

DAÑOS CAUSADOS POR EL VIENTO EN EL NORDESTE DE ARGENTINA: RESULTADOS

Dr. Mario Bruno Natalini, Profesor Titular, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Argentina.

Dr. Jorge Luis Lassig, Profesor Titular/Investigador, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina

Dr. Bruno Natalini, Investigador Adjunto/Profesor Adjunto, CONICET/Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Argentina.

Mg. Claudia Palese, Ayudante de Primera/Investigadora, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina

RESUMEN

El 16 de octubre de 2008, durante la XX Jornada Argentina de Ingeniería Estructural, se anunció el lanzamiento de un proyecto de tres años de duración sobre la caracterización del daño causado por el viento a obras e infraestructura civil en la Provincia del Chaco. El proyecto terminó en 2010. En este trabajo se presentan los principales resultados obtenidos, lo que comprende la caracterización de las estructuras vulnerables, los patrones de daños y los fenómenos meteorológicos que causaron los daños, a partir del análisis de treinta y ocho eventos de daño, que incluyen catorce estudios de campo en las provincias de Chaco y Formosa.

ABSTRACT

On the 16th of October, 2008, the launching of a three years project on the characterisation of wind induced damage was announced during the XX Jornada Argentina de Ingeniería Estructural. The project, which focused on damage to civil structures and civil infrastructure in the Chaco Province, ended in 2010. In this paper, the main results are presented, which comprises the characterisation of vulnerable structures, patterns of damage and destructive meteorological phenomena. These results were obtained from the analysis of thirty-eight events, which include fourteen field surveys.

1. INTRODUCCIÓN

Los daños económicos producidos por los llamados Desastres Naturales muestran una tendencia a incrementarse exponencialmente en las últimas décadas. Las cifras varían de acuerdo a las fuentes, dado que cada base de datos tiene su propia definición cuantitativa de desastre, y además algunas toman en cuenta sólo las pérdidas aseguradas; pero todas coinciden en señalar el incremento exponencial de las pérdidas económicas. Así por ejemplo, Walker ^[1], citando fuentes de la industria del reaseguro de 2011 (Munich Re y Swiss Re, 201

1) afirma que las pérdidas económicas promedio sobre una década pasaron de U\$D 10.000 millones en los años 60 a U\$D 100.000 millones en la primera década del siglo XXI (pérdidas convertidas a valores actuales). A su vez, si se discrimina que tipo de fenómeno causaron estas pérdidas, se tiene que los daños atribuibles a fenómenos relacionados a vientos fuertes son similares o mayores a los que se producen por acción sísmica. Por ejemplo, de acuerdo a la base de datos EM-DAT ^[2], tomando el período 1900-2010, el 21% de las pérdidas económicas en América se deben a terremotos, y el 71% a tormentas.

En la región NEA de Argentina, que es de bajo riesgo sísmico, las tormentas son el único fenómeno que produce el colapso de estructuras civiles; y lo hace en forma regular cada año, como se verá más adelante. Sin embargo, es poca la información que se puede encontrar en la literatura abierta sobre las características del daño causado por tormentas a estructuras e infraestructura civil en Argentina. Hasta 2010, sólo se puede citar el reporte de Balbastro y Sonzogni ^[3] sobre un evento en particular ocurrido en Santa Fe. Debe destacarse que existe una contribución muy importante a un aspecto principal del problema, como es la caracterización de las tormentas severas, realizado por Schwarzkopf ^[4], quien desde principios de los 70 realiza sistemáticos estudios de campo para cuantificar la magnitud de las tormentas. La contribución de Schwarzkopf constituyó un avance que impactó en el campo de la seguridad estructural. Por ejemplo, Schwarzkopf y Rosso ^[5] desarrollaron un modelo para valorar el riesgo de que tornados y corrientes descendentes alcancen blancos puntuales o lineales que se usa actualmente en el diseño de líneas eléctricas de 500 KV.

Entre los años 2008 y 2010, se estudiaron daños causados por vientos fuertes en la Provincia del Chaco y zonas aledañas en el marco de un proyecto de pequeña escala de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). Los objetivos y enfoques del proyecto se presentaron en sociedad el 16 de octubre de 2008, durante la XX Jornada Argentina de Ingeniería Estructural ^[6]. Trabajaron en el mismo dos investigadores de la Facultad de Ingeniería de la UNNE (FI-UNNE) y dos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue (FI-UNCo). Los resultados obtenidos se presentaron en dos reuniones científicas internacionales ^{[7],[8]} y en dos revistas especializadas ^{[9],[10]}. Paradójicamente, estos resultados no estaban disponibles hasta ahora en idioma Español. Es de destacar que la ejecución del proyecto tuvo otras consecuencias, principalmente mejorar el contacto entre investigadores del área de Ingeniería de Viento de nuestro país. Actualmente hay investigadores de universidades nacionales que están trabajando en el estudio de daños en al menos las provincias de Santa Fe, Entre Ríos, Neuquén y Buenos Aires, y hay un proyecto en evaluación para hacerlo en Misiones, Corrientes y Chaco.

En este trabajo se presentan patrones de daño y las características de los fenómenos meteorológicos destructivos que se registraron durante el desarrollo del proyecto.

2. FUENTES DE DATOS

El análisis que se presentará a continuación se basa en una colección de datos heterogénea de fuentes primarias y secundarias. Las fuentes primarias son los relevamientos de campo inmediatamente posteriores a ocurridos los eventos. La información secundaria está en archivos de diferentes instituciones, tales como diarios locales, empresas proveedoras de energía eléctrica, compañías de seguros, organismos estatales que brindan ayuda en las emergencias, etc. Desde el punto de vista metodológico hay que tener en cuenta las diferencias entre la información proveniente de una u otra fuente. La proveniente de fuentes primarias está limitada a la duración del proyecto, que es un período corto para alcanzar conclusiones significativas desde el punto de vista estadístico, y tiene un nivel de detalle y confiabilidad que permite establecer los mecanismos de falla en cada caso. La información de fuentes secundarias en cambio permite analizar períodos de tiempo largos pero es incompleta. Aún siendo incompleta, el gran volumen información que aportan las fuentes secundarias permite establecer tendencias respecto a variables de interés. El tratamiento de la información meteorológica merece un párrafo aparte. Además de lo que se obtiene de testimonios y de servicios como el Servicio Meteorológico Nacional o el INTA, en los casos más importantes se identifica la causa meteorológica que dio origen a los intensos vientos que dañaron estructuras a partir de buscar en la base de datos de NOAA/Ready los parámetros meteorológicos correspondientes al lugar y momento en que ocurrió el evento (sondeos, cartas pronosticadas de superficie, 1000, 750, 500, 300 hPa, índices de inestabilidad, e imágenes satelitales).

La colección de datos consiste en información de treinta y cuatro eventos ocurridos en la Provincia del Chaco. Estos treinta y cuatro eventos comprenden todos los eventos ocurridos en esta provincia entre el 1 de julio de 2006 y el 31 de diciembre de 2010. Se hicieron relevamientos de campo en doce de estos casos. También se dispone de información de cuatro eventos en la Provincia de Formosa, de los cuales se hicieron relevamientos de campo en dos casos.

3. ALGUNAS CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL DAÑO EN LOS TREINTA Y CUATRO EVENTOS EN CHACO

Debió establecerse primero un criterio para contar el número de eventos. En algunos casos los daños ocurrieron en grandes áreas en condiciones de mal tiempo generalizado. En estos casos, si el daño en diferentes localidades fue debido a vientos fuertes que comenzaron a la misma hora, entonces se consideró la ocurrencia de un evento simple. De otra manera, los daños se computaron como debido a diferentes eventos que estaban correlacionados. De acuerdo a este criterio, solo quince eventos simples fueron completamente independientes, cuatro eventos estuvieron correlacionados con eventos ocurridos fuera de la provincia, y que por lo tanto no forman parte de la muestra, y quince eventos simples constituyeron cinco eventos múltiples.

La Fig. 1(a) muestra la distribución de los eventos a lo largo del año. Si se los clasifica por estación, diecinueve (56%) ocurrieron en primavera, doce en (35%) en verano, uno (3%) en otoño y dos (6%) en invierno. Primavera es claramente la estación más riesgosa, con un pico en octubre, seguida por el verano.

Se conoce la duración de las tormentas en quince casos. En doce de ellos, los daños ocurrieron durante períodos de vientos fuertes que duraron entre cuatro minutos y media hora. Estos eventos fueron causados por tormentas cortas muy intensas o por fases intensas de tormentas que duraron más de una hora. En los otros tres casos las tormentas duraron más de una hora.

La Fig. 1(b) muestra la distribución de los eventos a lo largo del día. No se observa diferencia significativa entre el número de tormentas que ocurren entre el crepúsculo y el alba, y entre el alba y el crepúsculo; 55% ocurre en horas de la noche y 45% a la luz del día.

La Fig. 1(c) muestra la distribución de los casos conforme a la ocurrencia de lluvia, lluvia y granizo o sólo viento durante los eventos. Estas categorías se excluyen mutuamente. Se ha observado que típicamente las primeras ráfagas ocurren antes que la lluvia o el granizo.

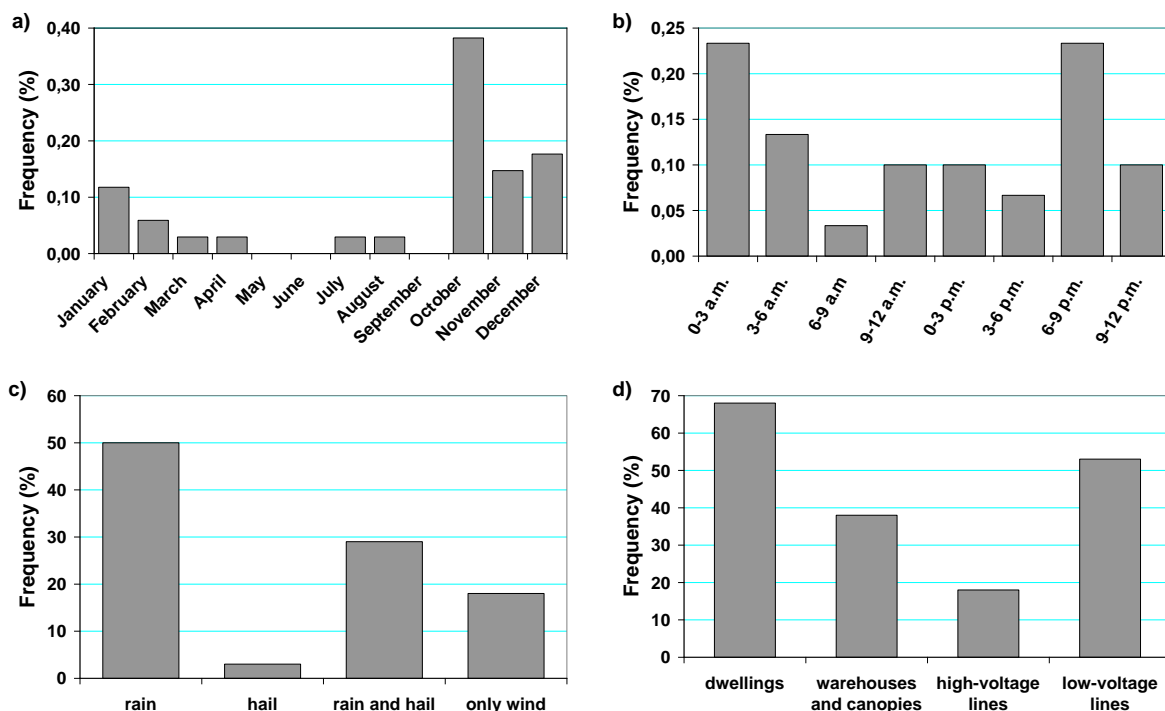


Fig. 1 a) distribución de eventos a lo largo del año, b) distribución de eventos conforme a hora de ocurrencia, c) frecuencia de ocurrencia de lluvia y granizo, d) estructuras más frecuentemente dañadas.

En cuanto a la extensión y grado de destrucción asociado con estos casos, es difícil cuantificar ambos factores con la información disponible. Se puede afirmar que dos de los eventos fueron extensos y destructivos, entendiéndose por ello que el estado tuvo que asistir significativamente a la población y que el daño causado por el viento era claramente visible para cualquier transeúnte. En cinco casos, el único daño observado ocurrió en estructuras aisladas en áreas rurales. Entre estos dos casos extremos hay casos en los cuales el daño fue extenso pero principalmente localizado en estructuras con déficit de mantenimiento o pobremente construidas. Hubo también cuatro casos en los cuales el estado dio significativa asistencia a la población sin que se pudiese discernir si la gente fue afectada por viento, granizo o inundaciones.

Las estructuras afectadas con mayor frecuencia fueron casas. Se reportaron daños a viviendas en veinte y tres eventos (68%), afectando alrededor de mil trescientos hogares en total. Más de veinte y cinco galpones y cubiertas aisladas sin paredes laterales, generalmente armados con estructuras livianas hechas con reticulado de barras de acero de sección circular, fueron dañados en trece eventos (38%). Líneas eléctricas de alta tensión fueron dañadas en seis casos (18%) y líneas de baja en dieciocho (53%). En el 42% de los casos, los daños ocurrieron únicamente en zonas urbanas, en el 26% únicamente en áreas rurales, y en el 32% fueron afectadas áreas rurales y urbanas al mismo tiempo.

El número de víctimas fue sorprendentemente bajo: un total de sólo once personas sufrieron heridas menores en tres eventos; veinte y ocho eventos no registraron heridos (82%), y en los otros tres casos restantes no se dispone de suficiente información para determinar si hubo heridos.

4. SIETE TORMENTAS EN EL NORDESTE DE ARGENTINA

En esta sección se presentan siete casos de estudio. Cuatro casos ocurrieron en Chaco y tres en la colindante provincia de Formosa. La Fig. 2 muestra la localización de los diferentes eventos. Se hará una descripción del daño relevado después de cada tormenta junto con las condiciones meteorológicas de gran escala en ese momento.

La naturaleza intrínsecamente local de las tormentas, que ocurrieron en un área geográfica muy extensa donde sólo había dos anemómetros del Servicio Meteorológico Nacional (*SMN*) en operaciones, vuelve imposible la determinación precisa de las velocidades de viento durante los eventos. Por otra parte, los autores de este trabajo consideran que la inferencia de la velocidad de viento por procedimientos estándares tales como la Escala de Fujita Mejorada (*EF*, siglas en inglés de Enhanced Fujita scale) no se debería usar sin hacer primero una validación del mismo. Los Indicadores de Daño (*DI*, siglas en inglés de Damage Indicators) que usa la escala *EF* se establecieron para prácticas constructivas que no son comunes en Argentina. Por ejemplo, de los veintiocho *DIs* que propuso el Wind Science and Engineering Center^[11], sólo tres pueden ser claramente identificados en Argentina, seis no tienen ningún equivalente, nueve probablemente tienen alguno, y diez probablemente no lo tengan.

En este trabajo se utilizaron dos indicadores de la inestabilidad atmosférica: el índice de ascenso estándar (*SLI*, siglas en inglés de Standard Lifted Index) y la energía potencial convectiva disponible (*CAPE*, siglas en inglés de Convective Available Potential Energy). El *SLI* es la diferencia entre la temperatura que una masa de aire cerca del suelo tendría si fuera elevada al nivel de 500 hPa ($T_p_{(500\text{hPa})}$) y la temperatura verdadera de ese nivel ($T_e_{(500\text{ hPa})}$). Cuando *SLI* es negativo la atmósfera es inestable. El índice *SLI* indica el tipo de inestabilidad y está asociado a los siguientes valores umbrales: $-2\text{ °C} < \text{SLI} \leq 0\text{ °C}$, ligeramente inestable; $-6\text{ °C} < \text{SLI} \leq -2\text{ °C}$, inestable; $\text{SLI} \leq -6\text{ °C}$, muy inestable. *CAPE* es una medida de la cantidad de energía disponible para la convección atmosférica, es decir, indica la flotabilidad de una parcela de aire y está directamente relacionada con la máxima velocidad vertical probable dentro de una corriente ascendente, entonces, altos valores de este índice indican una mayor posibilidad de tiempo severo. Los valores observados en ambientes tormentosos a menudo pueden superar 1.000 J/kg, y en casos extremos puede superar 5.000 J/kg. Se define como:

$$CAPE = \int_{p_n}^{p_f} (\alpha_p - \alpha_e) dp \quad (1)$$

donde α_e es el perfil del volumen específico ambiental, α_p es el volumen específico de una parcela que se mueve hacia arriba en forma adiabáticamente húmeda desde el nivel de libre convección, p_f es la presión del nivel de libre convección, y p_n es la presión del nivel de flotabilidad neutra.



Fig. 2 Ubicación de los casos estudiados

4.1 Primer caso: una tormenta que causó daño muy localizado en un suburbio de una capital de provincia

A las 4:30 a.m. hora local (07:30 UTC, siglas en inglés de tiempo universal combinado) del 22 de octubre de 2008, colapsaron siete torres de transmisión eléctrica de 132 KV en Fontana, un suburbio al oeste de Resistencia (aproximadamente 400 mil habitantes), cuando pasaba un frente frío de sur a norte. La tormenta causó daños menores en las áreas circundantes. En Fontana y Resistencia sólo fueron afectadas estructuras auxiliares, tales como carteles, marquesinas y toldos en estacionamientos. La línea eléctrica afectada corre de este a oeste y las torres cayeron hacia el norte. Se registraron ráfagas de aproximadamente 23 m/s en el aeropuerto, que está situado a 4,5 km hacia el sur. Esta velocidad de ráfaga es consistente con el nivel de daño observado en la ciudad, pero no puede explicar el colapso de las torres. La línea fue diseñada para resistir velocidades de viento de 30 m/s actuando durante diez minutos sobre cables y torres al mismo tiempo. La torre metálica reticulada es uno de los *DI*s que propone la escala *EF* que se puede encontrar en nuestro país. Aplicando entonces en este caso particular la escala *EF*, se estimó que las velocidad de ráfaga de tres segundos de duración a diez metros de altura debieron haber alcanzado entre 52 m/s y 73, 5 m/s. El análisis meteorológico a escala sinóptica mostró que el área fue afectada por actividad convectiva severa. Esta actividad convectiva, producto de fuerte inestabilidad, fue causada por la acción combinada de un sistema frontal y un sistema de baja presión (depresión) que se desarrollaba en la zona de discontinuidad. El sistema frontal estaba relacionado con un fuerte gradiente de humedad y temperatura. La Fig. 3, que corresponde al campo de líneas de corriente

de niveles cercanos al suelo, muestra que la zona de convergencia de las masas de aire está situada muy próxima a la zona afectada a las 03:00 hora local (06 UTC). El *SLI* y el *CAPE* alcanzaron valores de $-5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $3139,4\text{ J/kg}$, respectivamente, en las horas previas al evento. Estos índices de inestabilidad indicaban la formación de tormentas convectivas severas. Además, se observaban fuertes movimientos verticales y altas velocidades horizontales en las capas bajas de la atmósfera producidas por el Jet de niveles bajos de Sudamérica (SALLJ: South American low-level jet stream)(Virji ^[12], Berbery y Collini ^[13], Saulo et al. ^[14]).

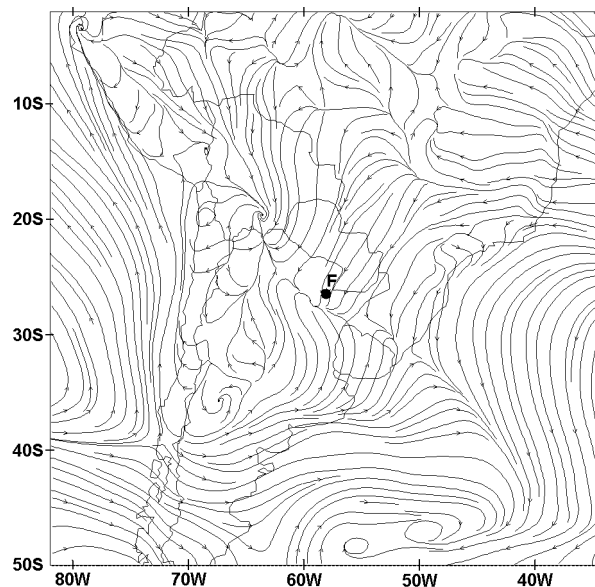


Fig. 3 Caso 1: Líneas de corriente en el nivel de 1000 hPa a las 06:00 UTC.

4.2 Segundo caso: una tormenta que causó daño extenso en una capital de provincia

La ciudad de Formosa es la capital de la Provincia de Formosa. Tiene una población por encima de los 200 mil habitantes. A las 18:40 hora local (21:40 UTC) del 21 de julio de 2008, una tormenta causó daño extenso en una franja de aproximadamente 200 m de ancho por 5000 m de largo en la zona urbana. La franja estaba orientada en dirección noroeste/sudeste, alineada con la dirección predominante de viento en ese momento.

Los tipos más comunes de daño que se observaron fueron la voladura de techos de viviendas, la caída de árboles y postes de electricidad. Una cubierta curva aislada sin cerramientos laterales de 70 m de profundidad \times 40 m de ancho fue completamente destruido al igual que algunas viviendas. Setecientas familias fueron asistidas por el gobierno.

En este caso, la causa de fuertes vientos se debió a las corrientes descendentes de celdas convectivas. El análisis meteorológico mostró la formación y desarrollo de un sistema de baja presión (ciclogénesis en niveles bajos de la atmósfera (Necco ^[15]). A las 18 hora local (21 UTC), el sistema estaba extendido sobre el norte y noreste de Argentina. Esta distribución de presiones causó circulación de aire desde el norte con advección de aire cálido y húmedo, como se puede apreciar en los campos de presiones y de espesores de la Fig. 4. Los espesores son la distancia vertical, en decímetros, entre el nivel de presión de 1000 hPa y el de 500 hPa. El espesor de la atmósfera a esos niveles es función de dos propiedades: la temperatura media y el

contenido medio de humedad del aire que está ubicado entre las superficies de presión de 1000 y 500 hPa. Un espesor de 570 dm o mayor está frecuentemente asociado con aire tropical. La zona de estudio estaba afectada por espesores entre 568 y 576 dm como se ve en la Fig. 4. Además, se observó que a las 18 hs la ciudad de Formosa se encontraba en el lado ecuatorial de la Corriente en Chorro que contribuía al movimiento ascendente del aire. Esta configuración dinámica combinada con la convergencia superficial produjo actividad convectiva severa. El *SLI* presentó valores entre $-2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-4,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ y *CAPE* entre 879 J/kg y 1.009 J/kg .

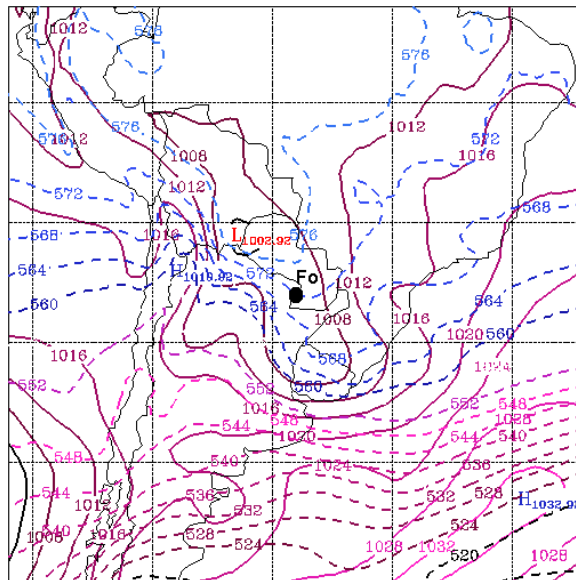


Fig. 4 Caso 2: Distribución de la presión al nivel de mar (hPa, línea continua) y espesores entre los niveles de 1000 hPa y 500 hPa (dm, líneas quebradas), a las 21 UTC (18 hora local).

4.3 Tercer caso: una tormenta que causó daños extensos en más de un centro urbano de la Provincia de Formosa

A las 5 a.m. hora local (08:00 UTC) del 9 de noviembre de 2008, la localidad de Estanislao del Campo (aproximadamente 4 mil habitantes) fue afectada por una tormenta que se desplazó luego sobre Pozo del Tigre (aproximadamente 4 mil habitantes) y finalmente sobre Las Lomitas (aproximadamente 10 mil habitantes). Las tres localidades están alineadas en dirección sudeste/noroeste, en coincidencia con la traza de la tormenta (ver Fig. 2). La tormenta causó daño extenso en Estanislao del Campo y Pozo del Tigre y algunos daños aislados en Las Lomitas. Más temprano, ese mismo día, a las 2:00 a.m. hora local, otra tormenta había causado daños aislados en la ciudad de Formosa, que se encuentra a 320 km hacia el sudeste de Las Lomitas. Los tipos predominantes de daño fueron la voladura de techos de viviendas, daños severos a edificios institucionales y caída de postes de electricidad. Defensa Civil estimó que una de cada dos familias en Estanislao del Campo y Pozo del Tigre fue afectada (aproximadamente 1.100 familias).

En el análisis meteorológico se identificó un Complejo Convectivo de Mesoescala (MCC, siglas en inglés de Mesoscale Convective Complex) sobre el área. Un MCC está definido como un complejo de tormentas cuyos toques nubosos cubren un área de más de 50.000 km^2 y además, sus temperaturas son menores o iguales a $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El MCC es un sistema predominantemente profundo y barotrópico (Velasco y Fritsch^[16], Campetella y Velasco^[17]). Uno de los centros convectivos más intensos del MCC estaba posicionado sobre el área de Pozo del Tigre, como se distingue en la Fig. 5. El *SLI* fue inferior a $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el *CAPE* fue de 2.100 J/kg . Dos horas antes del evento se observaba una atmósfera barotrópica con núcleos calientes en toda la región. El MCC se desarrolló en el borde este de una depresión que produjo persistente advección de aire cálido y húmedo.

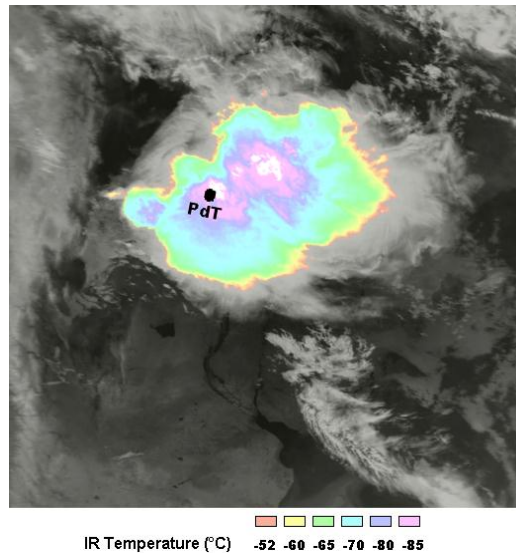


Fig. 5 Caso 3: escena térmica del canal 4 del sensor AVHRR/NOAA15 de las 08 UTC (5 hora local)

4.4 Cuarto caso: una tormenta que produjo daño extenso en una localidad pequeña

El Sauzalito es una localidad de aproximadamente 2 mil habitantes. Está en el noroeste de la Provincia del Chaco. El 10 de noviembre de 2007, a las 2:30 a.m. hora local (5:30 UTC), una tormenta causó daño extenso en la localidad. 200 familias fueron afectadas, principalmente por la voladura del techo de sus viviendas, situación agravada por un granizo intenso con poca lluvia. La tormenta causó pérdidas mayores en huertas, apiarios y cultivos en áreas próximas. La duración de la tormenta fue de aproximadamente 25 minutos. El día previo, se habían reportado algunos daños menores en las ciudades de Saenz Peña y Resistencia.

La masa de aire ubicada sobre el área estudiada era caliente y húmeda. La nubosidad se desarrolló por la actividad convectiva causada por un sistema frontal muy extendido que cruzaba Argentina, que estaba conectado a una depresión ubicada en el Océano Atlántico y por otro lado, en la zona continental, a una depresión térmica en el noroeste de país (Seluchi et al.^[18]). Este estaba asociado a una Corriente en Chorro de niveles superiores de la tropósfera. El *SLI* fue menor que $-3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y *CAPE* mayor que 1.300 J/kg en horas previas a la tormenta.

4.5 Quinto caso: una tormenta que causó daño extenso en una localidad, y el área rural circundante

Pampa del Indio es una localidad del Chaco de aproximadamente 6 mil habitantes. Una tormenta causó daño extenso en esta localidad durante la mañana del 21 de octubre de 2009. Los vientos fuertes comenzaron cuando un frente de ráfagas

alcanzó la zona urbana desde el sudoeste a las 11:02 a.m. hora local (14:02 UTC) y duraron media hora. Cuando el viento comenzó a amainar, comenzó a llover. El balance de daños a las zonas urbana y rural arrojó la voladura del techo de 90 viviendas, el colapso de 3 grandes cubiertas aisladas sin cerramientos laterales, la voladura del techo de un galpón de tamaño mediano, daños parciales a por lo menos 4 galpones de tamaño mediano, el colapso del mástil de la antena de una estación de radio FM y el derribo de 70 árboles y 24 postes de la línea eléctrica de baja tensión. Prácticamente no fueron afectadas las estructuras formales, es decir aquellas que fueron construidas bajo supervisión de profesionales, excepto algunos pocos casos de daños parciales a estructuras auxiliares, tales como paredes perimetrales, cercos y tanques de agua domiciliarios. Las viviendas afectadas fueron principalmente casas autoconstruidas (casa construidas por sus propios dueños sin ninguna intervención de profesionales). 133 familias fueron asistidas por el gobierno. El área afectada fue un cuadrado de aproximadamente 15 km x 15 km. Dentro de esa área el daño no se distribuyó en forma uniforme, sino que se encontró agrupado en diferentes puntos dentro de la misma.

Pampa del Indio estuvo afectada por advección húmeda desde el este durante las horas previas a la tormenta. Un sistema frontal proveniente del sudoeste produjo actividad convectiva severa. La ubicación de la Corriente en Chorro Subtropical (Antico y Berri ^[19]), que puede observarse en la Fig. 7, contribuyó además a la inestabilidad. Los índices de inestabilidad indicaban una atmósfera muy inestable con la formación de tormentas severas: el *SLI* alcanzó valores de -8.3°C y *CAPE* 2.340 J/kg.

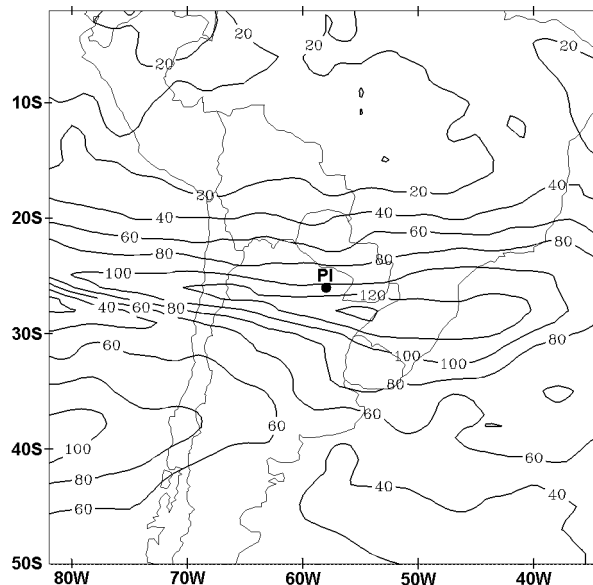


Fig. 6 Caso 5: velocidad del viento en nudos en el nivel de 200 hPa a las 15 UTC (12 hs).

4.6 Sexto caso: una tormenta de escala sinóptica que causó daños en áreas urbanas y rurales de Argentina y Paraguay

Desde la tarde del 6 de octubre de 2010 hasta la mañana del 7, se desarrolló una tormenta sobre el NEA y el este de Paraguay causando daños en una zona de aproximadamente 650 km de esta a oeste y 350 km de norte a sur (ver Fig. 7). Decenas de pueblos, ciudades y áreas rurales fueron afectadas por vientos fuertes,

intensa lluvia y granizo. Desde un punto de vista cualitativo, el patrón de daño fue similar en toda el área que se muestra en la Fig. 7 (área sombreada): voladura de techos de casas, derribo masivo de árboles y postes de líneas eléctricas de la red de baja tensión, el colapso de algunas torres de líneas de media y baja tensión, el colapso de muchos galpones y cubiertas aisladas sin cerramientos laterales, daños a una variedad de estructuras auxiliares y a cultivos. Pero desde un punto de vista cuantitativo, la parte oriental de Paraguay, situada entre las Provincias Argentinas de Misiones y Formosa, experimentó las mayores pérdidas. El corte de la provisión de servicio eléctrico que siguió inmediatamente a la tormenta afectó al 35% de la población de Paraguay. En la localidad de Pilar (alrededor de 30 mil habitantes), mil hogares perdieron el techo, y en la localidad de Laguna Ita el 80% de las casas sufrieron algún grado de daño. En Argentina los daños fueron también cuantitativamente substanciales en la mayor parte de la Provincia de Misiones y en la parte central y oriental de Formosa. En la Provincia del Chaco la tormenta causó daños principalmente en la ciudad de Saenz Peña y el área que se extiende 40 km hacia el sudoeste. Sorprendentemente, fueron escasos los heridos.



Fig. 7: Caso 6, área afectada por la tormenta.

En cada localidad, el fenómeno se manifestó como si el daño hubiese sido causado por tormentas locales de menos de media hora de duración. La secuencia de estas tormentas locales mostró una progresión desde el centro de Argentina hacia el noreste. En la mañana del día 6 hubo intensas lluvia y granizo en el norte de la Provincia de Santa Fe. Durante la tarde ocurrieron los daños en la Provincia del Chaco. En las primeras horas de la mañana del día 7, los vientos fuertes ocurrieron en Formosa, Paraguay y Misiones.

En las horas previas al evento, el NEA fue afectado por advección de aire cálido y húmedo desde el noreste que incrementó la inestabilidad de la masa de aire. La zona estaba bajo la influencia de una depresión. La posición de la Corriente en Chorro en la atmósfera superior favoreció la convección. El SLI fue menor que $-6,0$ °C y $CAPE$ mayor que 2.500 J/kg. En el borde este de la depresión se identificó un MCC. Este sistema tenía varias celdas convectivas en diferentes estados de desarrollo y disipación con corrientes verticales fuertes actuando en distintos lugares. Este sistema del tiempo es conocido en otros lugares como Derecho y corresponde a tormentas esparcidas producidas por la convección, con corrientes descendentes (downburst) y frente de ráfaga que pueden ser destructivos como un tornado pero que cubren un área geográfica más grande. De acuerdo a la clasificación del patrón de daños producidos por el viento propuesta en Fujita y Wakimoto ^[20], una familia de grupos de downburst tiene un eje mayor de 400 km o más. Johns y Hirt ^[21] definieron un Derecho como cualquier familia de grupos de

downburst producidos por un MCC que corresponden a un área concentrada de vientos severos informados, es decir, que se tienen registros; y/o a daños por vientos en un área que tiene una extensión en la que el eje mayor supera los 400 km (patrón de daños por viento clase 5).

4.7 Séptimo caso: un tornado que devastó un pueblo

El 21 de octubre de 2010, a las 18:00 hora local (21:00 UTC), un tornado causó daños severos en la localidad de Pozo del Tigre, el mismo pueblo que fue golpeado por la tormenta descrita en la sección 4.3. Centenares de testigos vieron el desplazamiento de al menos un embudo de tornado en plena luz diurna. El tornado entró al pueblo por el límite sudoeste y se desplazó luego hacia el nordeste, cruzando la zona urbana afectando un área de aproximadamente 300 m de ancho \times 2500 m de largo. Todo el proceso duró menos de 15 minutos. De acuerdo a testigos, el embudo tenía un diámetro entre 20 y 50 m a nivel del suelo, lo que es consistente con la traza observada. 852 viviendas fueron dañadas severamente y 2.215 persona (sobre una población de 4 mil) fueron afectadas, de las cuales 395 debieron ser evacuadas. Cuatro grandes cubiertas aisladas sin cerramientos laterales y un galpón del ferrocarril fueron destruidos. Cuatro personas murieron bajo los escombros de paredes de mampostería. Los hospitales atendieron 200 personas con heridas y contusiones causadas por la caída de paredes de mampostería, proyectiles y un granizo denso que combinado con los fuertes vientos devino un factor letal. La traza del tornado correspondía a la categoría F1 en la escala Fujita-Pearson (Fujita and Pearson ^[22]), que es equivalente a la categoría EF1 en la escala de Fujita Mejorada. La velocidad de ráfaga de 3 segundos de duración está entre 38,5 m/s y 48,5 m/s para la categoría EF1.

Varios factores influyeron en la formación del tornado del 21 de octubre (Schwarzkopf y Rosso ^[23]). En las capas bajas de la tropósfera había flujo de aire cálido y húmedo desde el norte activado por una depresión ubicada en el Altiplano Boliviano que se extendía hacia el sur penetrando en el norte argentino. También se detecta la presencia de la Corriente en Chorro Subtropical en los niveles altos de la tropósfera. Ambos factores contribuyeron a la formación de celdas convectivas intensas. El *SLI* fue menor que $-6,0$ °C (Fig. 8) y *CAPE* fue mayor que 3.200 J/kg.

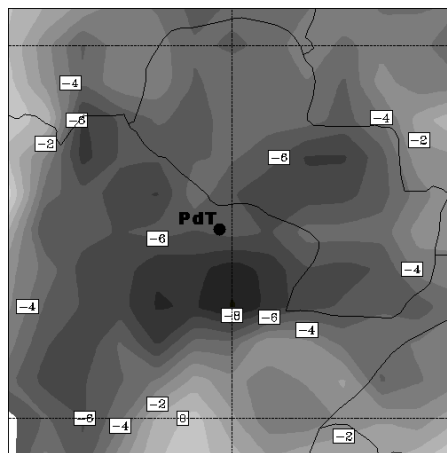


Fig. 8 Caso 7: Índice de inestabilidad *SLI* (°C) a las 2100 UTC en el noreste de Argentina.

5. ANÁLISIS DE DATOS

Se pueden extraer varios aprendizajes de la información que se presentó en las dos secciones anteriores. Por ejemplo, se identificaron algunas estructuras que tienden a fallar bajo la acción de vientos fuertes. Con el fin de organizar la discusión, en la Tabla 1 se presenta una clasificación de las estructuras más comunes en el área de estudio. Aun cuando se reconoce la importancia de las estructuras de Clase 1, puesto que el 12 % de la población del NEA vive en hogares que están dentro de la Clase 1, se las excluye de esta discusión puesto que se las debe tratar con una metodología diferente. Las estructuras Clase 2A son las que tienen más tendencia a fallar. Este es el tipo de hogar más común entre la gente de menores recursos económicos, quienes pasan de hogares de Clase 1 a Clase 2A tan pronto como pueden adquirir ladrillos y chapas. La Fig. 9 muestra una casa típica de este estilo. Se ha observado que en una amplia mayoría de los casos se vuela el techo mientras que las paredes y la carpintería permanecen intactas. La vulnerabilidad en estos casos está dada por la pobre sujeción de la estructura del techo a las paredes; siendo este un problema de naturaleza cultural que se podría prevenir fácilmente con campañas de entrenamiento y educación popular.

Tabla 1 Clasificación de estructuras usuales en el NEA

Clase 1	HOGARES PRECARIOS Pequeñas casillas construidas por los sectores más pobres de la población, usadas como alojamiento temporario en villas de emergencia o en áreas rurales. Hay muchas tipologías que combinan materiales descartables como cartón, film de plásticos, paja, madera y adobe.
Clase 2	ESTRUCTURAS NO FORMALES A Hogares: Casas construidas por sus habitantes sin intervención de profesionales, con paredes de mampostería y techo metálico. B Grandes cubiertas: Galpones y cubiertas aisladas sin paredes laterales, hechas con elementos estructurales ligeros compuestos de reticulados de barras de acero de sección circular.
Class 3	ESTRUCTURAS FORMALES A Viviendas sociales: Casas de paredes de mampostería y techo metálico de barrios de vivienda construidos por planes estatales. B Edificios institucionales: Escuelas, comisarías, oficinas gubernamentales C Líneas de transmisión eléctricas.



Fig. 9 Estos son ejemplos típicos de estructuras Clase 2A. Ambas estructuras perdieron el techo durante la tormenta descrita en la sección 4.5

Las estructuras de Clase 2B son las siguientes en la lista de estructuras vulnerables. Se las encuentra en escuelas, centros deportivos, carpinterías, estacionamientos, establecimientos rurales, depósitos en general, etc. Tienen una estructura liviana cuyos componentes estructurales son reticulados de barras de acero de sección circular (Fig. 10). Son baratos, fáciles de construir e intensamente usados en Argentina y Paraguay. Las estructuras de Clase 2B son parte de la cultura local y su construcción actualmente está fuera de control. Balbastro y Sonzogni ^[3] reportaron el mismo problema de vulnerabilidad de estas construcciones en la Provincia de Santa Fe.

Las estructuras de Clase 3C son las únicas estructuras de Clase 3 que mostraron ser vulnerables. Hay registros de falla de prácticamente todos los tipos de línea, comprendiendo cada voltaje y tipología de torre o poste. Pero una inspección detallada de los registros muestra que las fallas más frecuentes se concentran en dos tipos: los postes creosotados que se usan en líneas de baja tensión, y en las torres metálicas reticuladas que se usan en líneas de 132 KV. Se ha mencionado previamente que las líneas de baja tensión fueron dañadas en el 53% de los eventos registrados en el Chaco. La Fig. 11 muestra un colapso típico que involucró varios postes. Un total de 24 torres metálicas de líneas de 132 KV colapsaron durante 5 de los 34 eventos registrados en el Chaco. Todas las torres fueron de suspensión. Estas fallas preocupan a los proveedores de servicios eléctricos del NEA, pero el estudio de la causa de su vulnerabilidad recién está en sus comienzos ^[24].



Fig. 10 Detalle de estructuras livianas hechas con barras de acero. Izquierda: Columnas que soportan una cubierta de 35 m de luz; derecha: pórticos colapsados de una cubierta aislada sin paredes laterales de 20 m x 45 m.



Fig. 11 Izquierda: postes creosotados de línea de baja tensión; derecha: torre metálica reticulada de línea de (fotografía cortesía del Ing Miguel Malarin)

Las estructuras que se mencionaron anteriormente tienden a fallar bajo cualquier condición meteorológica que resulte en vientos fuertes. Sin embargo, de los catorce relevamientos de campo que se hicieron hasta ahora en el NEA, trece (considerados casos convencionales) mostraron patrones de daño similares que eran claramente distintos del caso de tornado descrito en la sección 4.7. En los casos convencionales el daño se distribuye uniformemente dentro de un área dada y revela una dirección de viento predominante. En un caso típico se puede esperar la ocurrencia de voladura de techo de varias casas, caída de árboles y una parte significativa de la red de baja tensión, el colapso de por lo menos un techo de grandes dimensiones (galpón o cubierta aislada), el colapso de una o dos antenas de estaciones locales de radio FM y daño a una variedad de estructuras pobremente construidas o deterioradas por falta de mantenimiento. Es ilustrativo mirar que es lo que raramente ha sido dañado en estos casos convencionales: estructuras de Clase 3A y 3B. En cambio después del pasaje del tornado de Pozo del Tigre se observó una distribución no uniforme del daño, determinada por la deriva del embudo. Se encontraron edificios intactos al lado de edificios completamente demolidos habiendo sido ambos de similar vulnerabilidad. Aun cuando el tornado se movía hacia el noreste, los edificios fueron derribados hacia todas direcciones, incluido el sudoeste. Todas las estructuras de Clase 3 fueron dañadas con la misma

frecuencia que las de Clase 2. Uno de los rasgos más sobresalientes fue la alta proporción de mamposterías derribadas, lo que causó cuatro muertos y decenas de heridos. Debe señalarse sin embargo que las mamposterías con estructura de hormigón resistieron satisfactoriamente en la mayoría de los casos.

La Tabla 2 resume las características meteorológicas principales de los casos de estudio presentados en la Sección 4. En todos los casos el origen de los fuertes vientos fue la intensa actividad convectiva. Este hecho concuerda con algunas de las características de los treinta y cuatro eventos informados en la Sección 3, como la corta duración de los fuertes vientos y la estacionalidad; la mayoría de los eventos ocurrieron en el período del año cuando las masas de aire cálido, húmedo e inestable predominan en el NEA. Aunque el número de casos estudiados es muy pequeño para tener significancia estadística, considerando la consistencia de los casos en la Sección 3, se puede concluir que virtualmente todos los eventos de vientos intensos que causaron daños en estructuras civiles en Chaco y Formosa corresponden a tormentas causadas por intensa actividad convectiva. Esta es una característica particular de esta región de Argentina.

Tabla 2 Cuadro comparativo de las características de los casos presentados en la Sección 4.

		CASOS DE ESTUDIO						
		1	2	3	4	5	6	7
Causas de la actividad convectiva	Sistema Frontal	X			X	X		
	Corriente en Chorro de niveles bajos de Sudamérica	X	X					
	Sistema de baja presión en el nivel de superficie		X	X	X	X	X	X
	Corriente en Chorro de niveles superiores		X	X	X	X	X	X
Tipo de actividad convectiva	Línea de inestabilidad	X	X					
	Complejo Convectivo de Mesoescala			X			X	
	Celdas Convectivas				X	X		
	Tornado							X
	SLI (°C)	-5.3	-2.8 a -4.4	-3.0	< -3.0	-8.3	-6.0	< -6.0
	CAPE (kJ/kg)	3139	819 a 1009	2100	> 1300	2340	2500	> 3200
	Área afectada, ancho x longitud (km)	Puntual	0.2 x 5	SD x 75	SD	15 x 15	350 x 650	0.3 x 2.5
Estructuras dañadas	Clase 2A		X	X	X	X	X	X
	Clase 2B		X	X		X	X	X
	Clase 3A							X
	Clase 3B			X				X
	Clase 3C	X	X	X	X	X	X	X

En todos los casos de estudio hubo dos factores que actuaron sobre la inestabilidad de las masas de aire: a) la existencia de un sistema de baja presión en el noroeste de Argentina, el cual se extiende a los países vecinos, produciendo la persistente advección de aire cálido y húmedo en el NEA, y b) la presencia de la Corriente en

Chorro de los niveles altos de la tropósfera, que por razones dinámicas, incrementa los movimientos verticales de ascenso contribuyendo a la inestabilidad.

Con respecto al tipo de actividad convectiva causante de los daños en los siete casos estudiados, un caso fue un tornado, dos casos fueron Complejos Convectivos de Mesoescala (MCC) y cuatro fueron actividad convectiva asociada a un sistema frontal o a una línea de inestabilidad. Esta última se refiere a un sistema de actividad convectiva que se encuentra en forma alineada, con celdas convectivas en distintos estados de desarrollo: iniciación, madurez y disipación. No se observa una dependencia entre los diferentes tipos de condiciones atmosféricas causantes de tormentas y los valores de los índices *SLI* y *CAPE* utilizados para valorar la intensidad de la inestabilidad. Si se relacionan los fenómenos meteorológicos y la severidad de los daños, el análisis de los casos sugiere que los MCC producen mayores pérdidas que las celdas convectivas que acompañan los sistemas frontales o las líneas de inestabilidad (sistemas sinópticos del tiempo), mientras que los tornados son devastadores. Sin embargo, siete casos analizados constituyen un muestreo muy pequeño para obtener conclusiones determinantes.

5. CONCLUSIONES

Los vientos fuertes destructivos en el NEA tienen su origen principalmente en tormentas caracterizadas por intensa actividad convectiva. Esto no era desconocido; en este trabajo simplemente se presenta evidencia de este hecho. La literatura de Ingeniería de Viento manifestaba hasta poco tiempo atrás una tendencia a tratar las tormentas convectivas de manera excesivamente simplificada, probablemente porque los principales centros de investigación de esta disciplina están en países de latitud media, donde los problemas predominantes son causados por ciclones tropicales y extratropicales. La región estudiada en este trabajo no está a una latitud media sino cercana al Trópico de Capricornio. Por esta razón las condiciones meteorológicas que produjeron actividad convectiva severa en los casos presentados son variadas: sistemas frontales, sistemas de baja presión, corriente en chorro de niveles superiores y la corriente en chorro de niveles bajos de Sudamérica. La actividad convectiva intensa producida por estos sistemas estaban organizadas de distintas maneras: celdas convectivas dispersas, líneas de inestabilidad, MCCs y nubes tornádicas. A nivel micrometeorológico los daños a estructuras se debieron a corrientes descendentes y a un tornado.

Se identificaron estructuras vulnerables, tales como casas autoconstruidas con paredes de mampostería y techo metálico, grandes cubiertas de estructuras no formales, torres metálicas reticuladas de líneas de electricidad de 132 KV y postes creosotados de líneas eléctricas de baja tensión.

Se documentó la ocurrencia de un tornado comprobándose que el patrón de daño asociado es diferente a los producidos por tipos convencionales de tormenta. Los tornados son más letales pero cabe señalar que la mayoría de las pérdidas económicas se deben a tormentas convencionales. La identificación de estos factores podría ser el primer paso hacia la formulación de políticas de mitigación en el NEA.

Agradecimientos

No habría sido posible reunir la información presentada aquí sin la ayuda de un conjunto de instituciones, entre las que se incluyen el Servicio Meteorológico

Nacional, el Diario Norte, la Dirección de Energía de la Provincia del Chaco, Defensa Civil de la Provincia de Formosa, y la Policía de la Provincia del Chaco. Esta investigación ha sido financiada por Universidad Nacional del Nordeste, la Universidad Nacional del Comahue y CONICET. Los autores agradecen los comentarios y sugerencias de los árbitros de la revista *Wind and Structures*, que significaron una importante contribución a este trabajo.

Referencias

- [1] Walker, G., Grundy, P., Musulin, R. (2011) "Disaster risk reduction and wind engineering", *Proceedings 13th International Conference on Wind Engineering* (Amsterdam), 10-5 July.
- [2] World Health Organisation Collaborating Centre on the Epidemiology of Disasters (2011) "Emergency Events Database", www.emdat.be.
- [3] Balbastro, G.C., Sonzogni, V.E. (2008), "Colapso de estructuras de galpones durante tormentas severas", *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, **8**(1), 37-55.
- [4] Schwarzkopf, M.L. (1984-1994), *Tormentas severas y tornados*, Anual reports of the project Estudio de los Tornados en la República Argentina, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- [5] Schwarzkopf, M.L. and Rosso, C.L. (1993), *Riesgo de tornados y corrientes descendentes en la Argentina*, CIRSOC, Biblioteca de Apoyo, Buenos Aires.
- [6] Natalini, B., Natalini, M.B., Wittwer, A.R. (2008) "Proyecto de relevamiento de daños causados por el viento en la Provincia del Chaco", *Memorias de las XX Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural* (Buenos Aires, Argentina), 15 al 17 de octubre.
- [7] Natalini, B., Lassig, J.L., Natalini, M.B., Palese, C. (2010) "Damage under strong winds in the NE of Argentina: three case studies", *Proceedings of the Southern Hemisphere Extreme Wind Workshop* (Canberra, Australia), 4th August, 174-177.
- [8] Natalini, B., Lassig, J.L., Natalini, M.B., Palese, C. (2011) "Wind-induced damage in two regions of Argentina", *Proceedings 13th International Conference on Wind Engineering* (Amsterdam), 10-5 July.
- [9] Natalini, B., Lassig, J.L., Natalini, M.B., Palese, C. (2012) "Damaging wind storms in North Eastern Argentina: seven case studies". *Wind and Structures*, **15**(2) 147-162.
- [10] Natalini, B., Lassig, J.L., Natalini, M.B., Palese, C. (2010) "Wind-induced damage in two regions of Argentina", *Journal of Civil Engineering and Architecture*, in press.
- [11] Wind Science and Engineering Center (2004), "A Recommendation for an Enhanced Fujita Scale (EF-Scale)", Texas Tech University.
- [12] Virji, H. (1981), "A preliminary study of summertime troposphere circulation patterns over South America estimated from cloud winds", *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 599-610.
- [13] Berbery, E.H. and Collini, E.A. (2000), "Springtime precipitation and water vapour flux over southeastern South America", *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1328-1346.
- [14] Saulo, C., Nicolini, M. and Chou, S.C. (2000), "Model characterization of the South American low-level flow during the 1997-98 spring-summer seasons", *Clim. Dyn.*, **16**, 867-881.
- [15] Necco, G.V. (1982), "Comportamiento de vórtices ciclónicos en el área sudamericana durante el FGGE: ciclogénesis", *Meteorológica*, **13**(1), 7-19.

- [16] Velasco, I. and Fritsch, J.M. (1987), "Mesoscale convective complexes in the Americas", *J. Geophys. Res.*, **92**, D8, 9591-9613.
- [17] Campatella, C.M. and Velasco, I. (1995), "Estudio de la tormenta ocurrida sobre territorio argentino entre el 18 y 19 de noviembre de 1982", *Meteorológica*, **20**, 75-84.
- [18] Seluchi, M., Saulo, A.C., Nicolini, M. and Satyamurty, P. (2003), "The northwestern Argentinean low: a study of two typical events", *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 2361-2378.
- [19] Antico, P.L. and Berri, G. (2004), "La corriente en chorro subtropical media mensual en América del Sur", *Meteorológica*, **29**, 37-45.
- [20] Fujita, T.T. and Wakimoto, R.M. (1981), "Five scales of airflow associated with a series of downbursts on 16 July 1980". *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 1438-1456.
- [21] Johns, R.H. and Hirt, W.D. (1987), "Derechos: Widespread convectively induced windstorms". *Wea. Forecasting*, **2**, 32-49.
- [22] Fujita, T.T. and Pearson, A. (1973), "Results of FPP classification of 1971 and 1972 tornadoes", *Preprints, Eighth Conference on Severe Local Storms*, American Meteorological Society, Boston, Mass., 142-145.
- [23] Schwarzkopf, M.L., and Rosso, L.C. (1982), "Severe storms and tornadoes in Argentina", *Proceedings 12th Conf. Severe Local Storms* (San Antonio, Texas), Amer. Meteor. Soc., 59-62.
- [24] Detke, F.R., Reinert, H.O., Duarte, J.A., Pizzutti, H.D., Fank, P.Y., Golemba, J.L., Möller, O. (2011) "Análisis estructural por elementos finitos aplicado a sistemas de transmisión de energía eléctrica en la provincia de Misiones, Argentina". *En Mecánica Computacional Vol. XXX*, Oscar Möller, Javier W. Signorelli, Mario A. Storti (Eds.), Rosario, Argentina, 2651-2667.