

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE LA TORMENTA SEVERA OCURRIDA EN ARANGUREN-ENTRE RÍOS-ARGENTINA

César A. Aguirre^{a,c}, Rodrigo R. Paz^b, José María Martínez Fayó^b, Germán Rearte^c,
Armando B. Brizuela^a

^aCentro de Investigaciones Científicas, CICyTTP-CONICET, Materi y España s/n (3105) Diamante,
Argentina, cesar.aguirre@gmail.com, <http://www.cicytpp.org.ar>

^bCentro Internacional de Métodos Computacionales en Ingeniería (CIMEC), INTEC-CONICET,
Güemes 3450 (3000) Santa Fe, Argentina, rodrigop@intec.unl.edu.ar, <http://www.cimec.org.ar>

^cUniversidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Paraná, Almafuerte 1033 (3100) Paraná,
Argentina, <http://www.frp.utn.edu.ar>

Palabras clave: Tormentas severas, Simulación de las Grandes Escalas.

Abstract. Muchos problemas de diseño en ingeniería están asociados al conocimiento del efecto del viento en las estructuras dispuestas a la intemperie. Las cargas por efecto del viento son uno de los parámetros de entrada necesarios para el cálculo. Generalmente este parámetro se selecciona en función de la importancia de la obra a partir de las estadísticas de viento obtenidas de los registros de estaciones meteorológicas convencionales como las del Servicio Meteorológico Nacional. En el caso del diseño de las líneas de transmisión de energía eléctrica de alta tensión, existe la norma de la AEA (Asociación Electrotécnica Argentina) que especifica el valor que debe asignarse para la carga por efecto del viento en el diseño de los postes y cables en función de la importancia de la línea. La norma permite que este parámetro sea evaluado en cada región a partir de registros locales de viento y estudios específicos. Existen numerosos trabajos referidos al estudio de vientos extremos en la República Argentina basados en las estadísticas meteorológicas, sin embargo, estas estaciones de medición están muy dispersas geográficamente y existe cierta incertidumbre en la utilización de estos métodos, sobre todo en los casos de relieve complejo, ya que las estadísticas de viento son confeccionadas utilizando el valor de velocidad media en zonas de terreno llano. Este trabajo muestra la utilización de las técnicas de Simulación de las Grandes Escalas como un aporte al estudio del problema, desde un punto de vista más dinámico. Se utilizó un código de Simulación de las Grandes Escalas denominado Advanced Regional Prediction System (ARPS) desarrollado por la Universidad de Oklahoma y el Centro de Análisis y Predicción de Tormentas (CAPS) de Estados Unidos para simular un evento de tormentas severas que produjo el colapso de una línea de transmisión de energía de 132 KV en cercanías de la ciudad de Aranguren (Argentina) el 27 de enero de 1998. Este código permite simular no sólo el campo de viento sino que posee submodelos de cambios de fase del agua y flujos de energía entre la superficie del suelo y la capa límite atmosférica. De los resultados del análisis del campo de viento simulado se desprende que la velocidad máxima que se obtiene en el sitio de colapso es mayor que el valor utilizado para el diseño de la misma. Además, se observan variaciones repentinas en la dirección del viento de casi 180° en menos de 1 minuto producto de la superposición de las corrientes descendentes de nubes convectivas vecinas.

1 INTRODUCCIÓN

El estudio de las tormentas severas es uno de los temas de gran interés mundial ya que permite abordar el conocimiento de los mecanismos de formación, desarrollo y disipación de las mismas con el fin de pronosticar su evolución, trayectoria y posibles daños. Los resultados de estos estudios son fundamentales en numerosas aplicaciones como por ejemplo la prevención de catástrofes utilizando sistemas de alerta, el diseño de la infraestructura edilicia acorde a la ocurrencia y severidad de dichas tormentas, sistemas de seguridad para los aerogeneradores, diseño de las líneas de transmisión de energía, entre otros. Debido a la poca densidad espacial de datos meteorológicos se hace dificultoso realizar este estudio analizando directamente los datos de viento. Una de las líneas de trabajo para abordar este tema es evaluar los daños producidos por las tormentas severas, es decir, se analizan las características de las trazas de daños producidas por las corrientes descendentes (Lichtenstein y Schwarzkopf, 1970; Schwarzkopf y Rosso, 1989; Schwarzkopf y Rosso, 1993) en el país siguiendo la metodología propuesta por Fujita (1971) y utilizando datos recopilados sobre un período de más de 50 años. Otros investigadores en el exterior siguieron también esta línea (Dyer, 1986; Fujita y Pearson, 1973; Fujita, 1985). Con estos datos se pueden aplicar modelos probabilísticos para determinar el riesgo de caída de estructuras sometidas a estas tormentas. En el caso particular del dimensionado de líneas eléctricas de media y alta tensión, la norma de la Asociación Electrotécnica Argentina (AEA, 2006) prevé la posibilidad de utilizar parámetros de carga producida por eventos meteorológicos en los que interviene el conocimiento de las características de viento utilizando el método probabilístico. Este método requiere contar con mediciones de viento durante grandes períodos de tiempo. La fiabilidad real en el diseño es muy sensible a la precisión con la cual se han suministrado los datos requeridos para su cálculo y los parámetros utilizados, a pesar de que las fórmulas de base que permiten obtener las cargas debidas al viento son bien conocidas (ASCE, 1991). La relación entre estos fenómenos y los efectos inducidos en las líneas de transmisión de energía eléctrica ha sido la preocupación de numerosos investigadores con el fin de aportar elementos que permitan una menor incertidumbre en su diseño y construcción (Ross et al., 2000; Letchford y Hawes, 2000; Letscher et al., 2002; Lilien et al., 2004; Bjerkan et al., 2004) y de grupos de trabajo de carácter nacional (INTI, 1984) e internacional (Groupe d'Action 22.11.04, 2001). Estos trabajos ponen de relieve la importancia de estudios detallados en escala espacial y temporal de estos fenómenos con el fin de obtener parámetros más precisos al momento de diseñar las líneas de transmisión de energía eléctrica. Los investigadores concuerdan en la importancia de contar con una descripción de los fenómenos de la turbulencia del viento tridimensional para estudiar en forma detallada estos eventos. En tal sentido, han sido desarrolladas en las últimas décadas las técnicas de Simulación de Grandes Escalas de la turbulencia (SGE) que permiten resolver las ecuaciones de la mecánica de fluidos para las grandes escalas de movimiento. Estas técnicas permitieron obtener resultados de la dinámica de las grandes escalas del flujo en capa límite atmosférica (Mason, 1989; Schmidt and Schumann, 1989; Esmaili and Piomelli, 1993; Xue et al., 2000).

2 OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es utilizar la Simulación de las Grandes Escalas en la capa límite atmosférica para simular un evento de tormenta severa ocurrido en la localidad de Aranguren (Provincia de Entre Ríos – Argentina) el 27 de enero de 1998 que produjo grandes destrozos en dicha localidad y la caída de varios postes de suspensión de una línea 132 KV.

3 LA SIMULACIÓN DE LAS GRANDES ESCALAS (SGE)

El código de Simulación de las Grandes Escalas de la turbulencia, orientado a las aplicaciones en la capa límite atmosférica, es el modelo de meso-escala de tipo no-hidrostático quasi-compresible denominado ARPS versión 4.5.2 (Advanced Regional Prediction System) desarrollado por el CAPS (Center of Analysis and Prediction of Storm) de la Universidad de Oklahoma (USA). Este modelo ha sido diseñado específicamente para el seguimiento y descripción de tormentas, posee sub-modelos de flujo de calor y vapor de agua, formación de nubes y precipitación. Para ello, tiene en cuenta la orografía y cobertura del terreno como así también las condiciones iniciales tanto del suelo como del estado de la atmósfera. Aguirre (2005) realizó algunas modificaciones al mismo introduciendo la opción de cálculo para el coeficiente de Smagorinsky (Smagorinsky, 1963) siguiendo la técnica de Germano et al. (1991) y utilizando una función de amortiguamiento para el coeficiente de viscosidad turbulenta en la zona adyacente al suelo de tipo Van Driest (1956). Aguirre et al. (2006a) utilizó la SGE junto a un modelo estocástico lagrangiano para simular la dispersión de gas propano comparando los resultados de concentración con los obtenidos en la experiencia de Fackrell and Robins (1982). Aguirre et al. (2006b) acopló este modelo con submodelos de difusión y reacción química, mientras que Aguirre et al. (2007) comparó los resultados del mismo para el caso de flujo en capa límite de canal sobre una colina de suave pendiente con las mediciones realizadas por Gong and Ibbetston (1989). Aguirre et al. (2008) lo utilizó junto con modelos estocásticos lagrangianos para simular la dispersión de CO₂ sobre la misma colina comparando los resultados con los medidos por Gong (1991). Seguidamente se mostrarán las ecuaciones principales y las aproximaciones consideradas en el código SGE. Los detalles concernientes al esquema numérico utilizado pueden encontrarse en Xue et al. (1995), Xue et al. (2000).

3.1 Las variables del modelo

Se plantea una descomposición *Reynolds* del flujo en la capa límite atmosférica y de las otras magnitudes escalares considerando un estado base y una fluctuación. El estado base depende sólo de la altura, mientras que las fluctuaciones son variables tridimensionales que evolucionan en el tiempo:

$$\left\{ \begin{array}{l} u(x, y, z, t) = \bar{u}(z) + u'(x, y, z, t) \\ v(x, y, z, t) = \bar{v}(z) + v'(x, y, z, t) \\ w(x, y, z, t) = w'(x, y, z, t) \\ \theta(x, y, z, t) = \bar{\theta}(z) + \theta'(x, y, z, t) \\ p(x, y, z, t) = \bar{p}(z) + p'(x, y, z, t) \\ \rho(x, y, z, t) = \bar{\rho}(z) + \rho'(x, y, z, t) \\ q_v(x, y, z, t) = \bar{q}_v(z) + q'_v(x, y, z, t) \\ q_{li}(x, y, z, t) = q'_{li}(x, y, z, t) \end{array} \right. \quad (1)$$

En (1) u, v, w son las tres componentes del campo de velocidad en los tres ejes cartesianos ortogonales x, y, z respectivamente, donde x toma la dirección oeste-este, y toma la dirección sur-norte y z es la dirección vertical. Además, en (1) θ es la temperatura potencial, p es la presión, ρ es la densidad del aire, q_v es la relación de mezcla del vapor de agua y q_{li} del agua en estado líquido y sólido. Puede observarse también que la componente vertical w del estado base de la velocidad es nula.

3.2 Las ecuaciones de balance del modelo

Las ecuaciones de conservación de la masa (2) y de la cantidad de movimiento (3) son planteadas considerando la aproximación $\rho'(x, y, z, t) \ll \bar{\rho}(z)$ mientras que para la resolución del campo de presión se utiliza la ecuación de estado de los gases para el aire húmedo considerando la compresibilidad del aire. Se considera además que solamente el estado base de la presión varía según la relación hidrostática. De esta forma puede caracterizarse al modelo como *quasi-compresible no-hidrostático*:

$$\frac{\partial \tilde{u}_j^\oplus}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i^\oplus}{\partial t} + \frac{\partial (\tilde{u}_i^\oplus u_j^\oplus)}{\partial x_j} = g_i \tilde{B}^\oplus - \left(\frac{\partial p'}{\partial x_i} \right)^\oplus + \tilde{C}^\oplus - \frac{\partial \tilde{R}_{ij}}{\partial x_j} + 2\nu \frac{\partial \tilde{S}_{ij}^\oplus}{\partial x_j} \quad (3)$$

En ambas expresiones el tilde representa la magnitud ponderada por el estado base de la densidad del aire $\tilde{u}_i = (\bar{\rho} u_i)$, mientras que el superíndice \oplus significa que a la magnitud se le ha realizado una operación de filtro pasabajo en la zona del rango inercial del espectro de la cascada de *Kolmogorov* de manera de obtener las grandes escalas. En la ecuación (3) $g_i \tilde{B}^\oplus$ es el término que representa los efectos de Boyancia, \tilde{C}^\oplus la fuerza de *Coriolis*, \tilde{R}_{ij} es el tensor *Reynolds de sub-malla* que aparece luego de la operación de filtro pasabajo y es calculado utilizando la formulación *Smagorinsky Dinámico* ([Smagorinsky, 1963](#); [Lilly, 1992](#); [Germano et al., 1991](#)) y \tilde{S}_{ij}^\oplus es el tensor de deformación. Para más detalles de la implementación de esta formulación en el código ARPS ver [Aguirre \(2005\)](#), [Aguirre et al. \(2006b\)](#) y [Aguirre et al. \(2007\)](#).

La ecuación de resolución del campo de presión que trabaja en combinación con la ecuación (3) es resuelta con ayuda de la ecuación de estado para el aire húmedo y la ecuación de conservación de la masa (1) según lo plantea [Klemp and Wilhelmson \(1978\)](#):

$$\left(\frac{\partial p'}{\partial t} \right)^\oplus = - \left(u_i \frac{\partial p'}{\partial x_i} \right)^\oplus - g_i \tilde{u}_i^\oplus - V_s^2 \frac{\partial \tilde{u}_i^\oplus}{\partial x_i} + V_s^2 \bar{\rho} \left(\frac{1}{\theta} \frac{d\theta}{dt} - \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \right)^\oplus \quad (4)$$

En la expresión (4) V_s representa la velocidad del sonido y A es la relación entre la constante de los gases perfectos para el aire seco y el aire húmedo ([Proctor, 1987](#)) y el término de correlación velocidad-gradiente de la fluctuación de la presión es resuelto utilizando un modelo a gradiente ([Deardorff, 1980](#)).

De la misma forma, pueden expresarse las ecuaciones de conservación de las magnitudes escalares (θ , q_v , q_l). En estas últimas se consideran un término suplementario que incluye las fuentes y sumideros S_θ , S_q mientras que en la ecuación para q_l se agrega además el término que representa la velocidad de caída libre del hidrometeoro V_q :

$$\frac{\partial \tilde{\theta}'^\oplus}{\partial t} + \frac{\partial (\tilde{u}_j^\oplus \tilde{\theta})}{\partial x_j} \delta_{j3} + \frac{\partial (\tilde{u}_j^\oplus \theta'^\oplus)}{\partial x_j} = S_\theta - \frac{\partial h_{\theta j}}{\partial x_j} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \tilde{q}'^\oplus}{\partial t} + \frac{\partial (\tilde{u}_j^\oplus q)}{\partial x_j} + \frac{\partial (V_q \tilde{q})^\oplus}{\partial x_j} \delta_{j3} + S_q - \frac{\partial h_{qj}}{\partial x_j} \quad (6)$$

En las dos últimas expresiones h_θ y h_q representan los términos de correlación velocidad-escalar que aparecen luego de realizar la operación de filtrado. Éstos son calculados

utilizando un modelo a gradiente de tipo *Samgorinsky Dinámico* de la misma forma que el tensor *Reynolds de Submalla*.

El modelo de pared que permite estimar las tensiones tangenciales $\tau_{13}|_p$ y $\tau_{23}|_p$ es de tipo “ley de pared logarítmica”:

$$\begin{cases} \tau_{13}|_p &= -\bar{\rho}C_{dm} \left| \vec{V}_A^\oplus \right| u_A^\oplus \\ \tau_{23}|_p &= -\bar{\rho}C_{dm} \left| \vec{V}_A^\oplus \right| v_A^\oplus \end{cases} \quad (7)$$

donde el subíndice (A) denota el valor calculado de la variable para la celda del dominio de cálculo adyacente al suelo, $\left| \vec{V}_A^\oplus \right|$ es el módulo de la componente horizontal de la velocidad y C_{dm} es el coeficiente de fricción calculado teniendo en cuenta la ley logarítmica del perfil de viento:

$$C_{dm} = \frac{k_v^2}{\ln^2\left(\frac{\Delta_A}{z_0}\right)} \quad (8)$$

En la ecuación (8) k_v representa la constante de *Von-Kármán*, Δ_A es la altura de la celda del dominio de cálculo adyacente al suelo y z_0 es el valor de la rugosidad.

3.3 Submodelo de los procesos microfísicos del agua en la tropósfera

La parametrización de los procesos microfísicos del agua simulan la condensación, evaporación, formación de nubes y precipitación. Este submodelo se basa en la descripción de [Klemp and Wilhelmson \(1978\)](#) y [Soong and Ogura \(1973\)](#).

Los autores consideran tres categorías para el agua (q_{li}): vapor (q_v), gotitas de agua que conforman las nubes (q_c) y gotas de agua que precipitan (q_r). Cada una de las formas líquidas es caracterizada por su tamaño. Al principio del proceso se forman las gotitas de agua que conforman las nubes cuando el aire llega al estado de saturación de vapor de agua y ocurre la condensación. Luego, si la relación de mezcla del agua en el aire saturado excede un umbral crítico, las gotas de lluvia se forman por aumento de tamaño de las gotitas de agua de las nubes. Las gotas de lluvia formadas comienzan a caer y aumentan de tamaño por coalescencia de las gotitas pequeñas de la propia nube que encuentran en su camino. Si luego de atravesar la base de la nube se encuentra con aire por debajo de la saturación, entonces el proceso de evaporación se desencadena disminuyendo de tamaño paulatinamente. El ritmo de los procesos de evaporación, condensación y cambio de categoría dependerá de ciertos parámetros y de la relación de mezcla del agua en el aire. Como todos estos procesos involucran transferencia de energía en forma de calor latente es necesario ajustar la temperatura.

No será descrita la formulación teórica de este aspecto debido a que no es el objetivo del presente trabajo. Para más detalles de la implementación en ARPS de los procesos microfísicos ver [Xue et al. \(2000\)](#).

4 SIMULACIÓN DE LA TORMENTA SEVERA OCURRIDA EN ARANGUREN

4.1 Descripción del evento

La tormenta severa ocurrida el 27 de enero de 1998 en la localidad de Aranguren –

Provincia de Entre Ríos, Argentina – produjo grandes destrozos mecánicos como voladura de techos de galpones, techos de viviendas, derribó algunos postes de teléfono y varias columnas de hormigón soporte de líneas de transmisión de energía en alta tensión de 22 metros de altura, con una fundación de 2,20 metros y un diámetro en la base de 0,5 metros. Si bien esta tormenta tuvo su mayor intensidad en esta localidad, la misma también produjo destrozos en otras ciudades de la zona central del país. El Diario “LA NACIÓN” en su portada del 28 de enero de 1998 publica:

“Las intensas tormentas que se abatieron en gran parte del territorio castigaron a la zona del noroeste, Cuyo, Córdoba, La Pampa, toda la Provincia de Buenos Aires (donde debieron evacuar la isla de Baradero), Capital Federal y el sur de Santa Fe y de Entre Ríos.”

“ROSARIO – Una fuerte tormenta se abatió en las primeras horas de ayer sobre esta ciudad, con vientos que alcanzaron los 83 kilómetros por hora y produjeron el anegamiento de calles, la caída de árboles y el corte del suministro eléctrico en algunos barrios”.

Los datos recopilados por las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional indican la presencia de una masa muy húmeda e inestable que desencadenó las numerosas tormentas cuando fue desplazada por una masa de aire relativamente más fría proveniente del suroeste. Si bien en Aranguren no se disponía en ese momento de estación meteorológica, las estaciones más cercanas revelaron la ocurrencia del fenómeno. La [Figura 1](#) muestra la ubicación geográfica de la localidad de Aranguren y de las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional más cercanas, la [Tabla 1](#) muestra un extracto de los datos para la estación Rosario AERO y Paraná AERO.

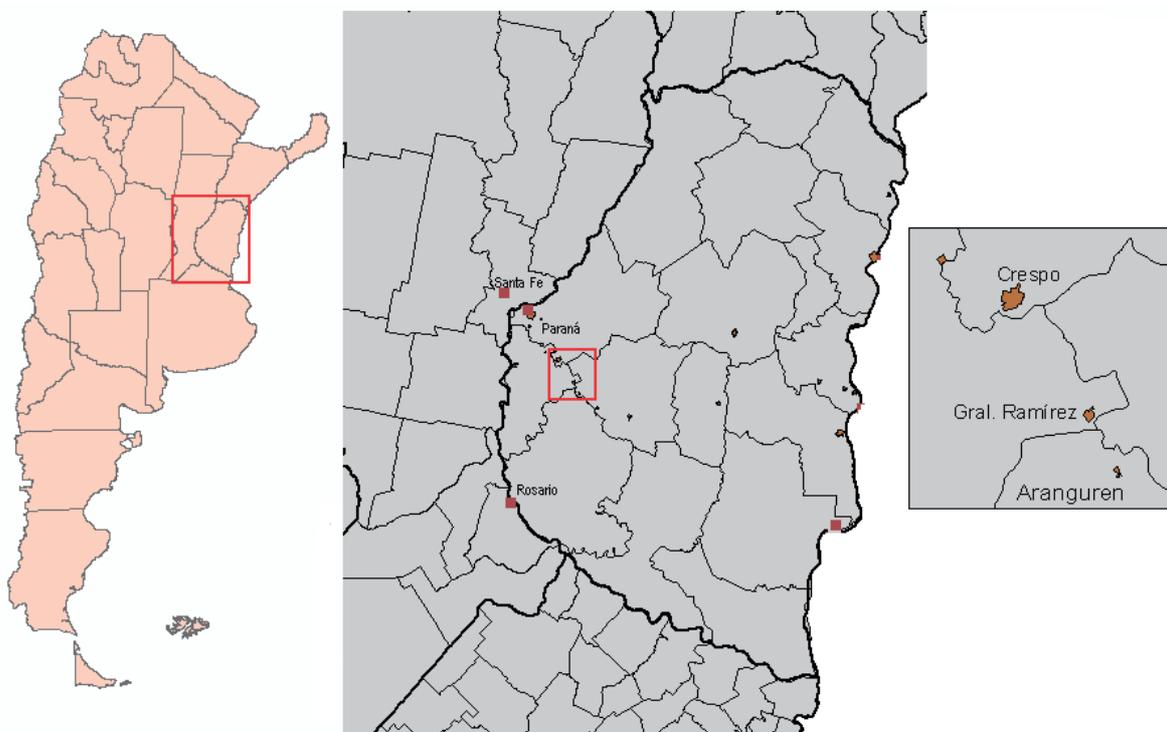


Figura 1: Ubicación geográfica de Aranguren – Provincia de Entre Ríos - Argentina

Rosario AERO: 87480		LAT: 32° 54.6'S LON: 60° 46.8'W Elev: 25 msnm													
Enero 1998	Día	T	Tx	Tm	P	H	PP	VV	V	VM	Vg	RA	SN	TS	FG
	20	27.9	35.0	23.7	1006.4	59	0	12.7	14.8	25.9	-				
	21	24.1	35.0	19.8	1004.3	79	1.02	12.4	13.0	46.5	-	o		o	
	22	21.5	25.4	17.0	1013.3	65	34.04	12.4	15.7	29.4	-	o			
	23	21.9	27.4	18.5	1011.9	67	0	12.4	10.4	22.2	-				
	24	24.8	30.0	19.1	1009.6	71	0	12.2	7.2	18.3	-				
	25	26.2	30.6	20.5	1008.4	61	0	13.2	11.5	18.3	-				
	26	26.1	29.7	23.5	1005.5	81	0	12.4	10.4	18.3	-	o		o	
	27	23.7	30.0	21.5	1004.0	89	56.90	11.4	14.4	35.2	-	o		o	
	28	20.9	26.2	15.0	1015.0	58	0	12.6	19.8	35.2	-				
	29	20.4	24.1	14.2	1017.9	66	0	13	9.4	18.3	-				
	30	18.1	25.6	13.9	1015.7	81	0	12.9	4.3	11.1	-				
	31	22.8	30.0	14.8	1011.5	71	0	10.8	6.9	18.3	-				

Paraná AERO: 87340		LAT: 31° 46.8'S LON: 60°28.8'W Elev: 74 msnm													
Enero 1998	Día	T	Tx	Tm	P	H	PP	VV	V	VM	Vg	RA	SN	TS	FG
	20	25.8	33.4	20.2	1007.0	67	0	14.2	18.5	29.4	-				
	21	26.9	33.6	22.5	1004.1	76	0	14.5	25.9	55.4	-				
	22	22.6	25.2	19.6	1015.4	60	40.89	15.0	19.8	25.9	-				
	23	24.7	27.9	15.0	1009.9	65	0	15.0	9.8	14.8	-				
	24	24.6	29.7	18.6	1009.7	77	0	14.8	5.4	9.4	-				
	25	25.2	30.6	18.8	1008.5	69	0	17.2	6.7	14.8	-				
	26	27.0	32.0	22.2	1004.7	77	0	13.4	12.4	33.5	-	o		o	
	27	22.7	32.2	21.1	1003.3	97	23.88	7.7	15.6	29.4	-	o		o	
	28	21.5	24.2	18.2	1014.3	74	99.06	15.0	15.6	33.5	-	o			
	29	17.1	20.0	15.3	1018.6	89	0	15.0	6.5	11.1	-				
	30	20.2	26.8	15.2	1014.8	71	0	17.7	5.6	11.1	-				
	31	20.5	26.4	16.0	1013.9	73	0	15.8	0.9	3.5	-				

Tabla 1: Extracto de datos registrados por las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional Rosario AERO y Paraná AERO.

En ella T , T_x y T_m expresan las temperaturas media, máxima y mínima del día en grados Celsius, P señala la presión atmosférica en HPa, H es la humedad relativa del aire, PP la precipitación en milímetros, VV es la visibilidad en Kilómetros, V es el valor medio de la velocidad del viento para el día considerado en km/hs mientras que VM el valor máximo de los promedios de velocidad considerando períodos de 10 minutos, V_g es la ráfaga máxima (no registrada por estas estaciones), RA , SN , TS y FG indican si se produjo lluvia, nieve, tormenta de lluvia o niebla respectivamente.

Puede observarse en la [Tabla 1](#) que la tormenta de lluvia se manifestó el 27 de enero en Rosario y entre el 27 y 28 de enero en Paraná, cayendo en ésta última más de 123 mm de precipitación. La variación de la presión atmosférica junto al descenso de temperatura denota la rápida irrupción de la masa de aire relativamente más frío que la reinante en esos días. Estas condiciones provocaron vientos máximos (promediados en períodos de 10 minutos) de 35.2 km/hs en Rosario y 33.5 km/hs en Paraná. Lamentablemente, no se han registrado las ráfagas máximas (valor máximo de la velocidad media considerando períodos de 10 segundos) que seguramente fueron más elevadas ya que los indicios de destrozos ocurrieron en varias localidades de la zona. Una de ellas, la localidad de Aranguren, fue la que sufrió los mayores inconvenientes.

Como se mencionó anteriormente, el objetivo del trabajo está orientado a simular las condiciones meteorológicas ocurridas en esa localidad, poniendo mayor énfasis en los valores máximos de velocidad de viento que ocasionaron la caída de los postes de suspensión de la línea de 132 KV que cruza cerca de Aranguren. Estos postes de hormigón son dimensionados según la especificación técnica de Agua y Energía de la Provincia de Entre Ríos de la década del 1960, basada en la VDE 0210, para una velocidad del viento de 130 km/hs.

4.2 Dominio de cálculo y condiciones iniciales

La extensión del dominio de cálculo abarca desde la margen oriental del Río Paraná al oeste hasta la localidad de Hernández al este, mientras que en la dirección norte-sur se extiende desde la ciudad de Crespo hasta 12 km al sur de Hernández, demarcando un dominio rectangular de 60 km en dirección este-oeste y 46 km en dirección norte-sur. Se cuenta con un modelo digital de elevación obtenido a partir de imágenes radar publicados por [U. S. Geological Survey \(2002\)](#) con una resolución espacial de 80 metros, procesados por [Brizuela \(2004\)](#), sin embargo, se decidió trabajar con una resolución espacial de 400 metros. La [Figura 2](#) muestra la extensión del dominio de simulación para este trabajo y el modelo digital de elevación, algunas localidades importantes, las rutas y la traza de la línea de alta tensión de 132 KV objeto de estudio.

Los parámetros que caracterizan a la superficie del suelo para el cálculo de los tensores de pared ($\tau_{13}|_p, \tau_{23}|_p$) y para el perfil logarítmico del viento (z_0 y k_v) fueron seleccionados considerando dos tipos superficie ([Garratt, 1992](#)):

a) sobre el río: $C_{dm} = 0.0057, z_0 = 0.005m, k_v = 0.40$.

b) sobre tierra: $C_{dm} = 0.0302, z_0 = 0.100m, k_v = 0.40$.

Además del modelo de elevación, se cuenta con datos de un radiosondeo realizado el 26 de enero de 1998 en la estación meteorológica del aeródromo de la ciudad de Córdoba – Argentina. Estos datos permiten incorporar al modelo las condiciones iniciales de las variables meteorológicas que representan el estado base. Las mismas son los valores medidos por los instrumentos montados en el radiosonda más la dirección y velocidad del viento que se observa a medida que el globo asciende. La [Tabla 2](#) muestra estos datos tomados a las 12:00 hs del meridiano de Greenwich.

4.3 Condiciones de borde

Se implementan condiciones de borde abiertas con un coeficiente de amortiguación que inhibe el reflejo de las ondas de presión al interior del dominio según (9). Estas condiciones son impuestas hasta los primeros 300 segundos de tiempo físico de cálculo con el fin de obtener una solución convergente para todas las variables en el espacio tridimensional. Posteriormente, se reinicia el cálculo a partir de las mismas pero utilizando una condición forzada para el campo de viento siguiendo el perfil logarítmico que se muestra en la [Figura 3](#) considerando que a 10 metros de altura en la estación Rosario AERO el 27 de enero de 1998 se observó un valor de velocidad máxima de 9.8 m/s. Conjuntamente con estas condiciones de velocidad se impuso un descenso de temperatura de 12 °C para los primeros 250 metros de altura (espesor de la capa límite) con el fin de considerar la irrupción de aire relativamente más frío proveniente de la zona central del país. Estas condiciones de borde son mantenidas durante 3 segundos de tiempo físico. Luego de recuperar el campo tridimensional de todas las variables en ese estado, se imponen nuevamente condiciones de borde abiertas (9).

$$\frac{\partial u_i^\oplus}{\partial t} + (u_i^\oplus + C_g) \frac{\partial u_i^\oplus}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

donde C_g es la velocidad de propagación de las ondas de gravedad:

$$C_g = z_t \frac{N}{\pi} \quad (10)$$

N representa la frecuencia de Brunt-Väisälä y z_T es la altura de la tropopausa.

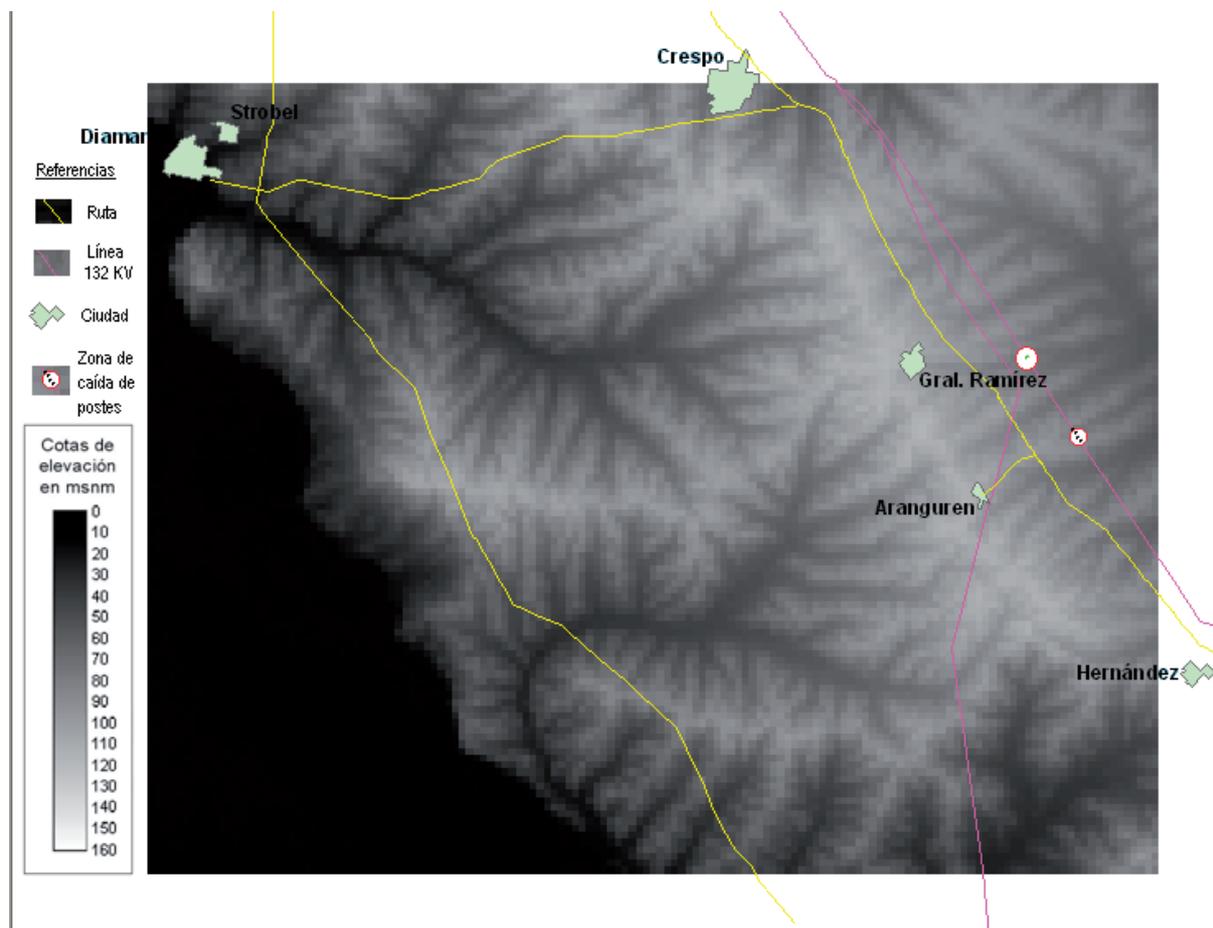


Figura 2. Extensión del dominio de cálculo para la simulación, modelo digital de elevación y traza de la línea de 132 KV.

Presión (hPa)	Temperatura (°K)	Punto de Rocío (°K)	Viento	
			Dirección	Velocidad (nudos)
15000	213.15	153.15	240	25
25000	213.15	183.15	200	30
30000	218.15	213.15	250	20
35000	228.15	213.15	190	25
45000	246.15	228.15	170	15
50000	257.15	233.15	160	20
65000	275.15	243.15	150	10
70000	281.15	253.15	160	15
75000	289.15	278.15	10	20
85000	298.15	281.15	340	25
95000	304.15	287.15	340	15
100000	310.15	293.15	360	10
100500	313.15	293.15	0	0

Tabla 2. Datos de radiosondeo Córdoba AERO obtenidos el 26 de enero de 1998.

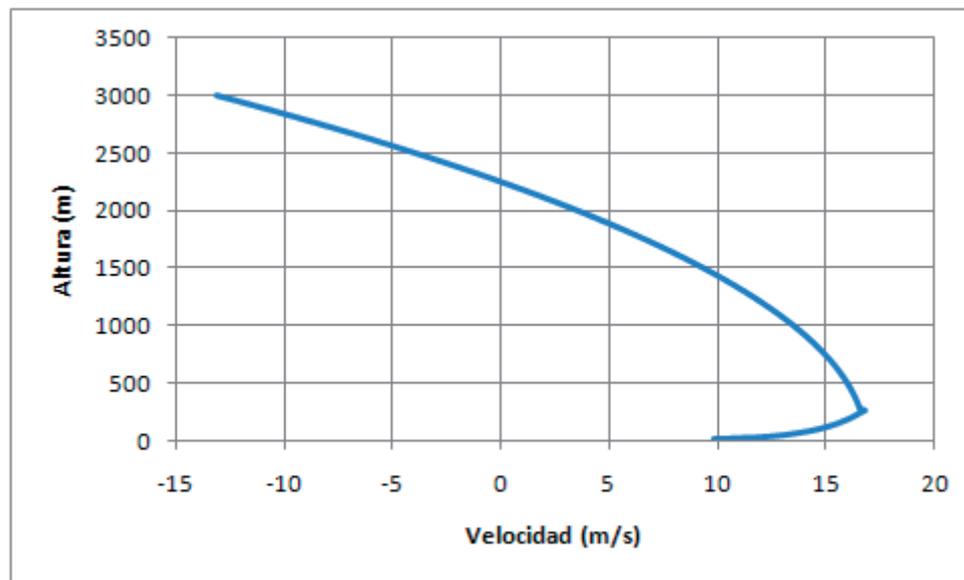


Figura 3. Perfil de viento forzado para simular el ingreso de aire frío.

5. RESULTADOS

En la [Figura 4](#) puede observarse una vista tri-dimensional de las formaciones nubosas simuladas por el modelo luego de 1980 segundos desde su inicialización (1680 segundos desde la aplicación de las condiciones forzadas). Se observan varios núcleos convectivos desarrollados. Un plano axial en dirección oeste-este que cruza al centro del dominio muestra la dirección e intensidad de las corrientes ascendentes y descendentes como así también los valores de relación de mezcla de gotitas de agua que conforman las nubes (q_c).

La [Figura 5](#) muestra una vista desde el sur de la misma situación. Pueden verse que algunas formaciones nubosas se prolongan hacia el suelo en forma de torbellinos donde las corrientes descendentes son más intensas lo que indica la ocurrencia de tornados.

La [Figura 6](#) presenta el sector donde se produjo la caída de la línea de transmisión de alta tensión. Puede observarse la gran cortante de viento a que se encuentran sometidos los postes de suspensión de la línea.

La [Figura 7](#) presenta una vista superior de todo el dominio de simulación. Se observa en azul la traza de la línea de alta tensión, en color rojo los vectores de velocidad del viento a 20 metros sobre el suelo (altura de los postes de la línea) y color negro las zonas donde asciende (línea llena) y desciende (línea punteada) la corriente de aire.

La [Figura 8](#) presenta una vista superior de la secuencia temporal del desarrollo de la tormenta simulada, mostrando los valores de la velocidad de viento a 22 metros de altura. La secuencia va desde 1680 segundos hasta los 2560 segundos desde el inicio de la simulación si bien se realizó la corrida hasta los 3920 segundos. En ella se muestra la evolución de la situación en intervalos de 60 segundos.

La [Figura 9](#) permite observar la evolución temporal de la simulación de la velocidad del viento y su dirección a la altura de las torres de suspensión en el sitio donde se produjo la rotura y caída de los mismos.

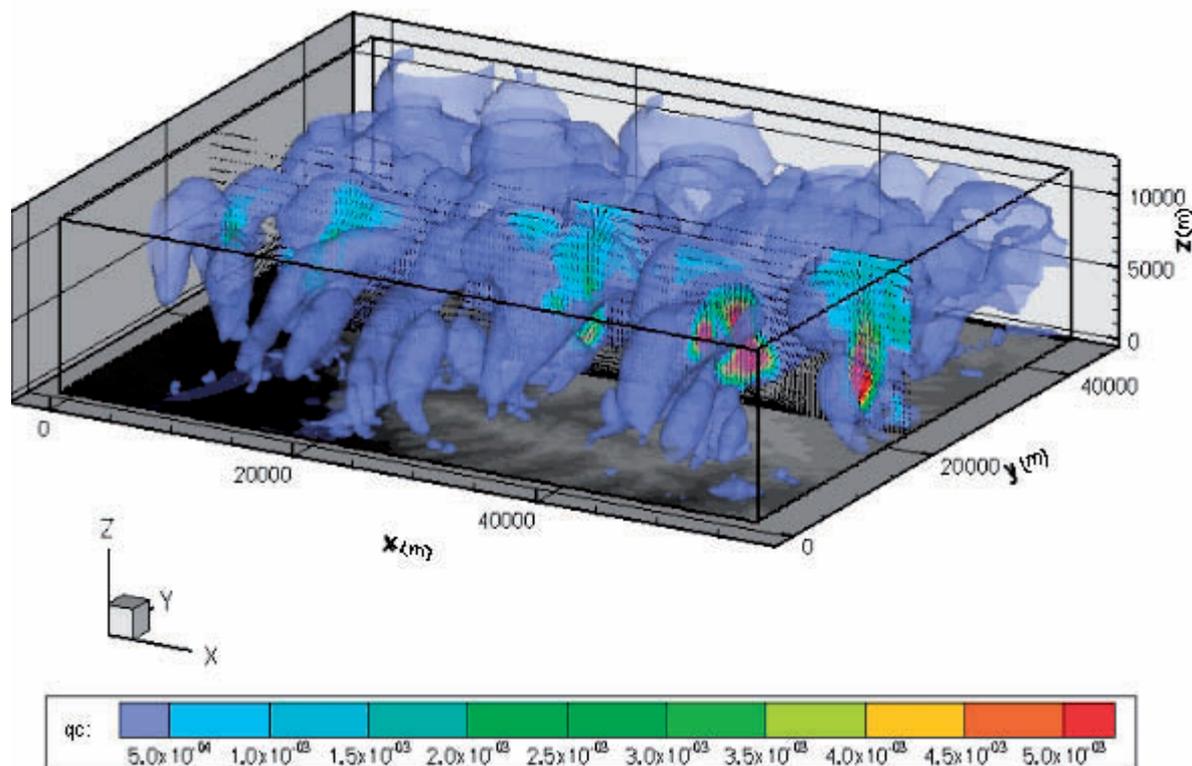


Figura 4. Vista tridimensional de la tormenta simulada para 180 segundos.
 q_c : Relación de mezcla para las gotitas de agua que conforman las nubes.

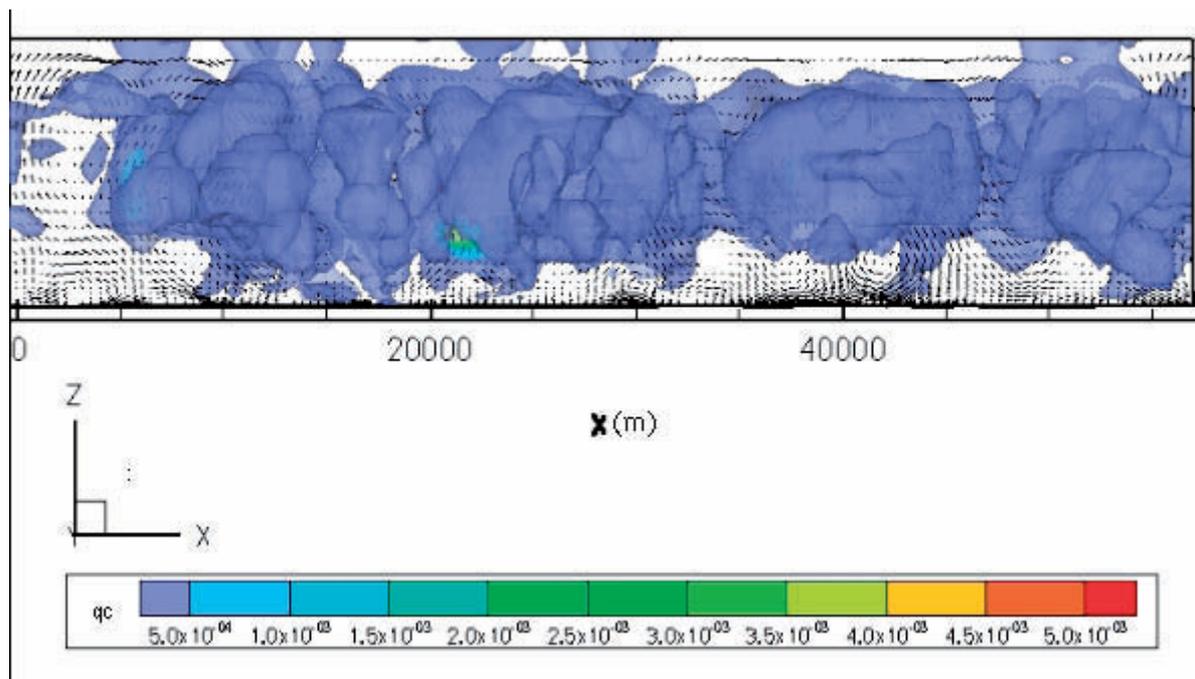


Figura 5. Vista desde el sur de la tormenta simulada en Aranguren para 180 segundos.
 q_c : Relación de mezcla para las gotitas de agua que conforman las nubes.

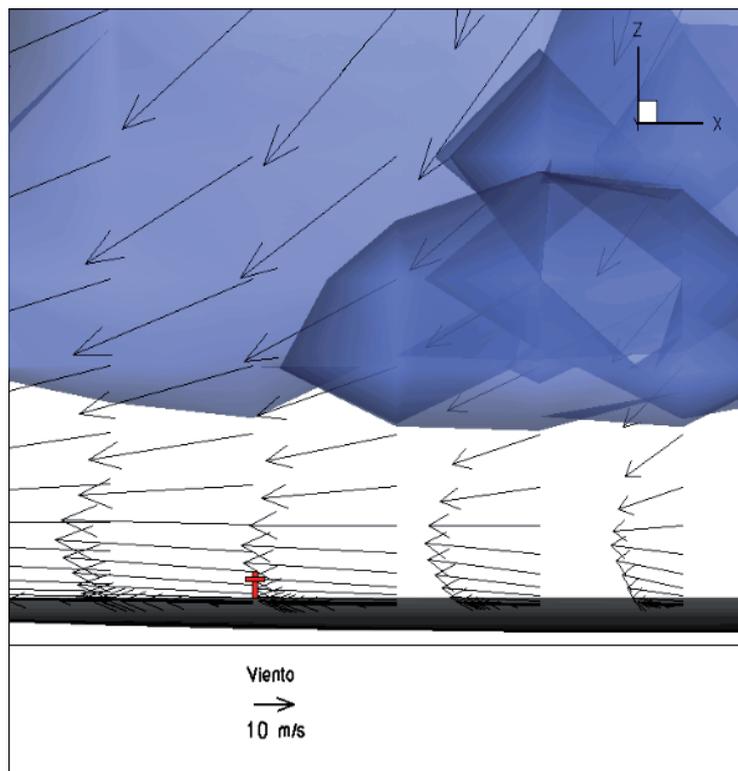


Figura 6. Vista ampliada desde el sur de la tormenta simulada en Aranguren para 1980 segundos desde el ingreso de aire frío.

†: Posición de una torre de suspensión de la línea de alta tensión 132 KV.

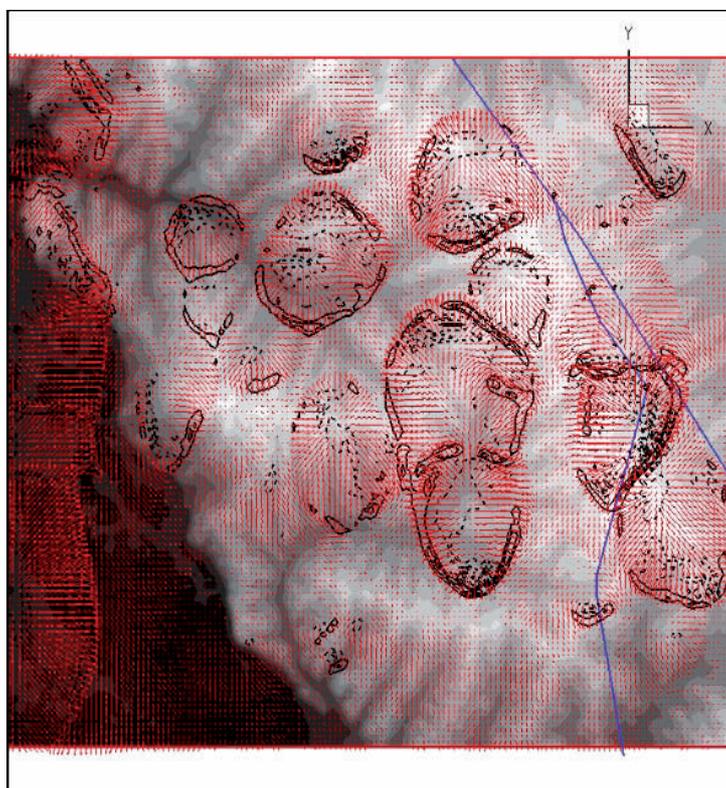


Figura 7: Vista superior del dominio de simulación para 1980 segundos.
 → Viento a 22 metros sobre el suelo. — Traza de la línea de AT 132 KV.

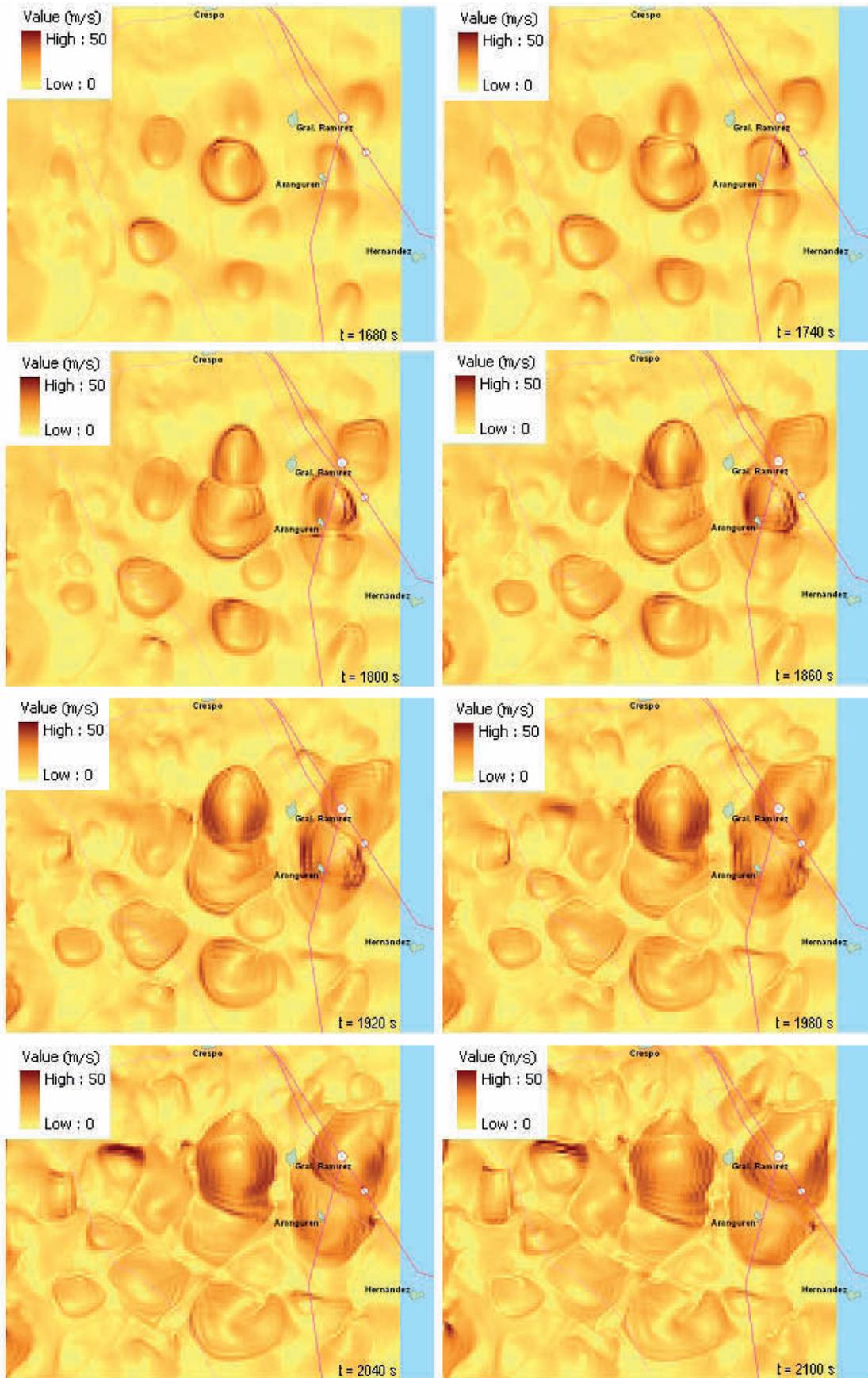


Figura 8. Secuencia temporal de los valores de velocidad de viento a 22 metros.

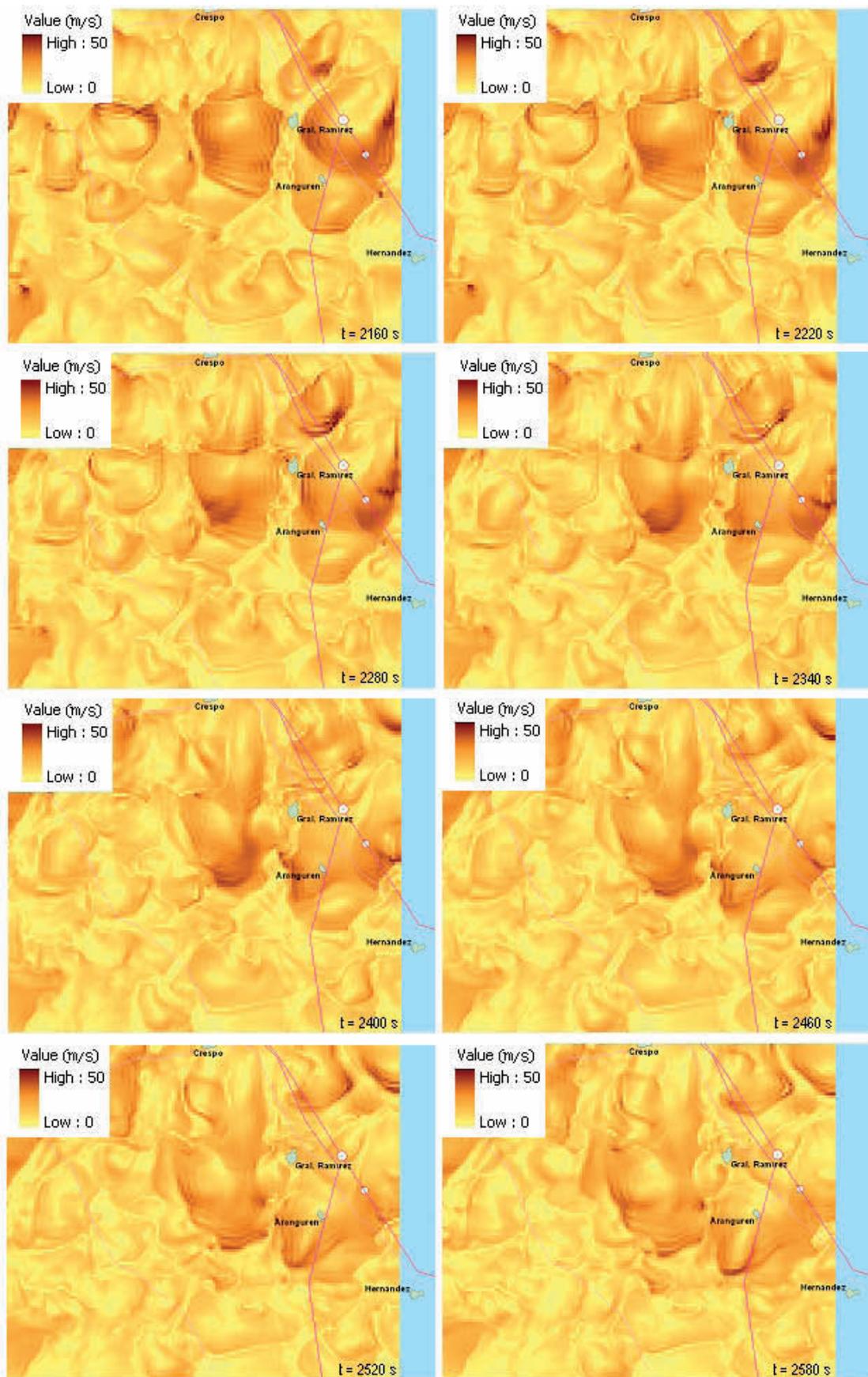


Figura 8. Secuencia temporal de los valores de velocidad de viento a 22 metros.

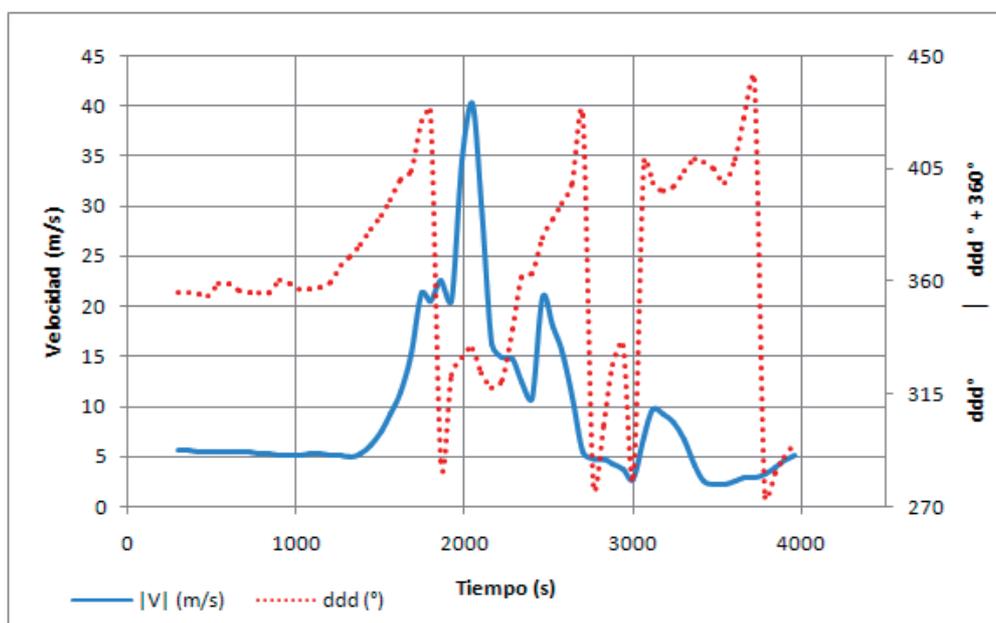


Figura 9. Evolución temporal de la velocidad y dirección del viento en el sitio de caída de las torres.

6. DISCUSIÓN

La resolución espacial de la simulación del presente trabajo es de 400 metros. Si bien se muestra que se logra simular la evolución de los sistemas convectivos más importantes que pudieron tener lugar en el episodio del 27 de enero de 1998, se debe hacer notar que se está trabajando con un código de grandes escalas de la turbulencia por lo que no es posible obtener un detalle de los micro sistemas de baja presión que pudieron haber generado los tornados que arrasaron tinglados, postes y viviendas precarias. Estos pequeños sistemas de gran vorticidad provocan velocidades de viento muy altas que no pueden ser resueltas por el código si no se realiza un refinamiento de la malla de cálculo.

En la Figura 4 y la Figura 5 se puede observar que de todas formas en la simulación se logran captar algunos torbellinos que descienden de las nubes convectivas pero no con mucho detalle ya que éstos desaparecen antes de llegar al suelo (Figura 6).

La Figura 7 permite observar las corrientes ascendentes y descendentes que se producen cerca del suelo. Se puede apreciar en esta figura que las mismas poseen una forma anular indicando que estas corrientes verticales son producidas con mayor o menor intensidad por cada una de las celdas convectivas que forman la tormenta generando lo que se denomina *macrodescendente* (*macroburst*) caracterizada por una amplia corriente descendente que al impactar sobre el suelo genera daños sobre áreas cuyas dimensiones horizontales son superiores a los 4 Km y pueden llegar hasta los 60 m/s (Schwarzkopf y Rosso, 1993). En el caso que nos ocupa, se obtuvieron valores máximos cercanos a los 50 m/s como puede observarse en la evolución temporal que muestra la Figura 8.

En la Figura 9 puede apreciarse que no sólo las estructuras sufren el efecto de las ráfagas fuertes sino también los cambios de dirección repentinos producto de la interacción de dos o más celdas convectivas vecinas que, a su tiempo, generan macrodescendentes que impactan desde distintas direcciones. Más precisamente en la Figura 9 se observa que la estructura soportó cuatro veces cambios de 180° en la dirección del viento aunque, de éstos, sólo uno fue acompañado de velocidades de 40 m/s.

7. CONCLUSIONES

El código de simulación de las Grandes Escalas Atmosféricas – ARPS - es una

herramienta que permite simular con cierto detalle los eventos de tormentas severas, sus características, evolución temporal y espacial, brindando resultados tri-dimensionales de las variables meteorológicas.

El evento del 27 de enero de 1998 ha sido simulado por el código, los resultados mostraron la evolución de varias celdas convectivas de gran tamaño que provocaron macrodescendentes y tornados causantes de numerosos daños materiales.

El valor máximo de velocidad de viento que se obtuvo como resultado de la simulación a en el sitio del colapso de las torres de suspensión de la línea de 132 KV fue de 40 m/s pudiendo haber provocado la caída de algunas de ellas ya que la velocidad del viento con la que se realiza su diseño es de 36,1 m/s. De todas formas, el valor de viento máximo obtenido como resultado de la simulación a la altura de las torres cerca General Ramírez fue de 51.8 m/s.

Se observaron variaciones bruscas de la dirección del viento, llegando en algunos casos a 180° producto de la superposición de dos o más macrodescendentes de nubes convectivas vecinas.

La resolución espacial de la simulación es de 400 metros. Se debería realizar un refinado de la malla de cálculo en el sector donde se produjo el colapso para obtener resultados más precisos.

REFERENCIAS

- AEA. Reglamentación de líneas aéreas exteriores de media y alta tensión. *Asociación Electrotécnica Argentina 1913-2006. Comité de estudios CE 3*, pp 1 – 87, 2006.
- Aguirre C. A. Dispersión et Mélange Atmosphérique Euléro-Lagrangien de Particules Fluides Réactives. Application à des cas simples et complexes. *Thèse de doctorat. Université Claude Bernard Lyon 1*. **115-2005**, pp 1-323, 2005.
- Aguirre C. A., A. B. Brizuela, I. Vinkovic and S. Simoëns. A Subrid Lagrangian Stochastic Model for Turbulent Passive and Reactive Scalar Dispersion. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. **27 (4)**, pp 627-635, 2006. URL:www.elsevier.com/locate/ijhff.
- Aguirre C. A., A. B. Brizuela, I. Vinkovic y S. Simoëns. Modelo acoplado Eulero-Lagrangiano de simulación de la dispersión atmosférica de especies químicamente reactivas en la capa límite. *Serie Mecánica Computacional Vol XXV*, pp: 185-205, 2006.
- Aguirre C. A., J. M. Martínez Fayó, A. B. Brizuela y M. F. Moyano. Simulación de las Grandes Escalas de Flujo Turbulento sobre una Colina de Suave Pendiente. *Serie Mecánica Computacional Vol XXVI*, pp 1215-1235, 2007.
- Aguirre C. A. y A. B. Brizuela. Simulación Numérica de la Dispersión Atmosférica de Gas Pasivo sobre una Colina utilizando un Modelo Acoplado. *Serie Mecánica Computacional Vol XXVII*, pp 217-237, 2008.
- ASCE. Guidelines for Transmission Line Structural Loading. *Task Committee on Structural Loading of the Committee on Electrical Transmission, Structures of the Committee on Analysis and Desing of Structures Division of the American Society of Civil Engineers*. pp: 1–137, 1991.
- Bjerkan L., O. Lillevik, S. M. Helleso, S. Enge and K. Halsan. Measurements on Aeolian vibrations on a 3 Km Ford crossing with fibre-optic brag grating sensors. *CIGRÉ*, **B2-314**, pp: 1-8, 2004.
- Brizuela, A. B. Modelo Digital de Elevación – Provincia de Entre Ríos. *Facultad de Ciencias Agropecuarias – UNER. CICyTTP – CONICET*. 2004.
- Deardorff J. W. Stratocumulus-capped mixed layer derived from a three dimensional model. *Journal of Boundary Layer Meteorology*. **18**, pp: 495-527, 1980.
- Dyer R. C. Rastros de Tornados no sudoeste do Brasil, este do Paraguai e nordeste da Argentina, 1986.

- Esmaili H. and H. Piomelli. Large-eddy Simulation of Relaminarizing Sink Flow Boundary Layers. *Review Near Wall Turbulent Flow. Elsevier Science*, pp: 287-346, 1993.
- Fackrell J. E. and A. G. Robins. Concentration Fluctuation and Fluxes in Plumes from Point Sources in a Turbulent Boundary Layers. *Journal of Fluid Mechanics*. **117**, pp 1 – 26, 1982.
- Fujita T. T. Proposed Characterization of Tornadoes and Hurricanes by Area and Intensity. *Satellite and Mesometeorological Research Project, University of Chicago*, **91**, 1971.
- Fujita T. T. The Downburst, Microburst and Macroburst. *Satellite and Mesometeorological Research Project, University of Chicago*, 1985.
- Fujita T. T. and A. D. Pearson. Results of FPP Clasification of 1971 and 1972 Tornadoes. *Eighth Conference of Severe Local Storm*, 1973.
- Garratt J. R. The Atmospheric Boundary Layers. *Cambridge University Press.*, 1992.
- Germano M., U. Piomelli, P. Moin and W. H. Cabot. A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model. *Journal of Physics Fluids*. **A 3**, pp 1760-1765, 1991.
- Gong W. and A. Ibbetson. A wind tunnel study of turbulent flow over models hill. *Boundary Layers Meteorology*, **49**, pp 113 – 148, 1989.
- Gong W. A Wind Tunnel Study of Turbulent Dispersion Over Two – and Three – Dimensional Gentle Hills from Upwind Point Sources in Neutral Flow. *Boundary Layers Meteorology*, **54**, pp 211-230, 1991.
- Groupe d'Action 22.11.04. Tension de pose de sécurité par rapport aux vibrations dues au vent. *Eléctra Review*, **198**. pp 28-43, 2001.
- INTI. Acción del Viento Sobre las Construcciones. *Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles*. **102**, pp: 1-115, 1984.
- Klemp J. B. and R. B. Wilhelmson. The Simulation of three-dimensional convective storm dynamics. *Journal Atmospheric Sciences*. **35**, pp 78-107, 1978.
- Letchford C. W. and H Hawes. Risk Assessment to Improve Reliability of Transmission Facilities Exposed to Sub-tropical High Wind Storm Event. *CIGRÉ*, **22-104**, pp: 1-5, 2000.
- Letscher P., P. Haberstick and B. Dalle. Strengthening RTE Overhead Transmission Lines Following the Storm of December 1999. *CIGRÉ*, **22-105**, pp: 1-5, 2002.
- Lichtenstein E. R. y M. L. A. Schwarzkopf. Aspectos Estadísticos de las Líneas de Inestabilidad en la Argentina. *Meteorológica*, **1 (1)**, 1970.
- Lilien D., D. Snegovisky, T. Capelle and M. Le Du. Limiting Windstorm Effects on Tower by a « Low Drag » Conductor. *CIGRÉ*, **B2-302**, pp: 1-4. 2004.
- Lilly D. K. A Proposed Modification of the Germano Subgrid-scale Closure Method. *Phys. Fluid.*, **A 4**, pp: 633-635, 1992.
- Mason P. J. Large-eddy Simulation of the Convective Atmospheric Boundary Layer. *J. Atmos. Sci.*, **46**, pp: 1492-1516, 1989.
- Proctor F. H. The Terminal Area Simulation System. *Volume I. Theoretical Formulation NASA. Contractor Report CR-4046*. 176 pp. 1987.
- Ross A. A. H. J., B. Rhebergen, J. P. M. van Oosterhout and C. G. N. de Jong. Probabilistic Based Condition Assessment of Overhead Transmission Lines. *CIGRÉ*, **22-103**, pp: 6, 2000.
- Schmidt H. and U. Schumann. Coherent Structure of the Convective Boundary Layers Derived from Large-eddy Simulation. *J. Fluid Mech.*, **200**, pp: 511-562. 1989.
- Schwarzkopf M. L. A. y L. C. Rosso. Informe Final Contrato Agua y Energía Eléctrica. *Universidad de Buenos Aires. Expte 433.244/84*, 1989.
- Schwarzkopf M. L. A y L. C. Rosso. Riesgo de Tornados y Corrientes Descendentes en la Argentina. *Universidad de Buenos Aires*. pp: 1-30, 1993.
- Smagorinsky J. General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiments. *Mon. Weather Rev.* **91**, pp 99-164, 1963.

- Soong S-T and Y. Oruga. A comparison between axi-symmetric and slab-symmetric cumulus cloud models. *J. Atmos. Sci.*, **30**, pp 879-893, 1973.
- U. S. Geological Survey. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Elevation Dataset. *National Aeronautics and Space Administration (NASA). National Imagery and Mapping Agency (NIMA). German Aerospace Center (DLR). Italian Space Agency (ASI)*. Sioux Falls, SD, <http://seamless.usgs.gov>. 2002.
- Van Driest E. R. On Turbulent Flow Near Wall. *J. of Aero Science*. **23**, pp: 1007-1011, 1956.
- Xue M., K. K. Droegemeier and V. Wong. The Advanced Regional Prediction System and Real-time Storm Weather Prediction. *International Workshop on Limited-area and Variable Resolution Models. Beijing, China. World Meteorology Organization*. 1995.
- Xue M., K. Droegemeier and V. Wong. The Advanced Regional Prediction System (ARPS). A Multi-Scale Nonhydrostatic Atmospheric Simulation and Prediction Model. Part I: Model Dynamics and Verification. *Meteorology Atmospheric Physics*. **75**, pp 161-193, 2000.