

# Evento de vientos destructivos sobre el centro de Argentina durante el 16 y 17 de diciembre de 2023

Nota Técnica SMN 2024-191

**Marcos Saucedo<sup>1</sup>, Ramón de Elía<sup>2</sup>, Luciano Vidal<sup>2</sup>, Cynthia Matsudo<sup>2</sup>, Silvina Righetti<sup>2,4</sup>, Alicia Cejas<sup>1</sup>, David Diaz<sup>1</sup>, Nicolás Pérez<sup>1</sup>, Paula Hobouchian<sup>2</sup>, Roxana Vasques Ferro<sup>3</sup>, Claudia Ribero<sup>3</sup>, Melissa Patanella<sup>1</sup>, Pablo Irurzun<sup>1</sup>, Hernán Bechis<sup>4,5</sup>, Daniela D´Amen<sup>1</sup>, Paola Salio<sup>4,5</sup>, Yanina García Skabar<sup>2</sup>, Sebastián Pérez<sup>1</sup>, Carlos Sánchez<sup>1</sup>, Cecilia Fiol<sup>1</sup>, Ricardo Vidal<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Dirección Nacional de Pronósticos y Servicios para la Sociedad*

<sup>2</sup> *Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios*

<sup>3</sup> *Dirección de Meteorología Aeronáutica*

<sup>4</sup> *DCAO, FCEyN, UBA*

<sup>5</sup> *CIMA, CONICET-UBA*

Diciembre 2024



Ministerio de Defensa  
Argentina

### *Información sobre Copyright*

*Este reporte ha sido producido por empleados del Servicio Meteorológico Nacional con el fin de documentar sus actividades de investigación y desarrollo. El presente trabajo ha tenido cierto nivel de revisión por otros miembros de la institución, pero ninguno de los resultados o juicios expresados aquí presuponen un aval implícito o explícito del Servicio Meteorológico Nacional.*

*La información aquí presentada puede ser reproducida a condición que la fuente sea adecuadamente citada.*

## Resumen

Entre el 16 y 17 de diciembre de 2023 una serie de eventos convectivos tuvieron lugar sobre la región central del país, predominantemente en la provincia de Buenos Aires. Los impactos más graves se produjeron en la ciudad de Bahía Blanca y el área metropolitana de Buenos Aires, dejando numerosas víctimas fatales, heridos y amplios daños. Esta Nota Técnica describe el evento en sus diferentes estadios, desde la predicción, pasando por su monitoreo a través de observaciones convencionales y sensores remotos, hasta la evaluación de los daños. Particularmente, se destaca el esfuerzo puesto en el estudio de predictibilidad del evento y la discusión sobre el uso de los modelos numéricos por los pronosticadores. Este estudio, con su intento de analizar el evento desde muchas perspectivas distintas, es una oportunidad para plasmar los desafíos a los que se ven sometidos los pronosticadores durante eventos extremos.

## Abstract

Between December 16 and 17, 2023, a series of convective events occurred over the central region of Argentina, predominantly in the province of Buenos Aires. The most severe impacts occurred in the city of Bahia Blanca and the metropolitan area of Buenos Aires, leaving numerous fatalities, injuries and extensive damage. This Technical Note describes the event in its different stages, from its prediction, through its monitoring by means of conventional observations and remote sensing, to damage assessment. Emphasis is placed on the study of the predictability of the event and a description of the use of numerical models by forecasters. This study, with its attempt to analyze the event from many different perspectives, is an opportunity to capture the challenges faced by forecasters during extreme events.

**Palabras clave:** Estudio de caso, tormenta convectiva, viento, alto impacto

## Citar como:

Saucedo, M., R. de Elía, L. Vidal, C. Matsudo, S. Righetti, A. Cejas, D. Diaz, N. Pérez, P. Hobouchian, R. Vasques Ferro, C. Ribero, M. Patanella, P. Irurzun, H. Bechis, D. D'Amén, P. Salio, Y. García Skabar, S. Pérez, C. Sánchez, C. Fiol, R. Vidal, 2024: Evento de vientos destructivos sobre el centro de Argentina durante el 16 y 17 de diciembre de 2023. Nota Técnica SMN 2024-191.

## 1. INTRODUCCION

Durante el 16 y 17 de diciembre de 2023 la zona central de Argentina estuvo afectada por un gran sistema convectivo que provocó importantes daños y pérdidas humanas. La intensidad del evento y su impacto social estimularon la realización de diferentes informes internos dentro del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) los cuales fueron utilizados para la comunicación al público y con autoridades nacionales (ver por ejemplo [informe](#)).

La coincidencia de este evento con el inicio de un proyecto piloto<sup>1</sup> sobre la verificación de modelos del Centro Europeo para el Pronóstico a Mediano Plazo (ECMWF, por sus siglas en ingles) en la región, estimuló la elección de este destructivo evento como objeto de estudio. Esto provocó que durante varios meses se analicen en detalle varios aspectos asociados a su desarrollo. En el transcurso de estas actividades los representantes del SMN en el proyecto se familiarizaron con el catálogo de Eventos Severos del ECMWF que propone una aproximación centrada en la predictibilidad de los eventos y la performance de los modelos (Magnusson 2019, ver [catálogo](#)). Al mismo tiempo que este análisis era llevado adelante, la iniciativa de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) *High Impact Weather* (HIWeather), impulsaba el estudio de casos extendidos a toda la cadena de valor (ver [Warning Value Chain Project](#)). Dada la importancia de esta propuesta y el impacto positivo que puede tener en una institución como el SMN, se decidió que la presente Nota Técnica debería aprovechar tanto las lecciones del proyecto piloto como las recomendaciones de HIWeather.

Esta Nota Técnica es el resultado del trabajo de muchas personas y de la colaboración de otras tantas tanto del ámbito del SMN como del sector académico. Debido a su ambicioso objetivo y la multiplicidad de temas involucrados, este documento es inusualmente largo lo que dificulta no solo la lectura sino su misma redacción y calidad de terminación. Pero dado lo interesante que resultaba recopilar esta información en un solo documento se coincidió en que sus virtudes superaban sus evidentes desventajas.

Un antecedente importante a este estudio es Torres Brizuela y otros (2010), donde se estudió un evento convectivo muy intenso de octubre de 2008 que tuvo lugar en la provincia de Buenos Aires. El artículo se centró sobre todo en los aspectos sinópticos, aprovechando también la información disponible de satélite y de los radares de Pergamino y Ezeiza.

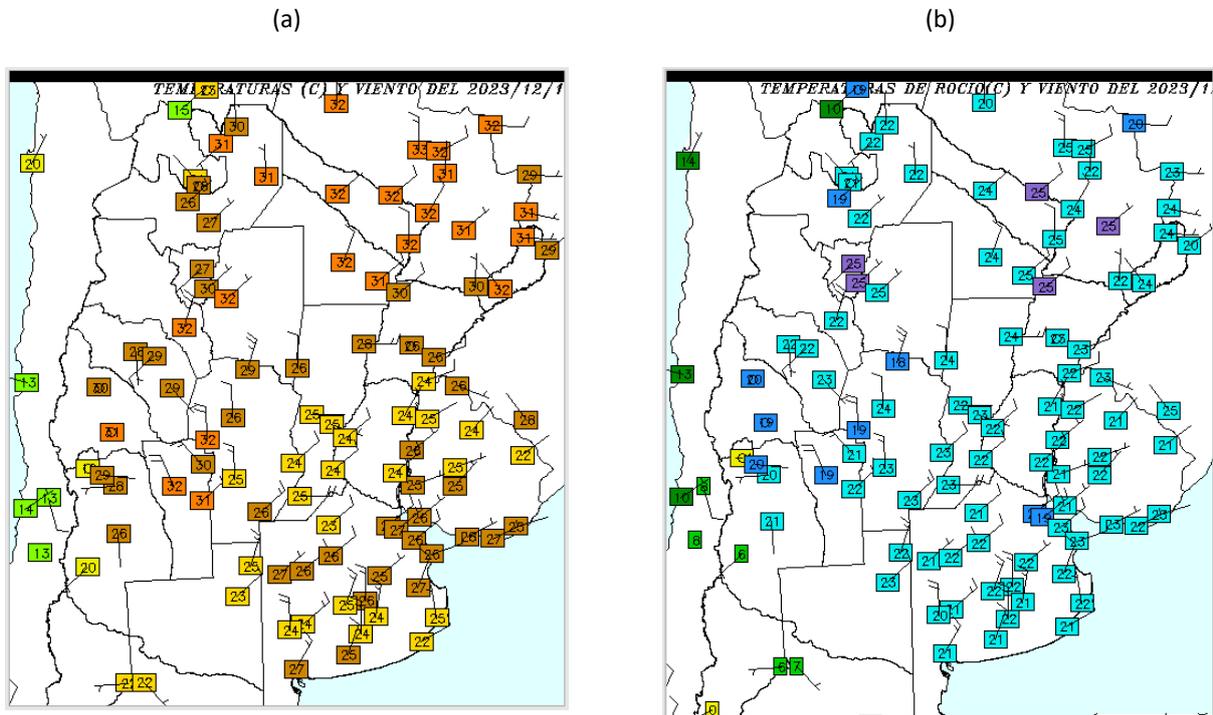
## 2. DESCRIPCIÓN DEL EVENTO

### 2.1 Situación meteorológica general

La situación meteorológica asociada al evento se caracterizó por la presencia de una masa de aire cálido, muy húmeda e inestable que se ubicaba sobre el centro y norte del país. Sobre el norte de la región patagónica se ubicaba una zona frontal (Fig. 1), que comenzaba a desplazarse hacia el centro del país. Al norte de dicho sistema en horas de la tarde del sábado 16 de diciembre las temperaturas se ubicaban entre los 29 y 35°C (Fig. 1a) con puntos de rocío entre 19 y 25°C (Fig. 1b).

---

<sup>1</sup> El proyecto piloto *South American Regional Model Verification Pilot project* liderado por WGNE y JWGFVR de la OMM comenzó en enero de 2024 y esta Nota Técnica es uno de sus resultados (ver <https://wgne.net/activities/on-going-activities/>).

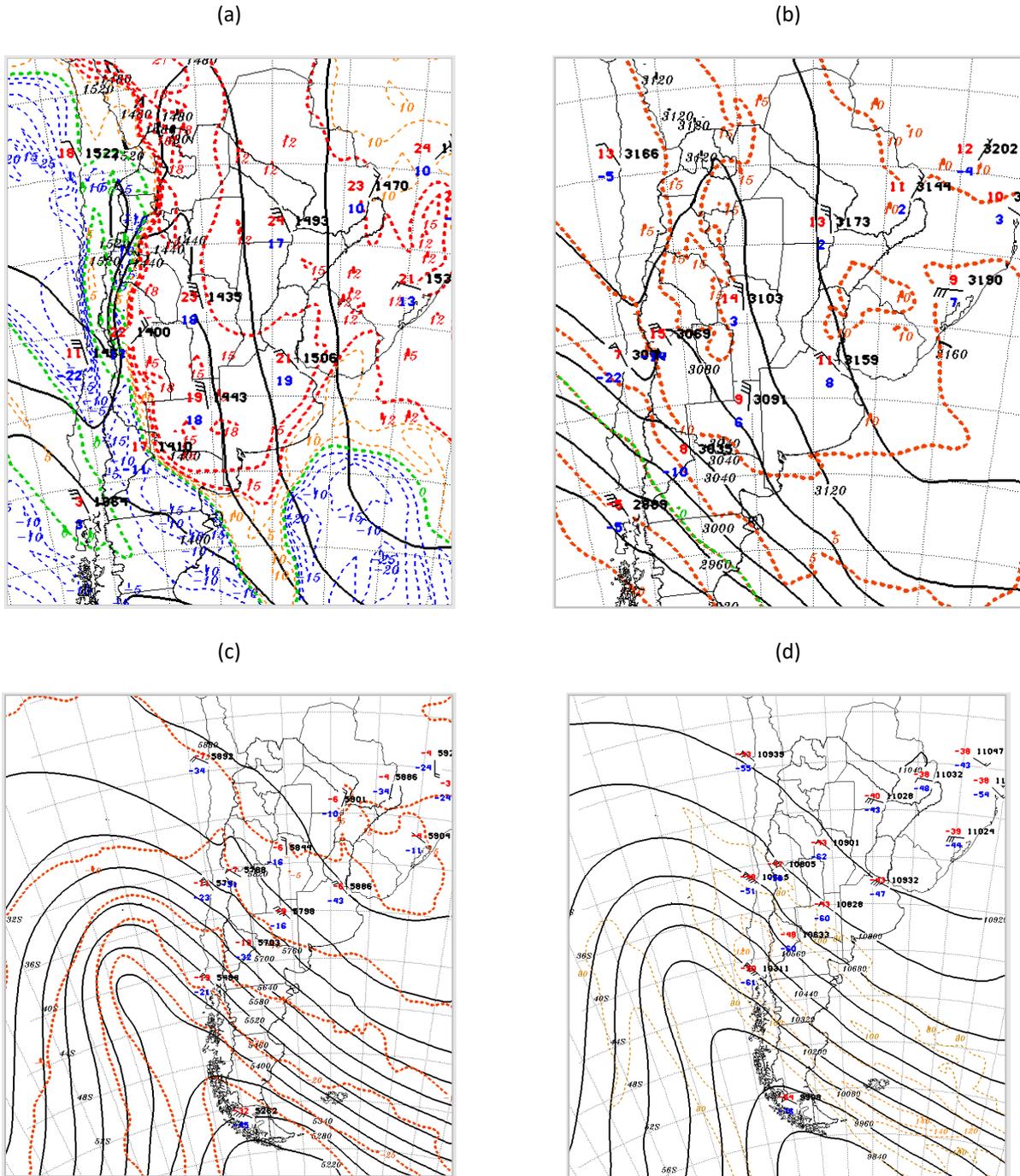


**Figura 1:** Viento y temperatura (a) y punto de rocío (b) observados a las 09 HOA del sábado 16 de diciembre de 2023.

Esta masa de aire muy húmedo se observaba también en el nivel de 850 hPa en la mañana del sábado 16 de diciembre con puntos de rocío por encima de los 12°C desde el norte de Río Negro hacia el norte de país, gracias a un flujo proveniente del sector norte (Fig. 2a). En niveles medios y altos de la tropósfera se ubicaba una importante vaguada o eje de mínima presión sobre el Océano Pacífico (Fig. 2b, 2c y 2d), la cual avanzaba hacia el este dando lugar a la formación de lluvias y tormentas sobre las provincias de Mendoza, Río Negro, La Pampa y San Luis. Este sistema, además, provocó condiciones de viento zonda en la tarde y noche del sábado 16 en las provincias de Mendoza y San Juan, con temperaturas máximas que alcanzaron los 45°C.

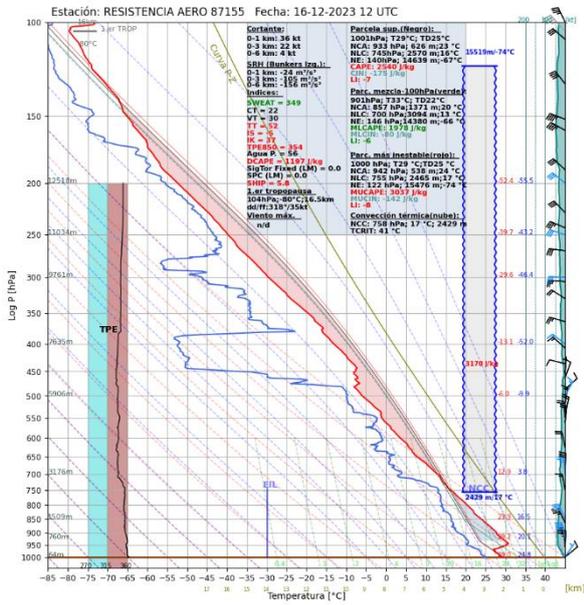
La información de radiosondeos de la mañana del sábado 16 daba cuenta de la inestabilidad de la masa de aire sobre el centro y norte del país según se aprecia en Resistencia (Fig. 3a), Córdoba (Fig. 3b), Aeroparque (Fig. 3c), Mendoza (Fig. 3d) y Santa Rosa (Fig. 3e). Para dar una idea de la inestabilidad de la masa de aire, en estos sondeos se evidencian valores de MUCAPE por encima de los 2000 J/kg desde la mañana del día 16, con picos en horas de la tarde entre 3000 y 4500 J/kg, junto con valores de agua precipitable del orden de los 40 a 50 mm. Asimismo, se aprecia en el sondeo de Santa Rosa vespertino un flujo del noreste de 20 nudos a 500 metros de altura, rotando al norte a 30 nudos en el nivel de 1000 metros (Fig. 4a), lo cual denota una fuerte cortante vertical del viento en los niveles más bajos. En consecuencia, el riesgo de tormentas severas era muy elevado en la región, incluso cabía esperar la posible ocurrencia de tornados en este entorno. Cabe destacar que en los sondeos vespertino y nocturno de Aeroparque se aprecia un flujo de viento del norte en los primeros 500 metros con una intensidad del orden de los 40 nudos, dando una cortante muy intensa. Esto podría generar condiciones propicias para la ocurrencia de líneas de inestabilidad y arcos muy violentos (Fig. 4b y 4c), lo cual acontecería en las primeras horas del domingo 17. Finalmente, en el sondeo de Neuquén se aprecia que la masa de aire era mucho más seca en comparación con las provincias del centro del país (Fig. 3f). No obstante, había inestabilidad en la región,

con valores de MUCAPE del orden de los 1000 J/kg. Otro aspecto para destacar de este sondeo es el fuerte flujo del noroeste en los niveles medios y altos que daba cuenta de la proximidad de la intensa vaguada que se ubicaba al oeste.

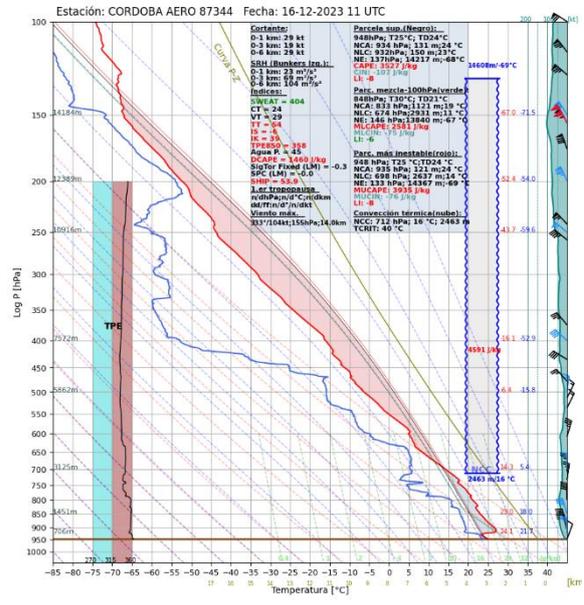


**Figura 2:** Geopotencial (líneas negras continuas) e isodrosotermas (líneas punteadas) en 850 hPa (a), geopotencial e isotermas (líneas punteadas) en 700 hPa (b) y en 500 hPa (c), y geopotencial e isotacas (líneas punteadas) en 250 hPa (d) correspondientes a las 12 UTC del 16 de diciembre de 2023 provenientes del análisis del modelo Global Forecasting System (GFS), junto con datos ploteados de radiosondeos.

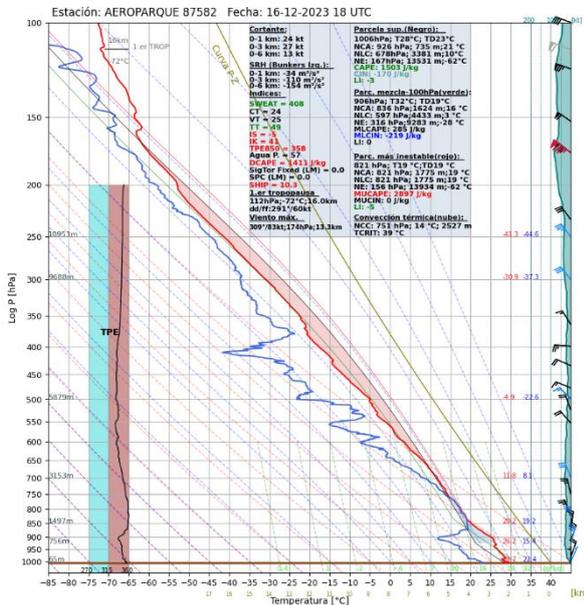
(a)



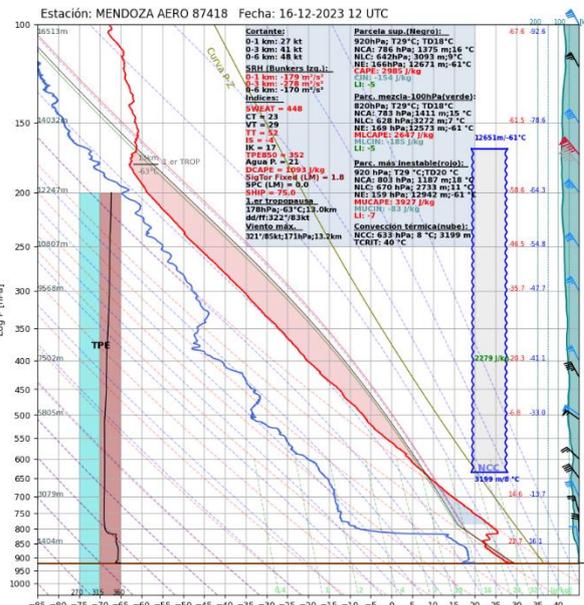
(b)



(c)



(d)



(e)

(f)

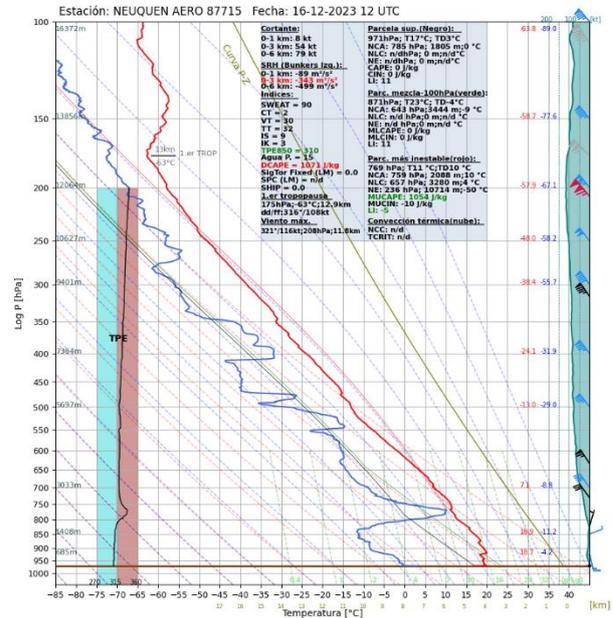
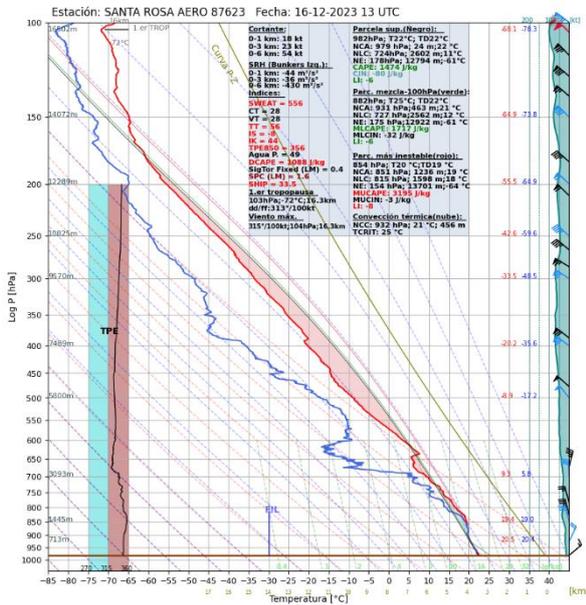
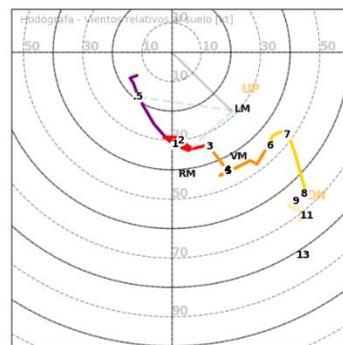
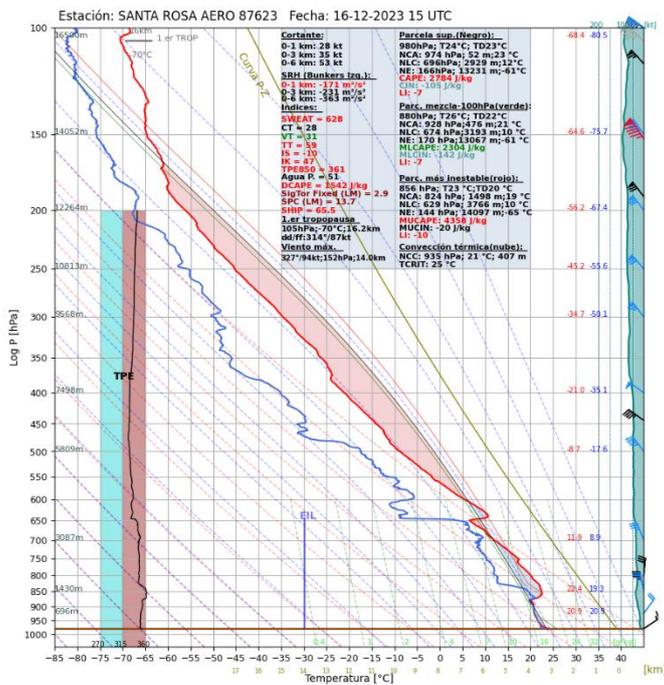


Figura 3: Radiosondeos correspondientes a las 1200 UTC del sábado 16 de diciembre de (a) Resistencia, (b) Córdoba, (c) Aeroparque, (d) Mendoza, (e) Santa Rosa y (f) Neuquén.

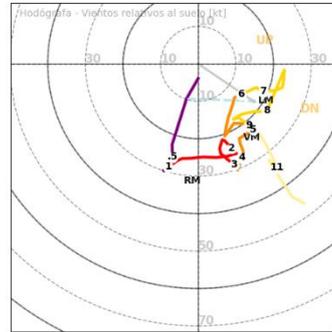
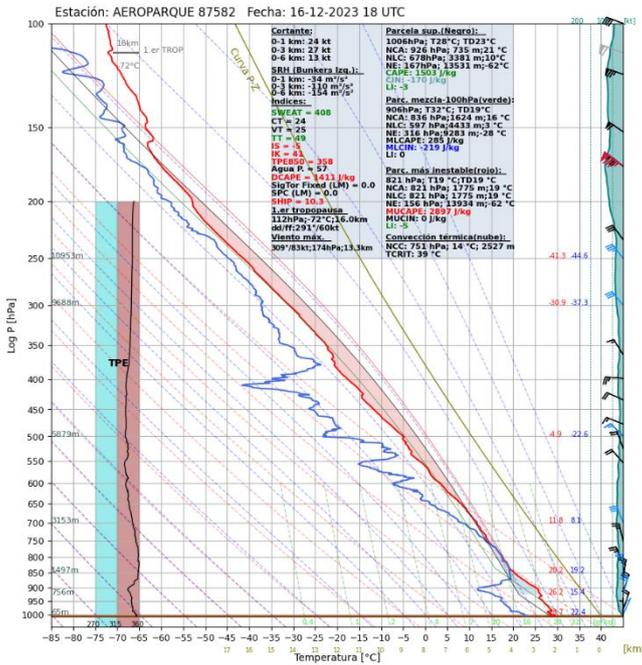
(a)



Viento medio (VM): SSE @ 40 kts  
 Vector Bunkers derecha (RM): S @ 42 kts  
 Vector Bunkers izquierda (LM): SE @ 28 kts  
 Vector Corfidi cortante arriba (UP): ESE @ 30 kts  
 Vector Corfidi cortante abajo (DN): SE @ 69 kts

Detalles de medición  
 Inicio: 2023-12-16 14:53:28 UTC; fin: 2023-12-16 16:15:50 UTC  
 Formato: BUFR FM-94  
 Soft. Ver: Eoscan 1.9.2  
 Sonda: Modem M20 radiosonde w/thermistor sensor, capacitance relative humidity sensor, and derived pressure from GPS height (France)

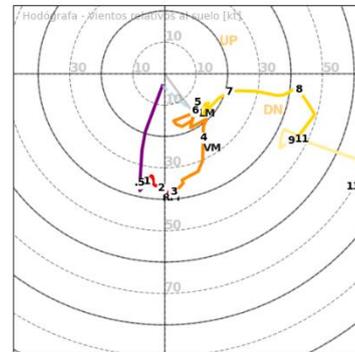
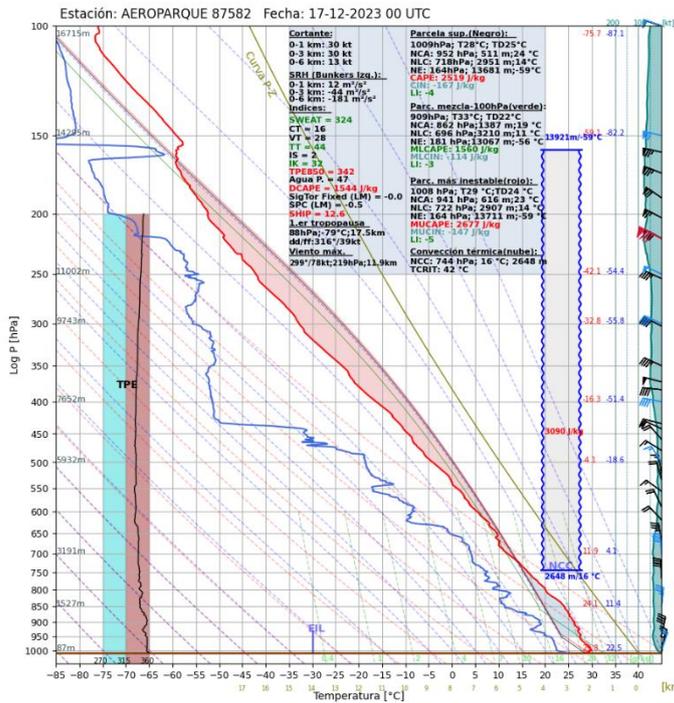
(b)



Viento medio (VM): SSE @ 22 kts  
 Vector Bunkers derecha (RM): UND @ 31 kts  
 Vector Bunkers izquierda (LM): ESE @ 18 kts  
 Vector Corfidi cortante arriba (UP): ENE @ 18 kts  
 Vector Corfidi cortante abajo (DN): ESE @ 32 kts

**Detalles de medición**  
 Inicio: 2023-12-16 17:38:02 UTC; fin: 2023-12-16 18:52:41 UTC  
 Formato: BUFR FM-94  
 Soft. Ver: MW41 2.4.0  
 Sonda: Vaisala RS41 with pressure derived from GPS height/  
 DigicORA MW41 (Finland)

(c)

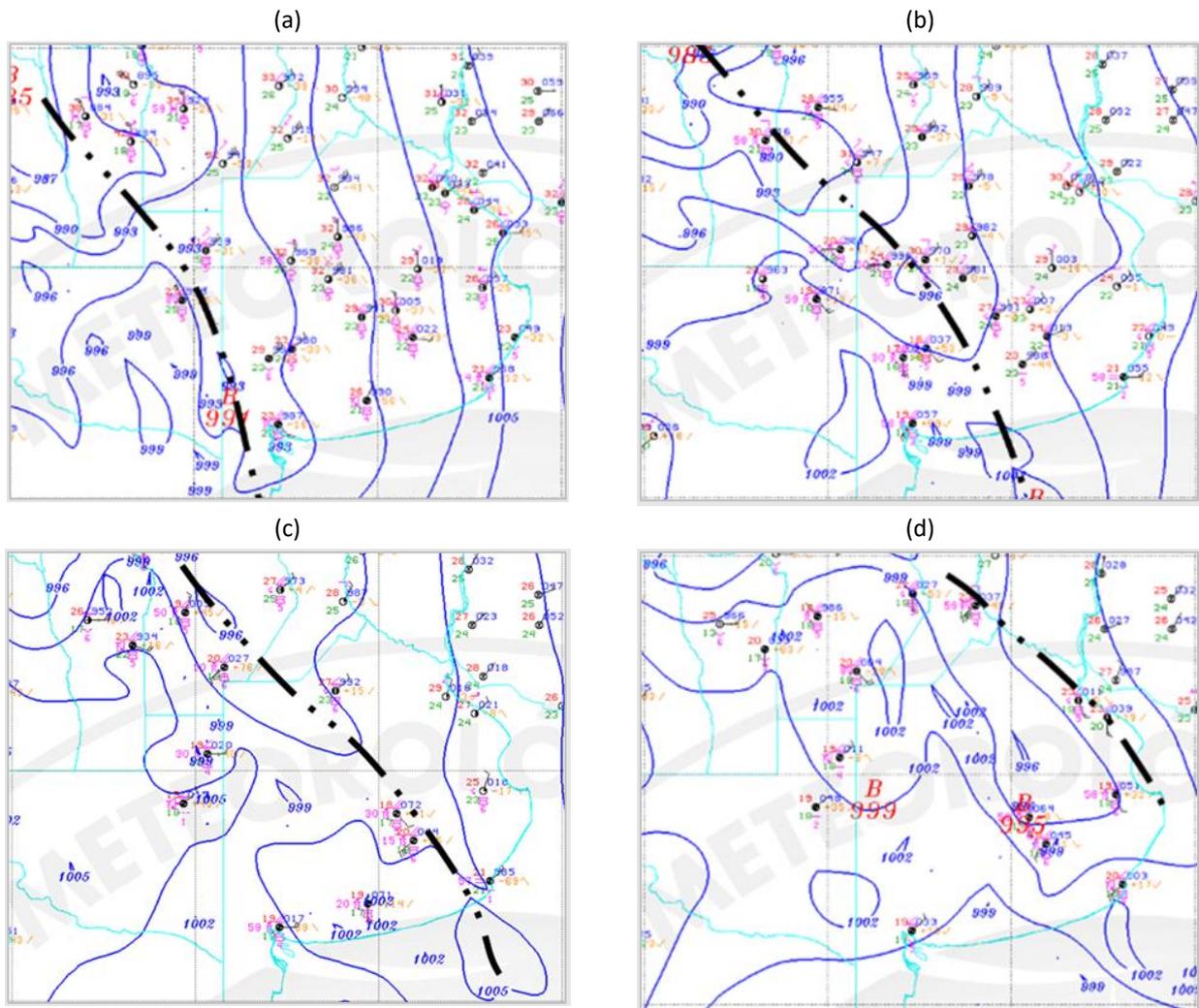


Viento medio (VM): SSE @ 27 kts  
 Vector Bunkers derecha (RM): UND @ 40 kts  
 Vector Bunkers izquierda (LM): SE @ 16 kts  
 Vector Corfidi cortante arriba (UP): ENE @ 22 kts  
 Vector Corfidi cortante abajo (DN): ESE @ 36 kts

**Detalles de medición**  
 Inicio: 2023-12-16 23:37:53 UTC; fin: 2023-12-17 00:41:30 UTC  
 Formato: BUFR FM-94  
 Soft. Ver: MW41 2.4.0  
 Sonda: Vaisala RS41 with pressure derived from GPS height/  
 DigicORA MW41 (Finland)

**Figura 4:** Radiosondeos correspondientes a las 1800 UTC del sábado 16 de diciembre de (a) Aeroparque y (b) Santa Rosa, y a las 0000 UTC del 17 de diciembre de (c) Aeroparque.

Toda la situación detallada previamente podría explicar la formación de tormentas de variada intensidad desde las primeras horas del sábado 16 de diciembre sobre La Pampa, Río Negro, este de Mendoza y San Luis. En horas de la tarde comenzó a tomar forma un sistema convectivo sobre las provincias de San Luis, La Pampa y el este de Río Negro, el cual fue propagándose hacia el este entre finales de la tarde, la noche del sábado 16 (Fig. 5b y 5c) y durante la madrugada del domingo 17 (Fig. 5d, 5e y 5f).



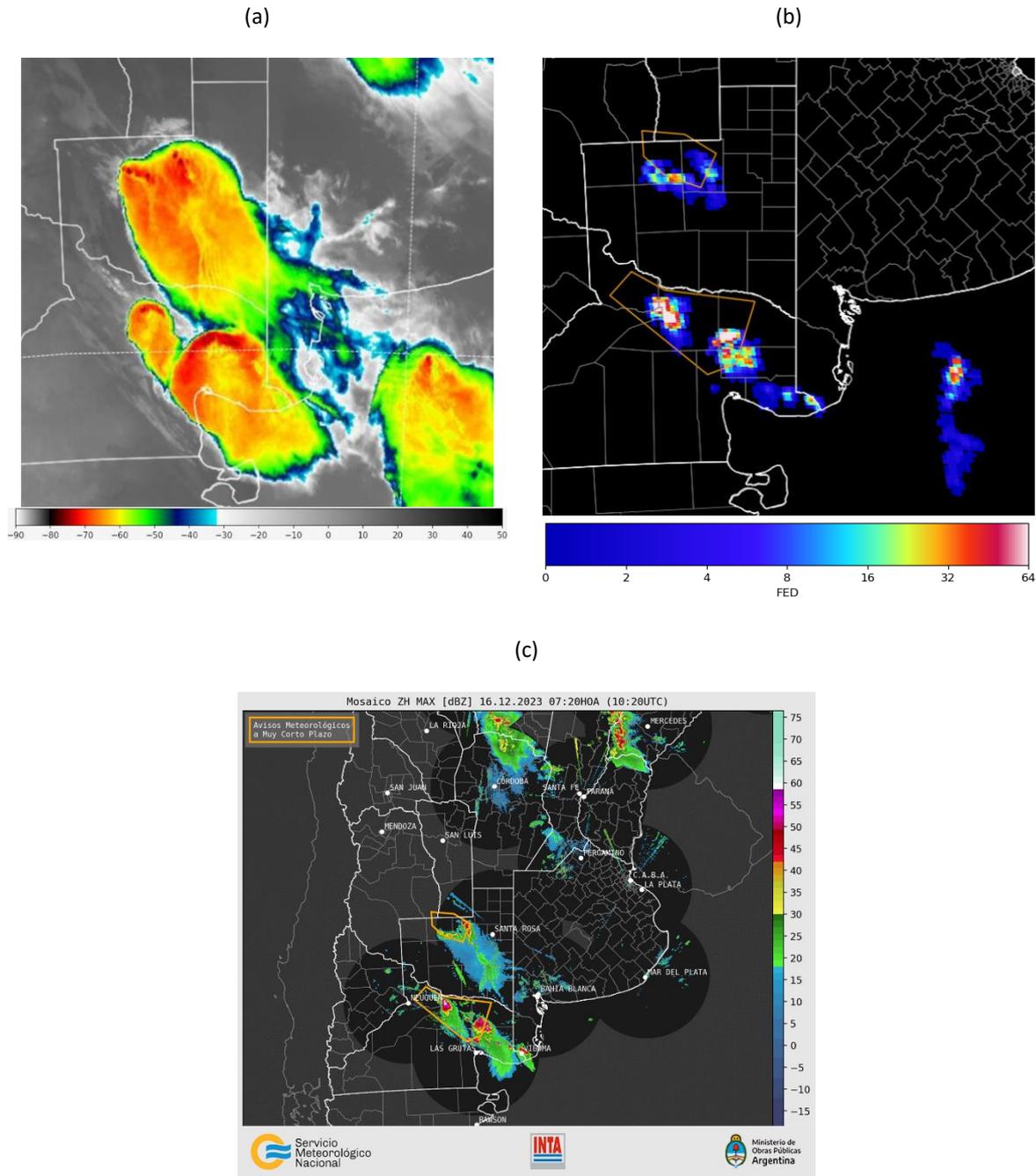
**Figura 5:** Campo de presión en superficie con la posición estimada de la línea de inestabilidad a las 21:00 UTC del 16 (a), a las 00:00 (b), a las 03:00 (c) y 06:00 (d) del 17 de diciembre de 2023.

Si bien los fenómenos asociados a este evento dejan su traza en las observaciones convencionales, es en la información proveniente de sensores remotos donde su naturaleza se puede apreciar con más detalle.

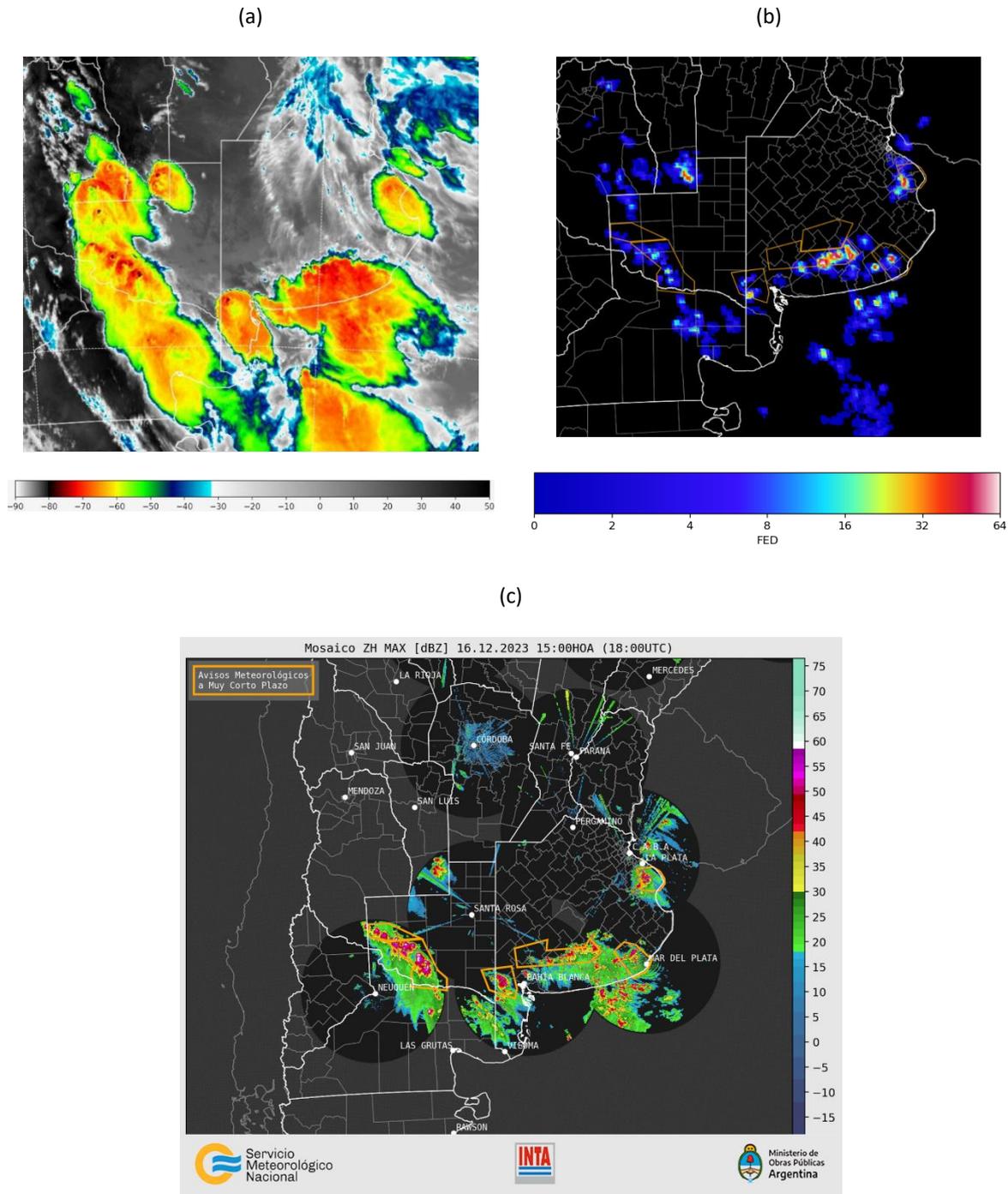
## 2.2 Monitoreo con sensores remotos

La madrugada del sábado 16 de diciembre comenzaron a desarrollarse tormentas de variada intensidad sobre el noreste de la provincia de Río Negro y centro de La Pampa (Fig. 6). Puntualmente estas tormentas ya mostraban indicios de severidad al menos distinguibles en los toques emergentes (“overshooting tops”)

muy bien definidos y que son un indicador del potencial severo de este tipo de tormentas, junto con la intensa actividad eléctrica (Fig. 6b) y valores significativos de reflectividad (>55dBZ) (Fig. 6c). Otras fuentes de información muestran que estas tormentas se extendieron en la vertical por encima de los 10 kilómetros.



**Figura 6:** (a) Imagen de temperatura de topes nubosos del satélite GOES-16 correspondiente al 16/12/2023 a las 7:20 hora local (10:20 UTC). (b) Actividad eléctrica observada con el sensor GLM a bordo del satélite GOES-16 para el mismo día y hora. (c) Compuesto de reflectividad máxima de la columna de la red SINARAME. En color naranja se muestran los polígonos correspondientes a los Avisos meteorológicos a muy a corto plazo (ACPs) vigentes en ese momento. Para más información sobre los ACP ver Ishikame y otros (2022).



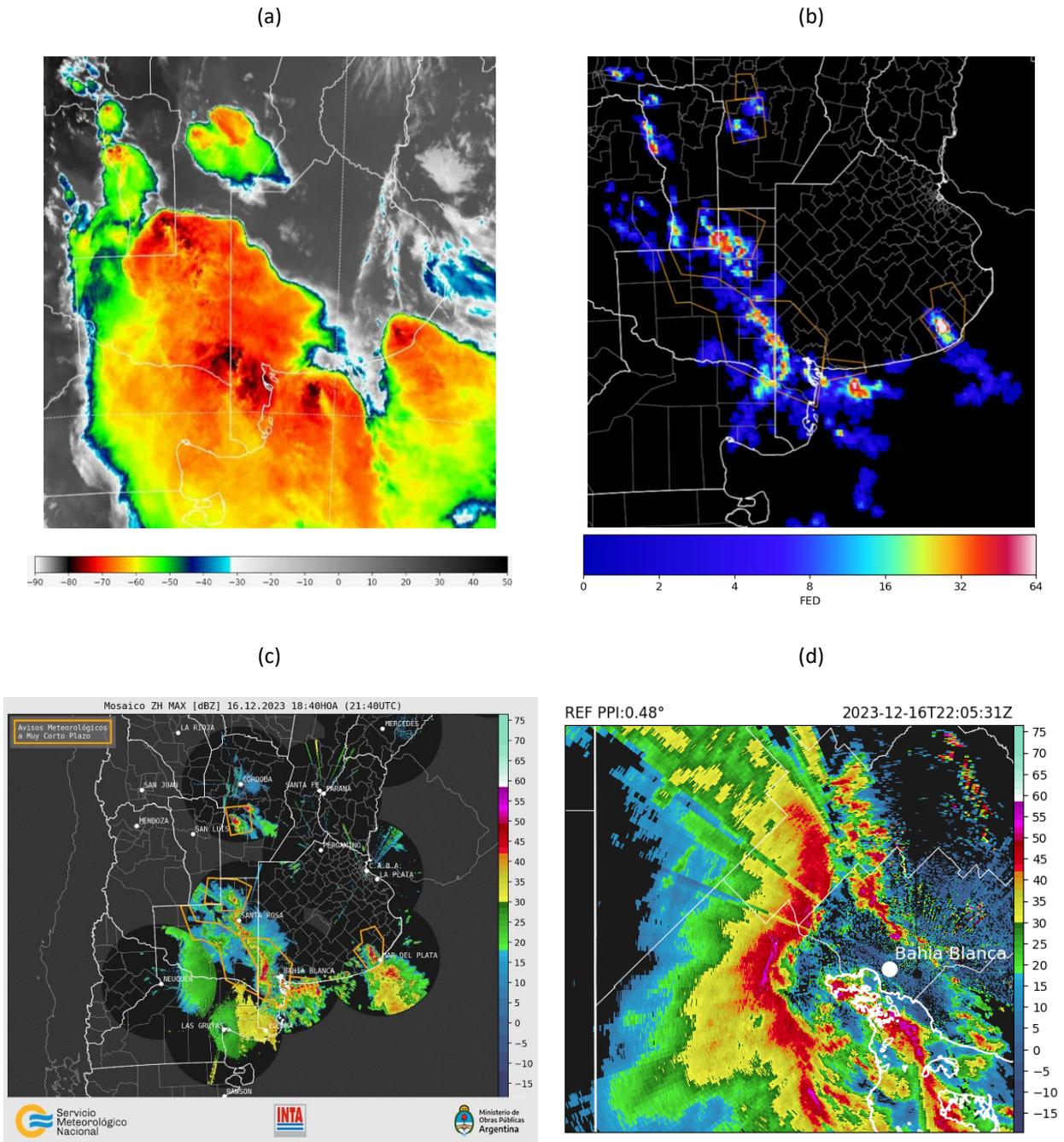
**Figura 7:** (a) Imagen de temperatura de topes nubosos del satélite GOES-16 correspondiente al 16/12/2023 a las 15:00 hora local (18:00 UTC). (b) Actividad eléctrica observada con el sensor GLM a bordo del satélite GOES-16 para el mismo día y hora. (c) Compuesto de reflectividad máxima de la columna de la red SINARAME. En color naranja se muestran los polígonos correspondientes a los ACP vigentes en ese momento.

Con el correr de las horas, la actividad convectiva se desplazó hacia el este y sudeste, y hacia la tarde comenzaron a activarse nuevos focos de tormenta desde el sur de Mendoza hasta el este de Río Negro, como se puede observar en las imágenes de satélite (tanto de topes nubosos como de actividad eléctrica (Fig. 7 a y b), y en el compuesto de reflectividad (Fig. 7c). Nuevamente estas tormentas mostraron signos de severidad (overshooting tops, lightning jumps, entre otros) y en las horas siguientes se fueron organizando en un extenso sistema convectivo de mesoescala con características severas.

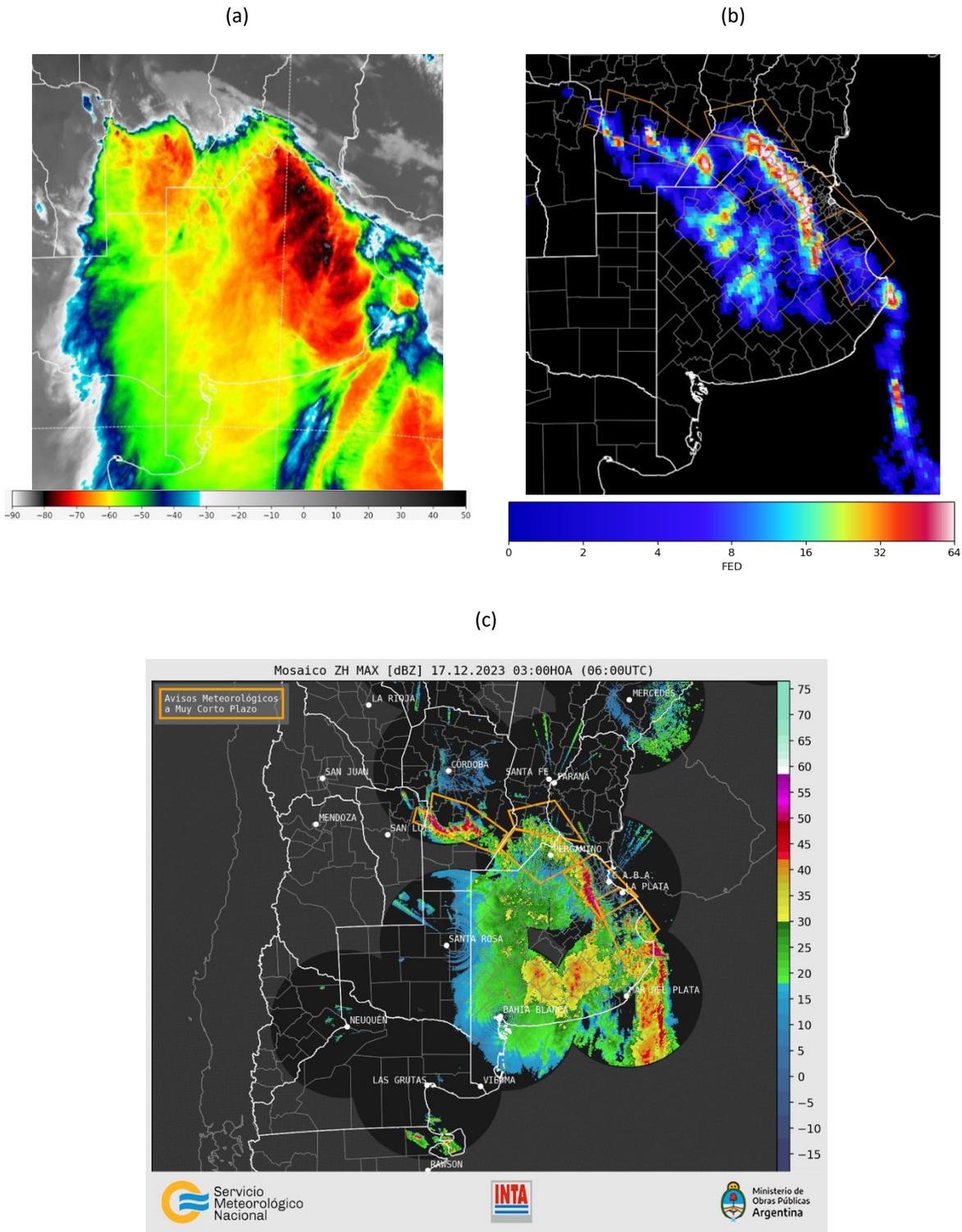
En el inicio de la situación y asociado a los modos convectivos supercelulares se observaron muchos reportes de granizo de tamaño grande y/o gigante y ráfagas severas. Para destacar fueron los daños en las cosechas de cereza en localidades del Valle Medio de Río Negro (reportes de granizo de hasta 4cm). Además, se observó granizo de tamaño gigante (estimado en 12 cm) asociado a la supercelda que pasó por Fortuna, sur de San Luis.

Ya hacia las 18:30 hora local este sistema mostró una organización de tipo línea de inestabilidad (Fig. 8 b y c). En el segmento ubicado sobre el sudoeste de la Provincia de Buenos Aires, se comenzó a observar una estructura en arco en las imágenes de radar dando el indicio de la presencia de tormentas de tipo "bow echo" (Fig. 8d) que cerca de las 19 horas afectaría a la ciudad de Bahía Blanca. El sistema generó fuertes vientos que alcanzaron los 150 km/h con la particularidad de la persistencia de las ráfagas por encima de los 100 km/h al menos por unos 20 a 30 minutos, de acuerdo con el registro de instrumental meteorológico ubicado en el Aeropuerto (Fig. 12a). Esta parte del sistema continuó su movimiento hacia el este y sudeste, mar adentro, mostrando un debilitamiento.

Por otro lado, el resto de la línea continuó su desplazamiento hacia el noreste para mostrar una intensificación sobre el noreste de la provincia de Buenos Aires hacia las 03:00 HOA del domingo 17 de diciembre que terminó afectando el Área Metropolitana de Buenos Aires entre las 03:30 y las 04:00, con ráfagas de viento que superaron los 140 km/h de acuerdo a registros en el Aeroparque Jorge Newbery de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y del Aeropuerto Internacional de San Fernando (ver Fig. 9). El sistema de tormenta nuevamente mostró características de línea de inestabilidad arqueada ("bow echo"), sistemas que producen como principal fenómeno severo fuertes y destructivas ráfagas de viento, además de la ocurrencia en algunos sectores puntuales de este tipo de sistemas de rotaciones que podrían llevar al desarrollo de algún tornado. No obstante, para determinar esto último es necesario llevar a cabo análisis más exhaustivos tanto de los datos observados como de relevamiento en campo.

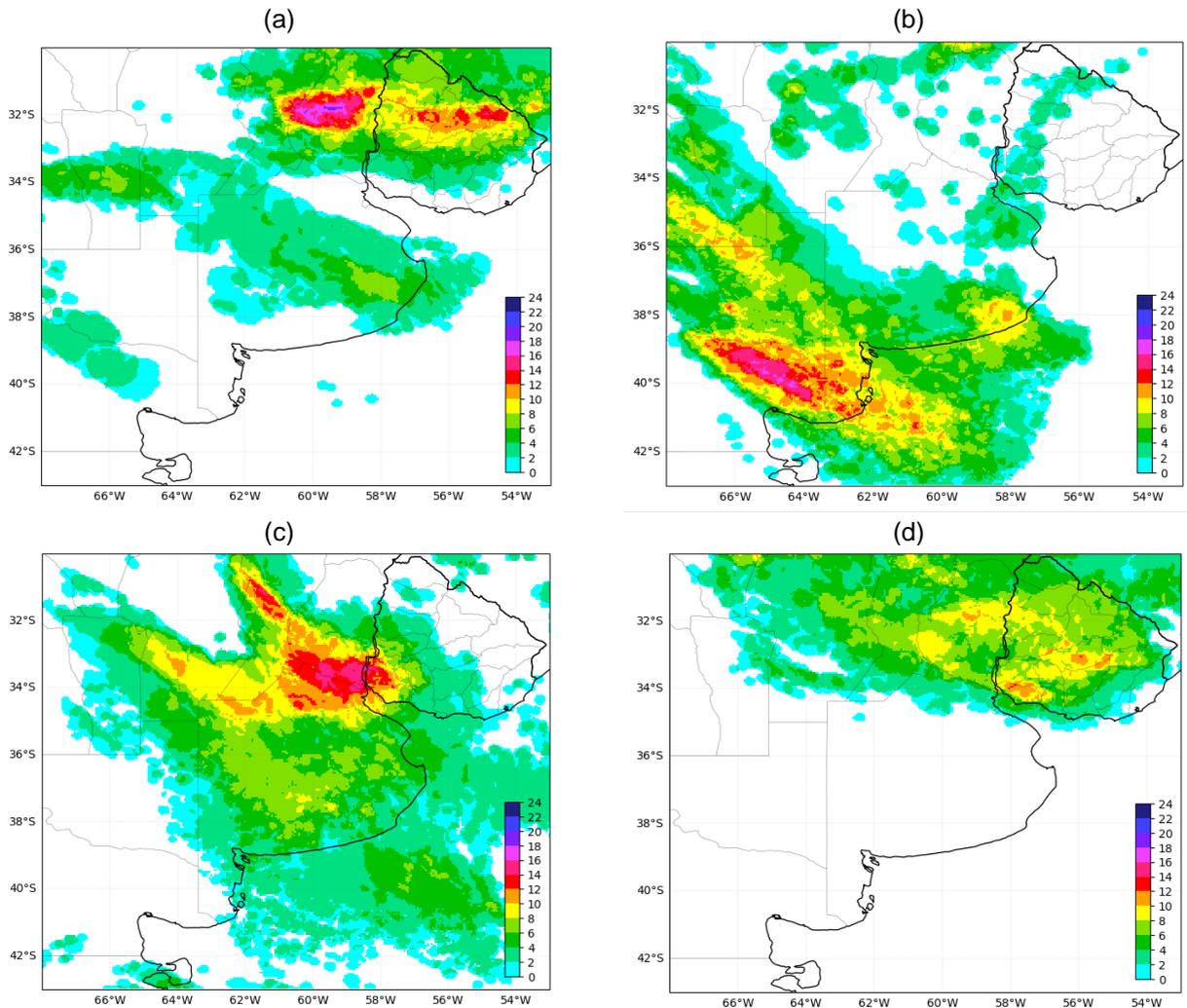


**Figura 8:** (a) Imagen de temperatura de topos nubosos del satélite GOES-16 correspondiente al 16/12/2023 a las 18:40 hora local (21:40 UTC). (b) Actividad eléctrica observada con el sensor GLM a bordo del satélite GOES-16 para el mismo día y hora. (c) Compuesto de reflectividad máxima de la columna de la red SINARAME. En color naranja se muestran los polígonos correspondientes a los ACP vigentes en ese momento. (d) Escaneo de la elevación más baja de reflectividad del radar RMA10-Bahía Blanca del SINARAME de las 19:05 hora local (22:05 UTC).



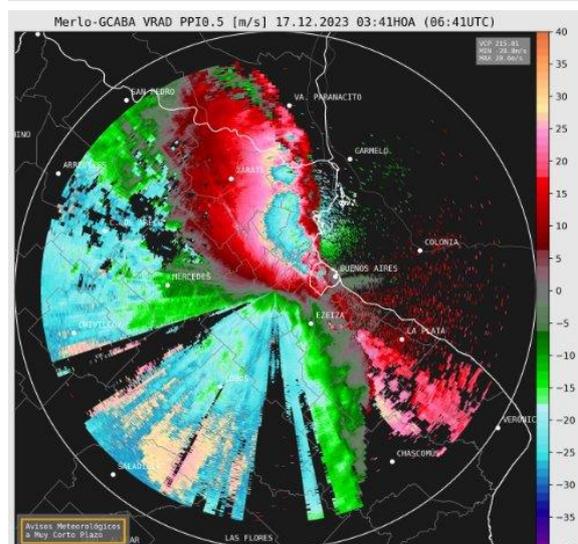
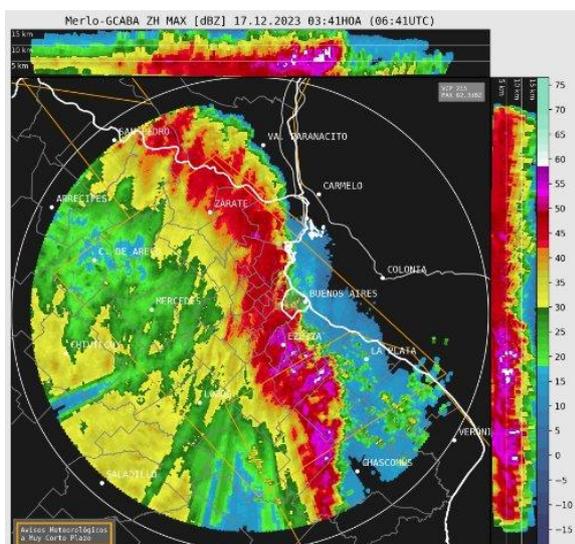
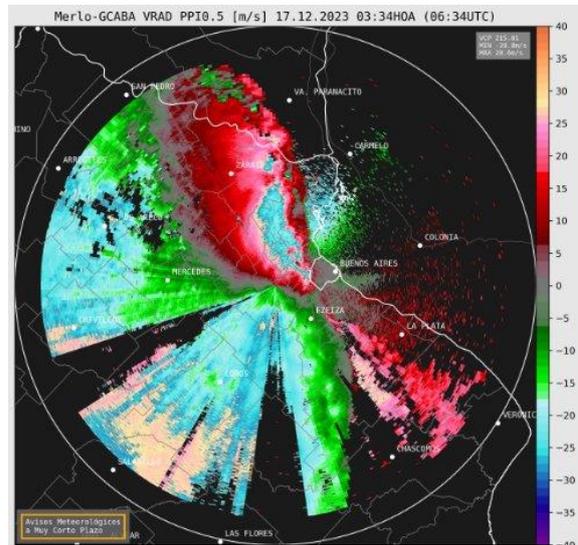
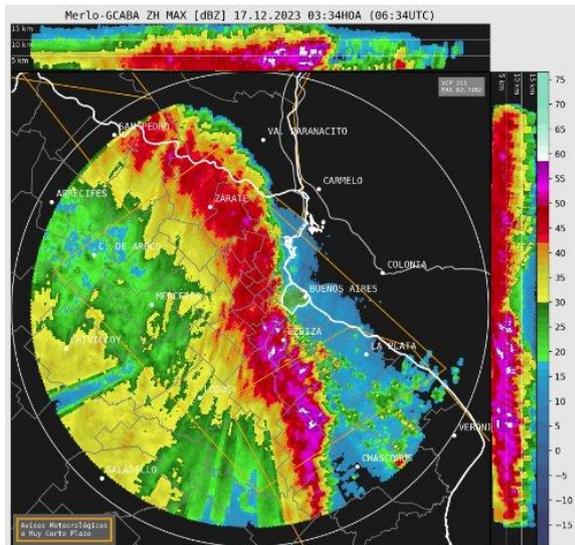
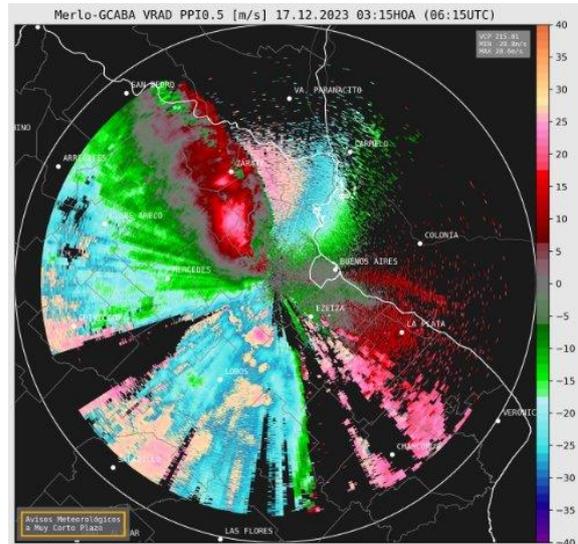
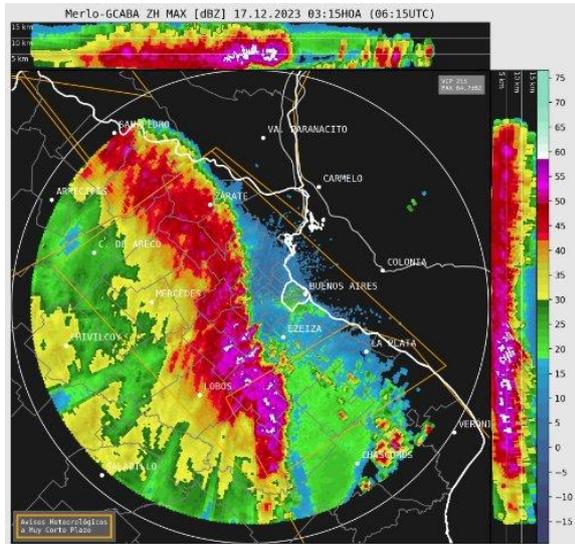
**Figura 9:** (a) Imagen de temperatura de topes nubosos del satélite GOES-16 correspondiente al 17/12/2023 a las 03:00 hora local (06:00 UTC). (b) Actividad eléctrica observada con el sensor GLM a bordo del satélite GOES-16 para el mismo día y hora. (c) Compuesto de reflectividad máxima de la columna de la red SINARAME. En color naranja se muestran los polígonos correspondientes a los ACP vigentes en ese momento.

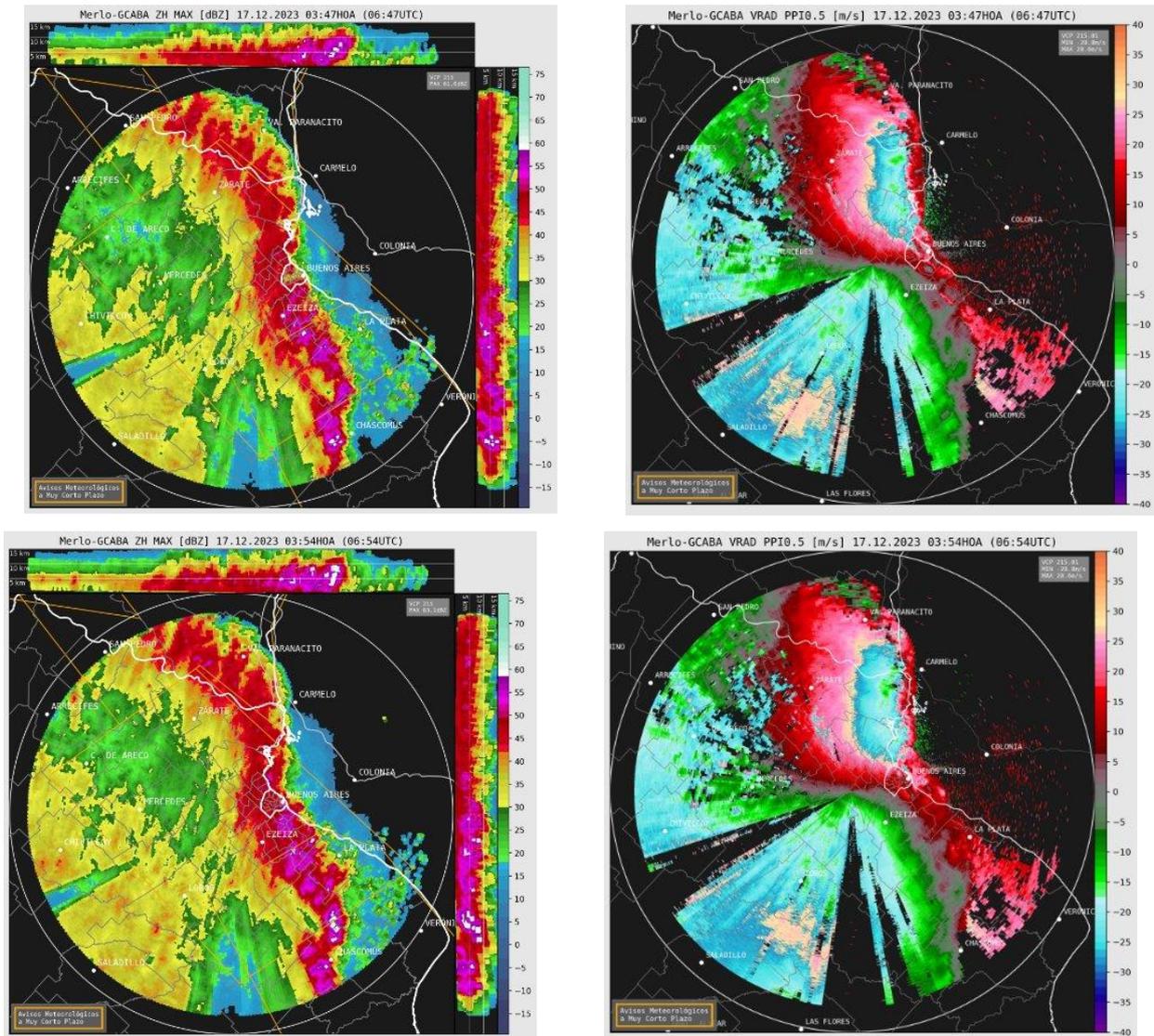
La Figura 10 ilustra la evolución en sucesivos días de la actividad eléctrica en la región de la provincia de Buenos Aires. Cada panel muestra la cantidad de horas con actividad de acuerdo con la barra de colores. Es interesante notar que las zonas con eventos más destructivos estudiadas aquí se han encontrado poco afectadas, aunque sí son cercanas a zonas de gran actividad (ver el caso de Bahía Blanca en el panel b y Ciudad de Buenos Aires en el panel c). Cabe aclarar que sistemas convectivos que se mueven a altas velocidades naturalmente residen un tiempo relativamente corto en la zona por las que evolucionan.



**Figura 10:** Número de horas con actividad eléctrica por día para el (a) 15/12/2023, (b) 16/12/2023, (c) 17/12/2023 y (d) 18/12/2023. Datos provenientes de la red ENTLN Global Lightning Network (DiGangi y otros 2022).

El AMBA y sus alrededores están monitoreados por dos radares meteorológicos, uno ubicado en Ezeiza (Provincia de Buenos Aires) perteneciente al Sistema Nacional de Radares Meteorológicos (SINARAME, Subsecretaría de Recursos Hídricos) y otro perteneciente a la Ciudad de Buenos Aires ubicado en Merlo, Provincia de Buenos Aires. Este segundo radar, que opera en banda S tiene la posibilidad de ofrecer una vista más completa de un evento de esta naturaleza con altas reflectividades y vientos muy fuertes. La Figura 11 muestra la serie temporal de la reflectividad máxima en la columna (izquierda) y Doppler en niveles bajos (derecha) durante la llegada de la línea a la zona del AMBA. El progreso de la reflectividad refleja la parte más intensa al sur de la Ciudad, mientras que la variable Doppler, que nos informa de la componente radial de la velocidad, tiene su máximo hacia el norte.





**Figura 11:** Serie temporal de reflectividad (COLMAX, izquierda) y Doppler de la elevación 0.5° (derecha) del radar ubicado en Merlo perteneciente a la Ciudad de Buenos Aires. Las imágenes ilustran el progreso del sistema entre las 3:15 y las 3:54 hora argentina del 17 de diciembre de 2023.

Una simple estimación de la velocidad del sistema convectivo entre escaneos sucesivos, indica una velocidad media de desplazamiento de la reflectividad de aproximadamente 70 km/h. La velocidad Doppler en superficie indica una componente por detrás de la línea de inestabilidad del sector sur de aproximadamente 90 km/h de forma sostenida. La máxima velocidad radial medida por el radar corresponde a un máximo local en el Delta del Paraná al sudoeste de Carmelo con valores de 170 km/h luego de corregir por aliasing (28,7 m/s). Este viento corresponde a una altura aproximada de 500 m. Este máximo ocurre cerca del centro del jet que se ubica sobre el delta, y cuya componente del viento es paralela al frente en la zona al norte de la Ciudad de Buenos Aires. La estructura curva de la línea de valor cero en la variable Doppler indica que el viento gira rápidamente con la altura hasta convertirse del oeste en los primeros 1000 metros.

## 2.3 Vientos registrados en superficie

La evolución del sistema fue acompañada por ráfagas intensas en varios puntos de la provincia de Buenos Aires, registrándose los valores máximos en las estaciones del SMN descriptos en la Tabla I. Notar que todos los máximos provienen del cuadrante sudoeste.

**Tabla I:** Intensidad de ráfaga máxima (en nudos) registradas en las estaciones del SMN entre la tarde del sábado 16 y la madrugada del domingo 17 de diciembre de 2023.

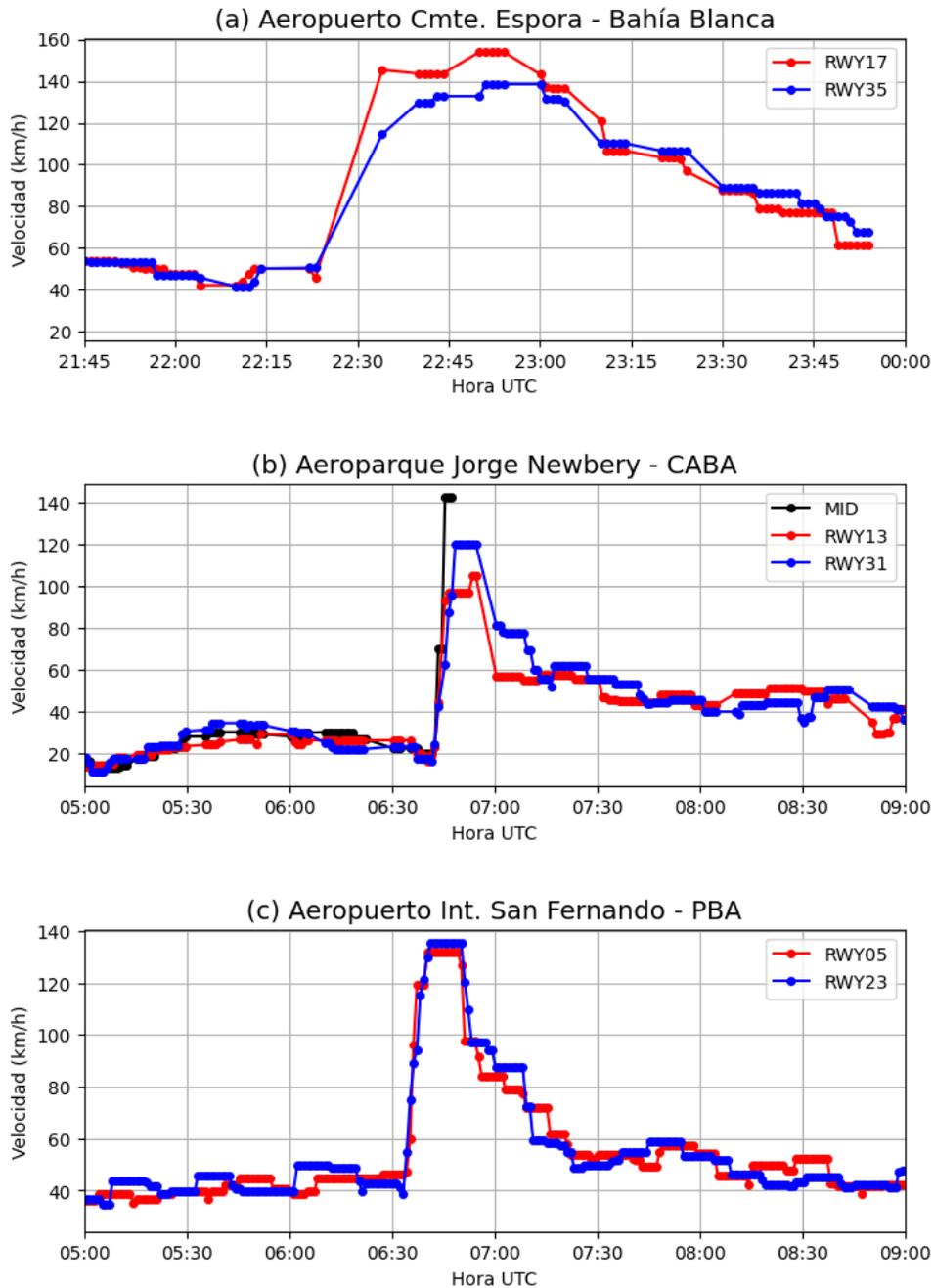
Estación	Fecha y Hora (HOA)	Dirección y Velocidad ráfaga máxima
Bahía Blanca	16/12/23 19:48	250/84 kt (155 km/h)
San Fernando	17/12/23 03:42	240/73 kt (135 km/h)
OCBA	17/12/23 03:42	230/54 kt (100 km/h)
Aeroparque	17/12/23 03:54	210/56 kt (104 km/h)
El Palomar	17/12/23 03:42	230/67 kt (124 km/h)
Morón	17/12/23 03:30	200/60 kt (111 km/h)
Ezeiza	17/12/23 03:30	200/47 kt (87 km/h)
La Plata	17/12/23 04:06	230/51 kt (94 km/h)

La severidad de las ráfagas de viento asociadas a los sistemas que afectaron tanto a Bahía Blanca en la tarde del sábado 16 de diciembre como al AMBA en la madrugada del domingo 17 quedó registrada por los anemómetros de los sistemas de observaciones automática AWOS (por sus siglas en inglés; Fig. 12). En el caso del AWOS ubicado en el Aeropuerto comandante Espora de la ciudad de Bahía Blanca los registros máximos fueron de 138 y 154 km/h (puntos entre sí distantes a aproximadamente 3 kilómetros), con un periodo aproximado de 30 minutos (entre las 22:40 y las 23:10 UTC) donde las ráfagas se mantuvieron por encima de los 120 km/h (Fig. 12a). En el AMBA, los registros máximos fueron de 105 km/h (cabecera 13), 120 km/h (cabecera 31) y 142 km/h (centro de la pista) en el Aeroparque Jorge Newbery, y de 132 km/h (cabecera 05) y 135 km/h (cabecera 23) en el Aeropuerto Internacional de San Fernando. Notar la interrupción de la medición del anemómetro del centro de pista de Aeroparque, dañado por un objeto arrastrado por el viento.

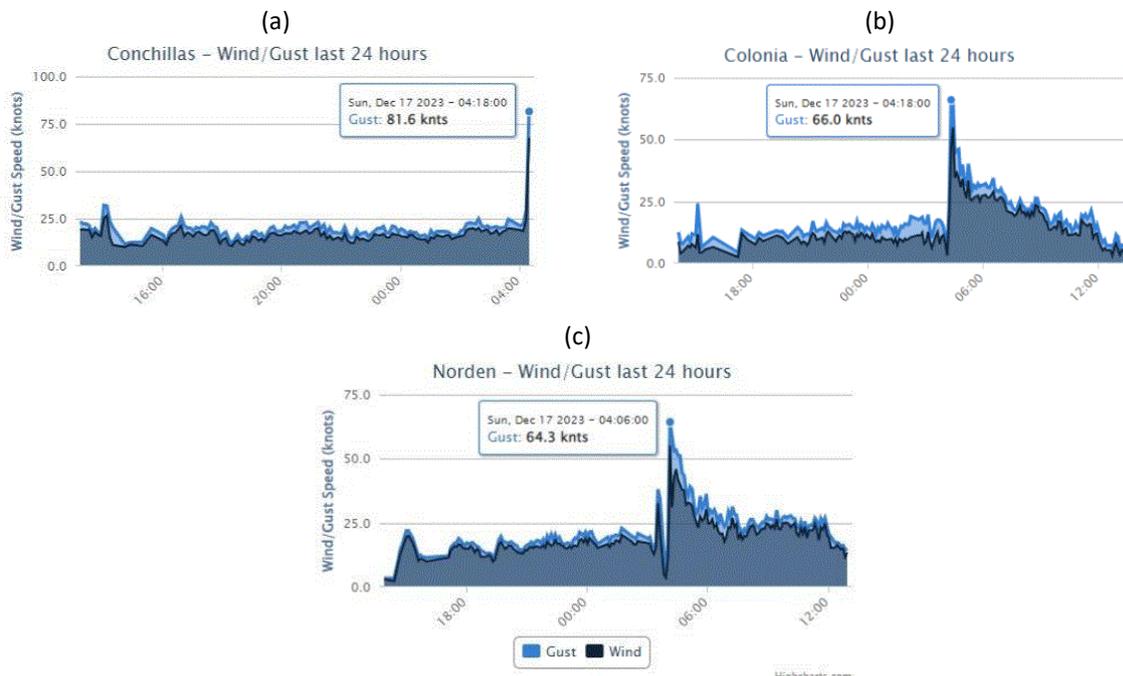
En la Figura 13 tres anemómetros provenientes de la Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP), también indican picos de viento en zonas aledañas al Río de la Plata (Conchillas y Colonia en Uruguay, y el pilote Norden, ubicado entre La Plata y Colonia, ver [aquí](#)).

## 2.4 Eventos de lluvia y granizo

El análisis de la precipitación ocurrida durante este evento se realizó considerando las estimaciones de precipitación por satélite y las observaciones pluviométricas disponibles en el SMN. De este modo, se utilizaron varios productos satelitales de monitoreo de la precipitación a mayor resolución temporal como el Hidroestimador (Hobouchian 2017), IMERG (Huffman y otros 2020) y GSMaP (Mega y otros 2018), como así también la estimación de precipitación satelital ajustada con observaciones pluviométricas (SQPE-OBS, por sus siglas en inglés). El producto experimental SQPE-OBS (Fig. 14) se obtiene en escala diaria a partir de realizar un ajuste pluviométrico a la estimación satelital IMERG Early Run (Huffman et al., 2020). Para más información sobre este producto se puede revisar Hobouchian y otros (2021).



**Figura 12:** Evolución temporal de las ráfagas máximas en 10 minutos registradas el día 16/12/2023 (Bahía Blanca) y 17/12/2023 (Aeroparque y San Fernando) por los sistemas automáticos AWOS ubicados en los aeropuertos de Bahía Blanca (PBA), Aeroparque (CABA) y San Fernando (PBA). Los diferentes colores corresponden a los anemómetros ubicados en las diferentes cabeceras de las pistas con las que cuenta cada aeropuerto. La hora indicada es en UTC (HOA+3). Información brindada por la Empresa Argentina de Navegación Aérea (EANA).

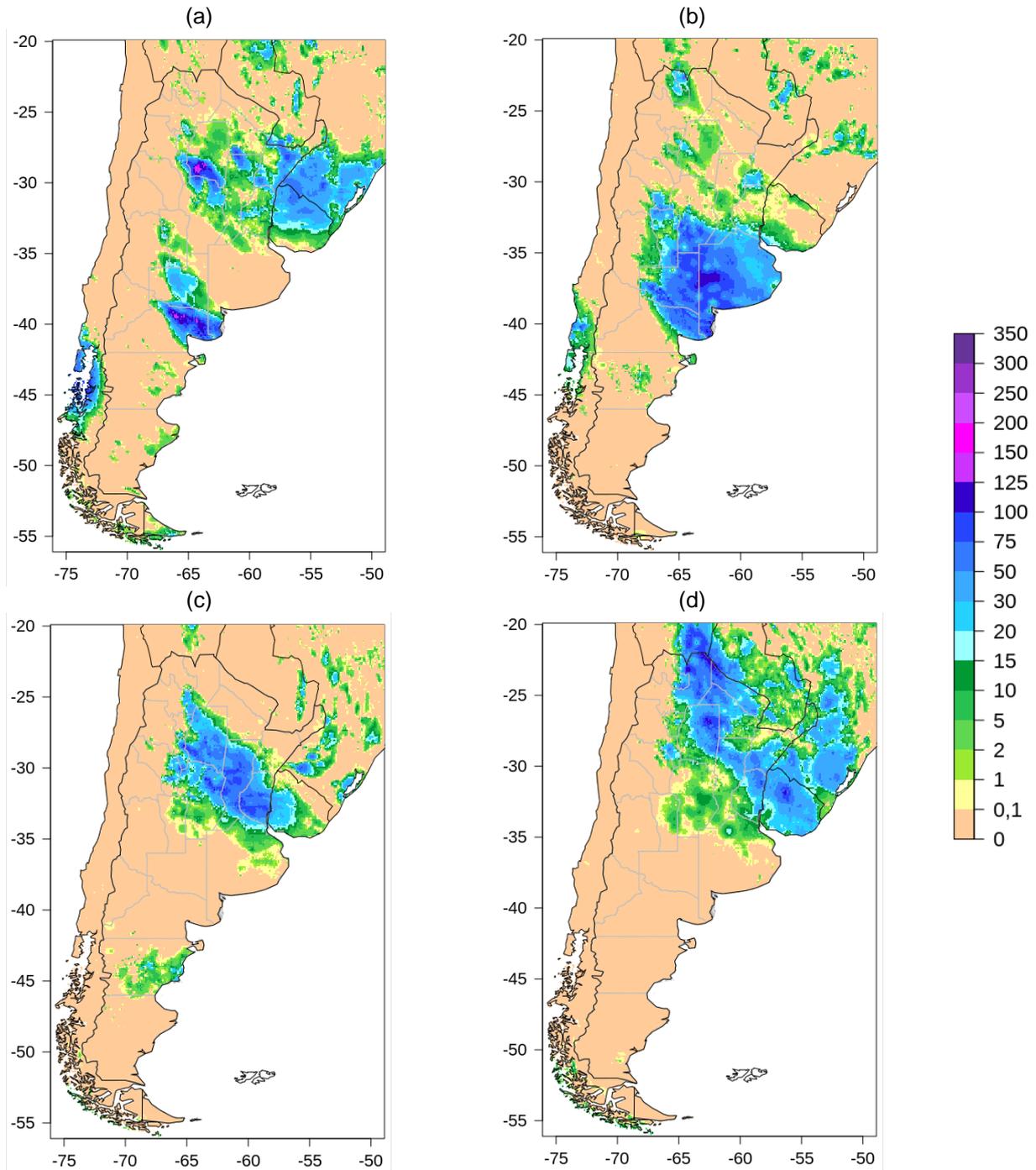


**Figura 13:** Mediciones de viento sobre el Río de la Plata, en Conchillas (al noroeste de Colonia), Colonia y entre Colonia y La Plata (Pilote Norden). Datos provenientes de la Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP).

La Figura 14 y el monitoreo de la precipitación cada 6 horas (no se muestra) coinciden en un área de precipitación continua y extendida que se traslada desde el norte de la Patagonia hacia el noreste de Argentina. Este patrón de lluvia continua se ve principalmente entre las 09:00 HOA del 16 de diciembre hasta las 21:00 HOA del 17 de diciembre durando más de 24 horas, lo que es consistente con los sistemas convectivos de mesoescala (ver Markowski y otros 2010).

Los valores máximos de precipitación en Bahía Blanca y el AMBA se producen el día pluviométrico 16 de diciembre de 2023 (entre las 09:00 HOA del día en cuestión y las 09:00 HOA del día siguiente) en línea con la descripción previa del evento (Fig. 14b). Este máximo resulta ser mayor en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires comparado con la zona del AMBA. Los valores de precipitación estimada para Bahía Blanca se encuentran entre los 50 mm hasta superar los 75 mm en el área circundante, mientras que para la zona del AMBA se superan los 30 mm hasta valores por encima de 50 mm en algunos puntos. La Tabla II, con mediciones en superficie, ayuda a complementar esta información.

En cuanto a los días posteriores, se observa como el área de precipitación se traslada hacia el noreste con valores máximos similares (Fig. 14 c y d). A su vez, se observa la ocurrencia de lluvia en San Luis, Córdoba y norte de Buenos Aires con valores estimados entre 10 y 20 mm.



**Figura 14:** Estimación de precipitación acumulada diaria [mm/día] a partir del producto experimental SQPE-OBS para los días pluviométricos (09:00 del día inicial a 09:00 HOA del día siguiente) (a) 15/12/2023, (b) 16/12/2023, (c) 17/12/2023 y (d) 18/12/2023. En estas figuras se enmascara el océano por falta de datos para aplicar adecuadamente la metodología.

**Tabla II:** Totales de precipitación registrados en las estaciones del SMN entre las 9hs del 16 y las 9hs del 17 de diciembre 2023. Las estaciones están ordenadas en orden decreciente de precipitación acumulada.

Estación Meteorológica	Precipitación (mm)
NUEVE DE JULIO	74
BENITO JUAREZ AERO	71
BAHIA BLANCA AERO	60
RIO CUARTO AERO	59
EZEIZA AERO	57
AZUL AERO	55
GENERAL PICO AERO	54
OLAVARRIA AERO	54
PIGUE AERO	53
CORONEL SUAREZ AERO	52
LA PLATA AERO	52
LAS FLORES	48
JUNIN AERO	46
BOLIVAR AERO	45
TANDIL AERO	45
PEHUAJO AERO	44

Estación Meteorológica	Precipitación (mm)
VENADO TUERTO AERO	44
MERLO AERO	43
MORON AERO	42
SANTA ROSA AERO	42
TRES ARROYOS	41
MAR DEL PLATA AERO	40
BUENOS AIRES OBSERVATORIO	39
DOLORES AERO	37
LABOULAYE AERO	36
SAN FERNANDO AERO	34
EL PALOMAR AERO	33
GALEGUAYCHU AERO	30
TRENQUE LAUQUEN	30
PUNTA INDIO B.A.	24

\* sólo se muestran los valores superiores a 15mm

## 2.5 Descripción de los eventos desde la perspectiva de la mesoescala

Dada la extensión de los daños generados por ráfagas severas y la apariencia de los sistemas convectivos en imágenes de radar, existe una alta probabilidad de que se hayan registrado dos *derechos* durante esta situación (Bruno Ribeiro, comunicación personal). Un derecho se define como un sistema convectivo de mesoescala que produce daños por ráfagas en línea recta que ocurren de manera continua o intermitente en una franja de al menos 650 km con un ancho mínimo de aproximadamente 100 km (glosario de la American Meteorological Society, <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Derecho>). Los derechos por lo general contienen estructuras de tipo “bow-echo”, en los que las ráfagas más severas pueden observarse en asociación a la aparición de estructuras del tipo jet de entrada posterior (“rear-inflow jet”, o RIJ) o vórtices de fin de línea (“book-end vórtices”). De acuerdo con la estructura del sistema convectivo y los forzantes asociados a su ocurrencia, los derechos suelen clasificarse como de tipo “serial” o progresivo. Los derechos seriales se componen de múltiples bow-echoes embebidos en una extensa línea de inestabilidad, en condiciones de fuerte forzante sinóptico. Estos se diferencian de los derechos progresivos en cuanto a estos últimos son generalmente de extensión algo menor y cuya propagación se encuentra dominada por la dinámica interna del sistema convectivo de mesoescala.

Un ejemplo de estos últimos fueron los registrados en el norte de la provincia de Buenos Aires y que también afectaron al AMBA durante la madrugada del 21 de octubre de 2008 (Torres Brizuela y otros, 2010). Si bien estas clasificaciones son utilizadas regularmente en la literatura, existe un debate abierto respecto de la definición precisa de estos sistemas, como se discute en Corifidi y otros (2016). A su vez, estos sistemas pueden venir acompañados de la formación de circulaciones ciclónicas (mesovórtices) y la posible tornadogénesis si hay suficiente forzamiento, inestabilidad y cortante del viento. Weisman (1993) realizó estudios idealizados de los denominados “book-end vortices” llegando a la conclusión que su origen radicaba en la inclinación en la vertical de la vorticidad horizontal del sistema (en la zona del borde delantero del RIJ). Una completa revisión de este último tema puede encontrarse en Schenkman y Xue (2016). En dicho trabajo se muestra un modelo conceptual (su Figura 6) que es muy similar a lo observado en la Figura 11 y que podría justificar los daños puntuales observados en la zona de los bosques de Palermo y el Aeroparque Jorge Newbery de la Ciudad de Buenos Aires. Allí una franja muy angosta de

daños severos, principalmente en la arboleda, se observó. También se encontraron registros de videos tomados en la plataforma del aeropuerto donde se observa el pasaje de un mesovórtice que hacer rotar a varios aviones que estaban siendo preparados para sus correspondientes vuelos (ver <https://www.instagram.com/reel/C08iJmDsBxJ/?igsh=QkFLZFQ1NVhkdA%3D%3D>).

Como se ha mencionado, el análisis de las imágenes de radar muestra dos líneas de inestabilidad bien marcadas, unidas por una región de convección más débil entre ellas (Fig. 9). La línea de inestabilidad que se desplaza por el norte de la Provincia de Buenos Aires produjo reportes de daños por ráfagas severas en una franja desde el noreste de La Pampa hasta localidades del sur de Uruguay (ver Fig. 15), por lo que cumple la definición de derecho. Este derecho se desarrolló en un entorno de fuerte forzante sinóptico, y se organizó adelante/sobre el avance de un frente frío, siguiendo la evolución del sistema sinóptico de gran escala por lo que podría clasificarse como un derecho de tipo “serial”.

Por otro lado, la línea de inestabilidad que se desarrolló más al sur, afectando la ciudad de Bahía Blanca y desplazándose al este sobre el mar argentino muestra características similares en cuanto a la extensión de los daños. Es altamente probable que este sistema haya sido también un derecho con el desarrollo de al menos un tornado o mesovórtice (Centro de Información Meteorológica del SMN, comunicación personal), aunque el desplazamiento hacia el océano interrumpió la recolección de reportes de ráfagas severas, por lo que no puede determinarse a ciencia cierta si efectivamente se cumplieron los criterios de extensión para considerarlo como tal.

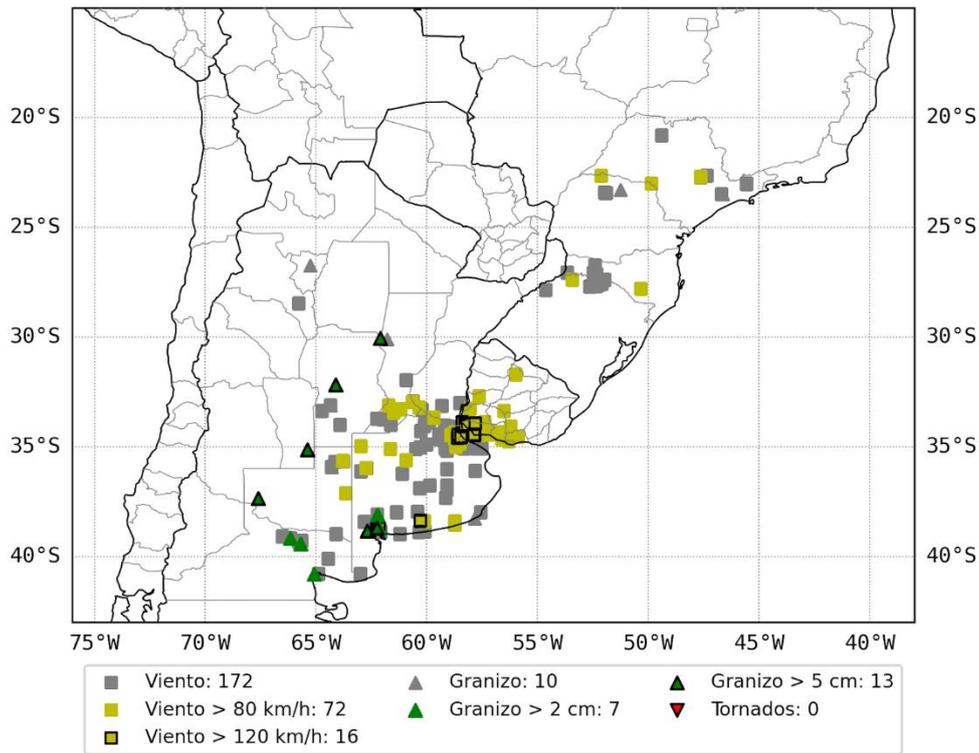
Los avances en la red operacional de radares, así como la disponibilidad de reportes de eventos severos provista por la base de datos SAMHI comienzan a hacer posible una adecuada caracterización de este tipo de eventos en el país. Dada la extensión espacial y la severidad de los daños en este tipo de sistemas, resulta fundamental continuar avanzando en el desarrollo de herramientas de pronóstico y comunicación de estos, de manera de minimizar los impactos a la población.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LOS IMPACTOS

Si bien en las secciones anteriores se ha hecho mención a los impactos, en esta sección se describen los mismos con más detalle. Como todo estudio de impactos, la obtención de datos robustos a gran escala resulta un gran desafío y en parte azarosa debido al inmenso trabajo de campo que esto necesita.

#### 3.1 Descripción general

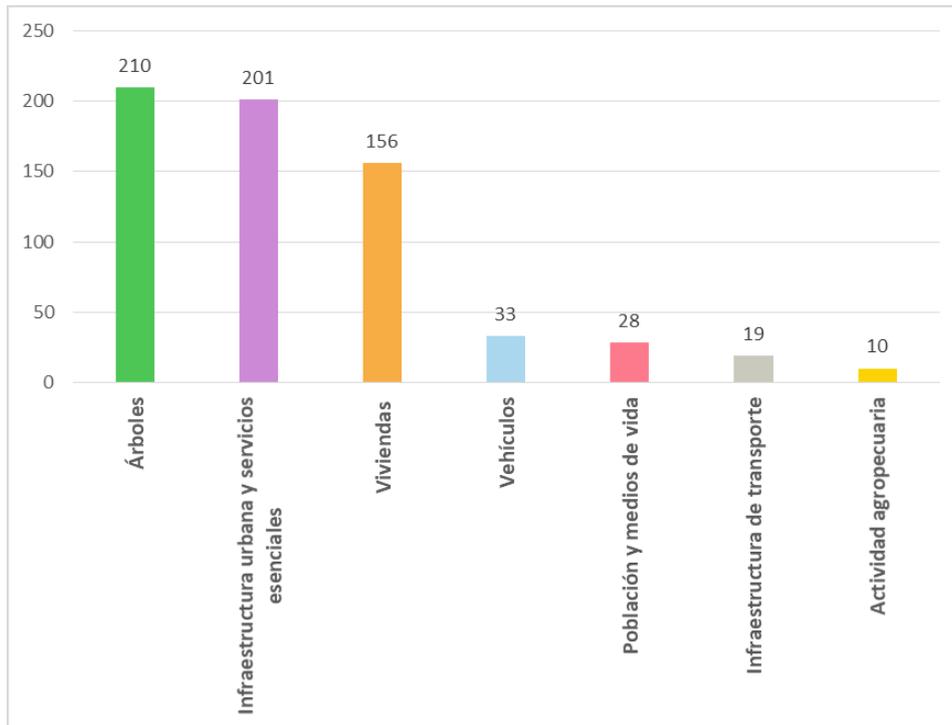
La Figura 15 muestra un mapa de los eventos meteorológicos importantes que afectaron la región en términos de vientos, lluvias y granizo. Pueden verse en particular picos de intensidad sobre áreas aledañas a la ciudad de Bahía Blanca y al Área Metropolitana de Buenos Aires. Como la obtención de estas observaciones depende de la presencia de estaciones y/o presencia humana, la acumulación cerca de las zonas urbanas no necesariamente refleja la distribución real de los fenómenos.



**Figura 15:** Mapa de fenómenos meteorológicos extraído de la base de datos SAMHI para los días 16, 17 y 18 de diciembre de 2023. Notar la predominancia de máximos de viento, la presencia de algunos eventos de granizo y zonda en Mendoza y San Juan. La mayoría de estos datos provienen de publicaciones de redes sociales y en el caso del viento de mediciones de estaciones meteorológicas no oficiales. *Fuente:* Base de datos SAMHI.

Este sistema de tormentas generó numerosos impactos que afectaron tanto la vida como la propiedad de la población a lo largo de varias provincias. La fuente de información más importante con la que se cuenta es la *Base de Datos de Amenazas Meteorológicas y sus Impactos de América del Sur (SAMHI)*, por sus siglas en inglés; ver Salio y otros, 2024). Dicha herramienta, mantenida por el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA) y el Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO) de la Universidad de Buenos Aires (UBA), de la que también participa el SMN, tiene el propósito de llevar adelante la catalogación sistemática de eventos meteorológicos significativos y sus impactos socioambientales asociados. La información se encuentra categorizada en siete unidades temáticas vinculadas a diferentes tipos de impactos: a la población y sus medios de vida, a las viviendas, a la infraestructura de transporte, a la infraestructura urbana y los servicios esenciales, al arbolado y al parque vehicular.

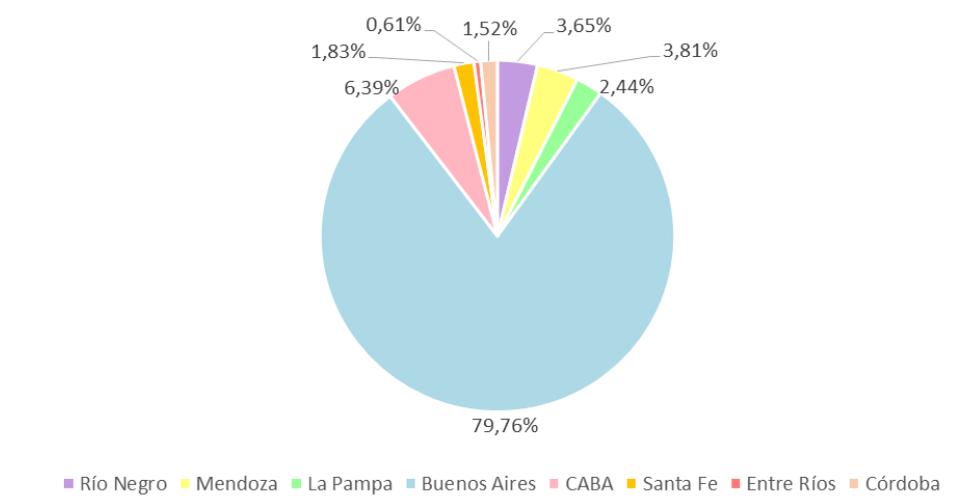
La Figura 16 muestra una recopilación del total de registros asociados a los impactos que tuvieron lugar en el período considerado para el evento de diciembre.



**Figura 16:** Registros de impacto según su caracterización en la base de datos SAMHI durante el evento de tiempo severo del 16 y 17 de diciembre de 2023. Fuente: Base de datos SAMHI.

El análisis de los registros revela que la familia que agrupa al arbolado fue donde más se concentraron los daños, con un total de 210 reportes divididos entre árboles quebrados y ramas de grandes dimensiones rotas. Le sigue en afectación la categoría de infraestructura urbana y de servicios esenciales, con poco más de 200 reportes de daños, afectando mayormente postes de baja y media tensión con cortes de suministro eléctrico y generando también daño a las líneas de telecomunicaciones. Por su parte, se cuenta con 156 registros de impactos en viviendas, mayormente con techos volados y daños generales a las estructuras edilicias, asociada a las fuertes ráfagas de viento. Continúan en cantidad los daños a vehículos, concentrándose principalmente en abolladuras y roturas en los parabrisas debido al granizo. Posteriormente, se cuenta con impactos a la población y a sus medios de vida, con la mayor cantidad de registros sobre personas fallecidas en la ciudad de Bahía Blanca y en el municipio bonaerense de Moreno, así como también heridos, evacuados con posterioridad al evento meteorológico y suspensión de actividades comerciales, económicas y laborales, que generaron pérdidas en la economía. Por su parte, los impactos en la infraestructura de transporte son los que continúan en cantidad de reportes en la base SAMHI, encontrándose principalmente asociados al corte de vías de circulación por caída de árboles y anegamientos, como también suspensión de vuelos, cierre de aeropuertos y daños en la estructura aeroportuaria. Finalmente, también se registraron impactos en las actividades agropecuarias, con cultivos y ganado afectados.

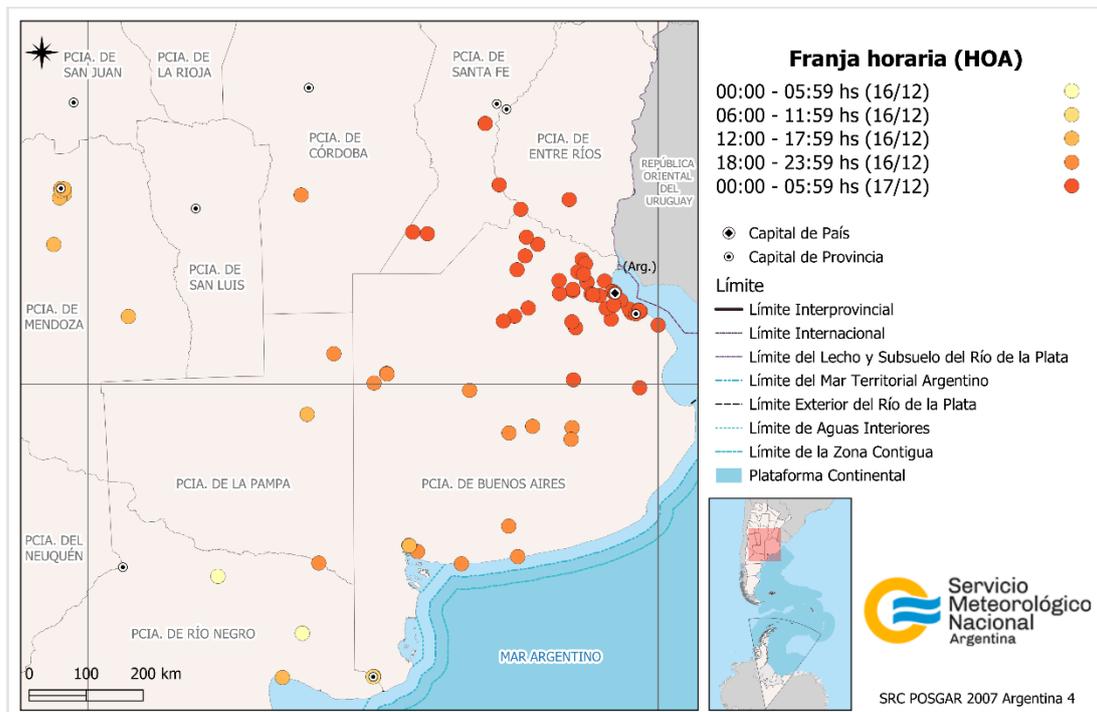
Siguiendo el análisis, la Figura 17 desglosa la información en cada provincia afectada para analizar de esta manera cómo se distribuyeron los impactos a lo largo del territorio nacional, tal como se muestra en el siguiente gráfico.



**Figura 17:** Registros de impacto por provincia en la base de datos SAMHI durante el evento de tiempo severo del 16 y 17 de diciembre de 2023. Fuente: Base de datos SAMHI.

Al visualizar la cantidad de registros por provincia, se observa una notable disparidad en los impactos en la provincia de Buenos Aires, concentrando casi el 80% del total de los reportes. En segundo lugar, la Ciudad Autónoma de Buenos Aires representa el 6,39% de los ingresos de daños recopilados en la base de datos SAMHI para el evento en cuestión.

En paralelo, también puede incorporarse la dimensión temporal al análisis. Para ello se ha constituido el siguiente mapa, que muestra el horario en que se produjo cada impacto de los que se tiene registro y la ubicación de estos en base a la información georreferenciada extraída de la base SAMHI.

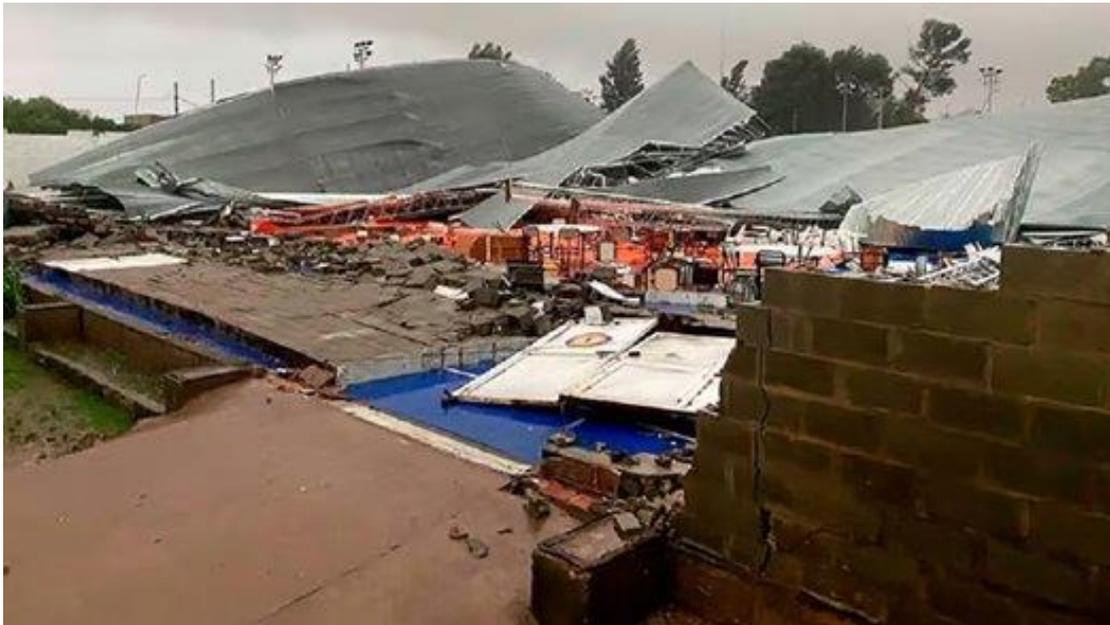


**Figura 18:** Registro de impacto desde el punto de vista de su evolución temporal. Base de datos SAMHI.

Puede determinarse que desde las primeras horas del sábado 16 de diciembre se registraron las consecuencias del avance de la tormenta en el noreste de la provincia de Río Negro. Más tarde, los efectos se extendieron a las provincias de La Pampa y Mendoza, alcanzando el sudoeste de la provincia de Buenos Aires en las últimas horas de ese día. Hacia el comienzo del domingo 17 de diciembre, la tormenta continuó su trayectoria por la mayor parte de la provincia en Buenos Aires impactando desde el sudoeste hasta alcanzar, en la madrugada de ese mismo día, al Área Metropolitana de Buenos Aires. Posteriormente, los efectos se sintieron en el sur de Entre Ríos y Santa Fe en horas de la mañana.

### 3.2 Ciudad de Bahía Blanca

Bahía Blanca fue el primer centro urbano afectado y donde se registraron pérdidas humanas. La Figura 19 presenta precisamente el estado del estadio cubierto donde tuvo lugar el trágico episodio que dejó 13 muertos. El evento no se restringió a un incidente local, sino que impactó una amplia área alrededor de la ciudad (ver Fig. 20).

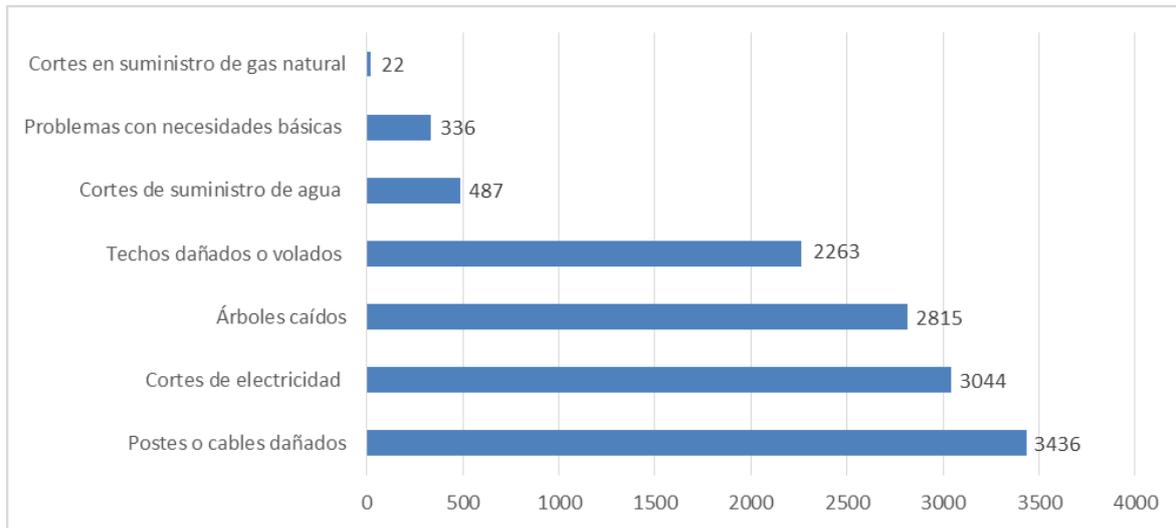


**Figura 19:** Estado del Club Bahiense del Norte luego de los destrozos del 16 de diciembre de 2023. Esa noche tuvo lugar un evento de patinaje artístico de fin de año (Fuente: X).

La ciudad de Bahía Blanca y sus alrededores se encontraron entre las zonas más afectadas por este evento debido a los intensos vientos y precipitaciones de las últimas horas del día 16 de diciembre (ver Fig. 21). Las fuertes ráfagas causaron el colapso de la estructura del club Bahiense del Norte, resultando en la muerte de 13 personas y dejando numerosos heridos. La gran mayoría de los edificios de uso comunitario sufrieron serios daños materiales. Entidades deportivas como Olimpo, El Nacional, Tiro Federal y Puerto Comercial White vieron destruidos sus muros, vestuarios, tribunas, canchas cubiertas, salones de eventos, techos de chapa, tinglados y buffets. Por su parte, la infraestructura educativa no fue la excepción: un total de 157 escuelas resultaron afectadas, de las cuales 47 fueron clasificadas como con daños de consideración y 15 sufrieron afectaciones muy graves.



**Figura 20:** Impacto del evento del 16 de diciembre de 2023 en cercanías de Bahía Blanca. (a) Notar el estado final de la antena de Radio Nacional (Fuente: X), (b) la destrucción de un bosque por caída de árboles (Crédito Pablo Argiroffi) y (c) los destrozos de instalaciones en el puerto (Fuente: CaféxMedio).



**Figura 21:** Registros de impacto en la ciudad de Bahía Blanca. Fuente: Centro de Operaciones de Emergencia – Municipalidad de Bahía Blanca.

La información proporcionada por el Centro de Operaciones de Emergencia de Bahía Blanca revela que la situación también generó problemas relacionados con necesidades básicas de la población. No sólo hubo obstáculos para garantizar la seguridad alimentaria, debido a la interrupción en la provisión de alimentos y agua potable, sino también problemas vinculados a la pérdida de colchones, mobiliario y vestimenta.

Por su parte, en el ámbito de la infraestructura energética, se registraron impactos significativos como el colapso de trece torres de alta tensión, daños en las líneas troncales y en las conexiones individuales de los inmuebles, así como más de 3000 registros de postes eléctricos caídos debido a la acción del viento. Según la Secretaría de Energía de la Nación, la empresa EDES (Empresa Distribuidora de Energía Sur) reportó que aproximadamente 112.000 usuarios del área urbana se vieron perjudicados por cortes de luz. Además, se registró la caída de más de 14.000 árboles a lo largo de toda la ciudad, concentrándose mayormente en el área central. También se vieron afectados espacios verdes como el Parque de Mayo, el Pinar, el Parque Independencia, la plaza Almirante Brown y el Parque Noroeste.

Los daños se extendieron también a la red de agua, con cortes en el suministro atribuibles a la rotura de caños por el desplome de árboles. Asimismo, desde ABSA (Aguas Bonaerenses S.A.) se informó que las plantas potabilizadoras Patagonia y Grünbein, al igual que el sistema de bombeo cloacal en Ingeniero White, se vieron afectados por los cortes eléctricos. De la misma manera, la red domiciliar de gas en diversos sitios de la ciudad se vio afectada a causa de daños en las tuberías y en las cabinas generados por los intensos vientos.

En el ámbito residencial, se registraron 300 viviendas completamente colapsadas y más de 12.000 con daños en los techos. Los reportes posteriores indican que las fuertes ráfagas también dañaron paredes y ventanas, causando un deterioro significativo en muchas propiedades. Ante tal situación de emergencia, las autoridades locales implementaron diversas medidas, incluyendo la evacuación de las zonas más impactadas y la habilitación de centros de refugio, que brindaron albergue a más de 350 personas.

Por último, el puerto de Bahía Blanca sufrió severos perjuicios que paralizaron sus operaciones, dejando a las terminales cerealeras sin electricidad ni conectividad. Los vientos intensos también provocaron derrumbes y afectaron notablemente las instalaciones portuarias, imposibilitando la recepción de camiones

y la carga de buques. Asimismo, se registró la caída de dos grúas y la interrupción de la producción en las plantas petroquímicas de la región. La Tabla III presenta una lista de los artículos de prensa que informaron al respecto.

**Tabla III:** Artículos de prensa que reportaron información sobre impactos en la ciudad de Bahía Blanca.

Título del artículo	Referencia	Enlace de acceso
<i>Actualización del estado de afectación de energía eléctrica</i>	Portal Oficial del Estado Argentino	<a href="#">Link</a>
<i>Temporal en Bahía: el corte de energía afecta los servicios de agua y cloacas</i>	BVC Noticias	<a href="#">Link</a>
<i>Continúa la asistencia en Bahía Blanca tras el temporal</i>	Gobierno de la Provincia de Buenos Aires	<a href="#">Link</a>
<i>El temporal causó graves daños y paralizó el puerto de Bahía Blanca</i>	DataPortuaria	<a href="#">Link</a>
<i>Fortalecer los lazos para reconstruir Bahía Blanca</i>	Pagina12	<a href="#">Link</a>
<i>Los efectos del temporal en la región</i>	Bolsa de Cereales y Productos de Bahía Blanca	<a href="#">Link</a>
<i>El drama que genera la pérdida masiva de árboles</i>	La Brújula 24	<a href="#">Link</a>

### 3.3 Área Metropolitana de Buenos Aires

Durante la madrugada del domingo 17, la tormenta impactó también en el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA), afectando tanto a la gran mayoría de los municipios de la provincia de Buenos Aires que la integra como a la propia Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Según las categorías de la base SAMHI (Salio y otros, 2024), se registró una víctima fatal en la localidad de La Reja, en el partido de Moreno, donde una mujer perdió la vida debido a la caída de una rama de gran porte. Además, se reportaron personas heridas en localidades como General Rodríguez y Tigre, y se llevaron a cabo evacuaciones en las zonas cercanas a Zárate.

En la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, fuertes ráfagas de viento provocaron el colapso parcial del escenario y el mobiliario de una fiesta electrónica organizada en el Club Gimnasia y Esgrima (ver Fig. 22), dejando un saldo de 15 personas heridas. Es probable que el horario en que ocurrió el incidente, a las 3:45 a.m., haya sido un factor determinante para evitar víctimas fatales. Además, otro evento ocurrido en el Hipódromo de Palermo resultó en tres personas lesionadas.

Uno de los elementos más afectados por la tormenta fueron los árboles. En la ciudad de La Plata se registraron 800 ejemplares caídos, mientras que en Tigre la cifra alcanzó los 1200. Según el Ministerio de Seguridad de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, el mismo domingo se reportaron 3112 árboles derribados y 74 ramas caídas en territorio porteño. El lunes 18, el número de árboles caídos fue de 601, con 77 ramas derribadas, y el martes 19, se contabilizaron 350 árboles y 64 ramas caídas.

La afectación del arbolado urbano generó a su vez otros impactos a lo largo de todo el AMBA como cortes en calles, daños en cartelería y vehículos con abolladuras, parabrisas rotos y vidrios quebrados.

La tormenta también dejó sin electricidad a más de 400.000 usuarios de toda el área metropolitana debido a la caída de postes y daños en las líneas eléctricas. Se contabilizaron 337.905 usuarios sin servicio de Edesur y 72.743 de Edenor. A su vez, según el Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires, se registraron 195 postes caídos y 171 líneas afectadas. Las zonas de Edesur más afectadas fueron los partidos de Almirante

Brown, Avellaneda, Esteban Echeverría, Cañuelas, Berazategui, Ezeiza, Florencio Varela, Lanús, Lomas de Zamora, Presidente Perón, Quilmes y San Vicente, mientras que, en CABA, los barrios más afectados fueron Recoleta y San Telmo. En el área de Edeonor, las localidades más impactadas incluyeron Tres de Febrero, General Las Heras, General Rodríguez, General San Martín, Hurlingham, La Matanza, Escobar, Ituzaingó, Malvinas Argentinas, Marcos Paz, Merlo, Moreno, Morón, Pilar, San Fernando, San Isidro, San Miguel y Tigre.

En cuanto a los daños en viviendas, las ráfagas de viento causaron principalmente afectaciones en techos y paredes de diversas localidades del conurbano bonaerense. Según la base SAMHI, se registraron daños en la zona sur, incluyendo La Plata, San Francisco Solano, Ensenada, Quilmes y Berisso; en la zona oeste, afectando localidades como El Palomar, Hurlingham, Ituzaingó y Moreno; y en la zona norte, en Tigre, Campana, Maquinista Savio, Pilar y Zárate.

Finalmente, el servicio de transporte urbano también se vio gravemente afectado al interrumpirse el servicio de trenes en las líneas Mitre, Sarmiento, San Martín, Belgrano Norte y Urquiza. La Tabla IV presenta un listado de artículos de prensa que informaron al respecto.

**Tabla IV:** Artículos de prensa que reportaron información sobre impactos en el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA).

Título del artículo	Referencia	Enlace de acceso
<i>Inundaciones, destrozos y caída de árboles: lo que dejó la tormenta que azotó el AMBA</i>	INFORAMA	<a href="#">Link</a>
<i>Una muerte, destrozos y cortes de luz: lo que dejó el brutal temporal en el AMBA</i>	El Cronista	<a href="#">Link</a>
<i>Temporal en Buenos Aires y provincias: cortes de luz, alertas y hasta cuándo hay lluvia</i>	Página 12	<a href="#">Link</a>
<i>Tormenta arrasa con el AMBA: calles inundadas, árboles caídos y cortes de luz</i>	Arriba Lanús	<a href="#">Link</a>
<i>Temporal en el AMBA: una mujer murió en Moreno y 18 personas resultaron heridas en CABA</i>	Nexofin	<a href="#">Link</a>
<i>Los estragos causados por el temporal generaron evacuados y daños en vehículos y viviendas</i>	La Posta! Noticias General Rodríguez	<a href="#">Link</a>
<i>Tras el temporal en AMBA, demoras y cancelaciones en los trenes: qué líneas están afectadas</i>	C5N	<a href="#">Link</a>



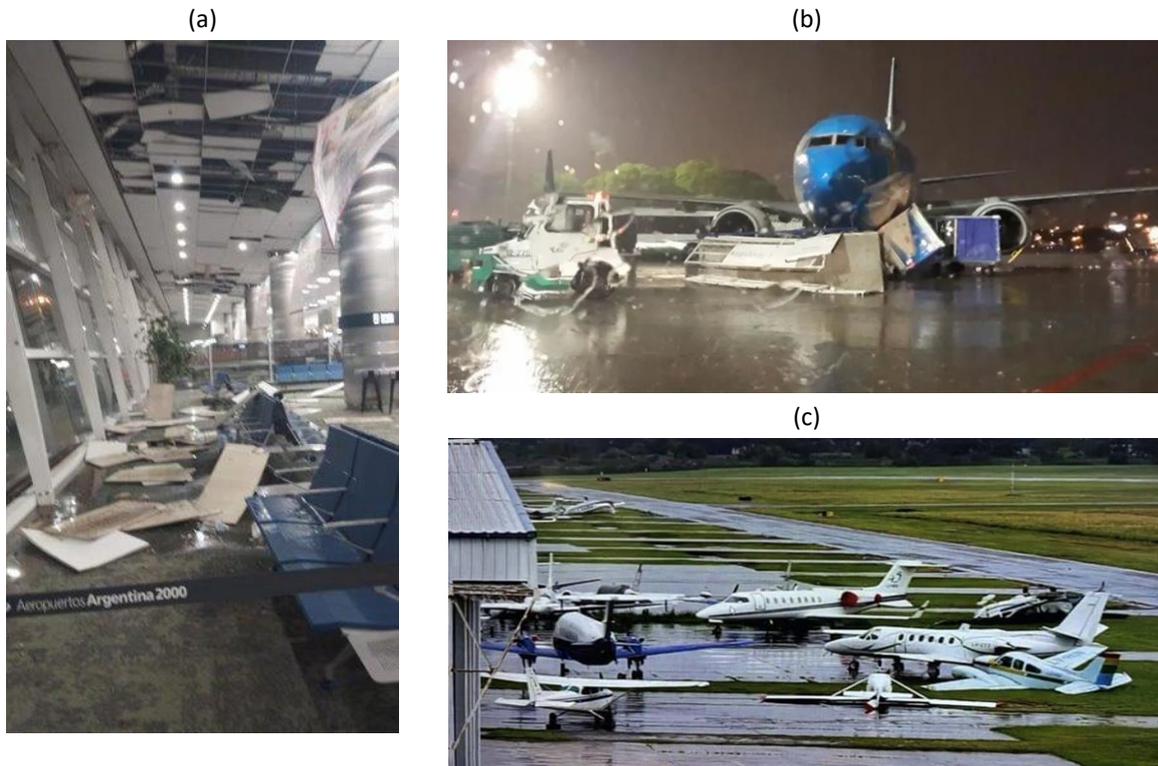
**Figura 22:** (a) Escenario destruido durante la realización del festival La Bresh realizado en el GEBA (Fuente X). (b) Árboles caídos provocaron destrozos (Crédito Alejandro Pagni/AFP).

### 3.4 Impactos en el sector aeronáutico

En el sector aeronáutico el evento también produjo impactos de gran importancia asociados al pasaje de las tormentas por la zona de AMBA. Especialmente, en el Aeroparque Jorge Newbery de la Ciudad de Buenos Aires, donde aviones estacionados en la plataforma se desplazaron producto del paso de estas, además provocó movimiento de elementos livianos (escaleras, carros de transportes de equipaje, etc.) que no estaban sujetos e impactaron en algunos aviones (ver Fig. 23b). Por otro lado, en el Aeropuerto Internacional de San Fernando, ubicado en la ciudad homónima, teniendo en cuenta que desde allí operan aeronaves de menor porte, se desplazaron todas concentrándose hacia un sector en particular y en algunos casos al moverse se dieron vuelta por completo (ver Fig. 23c).

Particularmente, desde la oficina meteorológica de aeródromo, así como de la estación meteorológica de aeródromo ambas ubicadas en el Aeroparque Jorge Newbery se emitieron los mensajes meteorológicos aeronáuticos regulares correspondientes (TAF, METAR), y los especiales (Aviso de aeródromo, SPECI) acordes con la situación meteorológica. En este sentido, es relevante mencionar que instrumental meteorológico ubicado en el punto medio de la pista de Aeroparque fue alcanzado por parte de una estructura metálica que se desprendió del techo de un hangar que lo dejó fuera de servicio (ver Fig. 12).

Por la información brindada por el Servicio de Gestión de Afluencia de Tránsito Aéreo, dependiente de la Empresa Argentina de Navegación Aérea (EANA), el informe post operaciones correspondiente al día 17 de diciembre de 2023 para el área de control terminal Baires, que mostró la comparación entre la demanda de tránsito aéreo prevista y las operaciones reales, se pudo observar que entre las 02:30 horas aproximadamente y 08:00 horas hubo menos movimientos reales a los previstos, especialmente entre las 3:00 horas y 06:00 horas donde fueron casi nulos.



**Figura 23:** (a) Interior de Aeroparque Jorge Newbery (Fuente X). (b) Imagen de escalera que impacta con carro de equipaje y sobre aeronave estacionada por efecto de los vientos intensos en el Aeroparque Jorge Newbery (Fuente X). (c) Imagen de un sector de la plataforma del aeropuerto internacional de San Fernando (Fuente X).

## 4. ANÁLISIS DE LOS PRONÓSTICOS NUMÉRICOS

En esta sección se busca analizar un conjunto de productos derivados del modelado numérico generados con distintos modelos, como así también realizar un estudio de predictibilidad. Entre los modelos considerados se encuentran: 1) WRF (determinístico y ensamble) (Skamarock y otros 2019) del Sistema de Asimilación y Pronóstico del SMN (SAP.SMN) (Maldonado y otros, 2024), 2) GFS (determinístico y ensamble) del National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (Zhou y otros, 2017) y 3) Integrated Forecast System (IFS HRES y ENS) del European Center for Medium Range Weather Forecasts ([ECMWF](#)). En la Tabla V se presentan las principales características de los modelos considerados.

**Tabla V:** Modelos utilizados en estos estudios. La resolución espacial refiere a la información disponible.

Modelo	Dominio	Resolución espacial	Resolución temporal	Convección	Plazo máximo
WRF DET/ENS (SAP.SMN)	Regional	4 km	1 h	Explicita	72/48 horas
IFS HRES/ENS (ECMWF)	Global	0.125°	1 h	Parametrizada	10/15 días
GFS DET/ENS (NCEP)	Global	0.25°	1 h	Parametrizada	15 días

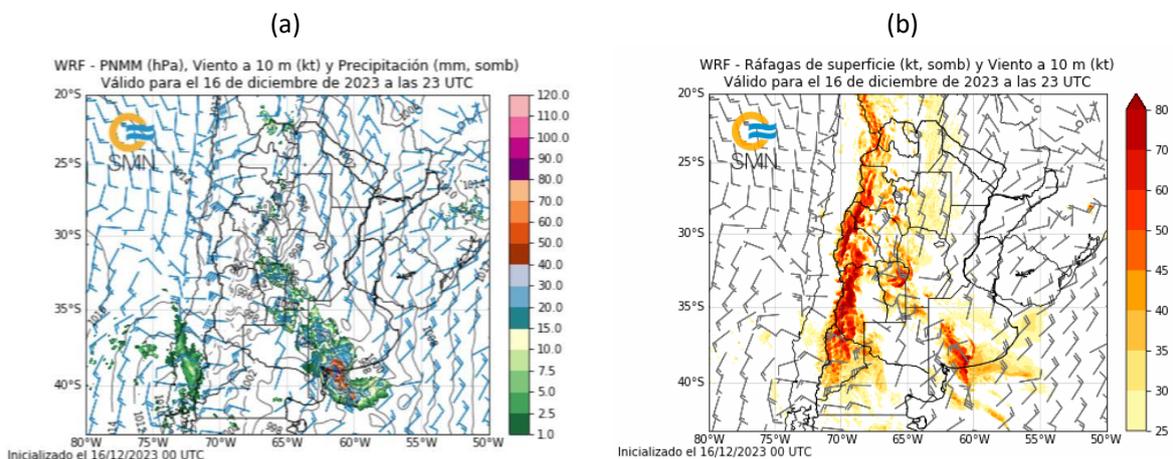
El SAP.SMN presenta la ventaja, frente al IFS y GFS, de proveer pronósticos a más alta resolución lo que permite representar los procesos asociados a la convección de una manera más realista. Cabe aclarar que la versión del SAP.SMN utiliza los análisis y pronósticos del GFS DET/ENS como condiciones iniciales y de borde. Para este trabajo, se utilizaron además de las variables tradicionales, información de los índices Extreme Forecast Index (EFI) y Shift Of Tails (SOT) provenientes del ensamble de IFS que dan cuenta de la magnitud --en términos de los extremos históricos-- del evento considerado (ver definiciones en Tsonevsky (2015)).

Para hacer este estudio se seleccionaron los pronósticos inicializados a las 00 UTC del día 16 de diciembre de 2023, lo que corresponde aproximadamente a 24 horas antes de la ocurrencia de los eventos en Bahía Blanca y Buenos Aires.

## 4.1 El modelo WRF del SMN

### 4.1.1 Ciudad de Bahía Blanca

La Figura 24 presenta los pronósticos del SAP.SMN-DET para las 23 UTC del 16 de diciembre, hora aproximada de la ocurrencia del evento en Bahía Blanca. El panel (a) muestra el campo de precipitación junto con la presión a nivel medio del mar y el viento a 10 m. Se observa una región de máxima precipitación ubicada en las cercanías de Bahía Blanca, la cual se fue desplazando del NO hacia el SE (no se muestra). Asimismo, se puede ver que el área de máxima precipitación también está acompañada por ráfagas superiores a 45 kt aunque desplazada hacia el este de Bahía Blanca (Fig. 24b). Esto último podría estar indicando que la ocurrencia del evento en la ciudad (máximo de ráfagas observado a las 23 UTC) es pronosticada unas horas antes de lo que en la realidad ocurrió.



**Figura 24:** Pronósticos del SAP.SMN-DET de precipitación, presión a nivel del mar y viento a 10 m (izq.) y ráfagas de superficie y viento a 10 m (der.), válidos para el 16 de diciembre de 2023 a las 23 UTC e inicializados el 16 de diciembre de 2023 a las 00 UTC.

La Figura 25 muestra la magnitud de viento a 10 m pronosticada por cada miembro del SAP.SMN-ENS a las 23 UTC (20 HOA). En particular, se puede ver que el miembro 12 presenta una zona de viento máximo, superiores a 45 kt, sobre el área de Bahía Blanca. Por otro lado, hay miembros, como el 2, 3, 10 y 11, que

muestran el máximo adelantado y otros como el 4, 16 o 20 que prácticamente no presentan pronósticos de viento en la provincia de Buenos Aires. Esta incertidumbre en los pronósticos podría estar dada por la configuración física de cada uno de los miembros, así como por la dispersión proveniente de las condiciones iniciales. Es importante destacar que estos valores refieren a las 20 HOA, lo cual no implica que antes o después no estuvieran pronosticados eventos similares.

En la Figura 26 se muestra la probabilidad pronosticada de ráfagas en superficie mayor a ciertos umbrales, válida para las 23 UTC. Para los umbrales de 30 y 45 kt se pronostican probabilidades mayores a 20%, mientras que para el umbral de 60 kt se ve una señal de entre 0 y 10% que abarca gran parte del sur de la provincia de Buenos Aires.

En la Figura 27 se presentan las series de tiempo para Bahía Blanca de diferentes variables del pronóstico determinístico (izquierda) y ensamble (derecha). El pasaje del sistema es claramente visible en la variable presión y en la precipitación asociada (tercer panel, izquierda) para las 21 UTC, en concordancia con la caída de la temperatura en superficie y la alta temperatura de rocío (segundo panel, izquierda). La intensidad del viento y las ráfagas no muestran valores demasiado intensos (primer panel, izquierda). Por otro lado, el panel derecho muestra como la intensidad del viento alcanza máximos en algunos miembros del ensamble entre las 19 UTC del día 16 y las 00 UTC del día 17 (tercer panel, derecha).

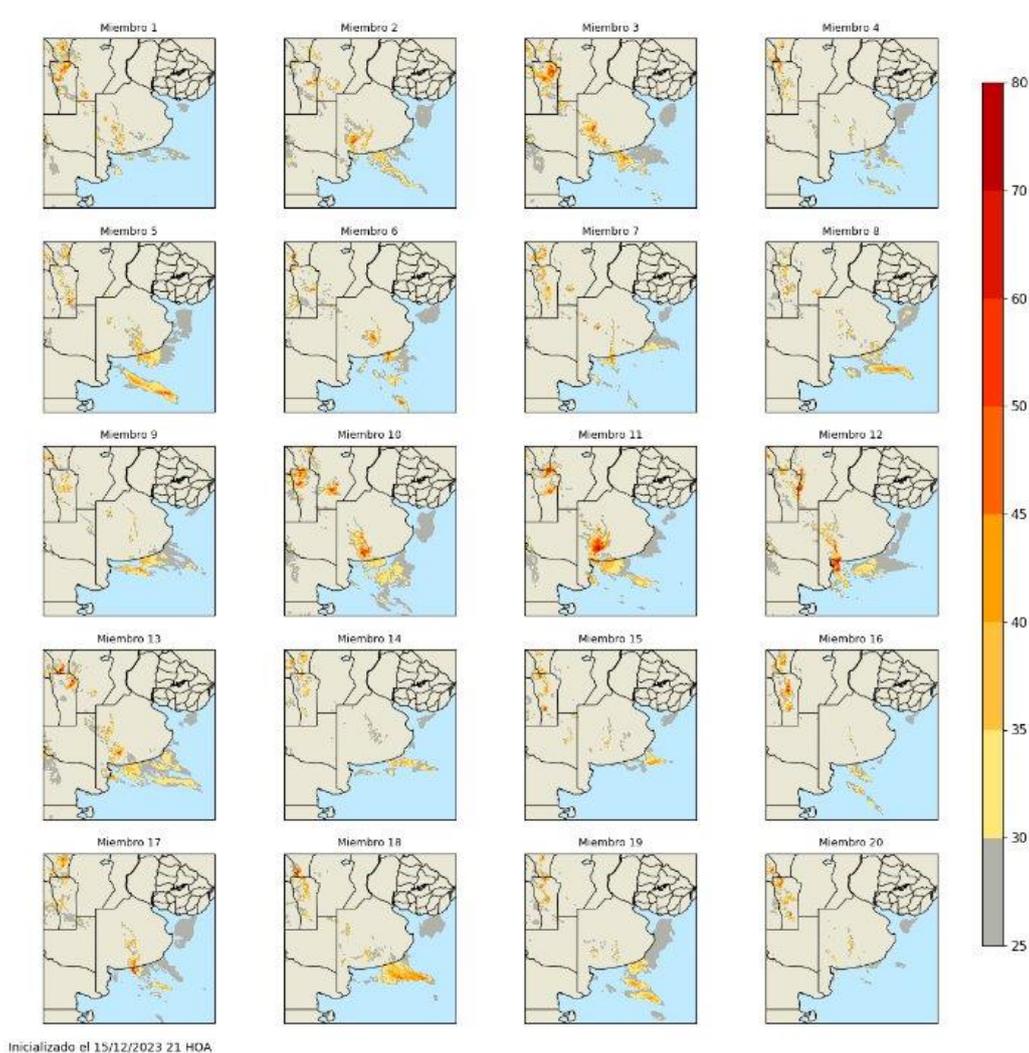
#### 4.1.2 Área Metropolitana de Buenos Aires

La Figura 28 presenta campos de la corrida del SAP.SMN-DET para las 7 UTC del 17 de diciembre (hora aproximada de la ocurrencia del evento en el AMBA). El panel (a) ilustra el campo de precipitación junto con la presión a nivel medio del mar y el viento a 10 m. Se observa una zona de máxima precipitación ubicada al norte de la provincia de Buenos Aires y al este de este máximo se encuentra una zona de fuertes ráfagas sobre el AMBA (Fig. 28a).

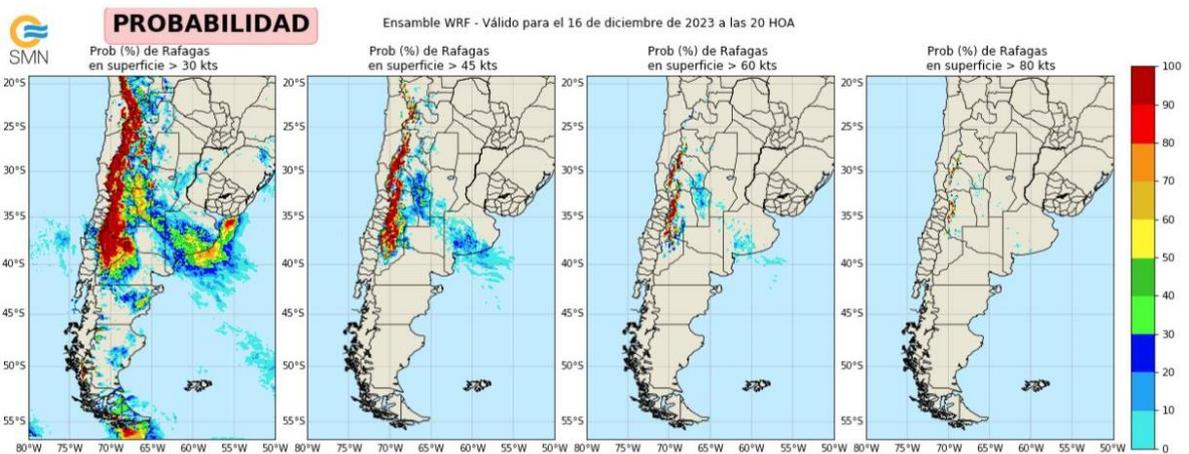
La Figura 29, muestra la magnitud de viento a 10 m pronosticada por cada miembro del SAP.SMN-ENS a las 07 UTC (04 HOA). Varios de los miembros del ensamble --paneles 3,6,12, 18 y 20-- muestran una intensa ráfaga sobre la zona del AMBA, mientras que en el resto de los miembros se aprecia eventos menos intensos o nulos. Al igual que en el análisis de la Figura 25, es importante destacar que estos valores refieren a la hora 04 HOA, lo cual no implica que antes o después no estuvieran pronosticados eventos destacables en los otros miembros.

En la Figura 30 se muestra la probabilidad pronosticada de ráfagas en superficie mayor a ciertos umbrales válida para las 07 UTC (04 HOA). Para los distintos umbrales las probabilidades alcanzan su máximo en el AMBA, con una indicación de probabilidades de ráfagas mayores a 80 nudos.

En la Figura 31 se presentan las series de tiempo para Ezeiza de diferentes variables del pronóstico determinístico (izq.) y ensamble (der.). El pasaje del sistema es claramente visible en la variable presión a las 06 UTC del día 17 y en la precipitación asociada (tercer panel, izquierda), como así también en la caída de la temperatura en superficie y la alta temperatura de rocío (segundo panel, izquierda). Las ráfagas muestran un máximo de más de 40 nudos (primer panel, izquierda). Por otro lado, el tercer panel a la derecha muestra como algún miembro del ensamble pronosticó un máximo de 55 nudos en la intensidad del viento para las 04 UTC del día 17.



**Figura 25:** Pronósticos del SAP.SMN-ENS de magnitud de viento a 10 m válidos para el 16 de diciembre de 2023 a las 23 UTC e inicializados el 16 de diciembre de 2023 a las 00 UTC.



**Figura 26:** Pronósticos del SAP.SMN-ENS de probabilidad de ráfagas en superficie mayor a 30, 45, 60 y 80 kts, válidos para el 16 de diciembre de 2023 a las 23 UTC e inicializados el 16 de diciembre de 2023 a las 00 UTC.

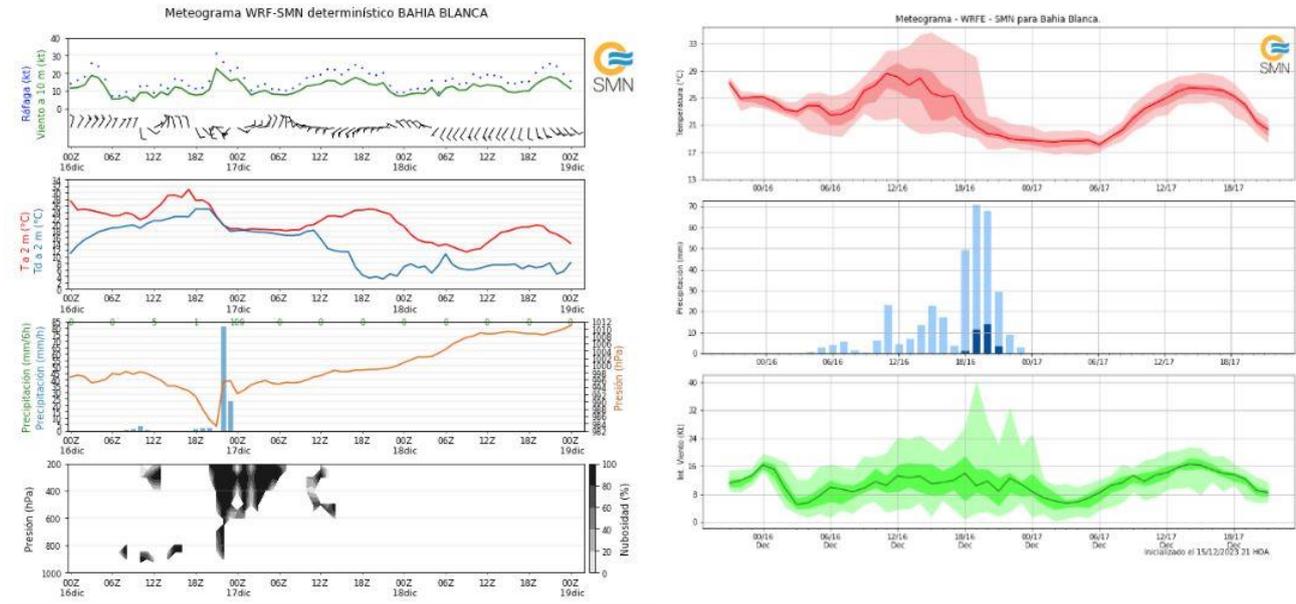


Figura 27: Series de tiempo para Bahía Blanca producido por el SAP.SMN de diferentes variables del pronóstico determinístico (izquierda) y ensamble (derecha). Ambos inicializados el 16 de diciembre a las 00 UTC.

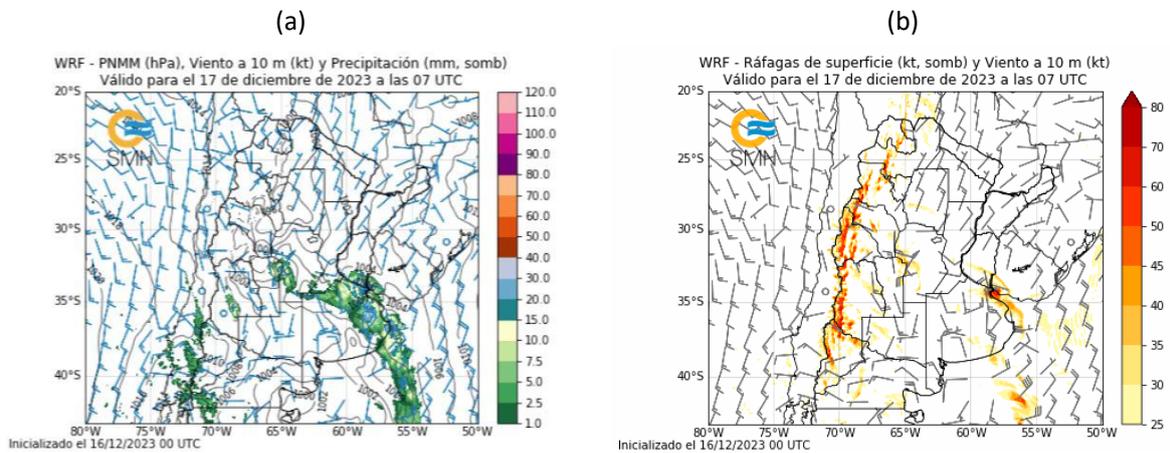


Figura 28: Pronósticos del SAP.SMN-DET de precipitación, presión a nivel del mar y viento a 10 m (izq.) y ráfagas de superficie y viento a 10 m (der.), válidos para el 17 de diciembre de 2023 a las 07 UTC e inicializados el 16 de diciembre de 2023 a las 00 UTC.



**Figura 29:** Pronósticos del SAP.SMN-ENS de magnitud de viento a 10 m válidos para el 17 de diciembre de 2023 a las 07 UTC e inicializados el 16 de diciembre de 2023 a las 00 UTC.

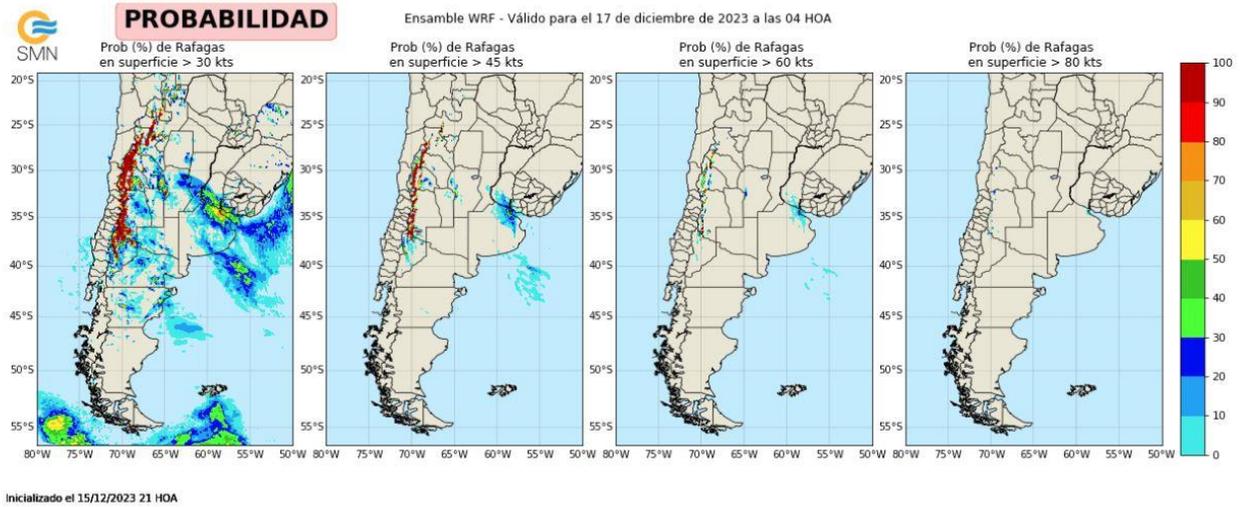


Figura 30: Pronósticos del SAP.SMN-ENS de probabilidad de ráfagas en superficie mayor a 30, 45, 60 y 80 kts, válidos para el 17 de diciembre de 2023 a las 07 UTC e inicializados el 16 de diciembre de 2023 a las 00 UTC.

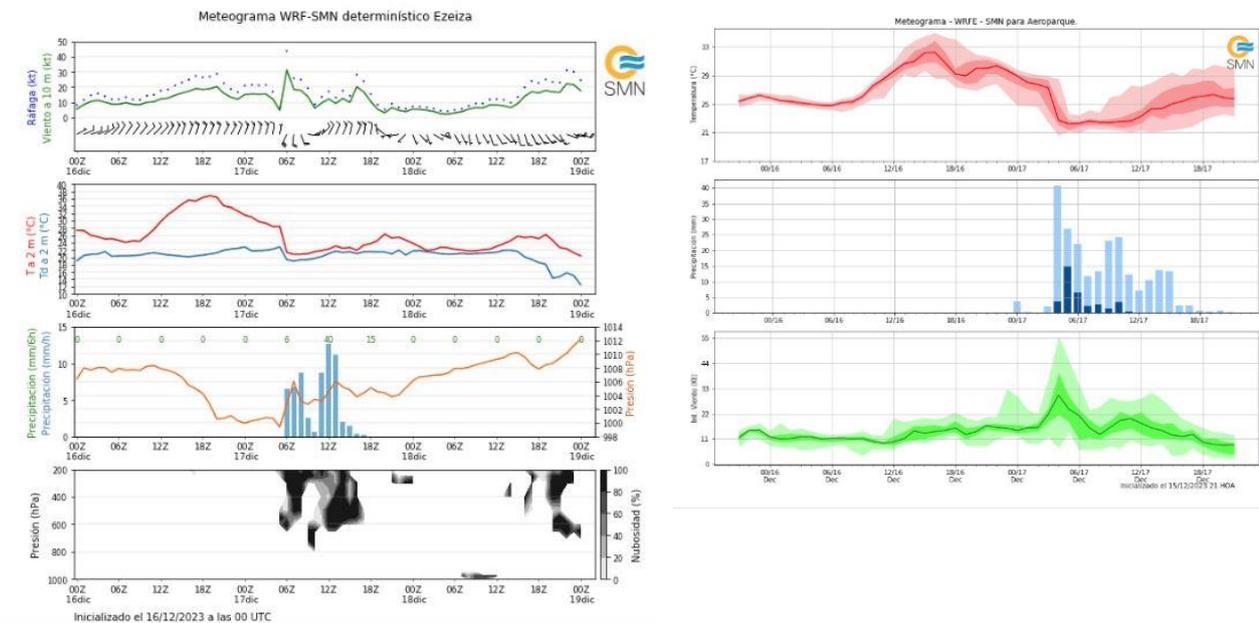
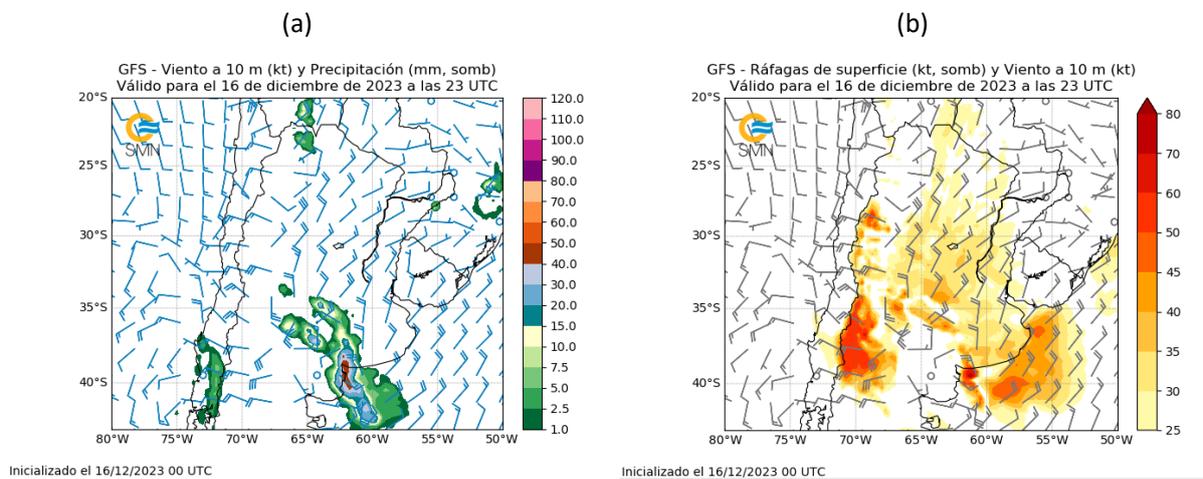


Figura 31: Series de tiempo para Ezeiza producido por el SAP.SMN de diferentes variables del pronóstico determinístico (izquierda) y ensamble (derecha). Ambos inicializados el 16 de diciembre a las 00 UTC.

## 4.2 El modelo GFS

### 4.2.1 Ciudad de Bahía Blanca

La Figura 32 presenta campos del pronóstico determinístico del GFS a la hora aproximada de la ocurrencia del evento en Bahía Blanca. El panel (a) ilustra la precipitación pronosticada a las 23 UTC. La zona de convección se dirige hacia el sudeste de la provincia de Buenos Aires acompañada por ráfagas mayores a 45 nudos (Fig. 32b). Notar la diferencia entre estas estructuras espaciales de ráfagas y las producidas por WRF determinístico (Fig. 24b). Asimismo, notar que, en este caso, tanto el patrón de precipitación como el de ráfagas se ven más retrasados.



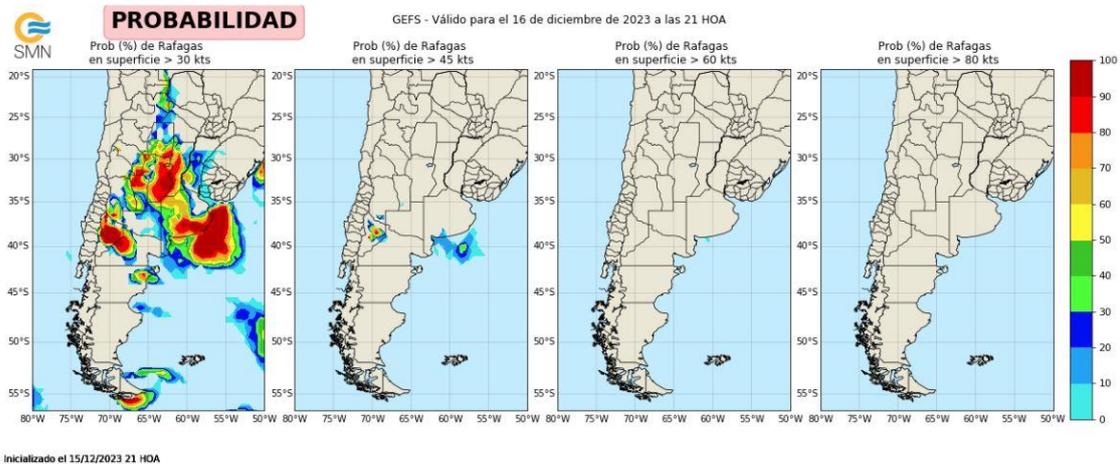
**Figura 32:** Pronósticos del GFS de (a) precipitación, presión a nivel del mar y viento a 10 m y (b) ráfagas de superficie y viento a 10 m, válidos para el 16 de diciembre de 2023 a las 23 UTC e inicializados el 16 de diciembre de 2023 a las 00 UTC.

La Figura 33 muestra la magnitud de viento a 10 m pronosticada por los 20 miembros del ensamble de GFS. Cabe recordar que fueron utilizados como condiciones iniciales y de borde de los 20 miembros del SAP.SMN-ENS ilustrado en la Fig. 25. En particular, puede verse en el panel 9 la ausencia de ráfagas en la zona de Bahía Blanca, mientras que los miembros 5,6,7 muestran patrones cercanos. El miembro 12 muestra el caso más intenso en la versión del SAP.SMN-ENS ilustrado en la Fig. 25, aquí produce una intensidad de viento más leve, puede estar debido a la menor resolución espacial del modelo. Es importante destacar que estos valores refieren a las 21 HOA, lo cual no implica que antes o después no estuvieran pronosticados eventos similares.

En la Figura 34 se muestra la probabilidad pronosticada de ráfagas en superficie mayor a ciertos umbrales válida para las 00 UTC del 17 de diciembre. La zona con probabilidad de ráfagas pronosticadas mayores a 45 nudos se encuentra al este de Bahía Blanca alcanzando valores entre 10-15% y cero probabilidades de superar los umbrales superiores.



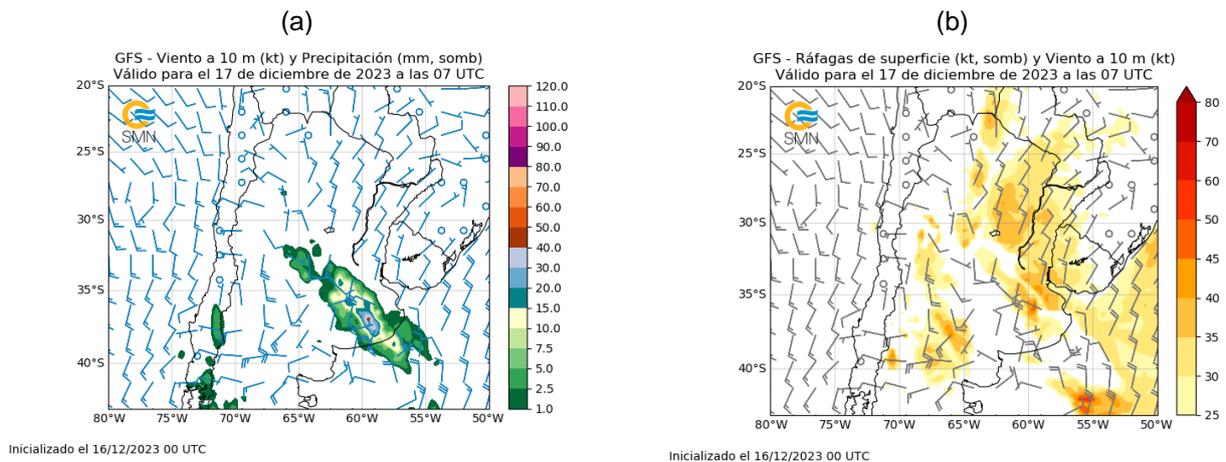
**Figura 33:** Pronósticos del GEFS de magnitud de viento a 10 m válidos para el 17 de diciembre de 2023 a las 00 UTC e inicializados el 16 de diciembre de 2023 a las 00 UTC.



**Figura 34:** Pronósticos del GEFS de probabilidad de ráfagas en superficie mayor a 30, 45, 60 y 80 kt, válidos para el 17 de diciembre de 2023 a las 00 UTC e inicializados el 16 de diciembre de 2023 a las 00 UTC.

### 4.2.2 Área Metropolitana de Buenos Aires

La Figura 35 presenta los campos del pronóstico determinístico del GFS a la hora aproximada de la ocurrencia del evento en AMBA. El panel (a) ilustra el campo de precipitación junto con la presión a nivel medio del mar y el viento a 10 m, quedando esta más atrasada en su desplazamiento que la producida por el WRF determinístico (ver Fig. 28a). La zona de máxima precipitación se encuentra sobre el centro de la provincia de Buenos Aires y se dirige hacia el norte de la provincia acompañada por fuertes ráfagas superiores a 40 nudos (Fig. 35b). Notar la diferencia entre estas estructuras espaciales de ráfagas y las producidas por el SAP.SMN determinístico, mucho más concentradas en la zona del AMBA (ver Fig. 28b).



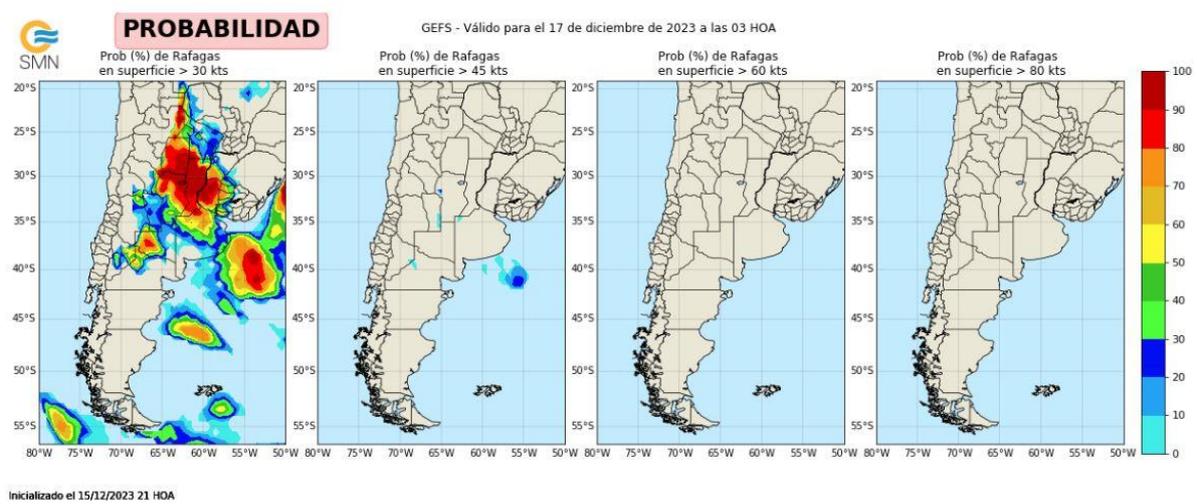
**Figura 35:** (a) Pronósticos del GFS de precipitación, presión a nivel del mar y viento a 10 m y (b) ráfagas de superficie y viento a 10 m, válidos para el 17 de diciembre de 2023 a las 07 UTC e inicializados el 16 de diciembre de 2023 a las 00 UTC.

Analizando la magnitud de viento a 10 m pronosticada por el ensamble de GFS (Fig. 36) se puede ver que ningún miembro del modelo global logra pronosticar viento intenso sobre la zona del AMBA o sus alrededores, a diferencia de los mostrados por el SAP.SMN-ENS (Fig. 29). Cabe remarcar que los pronósticos del ensamble de GFS están disponibles cada 3 horas por lo que, en este caso, se analizan los campos válidos a las 03 HOA en vez de las 04 HOA como en el caso del SAP.SMN-ENS.

La Figura 37 muestra los pronósticos de ráfagas en superficie en términos de probabilidad. Puede verse que la probabilidad de tener ráfagas de más de 45 nudos en la zona del AMBA es nula.



**Figura 36:** Pronósticos del GEFS de magnitud de viento a 10 m válidos para el 17 de diciembre de 2023 a las 06 UTC e inicializados el 16 de diciembre de 2023 a las 00 UTC.



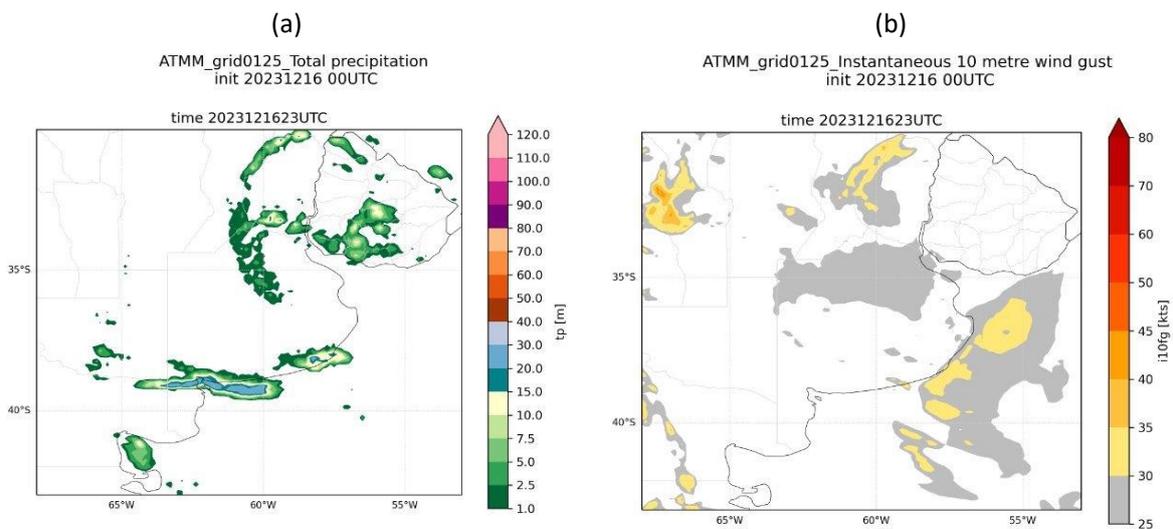
**Figura 37:** Pronósticos del GEFS de probabilidad de ráfagas en superficie mayor a 30, 45, 60 y 80 kt, válidos para el 17 de diciembre de 2023 a las 06 UTC e inicializados el 16 de diciembre de 2023 a las 00 UTC.

### 4.3 El modelo IFS

Todos los pronósticos operativos del ECMWF provienen del Sistema Integrado de Pronóstico versión 48r1 (IFS, por sus siglas en inglés). Incluye los modelos dinámicos globales atmosférico y oceánico y el sistema de asimilación de datos. En particular, para este trabajo se utilizaron los pronósticos provenientes de las siguientes componentes del IFS: el pronóstico determinístico en alta resolución a 10 días (HRES) y el ensamble operativo a 15 días (ENS). Asimismo, se utilizó la información de los índices Extreme Forecast Index (EFI, por sus siglas en inglés) y Shift Of Tails (SOT, por sus siglas en inglés) que dan cuenta de la magnitud de los extremos pronosticados con relación al clima del modelo. Más información sobre el cálculo de estos índices se puede encontrar [aquí](#).

#### 4.3.1 Ciudad de Bahía Blanca

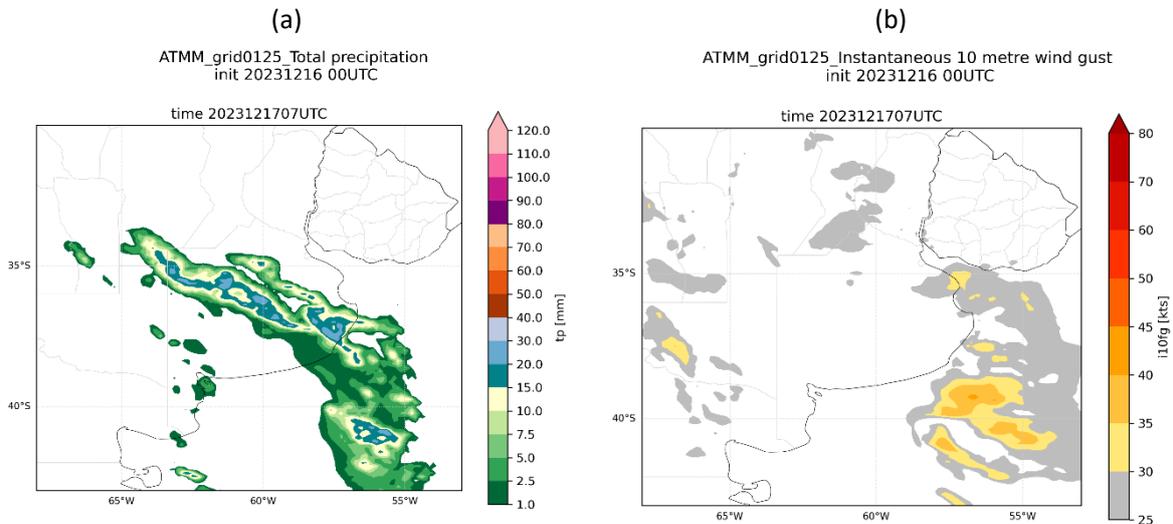
La Figura 38 presenta los campos de precipitación acumulada (izquierda) y ráfagas instantáneas (derecha) válidos para las 23 UTC (20 HOA) del día 16. En el campo de precipitación se puede ver que el máximo de alrededor de 15mm se ubica sobre Bahía Blanca con un patrón espacial más zonal y de menor intensidad que en el caso de WRF (Fig. 24). Por otra parte, el modelo no logra pronosticar ráfagas para la región de interés.



**Figura 38:** Pronósticos del HRES de (a) precipitación y (b) ráfagas de superficie válidos para el 16 de diciembre de 2023 a las 23 UTC e inicializados el 16 de diciembre de 2023 a las 00 UTC.

#### 4.3.2 Área Metropolitana de Buenos Aires

Del mismo modo que para Bahía Blanca, la Figura 39 presenta los campos de precipitación acumulada (izquierda) y ráfagas instantáneas (derecha) válidos para las 07 UTC (20 HOA) del día 17. En el campo de precipitación se puede ver el retraso del sistema en su aproximación al AMBA, algo también observable en el GFS (Fig. 35). Los pronósticos de ráfagas, no se observan particularmente sobre Buenos Aires, sino que se pronostican hacia el sudeste con una intensidad de 25 nudos. Si bien se observan los máximos asociados a la convección sobre el océano, esto no se refleja de igual manera sobre el continente.

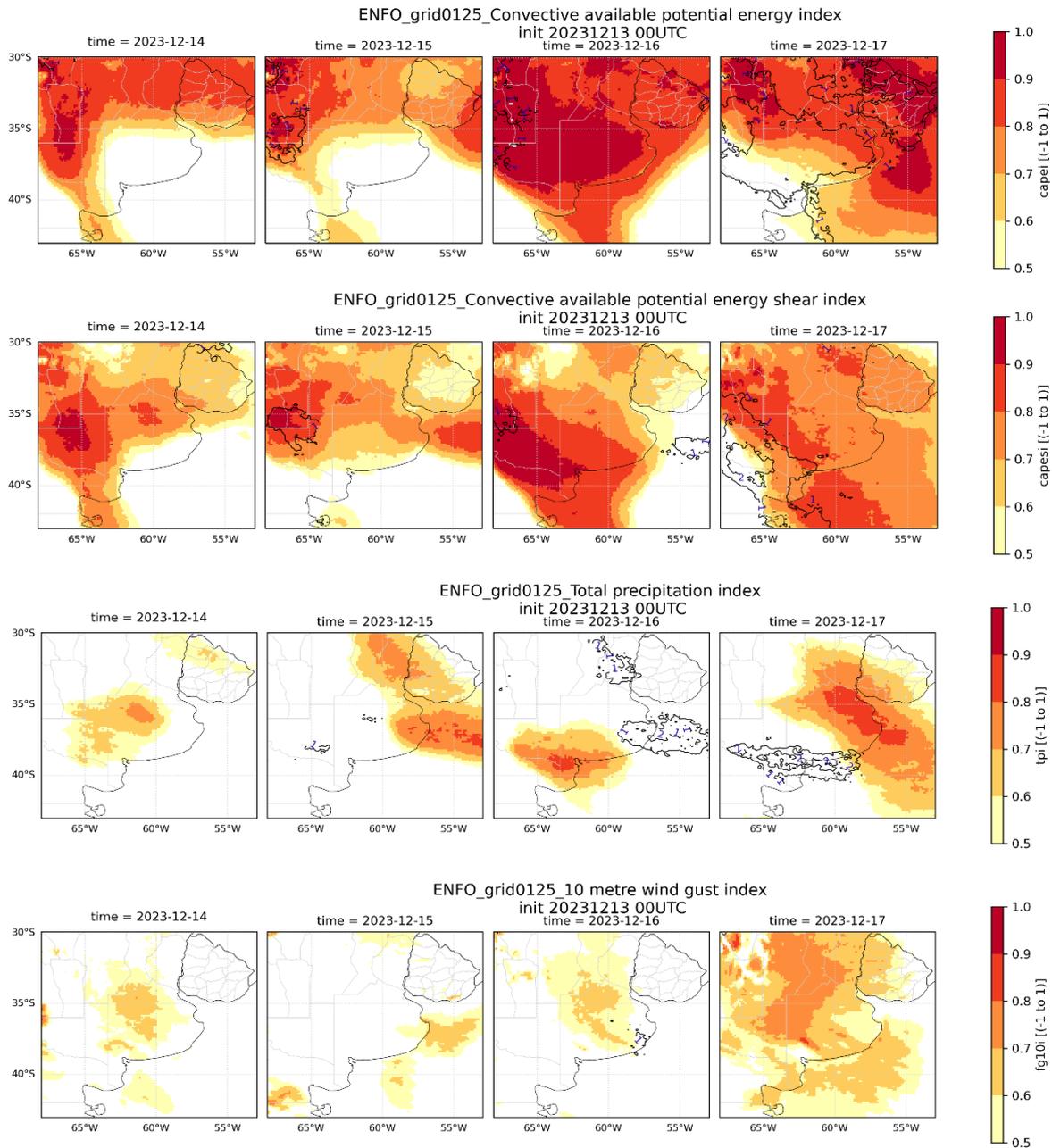


**Figura 39:** Pronósticos del HRES de (a) precipitación y (b) ráfagas de superficie, válidos para el 17 de diciembre de 2023 a las 07 UTC e inicializados el 16 de diciembre de 2023 a las 00 UTC.

### 4.3.3 Panorama general pronosticado

Un análisis de los EFIs de distintas variables nos ayuda a tener una visión general de lo evolución del pronóstico. Este índice, que toma valores entre -1 y 1, proporciona una medida de cuán extremo sería el evento pronosticado con respecto a la climatología del modelo. La evolución de los campos de EFIs pronosticados para cuatro días sucesivos puede apreciarse en la Figura 40. El pronóstico es inicializado el 13 de diciembre a las 00 UTC y se muestran los EFI de ráfagas, precipitación total, CAPE y CAPE-shear, este último es un indicador que combina tanto el CAPE disponible como la cortante vertical de niveles bajos existente (ver definición en Tsonevsky 2015). Asimismo, mantiene también una estrecha relación con la probabilidad de granizo y actividad eléctrica (ver por ejemplo Battaglioli y otros 2023). Es importante tener en cuenta que los valores de EFI corresponden a valores extremos para el día que se menciona, por ejemplo, un pronóstico de EFI de ráfagas de viento válido para el día 16 significa que se pronostican ráfagas extremas entre el día 16 y 17.

Se puede ver que ya para el día 14 se pronosticaban altos valores de EFI de CAPE y CAPE-shear indicando convección sobre La Pampa, Córdoba y Entre Ríos, lo cual se registró durante los días previos a los eventos registrados en Bahía Blanca y Buenos Aires. Con tres días de anticipación el EFI de CAPE mostraba valores mayores a 0.9 cubriendo casi toda la provincia de Buenos Aires mientras que el EFI de CAPE-shear quedaba restringido sobre el sur, y en particular sobre Bahía Blanca. Asimismo, el CAPE de precipitación también muestra valores superiores a 0.8 sobre la región de Bahía Blanca, aunque el CAPE de ráfagas presenta una señal más adelantada hacia el norte, lo que puede estar asociado con la ocurrencia de viento norte de mayor escala previo a la convección. En cambio, para el día 17 se ven máximos de EFI de CAPE y de precipitación, pero el EFI de CAPE-shear llega a valores moderados como el de ráfagas.



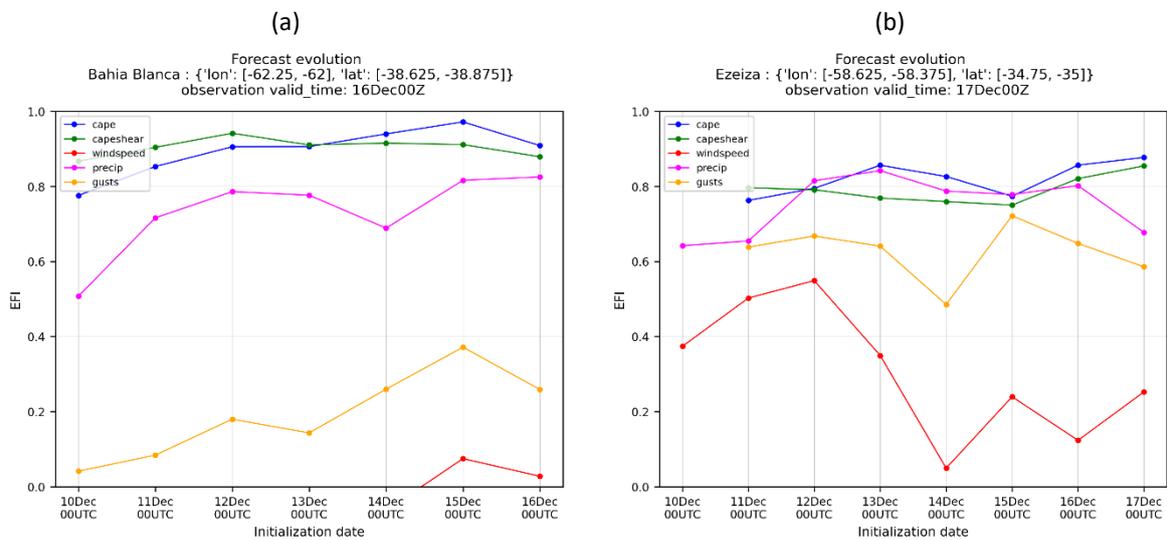
**Figura 40:** EFIs de las variables CAPE, CAPE-shear, precipitación y ráfagas (de arriba hacia abajo), de pronósticos inicializados el 13 de diciembre de 2023 a las 00UTC válidos para cuatro días consecutivos 14, 15, 16 y 17 de diciembre.

#### 4.4 Análisis de predictibilidad

La Figura 41 muestra la evolución del pronóstico de EFI en función de distintas fechas de inicialización. Dado que los valores de EFI son integrados en 24h y computados con una inicialización en 00 UTC, en el caso de Bahía Blanca la serie se muestra hasta el 16 de diciembre de acuerdo con el momento en que fueron registrados los máximos de viento y ráfagas en superficie. En cambio, para Ezeiza se consideró una

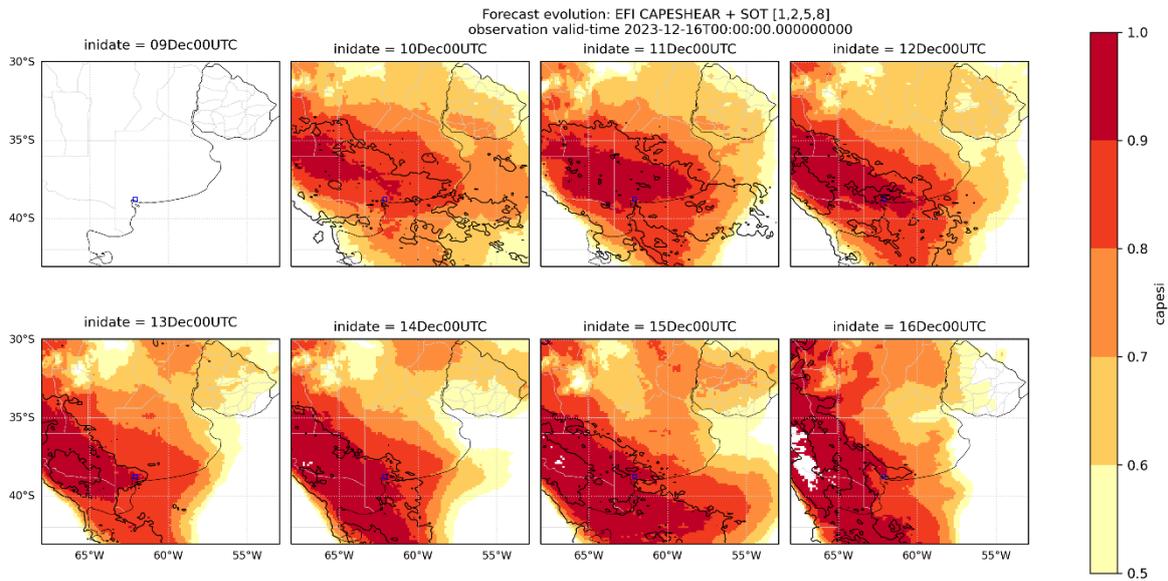
validez para el 17 de diciembre a las 00 UTC dado que los mayores impactos se registraron durante esa madrugada.

En el caso de Bahía Blanca se puede ver que los EFI de CAPE y CAPE-shear toman valores superiores a 0.8 --y en ocasiones arriba de 0.9-- indicando la posibilidad de ocurrencia de eventos inusuales extremos pronosticados con al menos 6 días de anticipación. La señal de precipitación no es tan fuerte mientras que la magnitud de viento y las ráfagas no muestran señal en ninguno de los días previos al evento. En el caso de Ezeiza, los EFI de CAPE y CAPE-shear e incluso precipitación rondan valores cercanos a 0.8 y el EFI de ráfagas, si bien es menor, indica un pronóstico de ráfagas inusuales valido entre el 17 y el 18 de diciembre. Hay que tener en cuenta que estas ráfagas no necesariamente se refieren a los eventos convectivos, sino que probablemente hayan estado asociadas al fuerte viento norte anterior al pasaje del frente.



**Figura 41:** Evolución del pronóstico de EFI para distintas variables para (a) Bahía Blanca y (b) Ezeiza. La abscisa indica el día de inicio del pronóstico, siendo todos válidos para el día del evento en las respectivas ciudades.

La Figura 42 muestra la evolución del pronóstico de CAPE-shear a lo largo de una semana para el día 16 de diciembre, en el que se observaron los eventos en la zona de Bahía Blanca. Se puede ver que una zona de máximo de EFI se encontraba desde una semana antes en la misma región sin demasiada variación, mayormente en La Pampa, y sur de la provincia de Buenos Aires. La situación general muestra alta predictibilidad y la ocurrencia de impactos importantes en la zona puede confirmarse comparando con la Figura 15.



**Figura 42:** Evolución del pronóstico de EFIs y de SOT (contornos) válidos para el 16 de diciembre para CAPE-shear. Cada campo corresponde a una diferente fecha de inicialización.

## 5. PRONÓSTICOS OFICIALES DEL SMN Y SU GÉNESIS

### 5.1 Evolución de las Alertas

A continuación, se detallan los alertas y avisos a corto plazo emitidos para la localidad de Bahía Blanca y el AMBA para el evento meteorológico en cuestión.

#### Actualización jueves 14/12 a las 8:09 AM



El área será afectada por lluvias y tormentas, algunas localmente fuertes o severas. Se espera que las mismas estén acompañadas por ráfagas intensas, caída de granizo de diversos tamaños, actividad eléctrica y, principalmente, abundante caída de agua. Se prevén valores de precipitación acumulada entre 60 y 100 mm, pudiendo ser superados en forma puntual.

#### Línea de tiempo para Bahía Blanca sábado 16



Actualización viernes 15 a las 07:02 AM



El área será afectada por lluvias y tormentas, algunas localmente fuertes o severas. Se espera que las mismas estén acompañadas por ráfagas intensas, caída de granizo de diversos tamaños, actividad eléctrica y, principalmente, abundante caída de agua. Se prevén valores de precipitación acumulada entre 60 y 100 mm, pudiendo ser superados en forma puntual.

Línea de tiempo para Bahía Blanca sábado 16



Línea de tiempo para CABA domingo 17



Actualización viernes 15 a las 19:05

Fecha de emisión: 15/12/2023 19:05h



Fecha de emisión: 15/12/2023 19:05h



El área será afectada por lluvias y tormentas, algunas localmente fuertes o severas. Se espera que las mismas estén acompañadas por ráfagas intensas, caída de granizo de diversos tamaños,

actividad eléctrica y, principalmente, abundante caída de agua. Se prevén valores de precipitación acumulada entre 60 y 100 mm, pudiendo ser superados en forma puntual.

Línea de tiempo para Bahía Blanca sábado 16

Tormentas 2023-12-15 19:05:35 Informate Informate Preparate Preparate

Línea de tiempo para CABA domingo 17

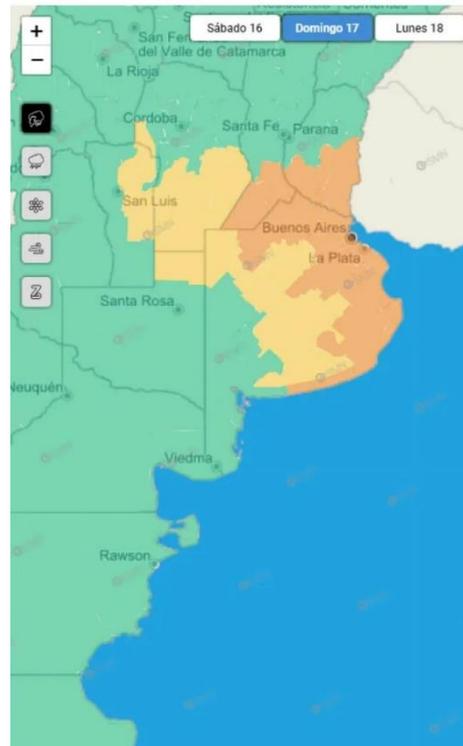
Tormentas 2023-12-15 19:05:35 Informate Informate Tranquilidad Tranquilidad

Actualización sábado 16 a las 07:03 AM

Fecha de emisión: 16/12/2023 07:03h



Fecha de emisión: 16/12/2023 07:03h



El área será afectada por lluvias y tormentas, algunas localmente fuertes o severas. Se espera que las mismas estén acompañadas por ráfagas intensas, caída de granizo de diversos tamaños, actividad eléctrica, y principalmente abundante caída de agua. Se prevén valores de precipitación acumulada entre 40 y 100 mm, pudiendo ser superados en forma puntual.

Línea de tiempo para Bahía Blanca sábado 16

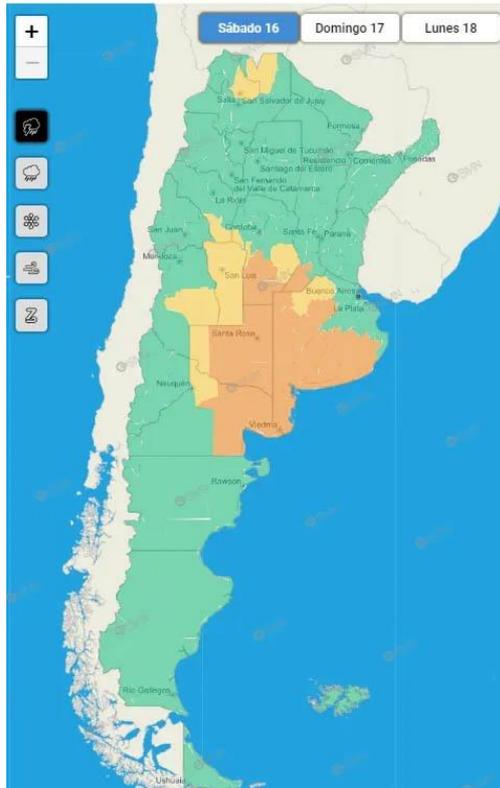
Tormentas 2023-12-16 07:03:35 Informate Preparate Preparate

Línea de tiempo para CABA domingo 17

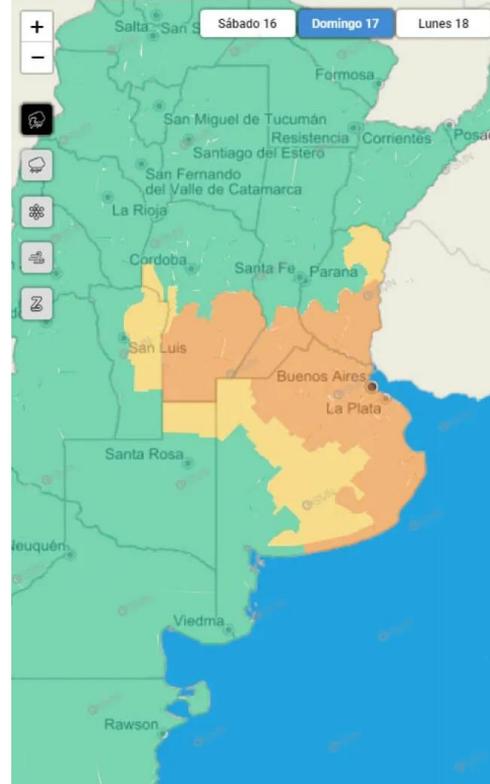
Tormentas 2023-12-16 07:03:35 Preparate Preparate Tranquilidad Tranquilidad

Actualización sábado 16 a las 17:44 HOA

Fecha de emisión: 16/12/2023 17:44h



Fecha de emisión: 16/12/2023 17:44h



El área será afectada por tormentas, algunas localmente fuertes o severas. Se espera que las mismas estén acompañadas por ráfagas muy intensas con velocidades que pueden superar los 100 km/h, caída de granizo que localmente podría ser de gran tamaño, muy fuerte actividad eléctrica y abundante caída de agua en cortos periodos. Se prevén valores de precipitación acumulada entre 70 y 130 mm, pudiendo ser superados en forma puntual.

Línea de tiempo CABA domingo 17



## 5.2 De los pronósticos numéricos a las Alertas

Con el objetivo de obtener un panorama de las vivencias de los pronosticadores durante el evento, se realizó un dialogo que tuvo lugar seis meses después de la ocurrencia del evento. En general, análisis posteriores a los eventos se realizan inmediatamente después y concluye con la producción de un informe. En este caso, la idea detrás de este diálogo fue hacer explícito opiniones que en las discusiones entre pronosticadores se dan por descontadas, de manera tal que los involucrados en el estudio del caso tengan una visión más clara de cómo vivieron los protagonistas el evento y como arribaron a la toma de decisión.

—La situación de ese día fue bastante particular para el mes de diciembre. Había un bloqueo en la parte noreste del país y se veía una vaguada con una zona de viento máximo pronosticado para el sábado. Ya desde el jueves empezamos a ver esto. Desde el viernes estaba bastante clara la situación, y se esperaba

que algún evento importante iba a suceder en provincia de Buenos Aires. Ya veníamos nosotros con alertas a nivel amarillo. Inclusive la alerta naranja en Bahía Blanca salió con mucha anticipación, del jueves para el sábado.

— *Sería interesante saber cómo ustedes llegan a la conclusión de que algo va a pasar, y de qué tipo de fenómenos van a tener lugar.*

—Nosotros tenemos varias herramientas como para poder ir viendo que algún evento puede salir de lo normal, y uno de ellos es el EFI<sup>2</sup>...

—También miramos cartas que son las de rutina, las que usamos siempre como para tener un pantallazo general, que son las de superficie, 500 y 200 hPa. Con respecto al EFI, lo que miramos son el EFI de precipitación, de viento y de nevadas.

—*¿No miran el EFI de CAPE?*

— Sí, pero eso para algo ya más puntual, lo que comenté son más como para dar un primer pantallazo. Nosotros, inclusive en las presentaciones que hacemos todos los días, miramos el EFI; pero no solo para el otro día, sino que vamos viendo el EFI a 5 o 6 días. Entonces, ya se nos va formando la idea de dónde hay que mirar en los próximos días. Por ejemplo, si el EFI a cuatro días está marcando algo, ya para nosotros eso es un semáforo que se enciende. Entonces, para este evento esa primera señal fue la del EFI. Sobre todo en diciembre, porque para ese mes era una situación bastante rara. La señal del EFI sugería que iba a haber algo, algún fenómeno anormal de precipitación, pero por supuesto, no sabíamos cuánto. Primero había una señal muy fuerte del EFI, incluso los vientos norte ya tenían un EFI cercano a 1, o sea una fuerte advección de humedad. De hecho, en las cartas de 850 hPa se veía una lengua de humedad bastante marcada, que llegaba hasta el centro de Buenos Aires, sur de Córdoba, aunque no tan al sur como para tocar Bahía Blanca. Y después también los EFI reflejaban los vientos del sur posteriores al evento. También una señal muy intensa; y bueno desde ya que también vimos los EFIs de precipitación altísimos desde el sur de Córdoba hasta Bahía Blanca y sus alrededores.

—Sí, yo creo que en líneas generales las cartas que vimos mostraban algo fuerte, por supuesto definir que iba a suceder puntualmente en Bahía Blanca, era imposible. Sabíamos que era el área del sudoeste de la provincia de Buenos Aires, incluyendo Bahía Blanca. Después el sistema barrió hacia el norte. El tamaño del área afectada fue un problema porque teníamos que tener toda la provincia o bien en alerta naranja o roja.

—Un elemento positivo para esta situación fue que todos los modelos que miramos --El GFS el del centro europeo y el WRF-- vieron bastante bien la situación<sup>3</sup>. Quizás no pronosticaron la escala máxima puntual de algunos lugares, pero vieron el todo bastante bien, el avance rápido, incluso los horarios en que ocurrirían. El pronóstico para CABA estuvo bastante bien con los horarios. Era un sistema que avanzaba muy rápido y sin embargo todos los modelos lo iban siguiendo bastante bien.

---

<sup>2</sup> EFI es el acrónimo del Extreme Forecast Index desarrollado por el ECMWF, ver <https://charts.ecmwf.int/?query=efi> .

<sup>3</sup> Es interesante tener en cuenta que en lugares como Met Office existe una oficina que provee información a los pronosticadores sobre la calidad de los modelos que se utilizan, lo que permite a estos dar diferentes pesos a los diferentes escenarios propuestos por los modelos. Esta capacidad todavía está en desarrollo en el SMN, donde los pronosticadores usan criterios subjetivos en la toma de decisión (ver Brown y Buchanan, 2018).

—Nosotros estuvimos estudiando las últimas horas del evento, sobre todo el pasaje sobre AMBA, y en del Centro Europeo no se ve tan bien. O sea, quizás ustedes estaban poniendo más atención en el WRF, ¿puede ser?

—La decisión final la tomamos con el WRF. Lo miramos en la rueda que hacemos todos los días a un horizonte de 3 días, 2 días, 1 día; incluso esperamos la corrida de 12Z, no nos quedamos con la de 6Z para la decisión final.

— La carta de divergencia del GFS mostraba, a nivel vectorial, la enorme divergencia esperada en altura. La flecha se salía del mapa prácticamente en todo lo que es sur de Córdoba y noroeste de Buenos Aires, o sea más al norte de lo que fue lo de Bahía Blanca, pero era increíble como marcaba divergencia en altura ya desde los días previos. No sirve para un pronóstico puntual porque es un gráfico bastante burdo, pero te da una señal, una muy rápida idea de dónde va a haber eventos con ascensos muy importantes.

—Con respecto al WRF, ¿qué es lo que miran exactamente? ¿miran las variables del medio ambiente, digamos los "ingredientes", o miran las variables que tienen impacto directo, como las ráfagas y la reflectividad por ejemplo?

— Miramos todo, pero evidentemente particularizamos tanto con las ráfagas como con los COLMAX (máximos de reflectividad simulados). En particular cuando hay chances de que se forme una línea de inestabilidad. Lo que hay que tener cuidado, e incluso pasó en esta situación que discutimos, es que a veces de una corrida a otra va cambiando el patrón...

—Pero en este caso no era sorprendente, ya que incluso los miembros del ensamble eran muy distintos entre sí. Ustedes, entiendo que, por cuestiones de tiempo, tienden a mirar sobre todo el determinístico, pero el panorama que te daba la visión de los 20 miembros es de una gran heterogeneidad, de gran incertidumbre en la ubicación de los eventos. En algunos tenías una línea de inestabilidad en una zona, en otros sectores aislados de convección aquí y allá.

—Sí, por ejemplo, la noche previa del viernes al sábado, el WRF en un momento dado da un sistema convectivo por el sur de la provincia de Buenos Aires, que finalmente nunca apareció. Y en la corrida siguiente ya no estaba. Generalmente lo que yo hago es ver si el modelo global lo apoya en esa idea o no, porque a veces el WRF se desacopla, y si el global no hace eso, le doy menos confianza,

—Una vez que ustedes tienen confianza de que algo va a pasar, que hay divergencias en altura, que está todo preparado para algún fenómeno convectivo importante ¿Cuál es el paso posterior para empezar a describir lo que va a pasar durante esa alerta? En este caso por ejemplo se dice que va a haber tormentas con vientos de más de 100 km/h. ¿cómo llegan a esto?

—Primero, una vez que evaluaste el evento y considerás que va a ser fuerte, hay que mirar los umbrales que tenemos para poder decidir de qué tipo de alerta se trata<sup>4</sup>. Para una alerta naranja estamos pensando en tormentas donde tengas ráfagas que sean mayores de 90 km/h. El caso de tormentas y las ráfagas es complejo, porque una cosa son las ráfagas esperadas post frontales, que son más fácil de predecir, y otra la asociada a la convección. Ahí se hace más difícil, uno tiene que estar mirando el sondeo, la cortante, etc. Estás mirando el sondeo del día previo y el del día de la tormenta, pero lamentablemente en Bahía Blanca no hay sondeos (aunque sí en Santa Rosa). Y se pidió un sondeo especial para las 18Z en Santa Rosa y Aeroparque y después pedimos otro para las 0Z en Aeroparque. Cuando uno prevé eventos así de

---

<sup>4</sup> Ver Saucedo y otros (2021), en particular su Fig. 4 y 5.

importantes se piden sondeos extras, que por cuestiones de presupuesto o logísticas no siempre están disponibles, pero esta vez estaban.

— *Una vez que ustedes ven todo ese panorama, aparece el tema del color de la alerta ¿Cómo resuelven este punto?*

— Cuando es una situación tan nítida y que se ve con tanto tiempo de anticipación, lo primero que hacemos es la pintamos primero de amarillo a 3 días. De esta manera los usuarios ya van a tener una idea que algo fuerte puede ocurrir. Después viene la parte más delicada de la elevación de la alerta a naranja o rojo, que ya es todo un proceso bastante más elaborado entre quienes estamos en SAT y las OVM correspondiente a la región en cuestión. En este caso particular, yo el día anterior (16 de diciembre) había hablado con Córdoba, porque nuestra duda era si poníamos algún rojo y en dónde. En ese momento el sur de Córdoba y el noroeste de Buenos Aires era donde se acumulaba más agua en menos tiempo. Recuerdo que dijeron "con el naranja vamos a estar bien; en esta zona no se van a llegar a los umbrales de precipitación de rojo".

— Entre los pronosticadores cuando hacemos el pasaje de turno, vamos chequeando, cosa de que no te sorprenda la presencia de un naranja, sino que, como decíamos antes, lo veníamos siguiendo por cuatro o cinco días. El de Bahía Blanca fue bastante difícil. El WRF daba una señal bastante importante ahí en el suroeste de Buenos Aires y después se movía hacia el norte,

— *Ustedes decidieron que fuera naranja y pasó lo que pasó. O sea, hay una alerta naranja que ocupa un área más grande que la provincia de Buenos Aires<sup>5</sup> para el sábado 16 a la tarde noche y el 17 a la mañana del domingo. Esto lo hablamos con alguno de ustedes y mencionaban la duda en ese momento sobre si debería ser naranja o roja. Ahora, al no existir un procedimiento que contemple todas las opciones, no se puede saber a posteriori si la elección de los colores fue las más apropiada o no. Era tan grande el área que, si se la pone rojo, hay luego muchas chances de que haya lugares donde no pasa nada o casi nada. Entonces, ¿ustedes creen que el naranja es el color apropiado cuando tienen áreas que darían para rojo mezcladas con otras verdes o amarillas?*

— Es muy difícil definir el color porque ¿con cuál de todos los parámetros que define a la tormenta podrías definir el color de la mejor manera? ¿con los vientos de la tormenta, con las descendentes, con la existencia de un *bow echo*, de una línea de inestabilidad, por el tamaño del granizo, por la presencia de actividad eléctrica? Son todas cosas que son muy difícil de cuantificar en un simple mapa, en un campo<sup>6</sup>. Nosotros usamos los acumulados de precipitación como proxy, así *grosso modo*, pero después es muy difícil que un acumulado llegue a esos valores en media hora, que por ahí fue lo que duró la tormenta. Creo que eso hace que sea muy difícil estandarizar perfectamente el rojo en tormentas. En otros fenómenos es bastante más tangible todo, --precipitación acumulada, viento sinóptico, vientos sostenidos, centímetros de nieve-- es todo bastante más claro. Pero con tormentas puede afectar tanto el tamaño del granizo, la actividad eléctrica o las ráfagas posteriores a la tormenta. Entonces es muy difícil.

---

<sup>5</sup> Casi el doble de la provincia de Buenos Aires, ver sección 5.1, actualización sábado 16 a la tarde, combinando sábado y domingo.

<sup>6</sup> Esto coincide con comentarios en Brown y Buchanan, (2018): "There are multiple ways to infer thunderstorm risk from numerous parameters and so it is not appropriate to define events based on stringent thresholds. "

—Aparte no queremos pecar de exagerados con el uso del rojo, porque es así como el público termina perdiendo confianza en las alertas. La alerta roja es muy delicada. Es más, el procedimiento es distinto en lo que respecta a la comunicación con las defensas civiles<sup>7</sup>.

### 5.3 El seguimiento continuo por ACPs

Las alertas meteorológicas no son la última instancia de comunicación entre el SMN y los usuarios, sino que para esto se utilizan los Avisos meteorológicos a muy corto plazo (ACPs). Estos son emitidos en forma de polígonos encerrando el área en riesgo, cuando los fenómenos como tormentas fuertes o severas, vientos o lluvias intensas han sido detectados por instrumental o testigos oculares (para una discusión en detalle de los APCs ver San Martino y otros 2019, Ishikame y otros 2022, Saucedo y otros 2023, Lohigorry y otros 2024).

La Figura 43 ilustra la evolución en el tiempo de los ACPs (polígonos) y su color indica el momento de su emisión. Más allá de su rol como "último aviso a la población" es interesante destacar que en su conjunto sirven para confirmar la zona donde efectivamente se encontraron fenómenos juzgados significativos por los pronosticadores de la *Coordinación de Pronósticos Inmediatos*. Es interesante también comparar el área cubierta por los ACPs en esta figura con la evolución de alertas discutida en la Sección 5, en particular con la evolución temporal de impactos presentadas en Figura 18. En general se ve una buena coincidencia excepto en la región del sur de Córdoba, norte de La Pampa y noroeste de la Prov. de Buenos Aires donde no existieron ACPs. Cabe aclarar no obstante que el sur de Córdoba tiene una pobre cobertura por radar, lo cual limita la emisión de ACPs.

Si bien en la Figura 43 se muestran los ACPs como si estos fueran idénticos, en la práctica los ACPs tienen una identidad propia dependiendo de los factores meteorológicos más relevantes sobre los que se advierte. La Figura 44 muestra la distribución de ACPs de acuerdo con las amenazas sobre las que se advierte. La diferencia más importante para remarcar es entre tormentas fuertes y severas, este último el escalón más alto en lo que respecta a severidad. Además, también se puede ver que el ACP más frecuente fue *Tormentas fuertes, con lluvia intensa, ráfagas y ocasional caída de granizo* (quizás el más estándar de los avisos para describir eventos convectivos), pero al mismo tiempo se pueden ver otros más específicos que por ejemplo no contienen avisos de granizo, o de ráfagas o de lluvias intensas.

---

<sup>7</sup> Es importante notar que la tendencia a evitar las alertas rojas es bastante común en los servicios meteorológicos. En algunos casos esta posición es explícita, como en Météo-France que tienen una política de "cero falsa alarma" para las alertas rojas (ver Gillet-Chaulet 2020). Esta posición coincide con las sugerencias en general de la OMM (WMO 2018) sobre la necesidad de minimizar falsas alarmas en los sistemas de alerta.

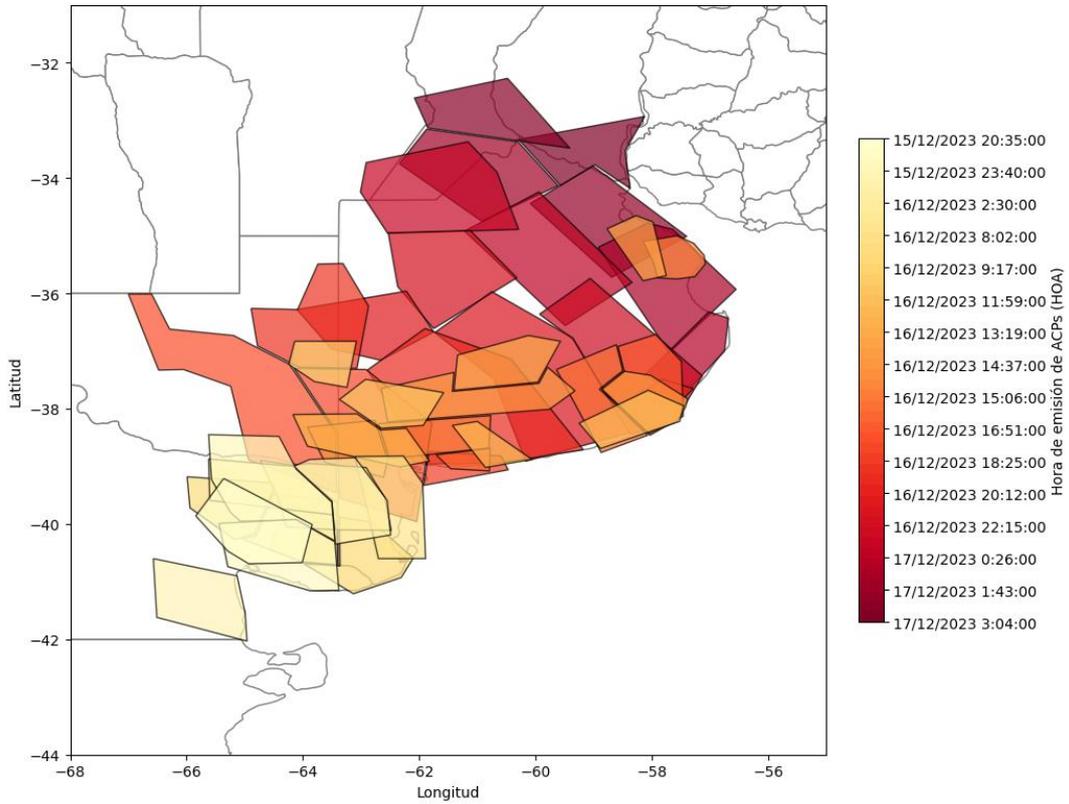


Figura 43: Evolución de los Avisos meteorológicos a muy corto plazo (polígonos en color) a lo largo del evento. El color corresponde al tiempo en que fueron emitidos (leyenda en color a la derecha).

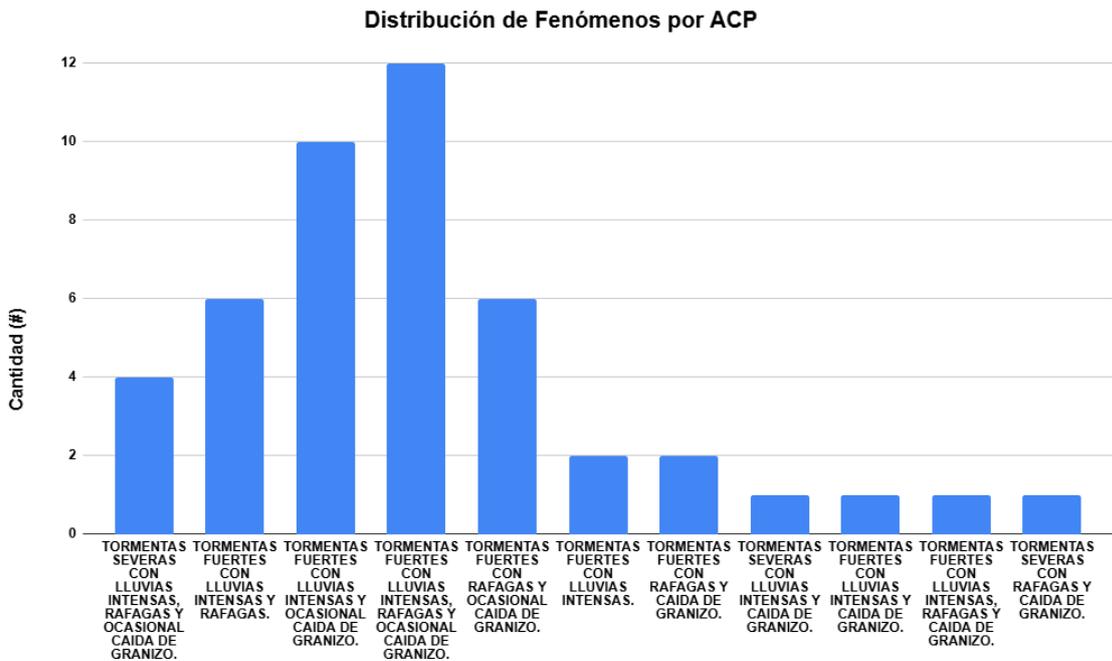


Figura 44: Distribución de ACPs de acuerdo con las amenazas que el pronosticador considera más importantes para cada caso.

## 6. CONCLUSIÓN

Esta Nota Técnica provee una visión integradora de la multiplicidad de elementos que involucran al SMN durante el desarrollo de un evento extremo. Como se puede ver, la misión de pronosticar obliga a la institución a adelantar lo más posible la información referida a un evento de esta naturaleza, monitorear su avance, evaluar su impacto y analizar a posteriori el desempeño institucional en todas las etapas. Esta última etapa es generalmente realizada sin mayor profundidad porque la institución ya se encuentra sometida a nuevos eventos meteorológicos que requieren su máxima atención.

El objetivo aquí fue utilizar el evento extremo para observar con más profundidad que de costumbre y revelar elementos que normalmente pasan desapercibidos. Lo primero a notar es que, dado que muchos de los participantes no comparten actividades de manera cotidiana, algunas temáticas discutidas resultaron novedosas para varios de ellos. Por esta razón creemos que esta Nota Técnica puede ser un texto clave para comprender el funcionamiento de la institución, no solo puertas afuera, sino para el personal ya existente o por incorporarse. La extensión de este trabajo impide que pueda tomarse como modelo para futuro reportes de eventos, sin embargo, debería servir para diseñar un reporte de eventos que sea más automático y completo de lo que es en la actualidad.

Como se puede apreciar, para el SMN un evento excede el evento meteorológico en sí. Es decir, la amenaza de un posible evento meteorológico --fundamentada con una variedad de pronósticos numéricos-- es ya un "hecho", en el sentido que pone en movimiento un número de medidas. La amenaza estudiada aquí se concretó en la realidad, pero podría no haberlo hecho, dando lugar a una falsa alarma. Por ejemplo, la tormenta sobre Bahía Blanca podría haber ocurrido fuera de la ciudad, o sobre el mar teniendo un impacto muy menor o haber sido más débil que lo esperado.

Así como la aparición de un pronóstico numérico amenazante es un "hecho" en el SMN, también lo es en la sociedad cuando el SMN transmite a la población esta amenaza. Este hecho finaliza cuando el evento meteorológico finalmente no ocurre, o cuando se termina de discutir en los medios el impacto de este. Lo mencionado en esta Nota Técnica tiene que ver con diferentes piezas de información que definen un evento en el SMN, desde la predicción de un evento meteorológico hasta sus secuelas si las hubiera.

En todas las secciones aquí presentadas fue necesario elaborar información con la que no se trabaja habitualmente, por ejemplo, con la utilización de observaciones no pertenecientes al SMN, realización de cálculos con datos de pronósticos a los que el SMN no tiene acceso de manera ordinaria, e información de impacto obtenida a través de otros organismos o recogida de la prensa. Sería de interés para la institución analizar la necesidad de contar con este tipo de información de manera más fluida a la hora de hacer informes "convencionales" al público o las autoridades, al mismo tiempo que sería importante que el SMN defina de manera más meditada la estructura que estos informes deberían tener y qué discurso deberían favorecer. Por ejemplo, en el informe original que siguió a la ocurrencia de este evento se discutió exclusivamente su evolución a través de las observaciones y la relación entre estas y las características de las alertas.

Esta manera de describir el evento soslaya el rol primordial jugado por los modelos numéricos como soporte a la toma de decisión sobre alertas, y las limitaciones de estos que pueden resultar en errores que expliquen en parte los yerros de los pronosticadores cuando los hay. Esta perspectiva --que se trata de evitar en esta Nota Técnica--, acarrea riesgos importantes para la institución porque le hace cargar en sus espaldas problemas que no le pertenecen. Por ejemplo, la "baja predictibilidad" de un evento --un problema intrínseco a su naturaleza--, pueda ser leído como "baja pericia de los pronosticadores" por parte de la sociedad. En

otras palabras, la no referencia a los pronósticos numéricos hace que naturalmente el pronosticador "se apropie" de los eventos de baja predictibilidad y de la incertidumbre de los modelos.

Para evitar este tipo de postura, esta Nota Técnica presenta un panorama de la evolución del pronóstico que les sirve a los pronosticadores para apoyarse y explicar el proceso de decisión en el que se basaron. Esto requeriría que se produzca un cambio en los próximos informes sobre eventos que tienen lugar. Por ejemplo, se podría contar con una "plantilla" de informe prediseñada. Un elemento clave de esa plantilla sería el establecer la postura de la institución, lo que implica un discurso estructurado que debería mencionar la predictibilidad del evento, en su situación general ("ingredientes"), intensidad, timing, macro, meso, y micro localización espacio temporal. En este sentido se podría utilizar frases del tipo como las que se mencionan en la Tabla VI.

**Tabla VI:** Ejemplos de expresiones que podrían utilizarse en los informes de estudios de caso para facilitar la comprensión del lector sobre el proceso y desafíos del pronóstico.

<b>Rol</b>	<b>Tipo de texto</b>
<i>Advertir del rol de los modelos numéricos como precursores</i>	"Los modelos comenzaron a tener señal del evento severo a partir del ..."
<i>Ilustrar que algunas predicciones están acompañadas de incertidumbre</i>	"El evento registrado era de muy baja probabilidad de acuerdo con lo que mostraban los modelos numéricos días antes"
<i>Los problemas de escala y su influencia a la hora de pronosticar</i>	"Los modelos daban una idea de la zona donde los eventos podrían ocurrir, pero no una localización precisa que hubiera permitido..."

El SMN ha hecho esfuerzo en los últimos años para objetivar la emisión de alertas. Como en muchas otras instituciones del mundo, no obstante, se deja un margen de maniobra a la perspectiva subjetiva del pronosticador de turno. Este es el tipo de desafío que se ve en la Sección 5.2 donde los pronosticadores explican el proceso de toma de decisión del lanzamiento de la alerta. Este proceso, complejo y con alto estrés por las implicancias de las decisiones<sup>8</sup>, suele realizarse a puertas cerradas, por lo cual esta Nota Técnica ofrece una ventana para conocer el tipo de discusión que tiene lugar. También se puede extraer de esa entrevista algunos elementos de la toma de decisión que podrían mejorarse. Por ejemplo, en lo que refiere al tipo de alerta que implica un evento que aparentemente acarrearía tiempo severo correspondiente a alertas rojo mientras que en otros correspondería amarillo. ¿Se privilegia el rojo como medida de protección a la población o el naranja para evitar falsas alarmas tan conspicuas? La institución debería definir más claramente este tipo de eventualidades para no trasladarle innecesariamente al pronosticador la inconsistencia de los pronósticos.

Un elemento claro que deja este análisis en lo que respecta a los pronósticos numéricos es que, a pesar del gran avance que han realizado los modelos globales, la modelización regional (WRF-SMN en este caso) sigue teniendo un valor clave a la hora de conocer los detalles del evento pronosticado. Los modelos globales, sin embargo, hacen un trabajo único al pronosticar con anticipación la situación general (los "ingredientes" que se necesitan para tal o cual fenómeno). Esta información sobre la situación general a venir ya resulta información clave para advertir al pronosticador los riesgos que esta situación puede acarrear. Luego, ya más cerca del evento, el pronóstico del modelo regional da más precisión sobre las eventualidades posiblemente asociadas.

<sup>8</sup> Es importante saber que realizar pronósticos meteorológicos en ocasiones de eventos severos no es un trabajo para cualquiera y que pocos resisten el estrés, el compromiso y la responsabilidad que implica.

A pesar de la gran cantidad de información recopilada en este texto, varios puntos de interés quedaron afuera. Entre los puntos que serían interesante estudiar con más profundidad está la utilización de la información brindada por el SMN (alertas y Avisos de corto plazo) para la toma de decisión, tanto por la población, como por usuarios específicos y las defensas civiles.

## Agradecimientos:

Los autores agradecen a los que gentilmente nos han provisto de los datos para la producción de las figuras aquí presentadas. En particular al ECMWF que puso a nuestra disposición la base de datos MARS, a EANA por los datos de los AWOS, a la NOAA por los datos del modelo GFS-GEFS y del GOES-16, a la NASA por los datos de precipitación IMERG y de ENTLN Global Lightning Network, al SINARAME por los datos de su red de radares, a la Ciudad de Buenos Aires por los datos del radar Doppler localizado en Merlo, a la Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP) por los datos de viento, al SAMHI y al Centro de Operaciones de Emergencia de Municipalidad de Bahía Blanca por los datos de impacto.

La motivación para llevar adelante este Nota Técnica fue resultado de nuestra participación en el proyecto piloto *South American Regional Model Verification Pilot project* liderado por WGNE y JWGFVR de la OMM. De allí nuestro profundo agradecimiento a sus participantes: Lucia Castro, Alejandro Godoy, Natalia Herrera, Soledad Osos, Yanina Garcia Skabar, Federico Otero, Pablo Spennemann, Barbara Casati, Caio Coelho, Ariane Frassoni, Thomas Haiden, Estibaliz Gascon, Linus Magnusson, Hellen Msemo, y Nils Wedi.

## REFERENCIAS

Battaglioli, F., Groenemeijer, P., Tsonevsky, I., and Púčík, T., 2023: Forecasting large hail and lightning using additive logistic regression models and the ECMWF reforecasts, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 23, 3651–3669, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-3651-2023>.

Brown K., P. Buchanan, 2018: An objective verification system for thunderstorm risk forecasts, *Meteorol Appl*, 26, 140–152, <https://doi.org/10.1002/met.1748>

Corfidi, S. F., M. C. Coniglio, A. E. Cohen, and C. M. Mead, 2016: A Proposed Revision to the Definition of “Derecho”. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 97, 935–949, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00254.1>.

DiGangi, E. A., M. Stock, and J. Lapierre, 2022: Thunder Hours: How Old Methods Offer New Insights into Thunderstorm Climatology. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 103, E548–E569. Gillet-Chaulet, B., 2020: Expected utility, a benefit for the forecaster. *The European Forecaster*, 25, 39–41.

Hobouchian, M. P., Y. García Skabar., D. Barrera, D. Vila y P. Salio, 2017: Validación de la estimación de precipitación por satélite aplicando la técnica Hidroestimador. *Revista Meteorológica*, 42, 19-37. ISSN: 1850-468X.

Hobouchian, M. P., G. Díaz, L. Vidal, Y. García Skabar, L. Ferreira, M. Maas, M. S. Rossi Lopardo, H. Veiga y M. Rugna, 2021: Ajuste de la estimación de precipitación satelital IMERG con observaciones pluviométricas en Argentina. Nota Técnica SMN 2021-105. <http://hdl.handle.net/20.500.12160/1694>

- Huffman, G. J., and Coauthors, 2020: Integrated Multi-satellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission (IMERG). Satellite Precipitation Measurement, V. Levizzani et al., Eds., Advances in Global Change Research, Vol. 67, Springer, 343–353, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9_19).
- Ishikame, G., P. Lohigorry, y L. Pappalardo, 2022: Caracterización a los avisos a muy corto plazo en el período 2014 - 2021. Nota Técnica SMN 2022-134. <http://hdl.handle.net/20.500.12160/2202>
- Lohigorry, P., M. Patanella, M. Saucedo, S. Perez, 2024: El pronóstico inmediato de tormentas severas en el mundo y las posibilidades en Argentina. Nota Técnica SMN 2024-175. <http://hdl.handle.net/20.500.12160/2816>
- Magnusson L., 2019: ECMWF Severe Event Catalogue for Evaluation of Multi-scale Prediction of Extreme Weather Technical memorandum 851, ECMWF.
- Maldonado, P., M. E. Dillon, C. Matsudo, M. Alvarez Imaz, F. Cutraro, Y. García Skabar, S. Osos, S. Righetti, M. Sacco, 2024: Sistema de Asimilación de Datos y Pronóstico Numérico del SMN: el Impacto del Supercómputo y del Sensoramiento Remoto. 1° Congreso de Ciencia y Tecnología e Innovación para la Defensa, Buenos Aires, Argentina.
- Markowski, P. y Richardson Y., 2010: Mesoscale Meteorology in Midlatitudes. Wiley & Sons, Ltd.
- Mega, T., T. Ushio, T. Matsuda, T. Kubota, M. Kachi and R. Oki, 2018: Gauge-Adjusted Global Satellite Mapping of Precipitation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 57, 1928 – 1935. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2870199>
- Salio, P., y Coautores, 2024: Toward a South American High-Impact Weather Reports Database. Bull. Amer. Meteor. Soc., 105, E1204–E1217, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0063.1>.
- San Martino F., S. Pérez y G. Russián 2019: Verificaciones de pronósticos a muy corto plazo en el SMN. Nota Técnica SMN 2019-64. <http://hdl.handle.net/20.500.12160/1241>
- Saucedo, M., Campetella C., Cejas A., Cerrudo C., Amarin I., Stella J.L., 2021: Definición de umbrales meteorológicos para el nuevo sistema de alertas del SMN. Nota Técnica SMN 2021-109. <http://hdl.handle.net/20.500.12160/1723>
- Saucedo, M., Bertinetti, A., D’Amen, D., Menalled, M., Lohigorry, P., De Diego M., Fernandez, C., 2023: Relevamiento de los usos y valoraciones del Sistema de Alerta Temprana a través la página web del Servicio Meteorológico Nacional. Nota Técnica SMN 2023-138. <http://hdl.handle.net/20.500.12160/2429>
- Schenkman, A. D., Xue M., 2016: Bow-echo mesovortices: A review. Atmospheric Research, 170, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.11.003>
- Skamarock, W., J. Klemp, J. Dudhia, D. Gill, Z. Liu, J. Berner, X.Y. Huang, 2019: A description of the advanced research WRF model version 4. National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA, 145(145), 550.
- Torres Brizuela, M., Vidal R., Skabar Y.G., Nicolini M., Vidal L., 2011: Análisis del entorno sinóptico asociado con eventos de bow-echo en la provincia de Buenos Aires. Meteorologica 36:3–17.

Tsonevsky I. 2015: New EFI parameters for forecasting severe convection. ECMWF Newsletter No. 144. <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2015/17324-new-efi-parameters-forecasting-severe-convection.pdf>

Weisman, M. L., 1993: The Genesis of Severe, Long-Lived Bow Echoes. J. Atmos. Sci., 50, 645–670. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1993\)050%3C0645:TGOSLL%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1993)050%3C0645:TGOSLL%3E2.0.CO;2)

WMO, 2018: Multi—hazard early warning systems: A checklist. In Outcome of the first Multi—hazard Early Warning Conference, 22—23 May 2017, Cancun, Mexico. World Meteorological Organization

Zhou, X., Y. Zhu, D. Hou, Y. Luo, J. Peng, R. Wobus, 2017: Performance of the New NCEP Global Ensemble Forecast System in a parallel Experiment. Weather Forecast. 32, 1989–2004. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-17-0023.1>

## Instrucciones para publicar Notas Técnicas

En el SMN existieron y existen una importante cantidad de publicaciones periódicas dedicadas a informar a usuarios distintos aspectos de las actividades del servicio, en general asociados con observaciones o pronósticos meteorológicos.

Existe no obstante abundante material escrito de carácter técnico que no tiene un vehículo de comunicación adecuado ya que no se acomoda a las publicaciones arriba mencionadas ni es apropiado para revistas científicas. Este material, sin embargo, es fundamental para plasmar las actividades y desarrollos de la institución y que esta dé cuenta de su producción técnica. Es importante que las actividades de la institución puedan ser comprendidas con solo acercarse a sus diferentes publicaciones y la longitud de los documentos no debe ser un limitante.

Los interesados en transformar sus trabajos en Notas Técnicas pueden comunicarse con Ramón de Elía ([rdelia@smn.gov.ar](mailto:rdelia@smn.gov.ar)), Luciano Vidal ([lvidal@smn.gov.ar](mailto:lvidal@smn.gov.ar)) o Martin Rugna ([mrugna@smn.gov.ar](mailto:mrugna@smn.gov.ar)) de la Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, para obtener la plantilla WORD que sirve de modelo para la escritura de la Nota Técnica. Una vez armado el documento deben enviarlo en formato PDF a los correos antes mencionados. Antes del envío final los autores deben informarse del número de serie que le corresponde a su trabajo e incluirlo en la portada.

La versión digital de la Nota Técnica quedará publicada en el Repositorio Digital del Servicio Meteorológico Nacional. Cualquier consulta o duda al respecto, comunicarse con Melisa Acevedo ([macevedo@smn.gov.ar](mailto:macevedo@smn.gov.ar)).