variables polarimétricas en dichas ubicaciones, obteniendo los puntos que se muestran en la Figura 32. Con las variables en dichos puntos se obtuvieron los gráficos de dispersión de Zh, Zdr y ROHV mostrados en la Figura 33. Puede verse que los valores de Zh para lluvia son en general similares en ambos radares pero para granizo los valores del RMA5 son en su mayoría superiores (>50 dBZ) que los de Cas (40-50dBZ). Por otro lado, en el gráfico de Zdr se observa que los valores son superiores en el RMA5 tanto para píxeles de lluvia como granizo, llegando a alcanzarse diferencias de hasta 9 dB entre ambos radares en algunos puntos. Esto concuerda con lo observado previamente en los PPI y está probablemente asociado a la resonancia. Por último el ROHV tiene valores muy altos en lluvia en ambos radares ($>0,95$) e inferiores en granizo ($<0,95$), sin embargo la mayoría de puntos tienen un mayor ROHV en Cas que en el RMA5. Esto concuerda los resultados encontrados por Kaltenboeck y Rhyzhkov (2013) de que los valores de ROHV son en general menores en banda C que en banda S.

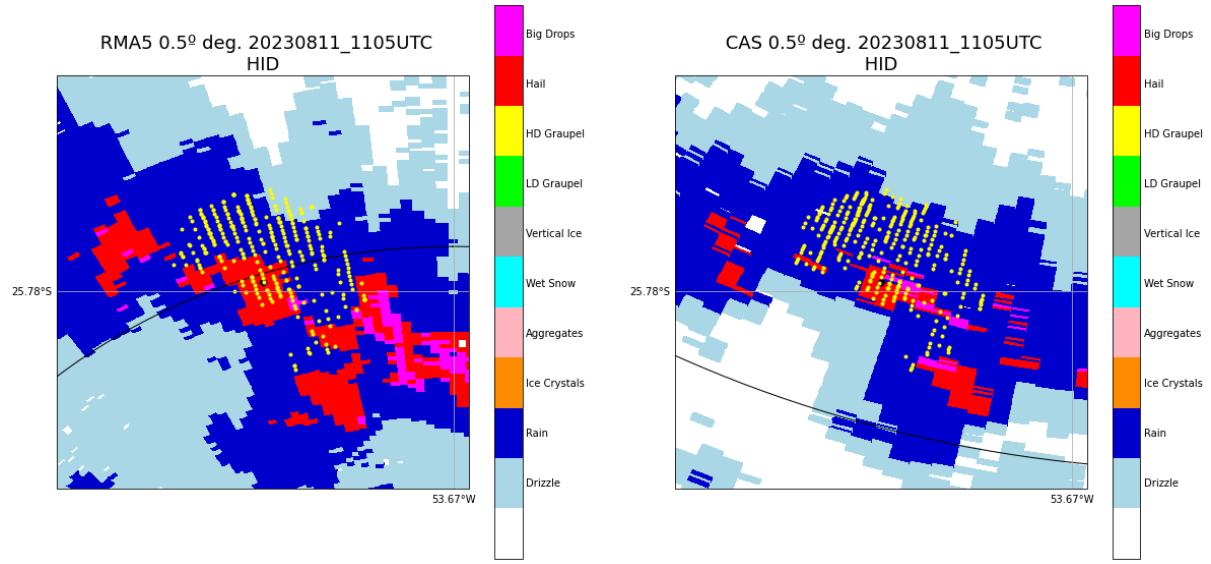


Figura 32: Gráficos PPI en la elevación de 0.5 con los pixeles más cercanos entre ambos radares con especies de HID coincidentes para la celda del 11-08-2023 a las 11:05Z.

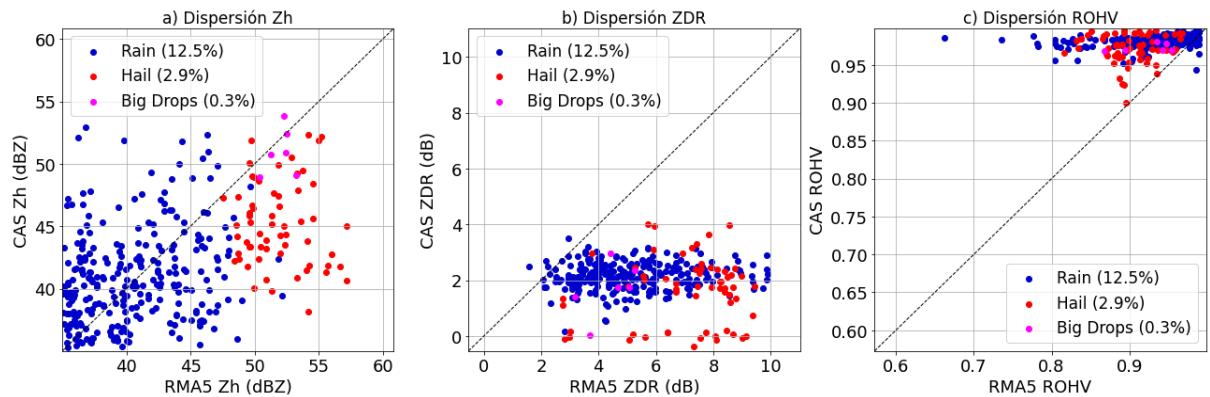


Figura 33: Diagramas de dispersión de Zh (a), Zdr (b) y ROHV (c) comparando el RMA5 con Cascavel para los pixeles más cercanos con la misma especie HID en ambos radares marcados en la Figura 32.

4. Conclusiones

Se realizó un estudio de la performance de un algoritmo de clasificación de hidrometeoro (HID) de lógica difusa presentado en Dolan y otros (2013) para la detección de granizo en la región de vigilancia de 9 radares de banda C de Argentina. Para ello se utilizaron reportes de granizo extraídos de la base de amenazas meteorológicas SAMHI que recopila datos desde el 2018 hasta la actualidad.

Se realizó un filtrado de los casos según criterios como distancia del reporte al radar, disponibilidad de datos de radar y de variables polarimétricas (Zh, Zdr, ROHV y PHI) y calidad de los datos crudos para evitar trabajar con casos datos de baja calidad (como interferencias electromagnéticas, bloqueo del haz, propagación anómala, entre otros).

Seguidamente se realizó un procesamiento de los datos de radar necesario para utilizar el HID. Se corrigió el Zh por atenuación por lluvias intensas y se recalcularó el Zdr a partir del Zh corregido. Se corrigió el PHI utilizando la metodología de Vulpiani y otros (2012) para eliminar posibles salto de fase y filtros no deseados y se recalcularó el Kdp a partir del PHI corregido.

Se obtuvo la altura del nivel de fusión para cada caso utilizando datos de perfiles verticales de temperatura de los radiosondeos más cercanos en tiempo y espacio a los reportes de granizo e interpolando los perfiles a los datos de radar.

Se calculó el HID para todos los casos aceptables y partir de ello se generó una base de datos de eventos de granizo dentro del rango de los radares de interés para este trabajo con un total de 143 reportes distribuidos en Argentina durante el periodo 2018-2023 (ver Anexo I).

Se evaluó la capacidad de detección del HID a través de la comparación del output del mismo en la elevación más baja de radar ($\approx 0,5^\circ$) con la ubicación del reporte a través de distintos análisis. En el primer análisis se tomó el dato de radar más cercano al reporte y se buscó algún pixel de granizo en una caja de 3x3 pixeles alrededor del reporte. En el segundo análisis se tuvo en cuenta una ventana temporal centrada en el tiempo más cercano al reporte y se evaluó la presencia de granizo en un radio de 5km alrededor del reporte en alguno de los tiempos considerados. Se calculó la probabilidad de detección (POD) para ambos análisis,

resultando el primero en 42 aciertos y 101 errores y una POD de 29%, mientras que con el segundo se obtuvo de 115 aciertos y 28 errores y una POD de 80%. El segundo análisis mostró una notable mejora debido a que se tuvo en cuenta la incertidumbre espacial y temporal asociada al reporte de granizo, que es un evento muy localizado. Entre los 28 casos en los que el HID no detectó granizo, se encontraron tres posibles causas de fallo: error en la ubicación del reporte (11 casos, 7% del total), error en la hora del reporte (9 casos, 6% del total) y atenuación por lluvias intensas que no pudo ser corregida con la metodología utilizada (8 casos, 6% del total). Se observó que además si se aumenta el radio de tolerancia de 5 a 10km y la ventana temporal de 10 a 30 min la POD aumenta a un 90%, con 129 aciertos y 14 errores.

Los eventos de granizo fueron agrupados según el modo convectivo predominante con la clasificación utilizada en Mulholland y otros (2018). Del total de reportes el 71% estuvo asociado a convección Multicelular (43% MCS y 28% MUN) y 29% a convección discreta (21% DNS y 8% DSC). Además 43% de los casos están repartidos entre los radares RMA1 en Córdoba y RMA 5 en Bernardo de Irigoyen, en acuerdo con la climatología de granizo encontrada por Mezher y otros (2012).

Los eventos, también, fueron clasificados a partir del diámetro (D) máximo de granizo según la nomenclatura utilizada en Ortega (2018). Del total de casos 23% pertenecen a la categoría No Severo ($D < 25\text{mm}$), 22% Severo ($25\text{mm} < D < 50\text{mm}$), y 12% Severo significativo ($D > 50\text{mm}$), quedando el otro 43% de los casos restantes sin tamaño estimado.

Se agruparon a los reportes en conjunto por tipo de convección y diámetro estimado y se encontró que en eventos MUN y DSC el granizo Severo es la categoría predominante mientras que el granizo No Severo predomina en las otras dos categorías convectivas. Sin embargo la mayor cantidad de casos de granizo Severo Significativo está asociada a eventos MUN. Además, 12 de los 16 eventos con granizo Severo Significativo ocurrieron en la región noreste de Argentina (asociados a los radares RMA3 Las Lomitas, RMA4 Resistencia, RMA8 Mercedes y RMA5 Bernardo de Irigoyen), la cual presenta las frecuencias máximas de granizo (Bang y Cecil, 2019). Los 4 casos restantes están asociados al RMA1 Córdoba.

Los resultados del cálculo de la POD para cada grupo muestran que los modos de convección discreta tienen POD más alto (POD promedio 75%) que los modos multicelulares (POD promedio 60%).

Además se identificó el contorno de las celdas convectivas asociadas a cada reporte utilizando el umbral de 35 dBZ para analizar el comportamiento de las variables polarimétricas. Se graficaron histogramas de frecuencias para cada variable discriminando por especie de hidrometeoro presente en las celdas convectivas.

En los casos de acierto predomina la lluvia, granizo y gotas grandes y en los casos de error la llovizna y la lluvia. Los valores de Zh son superiores en los casos de acierto (40 a 70dBZ) que en los casos de error (20 a 40dBZ) y los valores de Zdr altos (4 a 8 dB) son más frecuentes en los casos de acierto mientras que en los casos de error predominan valores inferiores (-2 a 2dB). Los pixeles con granizo y gotas grandes tienen valores similares tanto para Zh como Zdr en los casos de acierto. El ROHV y el Kdp tiene comportamiento similar en aciertos y errores. Los pixeles con lluvia tienen valores altos de ROHV ($>0,95$) y disminuyen en pixeles con granizo (entre 0,9 y 0,95). El Kdp tiene sus máximas frecuencias en valores inferiores a $0,5^{\circ}/\text{km}$ para todas las especies, tanto en los casos de acierto como de error.

Por último se analizaron 3 estudios de caso con diferentes modos de convección y tamaños de granizo distintos para mostrar la metodología de validación utilizada.

El primer caso está asociado al RMA1 Córdoba en el que se reportó granizo de hasta 80mm en Arroyito y el HID logró detectar el granizo correctamente. El segundo caso tuvo lugar en El Soberbio, Misiones , región en la cual tormentas con intensa caída de granizo destruyeron cultivos y dañaron viviendas. En este caso el HID no fue capaz de detectar el granizo en la elevación de 0.5° debido a gran atenuación producto de lluvias intensas al noreste del reporte. Finalmente en el último caso se realizó la comparación de las mediciones obtenidas por el RMA5 y el radar de banda S ubicado en Cascavel al sur de Brasil para explorar las discrepancias en la polarimetría de ambas bandas. Se observó que existen grandes diferencias principalmente en el Zh y Zdr medido por ambos radares para una misma celda convectiva (Zh y Zdr mucho mayor en el RMA5 que en Cas), principalmente debido a los efectos de resonancia (que ocurre con presencia de gotas de gran diámetro) y atenuación que afecta a los radares de banda C. Por otro

lado, los valores de ROHV asociados a granizo son menores en banda C que en banda S.

Entre posibles trabajos futuros se encuentran:

- Analizar la capacidad de detección del algoritmo comparando con métodos de detección de simple polarización como índices de granizo (POSH, MESH, VIL, entre otros) y algoritmos de simple polarización que tengan en cuenta la estructura vertical de las celdas convectivas. En estos casos podría utilizarse la información de los radares INTA para posibles comparaciones con los RMA.
- Analizar la sensibilidad del algoritmo a la altura del nivel de fusión comparando perfiles observados y modelados. En este caso se podría evaluar la posibilidad de usar el modelo WRF que se corre en el SMN diariamente.
- Comparar los resultados del algoritmo entre radares que comparten regiones de cobertura con el fin de buscar desviaciones en la reflectividad y demás variables y poder ajustar los umbrales del HID en consecuencia. Recientemente Vidal y otros (2024) realizaron una intercomparación entre el RMA3 y RMA4 y sus resultados muestran que existe una diferencia entre la reflectividad medida por ambos radares. Es seguro que existen más diferencias entre varios radares de la red SINARAME por lo que sería valioso explorar esta posibilidad.
- Se podría evaluar la implementación del HID como un producto operativo en las oficinas de pronóstico del SMN, dado que ha mostrado buenos resultados en esta verificación

Bibliografía

Altiner de Schwarzkopf, M. L., 1988: Climatología de los efectos de la convección severa en la República Argentina , Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
https://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n2211_AltingerdeSchwarzkopf

Anderson, M.E., Carey, L., Petersen, W.& Knupp, K., . 2011: C-band dual-polarimetric radar signatures of hail. Electron. J. Oper. Meteor. 12, 1-30, DOI Disponible en <http://nwafiles.nwas.org/ej/pdf/2011-EJ2.pdf>

Allen, John and Tippett,.2015: The Characteristics of United States Hail Reports: 1955–2014. Electronic Journal of Severe Storms Meteorology. 10. 1-31.
<https://doi.org/10.55599/ejssm.v10i3.60>

Bang, S. D. and D. J. Cecil, 2019: Constructing a Multifrequency Passive Microwave Hail Retrieval and Climatology in the GPM Domain. J. Appl. Meteor. Climatol., 58, 1889–1904, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0042.1>.

Baldini, L., Gorgucci, Eugenio and Petersen, Walt. (2005). Implementations of CSU hydrometeor classification scheme for C-band polarimetric radars. Disponible en:
https://ams.confex.com/ams/32Rad11Meso/techprogram/paper_95865.htm

Bechis, H.; Galligani, V.; Imaz, M.A.; Cancelada, M.; Simone, I.; Piscitelli, F.; Maldonado, P.; Salio, P.; Nesbitt, S.W. A case study of a severe hailstorm in Mendoza, Argentina, during the RELAMPAGO-CACTI field campaign. Atmos. Res. 2022,271,106127.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106127>

Bechini, R. and V. Chandrasekar, 2015: A semisupervised robust hydrometeor classification method for dual-polarization radar applications. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 32.1, 22-47, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00097.1>

Boodoo, Sudesh, Hudak, D., Leduc, M., Ryzhkov, A. and Donaldson, N.. (2009). HAIL DETECTION WITH A C-BAND DUAL POLARIZATION RADAR IN THE CANADIAN GREAT LAKES REGION. Disponible en
<https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/156032.pdf>

Bruick, Z. S., K. L. Rasmussen, and D. J. Cecil, 2019: Subtropical South American Hailstorm Characteristics and Environments. *Mon. Wea. Rev.*, 147, 4289–4304, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0011.1>.

de Elía R., L. Vidal, P. Lohigorry, R. Mezher y M Rugna, 2017: La red Argentina de radares meteorológicos de Argentina. Nota Técnica SMN 2017-39, <http://hdl.handle.net/20.500.12160/625>

Bringi, V. N., T. D. Keenan, and V. Chandrasekar, 2001: Correcting C-band radar reflectivity and differential reflectivity data for rain attenuation: A self-consistent method with constraints. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39, 1906–1915, <https://doi.org/10.1109/36.951081>.

Cecchini, M. A., A. J. Heymsfield, R. Honeyager, P. Field, L. A. T. Machado, and M. A. F. d. S. Dias, 2022: Revisiting the Hail Radar Reflectivity–Kinetic Energy Flux Relation by Combining T-Matrix and Discrete Dipole Approximation Calculations to Size Distribution Observations. *J. Atmos. Sci.*, 79, 1927–1940, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-20-0373.1>.

Depue, T. K., P. C. Kennedy, and S. A. Rutledge, 2007: Performance of the Hail Differential Reflectivity (HDR) Polarimetric Radar Hail Indicator. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 46, 1290–1301, <https://doi.org/10.1175/JAM2529.1>

Dixon, M., and G. Wiener, 1993: TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting—A Radar-based Methodology. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 10, 785–797, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1993\)010<0785:TTITAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1993)010<0785:TTITAA>2.0.CO;2).

Dolan, B., S. A. Rutledge, S. Lim, V. Chandrasekar, and M. Thurai, 2013: A Robust C-Band Hydrometeor Identification Algorithm and Application to a Long-Term Polarimetric Radar Dataset. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 52, 2162–2186, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0275.1>.

Gatlin, P. N., M. Thurai, V. N. Bringi, W. Petersen, D. Wolff, A. Tokay, L. Carey, and M. Wingo, 2015: Searching for Large Raindrops: A Global Summary of Two-Dimensional Video Disdrometer Observations. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 54, 1069–1089, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0089.1>.

Giangrande, S. E., and A. V. Ryzhkov, 2008: Estimation of Rainfall Based on the Results of Polarimetric Echo Classification. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 2445–2462, <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1753.1>.

Gourley, J. J., P. Tabary, and J. Parent du Chatelet, 2007: Empirical Estimation of Attenuation from Differential Propagation Phase Measurements at C Band. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 46, 306–317, <https://doi.org/10.1175/JAM2464.1>.

Gu, J.-Y., Ryzhkov, A., Zhang, P., Neilley, P., Knight, M., Wolf, B., & Lee, D.-I. (2011). Polarimetric Attenuation Correction in Heavy Rain at C Band. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(1), 39–58.
<https://doi.org/10.1175/2010JAMC2258.1>

Heinselman, P. L., and A. V. Ryzhkov, 2006: Validation of Polarimetric Hail Detection. *Wea. Forecasting*, 21, 839–850, <https://doi.org/10.1175/WAF956.1>.

Heistermann, M., Jacobi, S., and Pfaff, T.: Technical Note: An open source library for processing weather radar data (wradlib), *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 863-871, doi:10.5194/hess-17-863-2013

Helmus, J.J. and Collis, S.M., (2016). The Python ARM Radar Toolkit (Py-ART), a Library for Working with Weather Radar Data in the Python Programming Language. *Journal of Open Research Software*. 4(1), p.e25. DOI: <http://doi.org/10.5334/jors.119>

Höller, H., 1995: Radar-derived mass-concentrations of hydrometeors for cloud model retrievals. *Preprints, 27th Conf. on Radar Meteorology*, Vail, CO, Amer. Meteor. Soc., 453–454.

Jiang, Z., M. R. Kumjian, R. S. Schrom, I. Giannanco, T. Brown-Giannanco, H. Estes, R. Maiden, and A. J. Heymsfield, 2019: Comparisons of Electromagnetic Scattering Properties of Real Hailstones and Spheroids. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 58, 93–112, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0344.1>.

Kaltenboeck, R., and A. Ryzhkov, 2013: Comparison of polarimetric signatures of hail at S and C bands for different hail sizes. *Atmos. Res.*, 123, 323–336, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.05.013>

Kelly, D. L., J. T. Schaefer, and C. A. Doswell , 1985: Climatology of Nontornadic Severe Thunderstorm Events in the United States. *Mon. Wea. Rev.*, 113, 1997–2014, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1985\)113<1997:CONSTE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1985)113<1997:CONSTE>2.0.CO;2).

Kumjian, M. R., and Coauthors, 2020: Gargantuan Hail in Argentina. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 101, E1241–E1258, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0012.1>.

Lemon, Leslie R. "The Radar "Three-Body Scatter Spike": An Operational Large-Hail Signature", *Weather and Forecasting* 13, 2 (1998): 327-340, doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013<0327:TRTBSS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013<0327:TRTBSS>2.0.CO;2)

Lindley, T.T., and Lemon, L.R. (2007). Preliminary Observations of Weak Three-Body Scatter Spikes Associated With Low-End Severe Hail. *E-Journal of Severe Storms Meteorology*, 2, 1–15.<https://doi.org/10.55599/ejssm.v2i3.8>

Liu, H., and V. Chandrasekar, 2000: Classification of Hydrometeors Based on Polarimetric Radar Measurements: Development of Fuzzy Logic and Neuro-Fuzzy Systems, and In Situ Verification. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 17, 140–164, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017<0140:COHBOP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<0140:COHBOP>2.0.CO;2).

Marzano, F.S.; Scaranari, D.; Celano, M.; Alberoni, P.P.; Vulpiani, G.; Montopoli, M. Hydrometeor classification from dualpolarized weather radar: Extending fuzzy logic from S-band to C-band data. *Adv. Geosci.* 2006, 7, 109–114. <http://doi.org/10.5194/adgeo-7-109-2006>

Matsudo, C.M., and P. Salio, 2011: Severe weather reports and proximity to deep convection over Northern Argentina. *Atmos. Res.*, 100, 523-537, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.11.004>

Merino, A., López, L., Sánchez, J. L., García-Ortega, E., Cattani, E., and Levizzani, V., 2014: Daytime identification of summer hailstorm cells from MSG data, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1017–1033, <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1017-2014>.

Mezher, R., M. Doyle, and V. Barros, 2012: Climatology of hail in Argentina. *Atmos. Res.*, 114–115, 70–82, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.05.020>.

Miller, L. J., J. D. Tuttle, and C. A. Knight, 1988: Airflow and Hail Growth in a Severe Northern High Plains Supercell. *J. Atmos. Sci.*, 45, 736–762, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1988\)045<0736:AAHGIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1988)045<0736:AAHGIA>2.0.CO;2).

Mulholland, J. P., S. W. Nesbitt, R. J. Trapp, K. L. Rasmussen, and P. V. Salio, 2018: Convective Storm Life Cycle and Environments near the Sierras de Córdoba, Argentina. *Mon. Wea. Rev.*, 146, 2541–2557, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0081.1>.

Murillo, E. M., and C. R. Homeyer, 2019: Severe Hail Fall and Hailstorm Detection Using Remote Sensing Observations. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 58, 947–970, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-18-0247.1>.

Nesbitt, S. W., and Coauthors, 2021: A Storm Safari in Subtropical South America: Proyecto RELAMPAGO. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 102, E1621–E1644, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0029.1>.

Ni, X., C. Liu, D. J. Cecil, and Q. Zhang, 2017: On the Detection of Hail Using Satellite Passive Microwave Radiometers and Precipitation Radar. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 56, 2693–2709, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0065.1>.

Laviola, Sante, Giulio Monte, Vincenzo Levizzani, Ralph R. Ferraro, and James Beauchamp. 2020. "A New Method for Hail Detection from the GPM Constellation: A Prospect for a Global Hailstorm Climatology" *Remote Sensing* 12, no. 21: 3553. <https://doi.org/10.3390/rs12213553>

Ortega, K. L., 2018: Evaluating multi-radar, multi-sensor products for surface hail-fall diagnosis. *Electronic J. Severe Storms Meteor.*, 13 (1), 1–36. <https://doi.org/10.55599/ejssm.v13i1.69>

Overeem, A., H. de Vries, H. Al Sakka, R. Uijlenhoet, and H. Leijnse, 2021: Rainfall-Induced Attenuation Correction for Two Operational Dual-Polarization C-Band Radars in the Netherlands. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 38, 1125–1142, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-20-0113.1>.

Plummer, D.M.; Göke, S.; Rauber, R.M.; Di Girolamo, L. Discrimination of Mixed-versus Ice-Phase Clouds Using Dual- Polarization Radar with Application to Detection of Aircraft Icing Regions. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2010, 49, 920–936. <http://doi.org/10.1175/2009JAMC2267.1>

Rauber, R.M. and Nesbitt, S.L. (2018). *Radar Meteorology: A First Course*, 687 páginas, Wiley, <https://doi.org/10.1002/9781118432662>.

Rasmussen, K. L., M. D., Zuluaga, M. D., and R. A. Houze, R. A., 2014: Severe convection and lightning in subtropical South America. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 7359–7366, <https://doi.org/10.1002/2014GL061767>

Ribaud, J.-F., Bousquet, O., Coquillat, S., Al-Sakka, H., Lambert, D., Ducrocq, V., and Fontaine, E.: Evaluation and application of hydrometeor classification algorithm outputs inferred from multi-frequency dual-polarimetric radar observations collected during HyMeX, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 142, 95–107, <https://doi.org/10.1002/qj.2589>, 2015.

Rugna M. y L. Vidal, 2022: Evaluación preliminar de algoritmos de detección de granizo con radar meteorológico en banda C. Resumen, <http://hdl.handle.net/20.500.12160/2439>

Ryzhkov, P. Zhang, D. Hudak, J. Alford, M. Knight, and J. Conway, 2007: Validation of polarimetric methods for attenuation correction at C band. 33rd Conf. on Radar Meteorology, Cairns, Australia, Amer. Meteor. Soc., P11B.12, Disponible en: <http://ams.confex.com/ams/pdffiles/123122.pdf>

Ryzhkov, A.V.; Zrnic, D.S. *Radar Polymetry for Weather Observations*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2019. 10.1007/978-3-030-05093-1

Salio, P., and Coauthors, 2024: Towards a South American High Impact Weather Reports Database. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0063.1>

Silva Dias, M. A. F., 2011: An increase in the number of tornado reports in Brazil. Wea. Climate Soc., 3, 209–217, <https://doi.org/10.1175/2011WCAS1095.1>

P. Tabary et al., “Hail detection and quantification with a C-band polarimetric radar: challenges and promises,” in 34th Conf. on Radar Meteorology, Williamsburg, Virginia, pp. 5– 9, (2009). Disponible en:
https://ams.confex.com/ams/34Radar/techprogram/paper_155530.htm

Testud, J., E. Le Bouar, E. Obligis, and M. Ali-Mehenni, 2000: The Rain Profiling Algorithm Applied to Polarimetric Weather Radar. J. Atmos. Oceanic Technol., 17, 332–356, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017<0332:TRPAAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<0332:TRPAAT>2.0.CO;2)

Vidal, L., G. Ishikame, L. Pappalardo y M. Rugna, 2020: Sobre el uso del radar meteorológico para el diagnóstico de granizo. Nota Técnica SMN 2020-77.
<http://hdl.handle.net/20.500.12160/1388>

Vidal, L., D. Giménez y M. Rugna, 2024: Metodología de Intercomparación de la reflectividad de radares meteorológicos en banda C. Nota Técnica SMN 2024-157.
<http://hdl.handle.net/20.500.12160/2657>

Varble, A. C., and Coauthors, 2021: Utilizing a Storm-Generating Hotspot to Study Convective Cloud Transitions: The CACTI Experiment. Bull. Amer. Meteor. Soc., 102, E1597–E1620, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0030.1>

Wang, H., Ran, Y., Deng, Y. et al. Study on deep-learning-based identification of hydrometeors observed by dual polarization Doppler weather radars. J Wireless Com Network 2017, 173 (2017). <https://doi.org/10.1186/s13638-017-0965-5>

Yang, Ji, Kun Zhao, Guifu Zhang, Gang Chen, Hao Huang, and Haonan Chen, 2019: A Bayesian Hydrometeor Classification Algorithm for C-Band Polarimetric Radar. Remote Sensing, 11 (16), 1884, <https://doi.org/10.3390/rs11161884>

Zipser, E. J., D. J. Cecil, C. Liu, S. W. Nesbitt, and D. P. Yorty, 2006: WHERE ARE THE MOST INTENSE THUNDERSTORMS ON EARTH?. Bull. Amer. Meteor. Soc., 87, 1057–1072, <https://doi.org/10.1175/BAMS-87-8-1057>.

Zrnić, D.S.; Zhang, G.; Melnikov, V.; Andric, J. Three-body scattering and hail size. J. Appl. Meteorol. Climatol. 2010, 49, 687–700. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2300.1>

Anexo I

Reportes de granizo correspondientes a la base de datos SAMHI utilizados en el presente trabajo.

Latitud	Longitud	Fecha (Año Mes Dia Hora Minutos)	Diámetro (mm)	Tipo de convección	Tamaño granizo	Radar asociado
-32,4528	-64,3879	2018-10-30T01:45:00.000Z	25	Discreta no supercelda	No severo	RMA1
-31,8760	-64,6990	2018-11-04T19:40:00.000Z	40	Discreta supercelda	Severo	RMA1
-31,9134	-63,6820	2018-11-10T21:00:00.000Z	15	Discreta supercelda	No severo	RMA1
-31,4192	-63,0507	2018-12-11T18:00:00.000Z	80	Multicelular no organizado	Severo significati vo	RMA1
-30,9939	-62,8253	2018-12-11T18:30:00.000Z	40	Multicelular no organizado	Severo	RMA1
-30,9152	-62,6750	2018-12-11T18:45:00.000Z	50	Multicelular no organizado	Severo	RMA1
-32,6921	-64,7236	2019-02-08T18:00:00.000Z	35	Discreta supercelda	Severo	RMA1
-32,7574	-64,3369	2019-11-15T19:50:00.000Z	10	Discreta no supercelda	No severo	RMA1
-32,7588	-64,3341	2019-11-29T17:10:00.000Z	50	Discreta supercelda	Severo	RMA1
-33,1237	-64,3491	2019-11-29T19:20:00.000Z	50	Discreta no supercelda	Severo	RMA1
-32,1717	-64,4500	2019-11-29T21:00:00.000Z	-	Discreta no supercelda	Desconocido	RMA1
-32,3031	-64,4830	2019-12-14T23:30:00.000Z	40	Multicelular no organizado	Severo	RMA1
-32,5286	-64,5887	2020-03-11T18:10:00.000Z	-	Discreta no supercelda	Desconocido	RMA1

-32,4135	-63,2483	2021-09-01T23:40:00. 000Z	-	Discreta no supercelda	Desconoci do	RMA1
-32,1767	-64,1130	2021-09-02T02:20:00. 000Z	-	Multicelular organizado	Desconoci do	RMA1
-32,1767	-64,1130	2021-09-13T18:44:00. 000Z	-	Discreta no supercelda	Desconoci do	RMA1
-32,9110	-64,0240	2021-10-22T19:50:00. 000Z	10	Multicelular no organizado	No severo	RMA1
-33,0254	-64,0469	2021-12-21T01:10:00. 000Z	-	Multicelular organizado	Desconoci do	RMA1
-32,2000	-64,4100	2022-01-02T18:30:00. 000Z	50	Multicelular no organizado	Severo	RMA1
-32,6921	-64,7236	2022-01-02T21:00:00. 000Z	30	Discreta supercelda	Severo	RMA1
-31,9183	-64,5758	2022-01-16T18:10:00. 000Z	-	Multicelular no organizado	Desconoci do	RMA1
-31,9750	-64,5580	2022-01-16T18:45:00. 000Z	20	Multicelular no organizado	No severo	RMA1
-32,1740	-64,4510	2022-01-16T19:10:00. 000Z	40	Multicelular no organizado	Severo	RMA1
-32,4528	-64,3879	2022-01-16T19:50:00. 000Z	60	Multicelular no organizado	Severo significati vo	RMA1
-32,5704	-64,3939	2022-01-16T20:10:00. 000Z	60	Multicelular no organizado	Severo significati vo	RMA1
-30,9572	-62,3384	2022-04-22T14:20:00. 000Z	10	Discreta no supercelda	No severo	RMA1
-32,4528	-64,3879	2022-08-25T17:46:41. 000Z	-	Multicelular no organizado	Desconoci do	RMA1
-32,1767	-64,1130	2022-08-25T19:00:00. 000Z	50	Discreta no supercelda	Severo	RMA1
-31,0221	-64,0617	2022-10-05T19:40:00. 000Z	10	Multicelular organizado	No severo	RMA1

-31,9134	-63,6820	2023-01-20T19:55:00.000Z	-	Multicelular organizado	Desconocido	RMA1
		2023-02-15T21:15:00.000Z	55	Discreta supercelda	Severo significativo	
-32,1490	-64,4940	2023-02-24T18:40:00.000Z	50	Discreta supercelda	Severo	RMA1
-30,3954	-64,1223	2023-02-25T18:05:00.000Z	20	Discreta no supercelda	No severo	RMA1
-32,2067	-64,4006	2020-01-29T23:00:00.000Z	35	Discreta no supercelda	Severo	RMA3
-25,9466	-60,6201	2022-08-04T02:20:00.000Z	5	Multicelular no organizado	No severo	RMA3
-25,9466	-60,6201	2022-10-26T16:20:00.000Z	30	Multicelular no organizado	Severo	RMA3
-25,2145	-59,8589	2022-11-12T08:15:00.000Z	60	Multicelular organizado	Severo significativo	RMA3
-27,0420	-58,7050	2019-11-30T12:50:00.000Z	-	Multicelular organizado	Desconocido	RMA4
-27,5077	-58,5561	2020-06-30T04:20:00.000Z	-	Multicelular organizado	Desconocido	RMA4
-26,5370	-59,3410	2021-10-13T20:20:00.000Z	60	Multicelular organizado	Severo significativo	RMA4
-26,1872	-59,3672	2021-10-13T21:00:00.000Z	-	Multicelular organizado	Desconocido	RMA4
-28,3890	-59,0840	2021-10-23T07:50:00.000Z	30	Multicelular organizado	Severo	RMA4
-28,0469	-58,2303	2022-03-30T03:35:00.000Z	70	Discreta no supercelda	Severo significativo	RMA4
-26,4960	-59,6810	2022-08-04T00:40:00.000Z	-	Multicelular no organizado	Desconocido	RMA4

-28,0400	-58,2300	2022-08-23T20:00:00.000Z	20	Multicelular organizado	No severo	RMA4
-26,1800	-59,3600	2022-10-20T14:00:00.000Z	-	Multicelular organizado	Desconocido	RMA4
-27,8876	-59,2815	2023-01-12T17:15:00.000Z	-	Discreta no supercelda	Desconocido	RMA4
-28,0406	-59,2180	2023-01-12T18:00:00.000Z	100	Multicelular no organizado	Severo	significativo
-27,5077	-58,5561	2023-02-14T21:40:00.000Z	50	Multicelular organizado	Severo	significativo
-27,3174	-58,5726	2023-02-14T22:00:00.000Z	40	Multicelular organizado	Severo	RMA4
-26,4898	-58,3116	2023-05-27T19:30:00.000Z	20	Discreta no supercelda	No severo	RMA4
-28,5077	-59,0452	2023-09-12T02:00:00.000Z	-	Multicelular organizado	Desconocido	RMA4
-27,0381	-58,7072	2023-10-27T19:25:00.000Z	30	Multicelular organizado	Severo	RMA4
-28,2673	-58,1227	2023-11-03T04:55:00.000Z	-	Multicelular no organizado	Desconocido	RMA4
-26,1200	-53,0200	2018-06-29T23:50:00.000Z	-	Multicelular organizado	Desconocido	RMA5
-26,0700	-53,0500	2018-06-29T23:55:00.000Z	40	Multicelular organizado	Severo	RMA5
-25,7600	-53,0400	2018-08-24T10:30:00.000Z	15	Multicelular organizado	No severo	RMA5
-25,0300	-52,9800	2018-08-24T18:15:00.000Z	10	Multicelular organizado	No severo	RMA5
-25,1300	-54,3000	2018-09-19T16:08:00.000Z	-	Multicelular organizado	Desconocido	RMA5
-25,4400	-54,3900	2018-09-19T19:00:00.000Z	10	Multicelular organizado	No severo	RMA5

-27,2960	-54,1980	2020-02-12T17:20:00. 000Z	-	Multicelular no organizado	Desconocido	RMA5
-26,6210	-54,1100	2020-02-12T19:10:00. 000Z	-	Multicelular organizado	Desconocido	RMA5
-26,9933	-54,4866	2021-01-23T20:20:00. 000Z	-	Multicelular organizado	Desconocido	RMA5
-27,1526	-54,5607	2021-10-03T03:00:00. 000Z	-	Multicelular organizado	Desconocido	RMA5
-26,9940	-54,4800	2021-10-23T08:20:00. 000Z	20	Multicelular no organizado	No severo	RMA5
-25,6690	-54,0450	2021-10-23T15:40:00. 000Z	20	Multicelular organizado	No severo	RMA5
-25,5972	-54,5772	2021-10-29T21:00:00. 000Z	10	Multicelular no organizado	No severo	RMA5
-27,2975	-54,1975	2021-11-03T18:40:00. 000Z	-	Multicelular organizado	Desconocido	RMA5
-25,6070	-54,5710	2021-11-28T17:55:00. 000Z	-	Multicelular organizado	Desconocido	RMA5
-25,5972	-54,5772	2022-01-08T22:00:00. 000Z	-	Multicelular organizado	Desconocido	RMA5
-26,8086	-55,0221	2022-04-22T16:00:00. 000Z	20	Multicelular organizado	No severo	RMA5
-26,9933	-54,4866	2022-10-19T20:00:00. 000Z	-	Multicelular organizado	Desconocido	RMA5
-27,0820	-54,2938	2022-10-19T20:30:00. 000Z	-	Multicelular organizado	Desconocido	RMA5
-27,2760	-54,6410	2023-05-05T10:50:00. 000Z	-	Multicelular no organizado	Desconocido	RMA5
-27,6336	-55,0855	2023-07-12T03:05:00. 000Z	60	Discreta no supercelda	Severo significativo	RMA5
-27,7803	-55,0133	2023-07-12T03:30:00. 000Z	-	Discreta no supercelda	Desconocido	RMA5

-25,9734	-54,5630	2023-08-11T03:20:00. 000Z	30	Multicelular organizado	Severo	RMA5
-25,9215	-54,5843	2023-08-11T04:10:00. 000Z	-	Multicelular organizado	Desconoci do	RMA5
-25,7710	-53,8552	2023-08-11T11:00:00. 000Z	-	Multicelular organizado	Desconoci do	RMA5
-27,3780	-54,7450	2023-09-03T21:30:00. 000Z	-	Multicelular no organizado	Desconoci do	RMA5
-26,4089	-54,6071	2023-10-03T23:25:00. 000Z	25	Discreta no supercelda	No severo	RMA5
-27,2975	-54,1975	2023-11-15T03:00:00. 000Z	30	Multicelular organizado	Severo	RMA5
-38,1462	-58,2292	2019-07-21T12:15:00. 000Z	30	Discreta no supercelda	Severo	RMA6
-37,4524	-58,9344	2019-12-04T08:00:00. 000Z	20	Discreta no supercelda	No severo	RMA6
-37,3410	-57,0353	2019-12-11T18:00:00. 000Z	-	Multicelular organizado	Desconoci do	RMA6
-37,1570	-58,4790	2021-10-17T19:39:00. 000Z	10	Multicelular no organizado	No severo	RMA6
-37,2632	-56,9746	2022-12-11T16:50:00. 000Z	20	Multicelular organizado	Severo	RMA6
-37,8464	-58,2555	2023-01-26T20:15:00. 000Z	30	Multicelular organizado	Severo	RMA6
-37,8464	-58,2555	2023-02-07T10:30:00. 000Z	15	Multicelular organizado	No severo	RMA6
-38,1634	-58,7818	2023-02-12T19:00:00. 000Z	-	Multicelular organizado	Desconoci do	RMA6
-37,8464	-58,2555	2023-02-12T22:45:00. 000Z	-	Multicelular organizado	Desconoci do	RMA6
-38,5545	-58,7392	2023-03-13T22:10:00. 000Z	5	Multicelular organizado	No severo	RMA6

-38,5712	-58,7262	2023-04-17T17:40:00.000Z	-	Discreta no supercelda	Desconocido	RMA6
-38,3437	-57,9922	2023-05-26T01:35:00.000Z	-	Multicelular organizado	Desconocido	RMA6
-37,4465	-57,7294	2023-11-15T22:05:00.000Z	-	Multicelular no organizado	Desconocido	RMA6
-38,2705	-57,8399	2023-12-16T20:30:00.000Z	-	Multicelular organizado	Desconocido	RMA6
-38,9330	-69,2330	2020-02-11T23:50:00.000Z	-	Multicelular no organizado	Desconocido	RMA7
-39,2610	-68,7790	2020-02-12T00:30:00.000Z	-	Multicelular organizada	Desconocido	RMA7
-38,6259	-68,2999	2021-04-19T22:30:00.000Z	-	Multicelular organizada	Desconocido	RMA7
-38,8300	-68,1210	2021-12-17T17:20:00.000Z	-	Discreta no supercelda	Desconocido	RMA7
-38,7330	-68,1710	2021-12-17T22:00:00.000Z	-	Multicelular organizada	Desconocido	RMA7
-38,9830	-68,3200	2021-12-20T15:00:00.000Z	-	Multicelular organizada	Desconocido	RMA7
-38,9510	-68,0590	2021-12-20T16:00:00.000Z	-	Discreta no supercelda	Desconocido	RMA7
-38,8302	-68,1215	2022-08-17T18:00:50.000Z	-	Discreta no supercelda	Desconocido	RMA7
-39,0268	-67,5748	2022-08-17T19:15:50.000Z	-	Multicelular no organizado	Desconocido	RMA7
-38,9524	-68,2271	2022-11-09T18:30:00.000Z	-	Multicelular organizada	Desconocido	RMA7
-39,0946	-67,0824	2022-11-17T21:30:00.000Z	-	Multicelular organizada	Desconocido	RMA7
-38,9518	-68,0592	2023-12-08T18:20:00.000Z	5	Multicelular organizada	No severo	RMA7

-39,0877	-66,5208	2023-12-16T02:15:00. 000Z	-	Multicelular organizada	Desconocido	RMA7
-28,3890	-59,0840	2021-10-23T07:50:00. 000Z	30	Multicelular no organizado	Severo	RMA8
-28,0469	-58,2303	2022-03-30T03:35:00. 000Z	70	Discreta supercelda	Severo significati vo	RMA8
-29,0988	-56,5534	2022-04-22T20:30:00. 000Z	50	Multicelular organizado	Severo significati vo	RMA8
-28,0400	-58,2300	2022-08-23T20:00:00. 000Z	20	Multicelular organizado	No severo	RMA8
-28,4868	-59,3547	2023-01-12T18:00:00. 000Z	50	Discreta no supercelda	Severo significati vo	RMA8
-29,1401	-59,2599	2023-03-30T02:00:00. 000Z	40	Multicelular no organizado	Severo	RMA8
-30,2494	-57,6295	2023-09-03T11:30:00. 000Z	10	Multicelular organizado	No severo	RMA8
-28,8454	-58,9718	2023-09-12T01:15:00. 000Z	50	Multicelular no organizado	Severo significati vo	RMA8
-28,8408	-58,8301	2023-09-12T01:30:00. 000Z	50	Multicelular organizado	Severo significati vo	RMA8
-28,5077	-59,0452	2023-09-12T02:00:00. 000Z	-	Multicelular no organizado	Desconocido	RMA8
-29,3311	-59,0352	2023-10-03T21:15:00. 000Z	50	Multicelular no organizado	Severo significati vo	RMA8
-30,2494	-57,6295	2023-10-16T10:35:00. 000Z	-	Multicelular no organizado	Desconocido	RMA8
-29,7137	-57,0854	2023-10-16T12:00:00. 000Z	-	Multicelular organizado	Desconocido	RMA8

-29,0988	-56,5534	2023-10-16T20:30:00.000Z	-	Multicelular organizado	Desconocido	RMA8
-27,9983	-57,5873	2023-10-16T21:20:00.000Z	-	Multicelular organizado	Desconocido	RMA8
-28,2673	-58,1227	2023-11-03T04:55:00.000Z	-	Multicelular no organizado	Desconocido	RMA8
-37,6895	-63,1610	2018-12-28T22:00:00.000Z	40	Discreta no supercelda	Severo	RMA10
-38,7214	-60,4517	2019-01-12T23:10:00.000Z	15	Multicelular organizada	No severo	RMA10
-39,3660	-62,6330	2020-01-23T22:00:00.000Z	-	Multicelular organizada	Desconocido	RMA10
-37,5485	-62,7715	2020-02-04T18:30:00.000Z	30	Multicelular organizada	Severo	RMA10
-38,7214	-60,4517	2023-02-08T06:30:00.000Z	-	Multicelular organizada	Desconocido	RMA10
-39,5015	-62,6798	2023-02-11T21:50:00.000Z	50	Multicelular organizada	Severo	RMA10
-38,9999	-61,5537	2023-02-12T19:10:00.000Z	15	Multicelular organizada	No severo	RMA10
-27,7830	-64,2660	2019-11-25T19:50:00.000Z	-	Multicelular organizada	Desconocido	RMA11
-27,3369	-65,7576	2019-12-20T17:00:00.000Z	10	Discreta supercelda	No severo	RMA11
-27,6510	-64,1900	2021-10-29T19:15:00.000Z	20	Multicelular no organizada	No severo	RMA11
-28,3030	-64,1790	2021-10-29T20:00:00.000Z	-	Multicelular no organizada	Desconocido	RMA11
-28,0500	-65,3500	2021-10-31T15:00:00.000Z	-	Multicelular organizada	Desconocido	RMA11
-28,5527	-64,1417	2021-11-04T22:50:00.000Z	-	Discreta no supercelda	Desconocido	RMA11

-26,8520	-65,3800	2021-11-09T20:30:00. 000Z -		Multicelular no organizada	Desconocido	RMA11
-27,1671	-64,4908	2022-12-23T18:00:00. 000Z 10		Multicelular organizada	No severo	RMA11
-26,8304	-65,2038	2023-01-13T00:30:00. 000Z -		Multicelular organizada	Desconocido	RMA11
-28,4690	-65,7789	2023-01-18T00:30:00. 000Z -		Discreta no supercelda	Desconocido	RMA11
-27,3459	-65,5927	2023-11-29T18:10:00. 000Z -		Multicelular organizada	Desconocido	RMA11