

ANÁLISIS DE REPORTES DE OCURRENCIA DE TIEMPO SEVERO EN SUPERFICIE PARA EL CENTRO-NORTE DE LA ARGENTINA DURANTE LA TEMPORADA 2018-2019

Melissa Natalia Patanella^{1,2} y Henrique Fuchs Bueno Repinaldo³

¹Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

²Servicio Meteorológico Nacional Argentina

³Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências, Bauru, SP, Brasil

(Manuscrito recibido el 27 de diciembre de 2021, en su versión final el 30 de mayo de 2022)

ABSTRACT

En el centro y norte de la Argentina se dan algunas de las tormentas más intensas del mundo, y su inicio y desarrollo está fuertemente influenciado por la orografía de la cordillera de los Andes y las sierras de Córdoba. Estas tormentas se asocian a la ocurrencia de fenómenos de tiempo severo que generan importantes daños materiales y grandes pérdidas económicas tanto en áreas rurales como en urbanas.

El objetivo de este trabajo fue realizar el estudio observacional de la distribución espacial y temporal de diversos reportes de fenómenos de tiempo severo en superficie, en particular de caída de granizo, lluvias intensas, y vientos fuertes y ráfagas. Se encontró que estos fenómenos tendieron a darse en horas de la tarde y comienzo de la noche, y que la mayoría de los reportes fueron hacia fines de primavera y principios del verano. A su vez, se realizó un análisis especial del granizo, en el cual se determinó que a medida que aumentó su tamaño, disminuyó su densidad de acumulación.

Keywords: reportes de tiempo severo, Argentina, granizo, viento fuerte, lluvia intensa.

ANALYSIS OF SURFACE SEVERE WEATHER REPORTS IN CENTRAL-NORTHERN ARGENTINA DURING THE 2018-2019 SEASON

RESUMEN

Some of the most intense thunderstorms in the world take place in central and northern Argentina, and their start and development is strongly influenced by the orography of the Andes and sierras de Córdoba. These thunderstorms are associated with the occurrence of severe weather phenomena that generate important material damages and economic loss in rural and urban areas.

The aim of this paper was to do the observational study of the spatial and temporal distribution of different severe weather phenomena, in particular, hail, intense rain and strong winds with gusts. Most of these events took place between the evening and midnight, and also between late Spring and early Summer. At the same time, while studying the occurrence of hail, it was found that its density of accumulation decreased as its diameter increased.

Palabras clave: severe weather reports, Argentina, hail, strong winds with gusts, intense rain.

1. INTRODUCCIÓN

En el Sudeste de Sudamérica (SESA) y en particular en el centro de la Argentina ocurren algunas de las tormentas más intensas del planeta (eg. Romatschke y Houze, 2010; Cecil y Blankenship, 2012; Houze et al., 2015) que con frecuencia evolucionan en sistemas convectivos de mesoescala (MCSs, Mesoscale Convective Systems). Estas tormentas producen con frecuencia fenómenos de tiempo severo en superficie como fuertes ráfagas de viento, granizo de gran tamaño, inundaciones repentinas e incluso tornados (eg. Matsudo y Salio, 2011; Rasmussen y Houze, 2010; Cecil y Blankenship, 2012; Mezher et al., 2012; Rasmussen et al., 2014; Piersante, 2017; Mulholland et al., 2018). La región de la cordillera de los Andes y las sierras de Córdoba cuenta con diversos mecanismos geográficos de disparo de la convección húmeda profunda, lo cual resulta favorable para el inicio, desarrollo y mantenimiento de los MCSs que se propagan hacia el este sobre la Cuenca del Plata (eg. Romatschke y Houze, 2010; Cecil y Blankenship, 2012; Vidal, 2014; Houze et al., 2015; Repinaldo et al., 2015, 2017; Repinaldo, 2019; Piersante, 2017).

Las influencias combinadas de varios factores atmosféricos, como la corriente en chorro de capas bajas de Sudamérica (SALLJ, South American Low Level Jet) (Nicolini et al., 2006) y la topografía compleja permiten explicar los recurrentes eventos de tiempo severo en la región (Romatschke y Houze, 2010).

Se ha demostrado que la generación de tiempo severo es altamente dependiente del modo convectivo (Dial et al., 2010) y, en particular, las superceldas y bow echoes (Fujita, 1978) se asocian a una alta probabilidad de caída de granizo y hasta tornados (eg. Markowski y Richardson, 2010). Además, en los alrededores

de las sierras de Córdoba, gran parte de las tormentas tienden a iniciarse al comienzo de la tarde y hacia el final del día, en especial durante los meses del verano austral, es decir en diciembre, enero y febrero (Mulholland et al., 2018).

La caída de granizo en Argentina resulta en importantes daños materiales y como consecuencia, grandes pérdidas económicas, en especial en regiones rurales en las cuales se desarrolla la agricultura o en áreas urbanas con gran densidad poblacional (Rasmussen et al., 2014; Farnell et al., 2016; Punge y Kunz, 2016; Piersante, 2017; Prein y Holland, 2018). Kumjian et al. (2020) han estimado que un granizo que precipitó en la ciudad cordobesa de Villa Carlos Paz en el 2018 tuvo una dimensión entre 18.8 y 23.7 cm, la cual está cerca o sobrepasa el récord actual de 20.32 cm registrado en la ciudad de Vivian, Dakota del Sur, Estados Unidos (Pojoerlie et al., 2013).

Diversos estudios demostraron que el centro y norte de la Argentina se destaca como una de las regiones a nivel mundial con mayor frecuencia de ocurrencia de tormentas asociadas a la caída de granizo (Matsudo y Salio, 2011; Cecil y Blankenship, 2012) y, en particular, la base de la cordillera de los Andes y las sierras de Córdoba (Rasmussen et al., 2014), con máximos en las provincias de Mendoza y Córdoba (Mezher et al., 2012). Las tormentas generadoras de granizo en el norte del país alcanzan su máximo desarrollo hacia el comienzo de la noche (García-Ortega et al., 2009; Cecil y Blankenship, 2012), con una máxima frecuencia de ocurrencia durante el verano, seguido de la primavera (Mezher et al., 2012).

Otro de los fenómenos que genera graves daños socio-económicos es la ocurrencia de lluvias intensas, que pueden presentarse de forma aislada o como parte de un MCS (Velasco

y Fritsch, 1987). En particular, debido a los importantes acumulados de precipitación en poco tiempo, estos eventos se asocian a un gran potencial de anegamientos e inundaciones. La ocurrencia de inundaciones fue el fenómeno que causó más destrucción en la Argentina entre 1980 y 2010 (Choi, 2016). Trabajos previos han estimado que en el noreste de la Argentina los MCSs son responsables de hasta el 70 % de la precipitación durante el verano (eg. Durkee et al, 2009; Feng et al., 2021). Además, la frecuencia de ocurrencia de lluvias intensas es máxima hacia el comienzo de la noche en el norte de la Argentina (García-Ortega et al., 2009; Cecil y Blankenship, 2012).

Por último, las ráfagas y vientos fuertes son otro de los fenómenos responsables de la generación de considerables daños y pérdidas tanto sociales como económicos en Argentina y en el resto del mundo (Pita y Altinger de Schwarzkopf, 2016; Lombardo y Zickar, 2019). Se ha demostrado que, en general, las ráfagas de viento más fuertes que resultan destructivas se asocian a la presencia de descendentes de tormentas intensas y, en particular, a la ocurrencia de tornados (Rasmussen et al. 2014, Durañona, 2016). Pita y Altinger de Schwarzkopf (2016) demostraron que en la Argentina se dieron gran cantidad de eventos de vientos que generaron daños socio-económicos y a partir de ello, los clasificaron a través de la escala Fujita, dando como resultado que la mayoría se ubicaron en las categorías F0 y F1, correspondientes a velocidades entre 64 y 180 km h⁻¹. Según los autores, entre 1971 y 1998 ocurrieron 83 casos de downbursts, y entre 1930 y 1999 se registraron 470 eventos de tornados en el país.

Estudios previos han demostrado que el incremento de las pérdidas por daños asociados a la ocurrencia de tormentas severas es resultado directo de la densidad poblacional (eg. Changnon y Burroughs, 2003; Changnon, 2009), debido a esto, las regiones urbanizadas tienen mayor cantidad de reportes de eventos extremos en comparación a las áreas rurales (eg. Dobur, 2005). Por lo tanto, los estudios sobre

cambios a lo largo del tiempo en la intensidad y frecuencia de ocurrencia de estos fenómenos a partir de reportes de superficie son más inciertos (Changnon, 2009).

Con el fin de profundizar el conocimiento acerca del inicio y desarrollo de las tormentas convectivas que producen eventos de tiempo severo a través de observaciones meteorológicas al pie de la cordillera de los Andes, se desarrolló el Proyecto RELAMPAGO (Remote Sensing of Electrification, Lightning, And Mesoscale/microscale Processes with Adaptive Ground Observations) que permitió la realización de una campaña de medición extensiva en las provincias de Córdoba y Mendoza entre el 1° de junio de 2018 y el 30 de abril de 2019, con un período de observación intensiva comprendido entre el 1° de noviembre y el 18 de diciembre de 2018.

El objetivo de este trabajo es realizar el estudio de la distribución espacio-temporal de distintos tipos de reportes de tiempo severo que tuvieron lugar en la región centro-norte de Argentina entre el 1° de noviembre del 2018 y el 30 de abril del 2019.

En la sección “Datos y Metodología” se describen los diferentes conjuntos de datos utilizados en este trabajo. En la sección “Resultados” se expone el análisis de los reportes de caída de granizo, lluvias intensas, y vientos fuertes y ráfagas a partir de portales de noticias y diarios, publicaciones en diferentes redes sociales y de observaciones meteorológicas de superficie y mensajes aeronáuticos emitidos por la red de observación del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (SMN). Por último, se presentan las conclusiones más relevantes de este trabajo.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

En la figura 1 se presenta el dominio espacial, el cual se definió entre las latitudes 37°S y 21°S, y las longitudes 72°O y 52°O, comprendiendo el centro-norte de la Argentina. El dominio se

dividió en cuatro regiones, cada una abarcando las siguientes provincias:

- Centro: Norte de Buenos Aires y La Pampa, Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), Córdoba, Entre Ríos y Santa Fe,
- Cuyo: Mendoza, La Rioja, San Juan y San Luis,
- Noreste (NEA): Chaco, Corrientes, Formosa y Misiones,
- Noroeste (NOA): Catamarca, Jujuy, Salta, Santiago del Estero y Tucumán.

La separación del dominio en subregiones toma en cuenta lo dispuesto por el Artículo 124 de la Constitución Nacional, en donde se establecen cuatro regiones según sus características históricas, geográficas y sociales: Centro, Cuyo, Norte y Patagonia. A su vez, la región Norte se dividió en NOA y NEA según un tratado interprovincial en 1999. Según estos lineamientos, la provincia de La Pampa pertenece a la Patagonia y la provincia de Buenos Aires no pertenece a una región en particular, sin embargo ambas fueron tratadas como parte de la región Centro en este trabajo por presentar características similares a las otras provincias que conforman la región.

A pesar de contar con reportes de tiempo severo a lo largo de todo el país, se eligió este dominio debido a que aproximadamente un 80 % de los registros tuvieron lugar en esta región.

El dominio temporal se definió desde el 1° de noviembre del 2018 hasta el 30 de abril del 2019, coincidente con la extensión temporal de los registros de eventos de tiempo severo durante el proyecto RELÁMPAGO.

En este trabajo se utilizaron tres conjuntos de datos conteniendo diferentes reportes de ocurrencia de tiempo severo en superficie dentro del dominio espacial y temporal de interés.

Para comenzar, se contó con un set de datos de 1092 observaciones producto del relevamiento de eventos severos realizado en el marco del proyecto RELÁMPAGO. Si bien los reportes corresponden a toda la superficie de la Argentina, la mayoría se encontraban en la región central y norte del país. Los reportes fueron tomados a partir de publicaciones, fotos y videos de redes sociales; portales de noticias online; contribuciones de los ciudadanos, de participantes de la campaña y propios. Para generar esta base de datos se difundió un formulario (http://bit.ly/eventos_severos) a través de la cuenta educativa de Twitter del Proyecto RELÁMPAGO-CACTI, RELÁMPAGO_edu (@RelampagoEdu). Esto estuvo a cargo de estudiantes de grado y posgrado de la Licenciatura en Meteorología y Ciencias de la Atmósfera de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata y de la Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, además de ser auspiciado por diversas instituciones, organizaciones y proyectos con el fin de recolectar información que contribuya a una mejora en el pronóstico meteorológico de eventos severos, en particular en la Argentina.

Se relevaron reportes de granizo, ráfagas y vientos fuertes, rayos o truenos, lluvias intensas, tornados, torbellinos de polvo, trombas o nubes embudo, cada uno acompañado de datos acerca de su localización y horario de ocurrencia. A su vez, se contó con las características asociadas a cada evento en particular. En la figura 2 se muestra un caso de cada uno de los eventos a modo de ejemplo, haciendo referencia a los tres fenómenos de interés, granizo (figura 2, a-g), ráfagas o vientos fuertes (figura 2, h), o lluvia intensa (figura 2, i).

La geolocalización de cada uno de los reportes se hizo a partir de las coordenadas asociadas a cada evento, ya que cada uno contaba con datos acerca del lugar de ocurrencia, por ejemplo la ciudad, pueblo, paraje o incluso la intersección

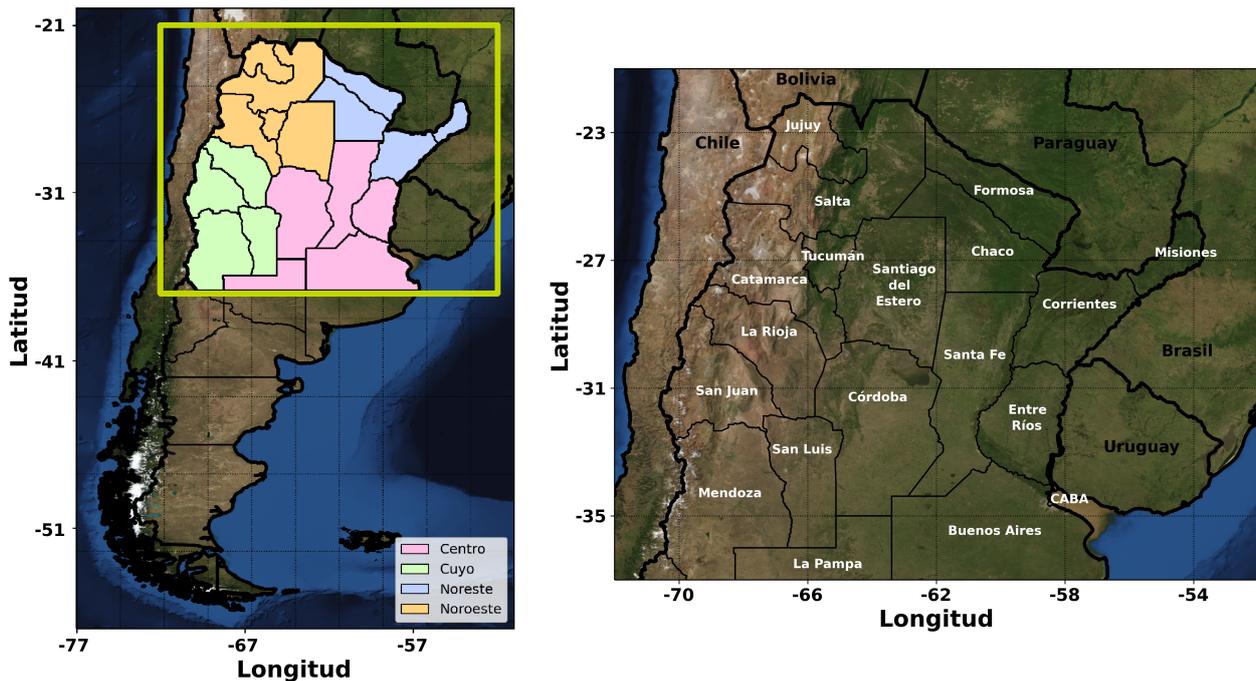


Figura 1: Dominio espacial que abarca el centro y norte de la Argentina, definido entre las latitudes 37°S y 21°S, y las longitudes 72°O y 52°O. Tomado de "Precursores de convección profunda asociada a la ocurrencia de tiempo severo en superficie en el centro-norte de la Argentina", por Patanella (2021).

de calles. Se trabajó con el Tiempo Universal Coordinado (UTC) para las figuras pero en Hora Oficial Argentina (HOA) para el análisis de la distribución horaria de los reportes. Si bien se contaba con la hora aproximada de ocurrencia de cada fenómeno, en este trabajo se agruparon los reportes según la hora entera más cercana.

En cuanto al granizo, se detalló su tamaño a través de la medición de su diámetro o una estimación del mismo mediante la comparación con objetos conocidos (e.g arvejas, monedas, pelotas de golf y naranjas); y su densidad de acumulación con la medición del espesor de la capa o a través de una estimación visual (figura 2 e-g). Tal como se expresa en la figura 2, los eventos de granizo se clasificaron según su tamaño en ≤ 1.5 cm, ≈ 2.5 cm (para granizos entre 1.6 y 3 cm), ≈ 4 cm (para granizos entre 3.1 y 7.9 cm) y ≥ 8 cm; y su densidad de acumulación en poca, moderada y abundante.

Para las ráfagas y/o vientos fuertes, se recolectó información acerca de la magnitud y dirección predominante del viento a través de mediciones con Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAs), o estimaciones de la velocidad a partir de daños en estructuras, por ejemplo, roturas, pérdidas o colapsos de techos, ventanas, puertas, paredes, columnas, postes de luz, semáforos, torres de comunicación o alta tensión, silos, carteles, alambrados o árboles.

En relación a las lluvias intensas, se buscaron datos de pluviómetros convencionales o EMAs y se tuvo en cuenta la ocurrencia de inundaciones, anegamientos y/o crecidas.

Para los casos de tornados, trombas, remolinos de polvo y/o nubes embudo y rayos o truenos se detalló su ocurrencia sin realizar una caracterización más profunda.

Para complementar la base de datos de



Figura 2: Representación a través de ejemplos de los diferentes tamaños y distribuciones de granizo, daños producidos por ráfagas o vientos fuertes, y lluvias intensas. Granizo de (a) ≤ 1.5 cm, (b) ≈ 2.5 cm, (c) ≈ 4 cm, y (d) ≥ 8 cm de diámetro. (e) Poca, (f) moderada, y (g) abundante caída de granizo. Daños y destrozos producidos por (i) ráfagas y vientos fuertes, y (j) lluvias intensas. La fecha, hora, lugar de ocurrencia y fuente de cada imagen se detallan a continuación: (a) 27/12/2018 17:45 hs, Villa Giardino, Cordoba (nexodiario.com); (b) 08/11/2018 18:00 hs, Napaleofú, Buenos Aires (eleco.com.ar); (c) 11/12/2018 16:40 hs, Miramar, Córdoba (lavoz.com.ar); (d) 23/02/2019 20:00 hs, Barrio de Empalme, Cordoba (cadena3.com); (e) 29/11/2018 15:30 hs, Sampacho, Córdoba (eldoce.tv); (f) 31/12/2018 18:20 hs, Darregueira, Buenos Aires (darregueiranoticias.blogspot.com); (g) 28/12/2018 16:20 hs, Guandacol, La Rioja (riojavirtual.com.ar); (h) 15/04/2019 10.00 hs, Esperanza, Santa Fe (airedesantafe.com.ar); (i) 22/10/2018 21.00hs, Apolinario Saravia, Salta (eltribuno.com).

RELAMPAGO, se creó un segundo set de 858 registros a partir de aún más reportes en redes sociales y periódicos digitales de diferentes localidades del país. Cada uno contaba con datos de la localización y la hora aproximada de la ocurrencia del evento, con información acerca de las características de cada uno, siguiendo el mismo lineamiento que el otro set de datos. Además, se recolectaron los datos de 782 observaciones sinópticas de superficie SYNOP (surface SYNOPTic observations), mensajes aeronáuticos METAR (MÉTéorologique Aviation Régulière) y SPECI (mensaje especial del METAR) que se encontraban dentro del dominio de interés. Se tomaron en cuenta los eventos de tormentas con granizo, lluvias intensas y ráfagas de todas las estaciones meteorológicas pertenecientes a la red oficial del SMN.

Por último, se realizó la verificación de la ocurrencia de los sistemas convectivos (CSs, Convective Systems) utilizando la herramienta Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC) que permite realizar el seguimiento del desarrollo de CSs a través de imágenes satelitales (Vila et al., 2008). A partir de esta información, se comprobó que los reportes habían ocurrido durante el pasaje de un sistema meteorológico por su localización, lo cual incluye un posible error del orden de minutos que no resulta relevante en el análisis de este trabajo.

3. RESULTADOS

Según los criterios de la Dirección de Pronósticos del Tiempo y Avisos (DPTyA) del SMN, una tormenta se considera como fuerte si se evidencia granizo entre 0.1 y 2 cm, ráfagas entre 60 y 90 km h⁻¹ y/o acumulados de lluvia entre 20 y 40 mm h⁻¹; y una tormenta se clasifica como severa si se registra granizo de más de 2 cm de diámetro, ráfagas mayores a los 90 km h⁻¹ y/o acumulados de lluvia que superen los 40 mm h⁻¹. De acuerdo a los reportes utilizados en este trabajo, de los 2732 reportes, 763 correspondieron a tormentas fuertes y 191

a severas, mientras que el resto de los registros no alcanzaron a superar los umbrales o no se tuvieron mediciones concretas de velocidad del viento o de intensidad de precipitación.

En la figura 3 se muestra la distribución horaria correspondiente a los reportes de granizo, lluvias intensas, y vientos fuertes y ráfagas.

Para este trabajo se separa el día en 4 partes, madrugada (03-09 UTC, 00-06 HOA), mañana (09-15 UTC, 06-12 HOA), tarde (15-21 UTC, 12-18 HOA) y noche (21-03 UTC, 18-00 HOA). En todo el dominio espacial y temporal, la mayor cantidad de registros (65 % del total, donde un 72 % corresponde a granizos, 63 % a lluvias intensas y 60 % a vientos fuertes y ráfagas) se dieron por la tarde y noche, que coincide con el período de mayor frecuencia de ocurrencia de convección debido al calentamiento solar que tiene lugar por la tarde en la región centro-norte de la Argentina, tal como lo descrito por García-Ortega et al. (2009), Nicolini y García Skabar (2011), Cecil y Blankenship (2012), Vidal (2014), Repinaldo et al. (2015), Mulholland et al. (2018).

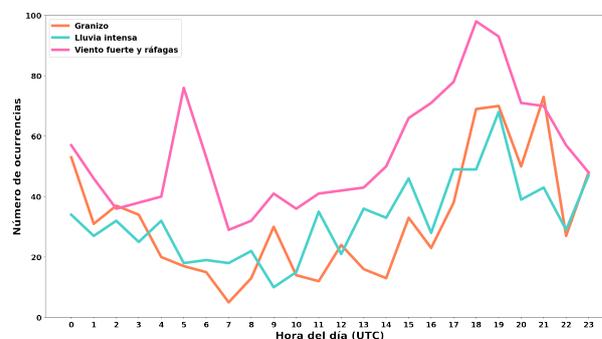


Figura 3: Total de reportes de eventos de tiempo severo dentro del dominio por hora.

De forma similar, en la figura 4 se expone la distribución mensual de todos los tipos de eventos de tiempo severo, evidenciando que la mayoría tuvo lugar entre noviembre y enero, es decir hacia el final de la primavera y comienzos del verano, con un descenso significativo a lo largo de los meses de febrero, marzo y abril.

Mulholland et al. (2018), encontraron que la mayoría de las tormentas en la región de las sierras de Córdoba, incluida en el dominio de este trabajo, tienen un máximo de ocurrencia durante los meses de diciembre, enero y febrero, es decir, durante los meses de verano austral.

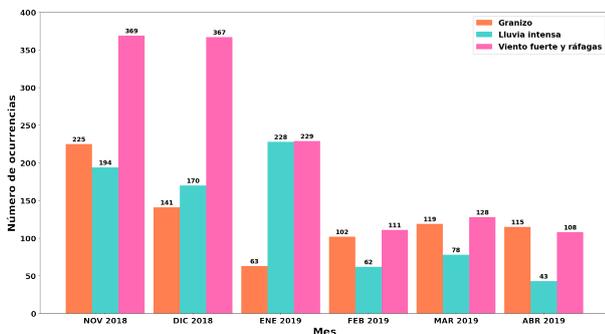


Figura 4: Total de reportes dentro del dominio de estudio por mes.

A continuación se presenta el análisis de las distribuciones mensuales, horarias y espaciales para cada tipo de reporte.

3.1. Granizo

En la figura 5 se expone la distribución mensual y en la figura 6 la horaria de los reportes de granizo mostrando las diferentes combinaciones de tamaños y densidades de acumulación. Según lo exhibido en las figuras 5 y 6, se destaca la ocurrencia de granizos de pequeño tamaño y también los reportes asociados a una abundante acumulación de este hidrometeoro. De todos los registros, la mayoría correspondió a los de pequeño tamaño (≤ 1.5 cm), con una abundante densidad de caída, seguida por poca acumulación. Luego, se evidenció un número mucho menor de reportes asociados a los de diámetro mediano (2.5, 4 cm) y por último, la menor cantidad de registros se asoció a los de gran tamaño (≥ 8 cm). En general los reportes de granizo pequeños se asociaron a la abundante densidad de caída, mientras que los de mayor tamaño, a la poca y moderada acumulación.

La distribución mensual de los reportes de granizo, expuesta en la figura 5, muestra que el mayor número de reportes tuvo lugar durante

noviembre, sin embargo se pudieron observar máximos en los extremos del dominio temporal, ya que la cantidad de reportes disminuyó de manera significativa hasta alcanzar un mínimo en enero y luego aumentó nuevamente hacia abril. Esto se encontró modulado principalmente por los hidrometeoros de pequeño tamaño con una abundante y poca densidad de caída. Sin embargo, el máximo número de reportes asociados a granizos mayores a 1.5 cm tuvo lugar en noviembre y diciembre, disminuyendo a lo largo de los meses, para todos los tipos de acumulación. Mezher et al. (2012) encontraron una mayor frecuencia de eventos de granizo durante el verano, seguido de la primavera en las regiones del Cuyo y del NOA, mientras que en la otras regiones la máxima frecuencia ocurre en la primavera seguido del verano. A la vez, el trabajo de Piersante (2017) indica que la mayor frecuencia de ocurrencia de granizo fue en verano para la región de Cuyo y, en particular, en la primavera para la provincia de Córdoba.

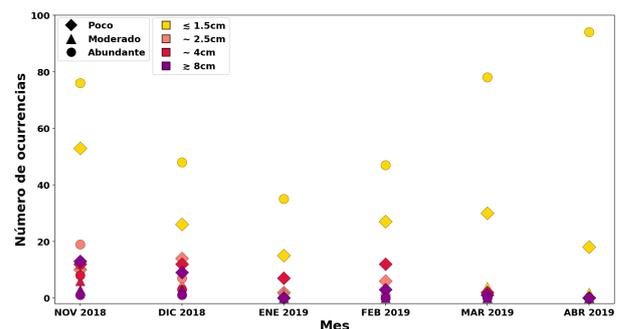


Figura 5: Combinación de tamaños y densidades de acumulación de granizo por mes. Los distintos colores indican los diferentes tamaños de granizo y las formas se corresponden a la densidad de acumulación.

A partir de la distribución horaria de los reportes de granizo, mostrada en la figura 6, se evidenció que la mayor cantidad de todos los tamaños y densidades se registró durante la tarde y noche (15-03 UTC, 12-00 HOA), luego de la formación de tormentas en la región de estudio. El inicio de la convección por la tarde (15-21 UTC, 12-18 HOA) en dicha zona, luego del máximo calentamiento de la superficie,

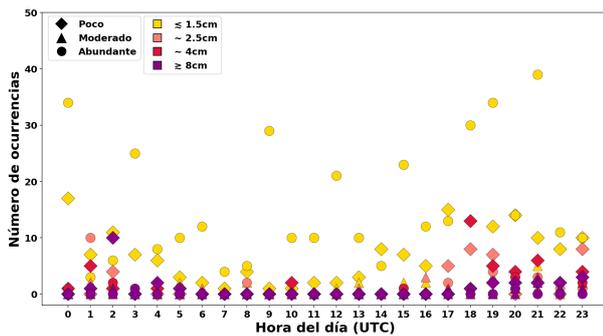


Figura 6: Combinación de tamaños y densidades de acumulación de granizo por hora. Los distintos colores indican los diferentes tamaños de granizo y las formas se corresponden a la densidad de acumulación.

fue estudiado en diversos trabajos, como los de Velasco y Fritsch (1987), Salio y Nicolini (2006), Romatschke y Houze (2010) y Vidal (2014).

Los hidrometeoros mayores a 1.5 cm tuvieron un máximo de frecuencia de ocurrencia por la tarde y noche (15-03 UTC, 12-00 HOA), y se asociaron a la poca y moderada densidad de acumulación. Sin embargo, los granizos de pequeño tamaño, si bien coincidieron con los máximos a partir de la tarde (15-21 UTC, 12-18 HOA), tuvieron un comportamiento más equitativo en cuanto a su distribución horaria y la mayor parte de ellos correspondieron a la abundante caída seguida de poca acumulación.

A partir de los datos provistos en las figuras 5 y 6, se evidenció que los granizos de pequeño diámetro tendieron a precipitar de forma abundante, y a medida que aumentó su tamaño, disminuyó su densidad de acumulación.

En la figura 7 se muestra la distribución espacio-temporal de todos los tipos de reportes. De forma similar, en la 8 se exhibe la correspondiente a los diferentes tamaños y en la 9 a los distintos tipos de acumulación de granizo.

Tal como se observa en la figura 7, la mayor parte de los reportes de todos los tamaños de

granizo se dieron en las regiones Centro y Cuyo, en particular se destacaron las provincias de Córdoba y Mendoza. A partir de lo presentado en la figura 8, el máximo número de reportes de granizos de pequeño tamaño se ubicó en Buenos Aires, Córdoba y Mendoza, y los de gran tamaño en la provincia de Buenos Aires, Córdoba, La Pampa y San Luis, en ambos casos alcanzando un máximo en noviembre. Se observó una disminución de la cantidad de registros de granizo a lo largo de los meses para todas las provincias. En particular para los granizos ≤ 1.5 cm, si bien el máximo de ocurrencia fue en noviembre y diciembre en Córdoba y Mendoza, al igual que para el resto de los tamaños, a lo largo de los meses se observó que los reportes tuvieron una distribución más equitativa respecto a las provincias en donde ocurren. En cambio, para los granizos de ≈ 2.5 cm se destacó la ocurrencia en la provincia de Mendoza, para los de ≈ 4 cm en Córdoba y Mendoza, y los ≥ 8 cm en la Provincia de Córdoba, en particular durante noviembre y diciembre. Los reportes mostraron que para los granizos de tamaño pequeño a mediano (≈ 2.5 cm) se destacó la ocurrencia en Mendoza y a medida que aumentó el diámetro el epicentro se corre hacia Córdoba, lugar en el cual se destacó la ocurrencia de granizos de gran tamaño.

Teniendo en cuenta lo expuesto en la figura 9, se destacó la ocurrencia de poca y moderada caída de granizo en la provincia de Buenos Aires, Mendoza y en particular Córdoba, entre noviembre y diciembre, con una disminución importante hacia abril. La mayor cantidad de registros correspondientes a la abundante caída de granizo se dieron en las provincias de Córdoba y en especial en Mendoza, aunque hubo reportes en todas las regiones y por ende en todas las provincias, durante todos los meses. Se observó que a lo largo del tiempo dentro del dominio temporal, la distribución de los eventos de granizo abundante se distribuyó de manera más equitativa entre las provincias.

La ocurrencia de gran cantidad de reportes de granizo en las regiones de Centro y Cuyo, con

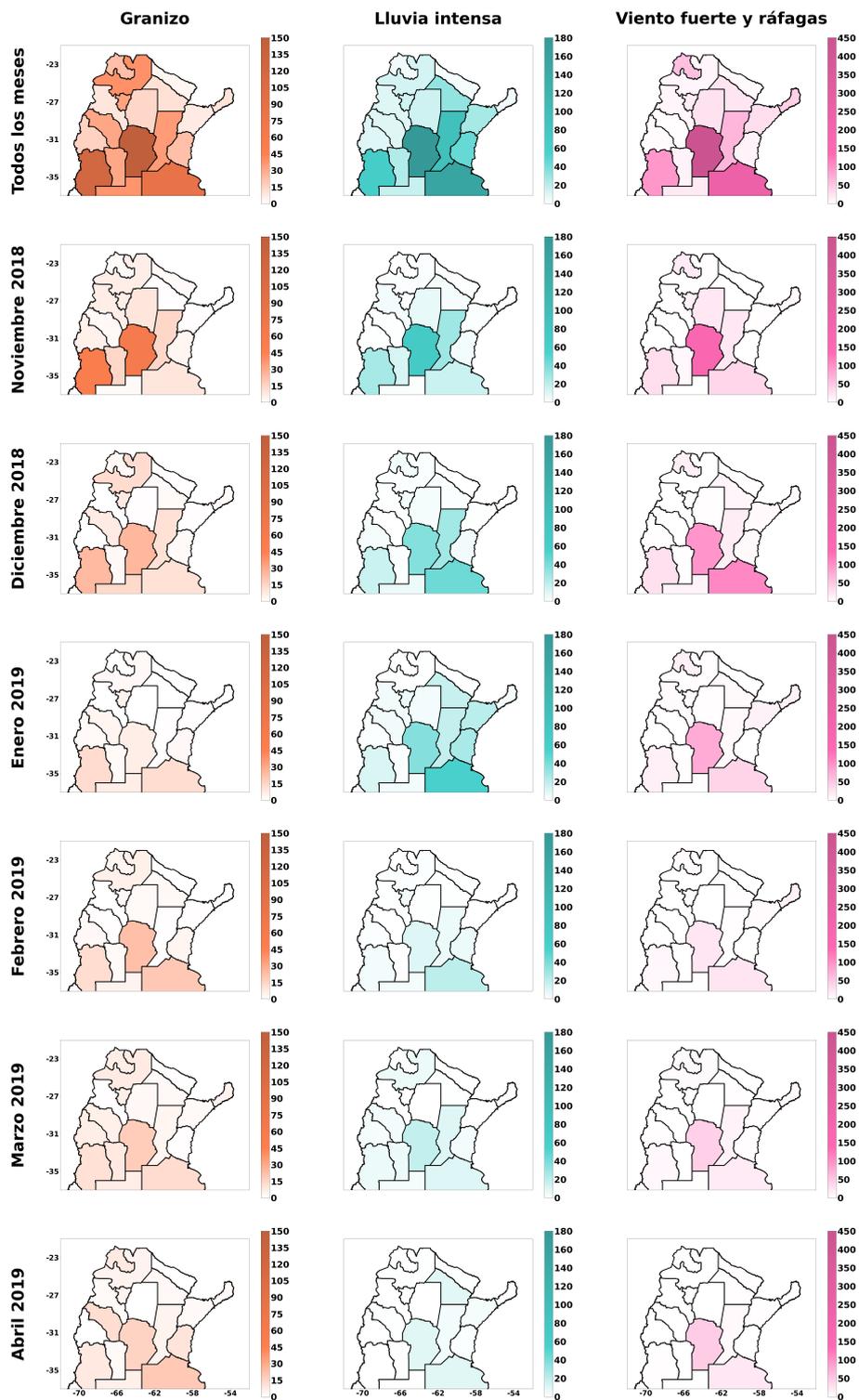


Figura 7: Distribución espacial por provincias de todos los eventos que tuvieron lugar entre los meses de noviembre 2018 y abril 2019 para todos los reportes y por mes (filas), discriminados por tipo de fenómeno - granizo, lluvias intensas y ráfagas (columnas).

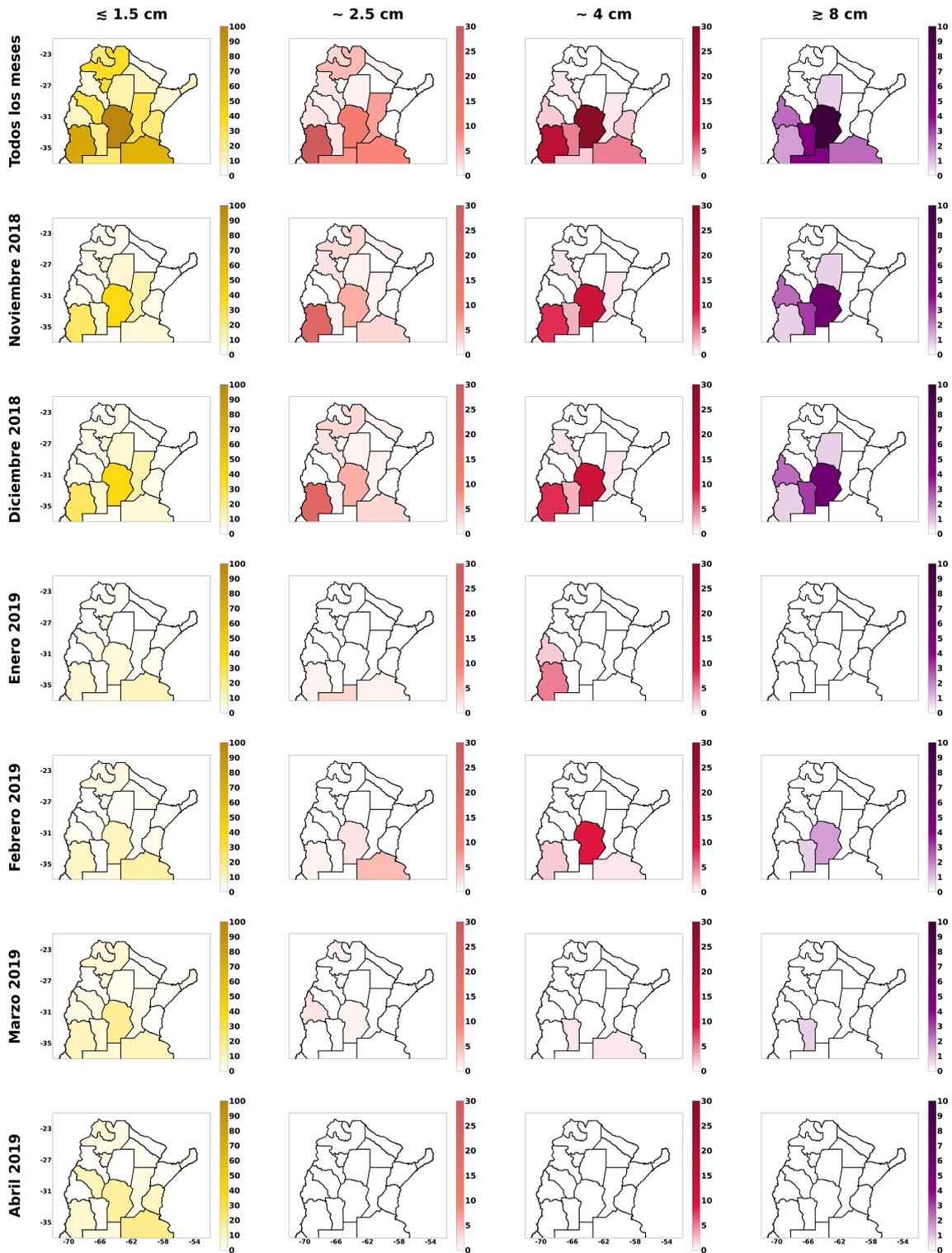


Figura 8: Distribución espacial por provincias de eventos de granizo que tuvieron lugar entre los meses de noviembre 2018 y abril 2019 para todos los reportes y por mes (filas), discriminados por tamaños (columnas).

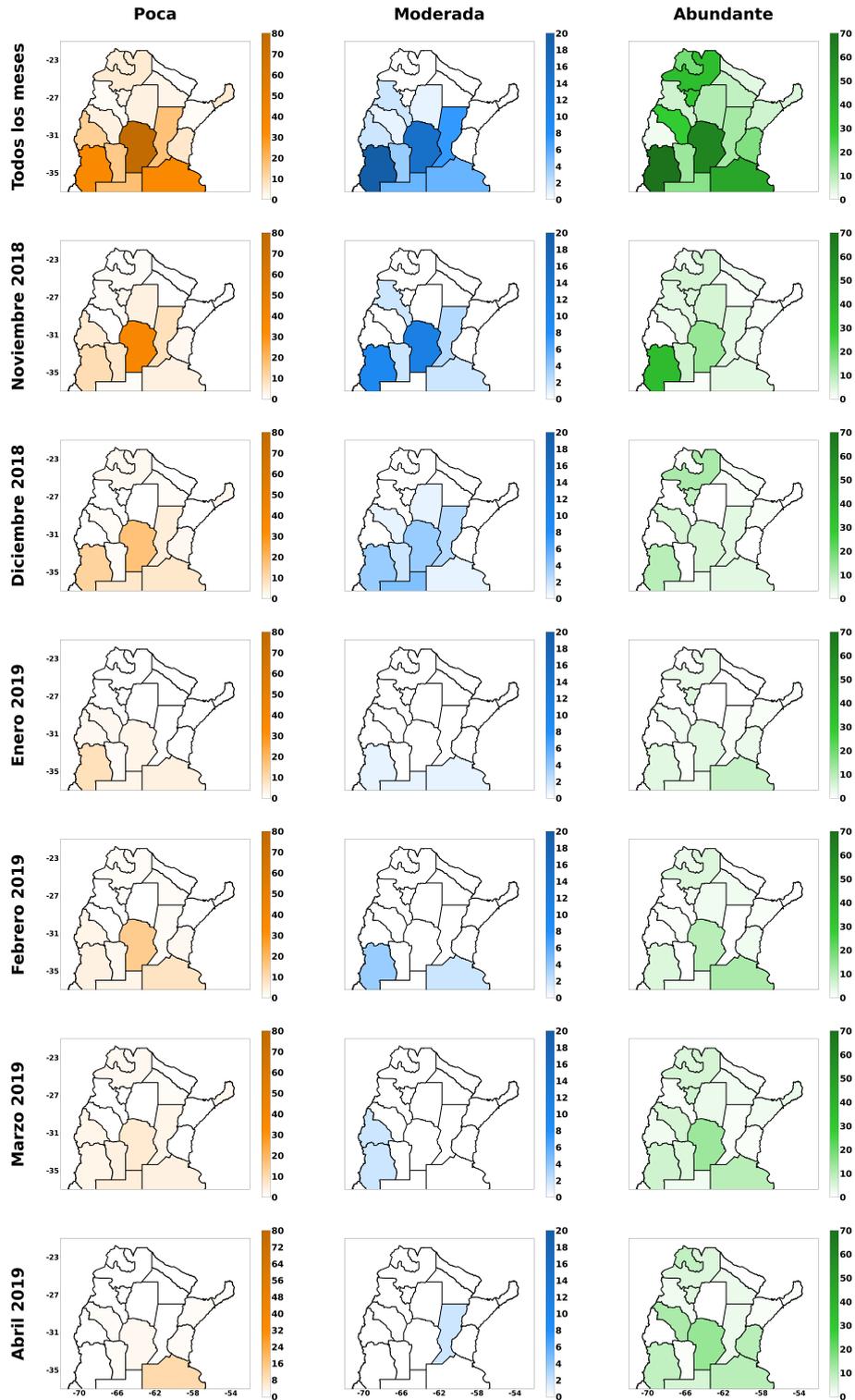


Figura 9: Distribución espacial por provincias de eventos de granizo que tuvieron lugar entre los meses de noviembre 2018 y abril 2019 para todos los reportes y por mes (filas), discriminados por densidad de acumulación (columnas).

máximos durante la primavera y verano estuvo de acuerdo con lo descrito en diferentes trabajos previos. Matsudo y Salio (2011) analizaron los reportes SYNOP desde el 2000 hasta el 2005 y encontraron que los eventos de granizo eran más frecuentes en las regiones de Cuyo y Centro, en especial durante el verano. Cecil y Blankenship (2012) indicaron que en el verano dentro de las zonas Centro y Norte, las tormentas de granizo alcanzaban su máxima frecuencia de ocurrencia, realizando una estimación a través de ocho años de datos del Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). Mezher y Mercuri (2008), analizando datos de estaciones meteorológicas de superficie, encontraron que Córdoba y Mendoza tenían gran cantidad de eventos de granizo, y a la vez el mayor número de ellos se daba durante la primavera. Según el estudio de reportes en noticias de diarios locales realizado por Rasmussen et al. (2014), la ocurrencia de granizo se concentra en verano a sotavento de la cordillera de los Andes, en particular en la región de Cuyo. Además, si bien Mezher et al. (2012) trabaja con datos anuales, indican que la máxima frecuencia de ocurrencia de tormentas de granizo alcanzan su máximo en el verano para las regiones de Cuyo y NOA, mientras que en el NEA y este de la región Centro se da en la primavera.

Resulta importante destacar que, al igual que se describe en los trabajos de Dobur (2005), Changnon (2009), Cecil y Blankenship (2012), Allen y Tippet (2015), Farnell et al. (2016), y Prein y Holland (2018), existe un nivel de incertidumbre respecto a la distribución espacial de los reportes de tiempo severo en superficie. Esto se debe a la inhomogeneidad en la distribución poblacional, ya que en las regiones más pobladas el número de personas con acceso a internet, telefonía y redes sociales es significativamente mayor.

3.2. Lluvias intensas

A partir de lo expuesto en la figura 3, en todo el dominio espacial y temporal, la mayor cantidad de reportes asociados a la ocurrencia

de lluvias intensas se dieron por la tarde y noche (15-03 UTC, 12-00 HOA), luego del inicio de la convección en la zona de estudio.

De manera similar, de acuerdo a lo presentado en la figura 4, la mayor frecuencia de reportes correspondientes a las lluvias intensas tuvo lugar entre noviembre y enero, alcanzando un máximo este último mes. A partir de allí y hasta abril, el número de registros disminuyó de forma abrupta. El gran número de reportes de lluvias intensas durante enero podría encontrarse asociado a una mayor frecuencia de convección organizada (Rasmussen y Houze, 2011)

En relación a la distribución espacial de los reportes de lluvias intensas, tal como lo mostrado en la figura 7, la mayor parte de los registros se centró en las provincias del Centro y sur del NEA. En noviembre los reportes se vieron concentrados en Córdoba, en diciembre en la región Centro y NOA en enero cuando se alcanzó el máximo se concentran en las regiones Centro, Cuyo y NEA. Luego la cantidad de reportes disminuyó de forma abrupta, desde enero hasta abril. Estos resultados fueron coincidentes con los de Matsudo y Salio (2011), que encontraron que la mayor frecuencia de ocurrencia de lluvias intensas corresponde a la región del NEA.

3.3. Ráfagas y vientos fuertes

En relación a la distribución horaria de los registros correspondientes a vientos fuertes y ráfagas, exhibidos en la figura 3, éstos tuvieron un máximo por la tarde (15-21 UTC, 12-18 HOA), seguido de otro máximo por la madrugada (03-09 UTC, 00-06 HOA). El máximo nocturno pudo estar asociado a que durante la madrugada la ocurrencia de MCSs es más frecuente debido a que la convección se encuentra más organizada. Por ejemplo, se ha demostrado que los bow echoes están asociados a daños por vientos fuertes (Cecil y Blankenship, 2012). Además, la convección profunda con fuertes ráfagas de viento que ocurren por la

madrugada (Saulo et al., 2007; dos Santos et al., 2008; Montini et al., 2019), puede ser el resultado de la intensificación del SALLJ por la noche (Stensrud, 1996).

Respecto a la distribución mensual de los reportes, expuestos en la figura 4, hubo un gran número de registros en noviembre, alcanzando un máximo en diciembre y, luego, a partir de enero se observó una disminución significativa en la cantidad a lo largo de los meses. De manera similar a los reportes de lluvias intensas, los registros de vientos fuertes y ráfagas por lo general se encuentran asociados a convección organizada (Rasmussen y Houze, 2011) que alcanzan un máximo de ocurrencia durante los meses de verano en los alrededores de las sierras de Córdoba (Mulholland et al, 2018).

Tomando en cuenta la distribución por provincias de los reportes de vientos fuertes y ráfagas, presentados en la figura 7, la mayor cantidad de registros se dio en la provincia de Córdoba, resaltando durante todos los meses, seguido por la provincia de Buenos Aires. En noviembre se observaron muchos reportes en Córdoba y en diciembre, cuando se alcanzó el máximo de registros de este evento en Córdoba y Mendoza. Durante el resto de los meses, el número de reportes disminuyó significativamente pero la región Centro continuó concentrando la mayoría de ellos. Esto resultó parcialmente coincidente con los resultados presentados por Matsudo y Salio (2011), en los que se expresa que gran cantidad de registros de ráfagas tienen lugar en Mendoza, San Luis y Buenos Aires.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó la distribución espacio-temporal de los reportes asociados a la caída de granizo, lluvias intensas, y vientos fuertes y ráfagas que fueron registrados en el centro y norte de la Argentina entre noviembre de 2018 y abril de 2019.

Respecto a la distribución horaria, la mayoría

de los reportes tuvo lugar en horas de la tarde y noche (15-03 UTC, 12-00 HOA), para todos los tipos de eventos. A su vez, los registros asociados a la ocurrencia de ráfagas y vientos fuertes alcanzaron un máximo secundario durante la madrugada (03-09 UTC, 00-06 HOA). En cuanto a la distribución mensual, durante los primeros meses del dominio temporal se concentró la mayor cantidad de reportes asociados a todos los fenómenos, con máximos para la ocurrencia de granizo en noviembre con un segundo máximo en abril, para los vientos fuertes y ráfagas en diciembre, y para las lluvias intensas en enero.

Relativo al granizo, se evidenció una disminución del tamaño pero un aumento en la acumulación a lo largo de todo el período de estudio. En el mes de noviembre tuvo lugar un gran número de eventos asociados a granizos de gran tamaño pero con una menor acumulación, luego la cantidad de reportes disminuyó hacia enero, aumentando nuevamente hasta abril, mes en el cual se dio el mayor número de granizos de pequeño tamaño con una abundante acumulación. De todos los reportes de granizo, el mayor número correspondió a la caída abundante de pequeño tamaño. A la vez, la mayoría de los de gran diámetro se asoció a una baja densidad de acumulación. Por lo que, la cantidad de granizo tendió a disminuir a medida que aumentó el tamaño del mismo.

Teniendo en cuenta la distribución espacial, la mayoría de los reportes de granizo fueron registrados en las regiones de Centro y Cuyo, en específico en Córdoba y Mendoza. Se observó un máximo en las provincias del oeste de la región Centro y en Cuyo en noviembre, en diciembre el mayor número de reportes de granizo tuvo lugar en el sur de la región Centro, y el resto de los meses la distribución espacial resultó más equitativa. En cuanto a la clasificación por tamaños, la máxima cantidad de eventos de granizos pequeños se dio en Córdoba, Buenos Aires y Mendoza, mientras que para los de gran tamaño se dio en Córdoba, San Luis y Buenos

Aires.

Respecto a los reportes asociados a la ocurrencia de lluvias intensas, gran cantidad tuvo lugar entre noviembre y enero. En cuanto a su distribución espacial, al comienzo del período de estudio la mayoría de los eventos se dieron en las regiones del norte, luego en Centro y NOA, y por último en Centro, Cuyo y en el NEA.

En relación a los registros de ráfagas y vientos fuertes, la mayor parte tuvo lugar en los últimos meses del año, durante noviembre y en particular, diciembre. Estos reportes ocurrieron en las provincias del Centro y Cuyo al comienzo del período, luego en Cuyo y en el sur del NOA, y para diciembre el máximo se concentró en el Centro, para luego disminuir de forma abrupta el resto de los meses.

Por último, cabe destacar que los reportes presentan una gran inhomogeneidad en cuanto a su distribución espacial debido a que la población no es uniforme a lo largo del territorio argentino. La falta de reportes no necesariamente implica que el fenómeno no haya ocurrido, sino que nadie ha reportado el evento o los registros no fueron lo suficientemente continuos. Gran cantidad de reportes provinieron de las ciudades más pobladas de cada provincia, en particular de sus capitales, aunque para una mejor visualización, en este trabajo los reportes se agruparon por provincias. Asimismo, ya que los datos corresponden a una sola temporada, estos resultados no permiten establecer una climatología para el centro-norte de la Argentina.

Agradecimientos: A Paola Salio y a mis compañeros de RELAMPAGO por brindarme el acceso a la base de datos para poder realizar su análisis en este trabajo.

REFERENCIAS

Allen, J. T., Tippett, M. K. (2015). The

characteristics of United States hail reports: 1955-2014. *Electronic Journal of Severe Storms Meteorology*. 10. 1-31.

Cecil, D. J., Blankenship, C. (2012). Toward a Global Climatology of Severe Hailstorms as Estimated by Satellite Passive Microwave Imagers. *J. Climate*, 25, 687-703, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00130.1>

Changnon, S. A. (2009). Increasing major hail losses in the US. *Climatic Change* 96, 161-166, <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9597-z>

Changnon, S. A., Burroughs, J. (2003). The Tristate Hailstorm: The Most Costly on Record, *Monthly Weather Review*, 131(8), 1734-1739, <https://doi.org/10.1175//2549.1>

Choi, S. L. (2016). Integrating social media and rainfall data to understand the impacts of severe weather in Argentina. M.S. Thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign, <http://hdl.handle.net/2142/90667>

Dial, G. L., Racy, J. P., Thompson, R. L. (2010). Short-term convective mode evolution along synoptic boundaries. *Wea. Forecasting*, 25, 1430-1446, <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222315.1>

Dobur, J. C. (2005). A comparison of severe thunderstorm warning verification statistics and population density within the NWS Atlanta county warning area. Preprints, Fourth Annual Severe Storms Symp., Starkville, MS. East Mississippi Chapter National Weather Association and Amer. Meteor. Soc., D2-6.

Dos Santos, J. G. M. D., Campos, C. R. J. D., Lima, K. C. (2008). Análise de jatos de baixos níveis associados aum sistema convectivo de mesoescala na américa do sul: um estudo de caso. *Rev. Brasil. Geofís.* 26, 451-468. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2008000400006>

Durañona, V. (2015). Extreme wind climate of Uruguay. Tesis de Doctorado. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería. IMFIA, 439 págs. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/8394>

Durkee, J. D., Mote, T. L., Shepherd, J. M. (2009). The Contribution of Mesoscale

- Convective Complexes to Rainfall across Subtropical South America. *Journal of Climate*, 22(17), 4590-4605. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2858.1>
- Farnell, C., Rigo, T., Martin-Vide, J. (2016). Application of cokriging techniques for the estimation of hail size. *Theor Appl Climatol* 131, 133–151 (2018), <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1937-0>
- Feng, Z., Leung, L. R., Liu, N., Wang, J., Houze, R. A., Li, J., et al. (2021). A global high-resolution mesoscale convective system database using satellite-derived cloud tops, surface precipitation, and tracking. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2020JD034202. <https://doi.org/10.1029/2020JD034202>
- Fujita, T. T. (1978). Manual of downburst identification for Project NIMROD. SMRP Research Paper 156, University of Chicago, 104 pp.
- García-Ortega, E., López, L., Sanchez, J. (2009). Diagnosis and sensitivity study of two severe storm events in the Southeastern Andes. *Atmospheric Research*. 93. 161-178, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.10.030>
- Houze, R. A. Jr., Rasmussen, K. L., Zuluaga, M. D., Brodzik, S. R. (2015). The variable nature of convection in the tropics and subtropics: A legacy of 16 years of the Tropical Rainfall Measuring Mission satellite. *Rev. Geophys.*, 53, 994-1021, <https://doi.org/10.1002/2015RG000488>
- Lohigorry P., de Elia, R., Russian G. (2018). Pronósticos a muy corto plazo en el Servicio Meteorológico Nacional. Nota Técnica SMN 2018-46, <http://repositorio.smn.gob.ar/handle/20.500.12160/649>
- Lombardo, F. T., Zickar, A. S. (2019). Characteristics of measured extreme thunderstorm near-surface wind gusts in the United States. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 193, 103961, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.103961>
- Kumjian, M. R., Gutierrez, R., Soderholm, J. S., Nesbitt, S. W., Maldonado, P., Luna, L. M., Marquis, J., Bowley, K. A., Imaz, M. A., Salio, P. (2020). Gargantuan Hail in Argentina. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(8), E1241-E1258. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0012.1>
- Matsudo, C. M., Salio, P. V. (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>
- Markowski, P. M., Richardson, Y. P. (2010). *Mesoscale meteorology in midlatitudes*. WileyBlackwell, Southern Gate, Chichester, West Sussex, UK.
- Mezher, R. N., Mercuri, P. (2008). Análisis espacial y temporal de la ocurrencia de eventos de granizo sobre Argentina. IXV Congresso Brasileiro de Meteorologia, São Paulo, Brasil. <https://www.divulgameteo.es/uploads/Granizo-Argentina.pdf>
- Mezher, R. N., Doyle, M., Barros, V. (2012). Climatology of hail in Argentina. *Atmos. Res.*, 114, p. 70-82. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.05.020>
- Montini, T. L., Jones, C., Carvalho, L. M. (2019). The South American low-level jet: a new climatology, variability, and changes. *J. Geophys. Res. Atmos.* 124, 1200–1218. <https://doi.org/10.1029/2018jd029634>
- Mulholland, J. P., Nesbitt, S. W., Trapp, R. J., Rasmussen, K. L., Salio, P. V. (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>
- Nicolini, M., Saulo, A. C. (2006). Modeled Chaco low-level jets and related precipitation patterns during the 1997-1998 warm season. *Meteorology and Atmospheric Physics* 94, 129-143, <https://doi.org/10.1007/s00703-006-0186-7>
- Nicolini, M., García Skabar, Y. (2011). Diurnal cycle in convergence patterns in the boundary layer east of the Andes and convection. *Atmos. Res.*, 100, 377–390, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.09.019>
- Patanella, M. (2021). Precursores de convección profunda asociada a la ocurrencia de tiempo severo en superficie en el centro-norte de la Argentina. Tesis

- de Licenciatura. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, 116 págs. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/121983>
- Piersante, J. (2017). Characteristics of hail events near the sierras de Córdoba, Argentina. SOARS Paper, 20 pp., <https://opensky.ucar.edu/islandora/object/manuscripts\%3A955/datastream/PDF/view>
- Pita, G.L., de Schwarzkopf, M.L.A. (2016). Urban downburst vulnerability and damage assessment from a case study in Argentina. *Nat Hazards* 83, 445–463, <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2323-z>
- Prein, A., Holland, G. (2018). Global estimates of damaging hail hazard. *Weather and Climate Extremes*. 22. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.10.004>
- Pojorlie, K. L., Doering, S., Fowle, M. A. (2013). The record-breaking Vivian, South Dakota hailstorm of 23 July 2010. *J. Oper. Meteor.*, 1, 3–18, <https://doi.org/10.15191/nwajom.2013.0102>.
- Punge, H. J., Kunz, M. (2016). Hail observations and hailstorms characteristics in Europe: A review. *Atmospheric Research*. 176. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.02.012>
- Rasmussen, K. L., Houze, R. A. Jr. (2011). Orographic convection in South America as seen by the TRMM satellite. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 2399–24201 <https://doi.org/10.1175/MWR-D-10-05006.1>
- Rasmussen, K. L., Zuluaga, M. D., Houze, R. A. (2014). Severe convection and lightning in subtropical South America. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 7359–7366, <https://doi.org/10.1002/2014GL061767>
- Repinaldo, H. F. B., Nicolini, M., García Skabar, Y. (2015). Characterizing the diurnal cycle of low-level circulation and convergence using CFSR data in southeastern South America. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(3):671–690, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0114.1>
- Repinaldo, H. F. B., Nicolini, M., García Skabar, Y. (2017). Iniciación de un sistema convectivo sobre las sierras de Córdoba y sensibilidad a modificaciones en el perfil orográfico. *Meteorologica*, Centro Argentino de Meteorólogos, Vol 42 N°2 (2017) 23-42, http://www.meteorologica.org.ar/wp-content/uploads/2018/01/Repinaldo_y-otros_Vol42N2.pdf
- Repinaldo, H. F. B. (2019). Estudio de mecanismos de escala sinoptica y/o mesoescala que controlan la iniciacion y la regeneracion de la conveccion profunda en el Noroeste Argentino y en la region de las Sierras de Cordoba. Tesis de Doctorado. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 284 págs.
- Romatschke, U., Houze, R. A. Jr. (2010). Extreme summer convection in South America. *J. Clim.*, 23, 3761–3791, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3465.1>
- Salio, P., Nicolini, M. (2006). Seasonal characterization on the diurnal cycle of convection frequency over southeastern South America under different low-level jet conditions. En *Proceedings of the 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*, Foz do Iguacu, Brazil, pp. 1157–1162.
- Saulo, C., Ruiz, J., Skabar, Y. G. (2007). Synergism between the Low-Level Jet and Organized Convection at Its Exit Region, *Monthly Weather Review*, 135(4), 1310–1326. <https://doi.org/10.1175/MWR3317.1>
- Stensrud, D. J. (1996). Importance of Low-Level Jets to Climate: A Review. *Journal of Climate*, 9(8), 1698–1711. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009\%3C1698:IOLLJT\%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009\%3C1698:IOLLJT\%3E2.0.CO;2)
- Velasco, I., Fritsch, J. M. (1987). Mesoscale convective complexes in the Americas. *Journal of Geophysical Research* 92, <https://doi.org/10.1029/JD092iD08p09591>
- Vidal, L. (2014). Convección Extrema sobre Sudamérica: Estructura Interna, Ciclos de Vida e Influencia de la Topografía en la Iniciación. Tesis de Doctorado. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y

Naturales, Universidad de Buenos Aires, 274
págs.

Vila, D., Machado, L., Laurent, H., Velasco, I.
(2008). Forecast and Tracking the Evolution
of Cloud Clusters (ForTraCC) Using
Satellite Infrared Imagery: Methodology and
Validation. *Weather and Forecasting*. 23,
<https://doi.org/10.1175/2007WAF2006121.1>