

**INTI** Instituto Nacional de  
Tecnología Industrial



Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales  
de Seguridad para las Obras Civiles del Sistema INTI



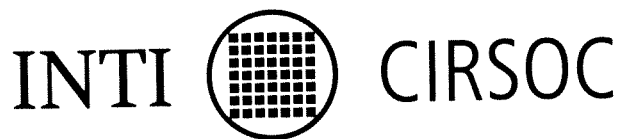
# **RIESGO DE TORNADOS Y CORRIENTES DESCENDENTES EN LA ARGENTINA**

**Dra. María Luisa A. de Schwarzkopf  
Lic. Luis César Rosso**

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales  
Departamento de Ciencias de la Atmósfera

**1993**

**BIBLIOTECA DE APOYO**



*Av. Cabildo 65 Subsuelo - Ala Savio  
(C1426AAA) Ciudad Autónoma de Buenos Aires  
República Argentina*

*Tel./Fax: (54 11) 4779-5271/5273*

*Web: [www.inti.gob.ar/cirsoc](http://www.inti.gob.ar/cirsoc)*

*E-mail: [cirsoc@ffmm.gov.ar](mailto:cirsoc@ffmm.gov.ar)  
[cirsoc@inti.gob.ar](mailto:cirsoc@inti.gob.ar)*

**Primer Director Técnico ( † 1980): Ing. Luis María Machado**

**Directora Técnica: Inga. Marta S. Parmigiani**

© 1996

**Editado por INTI**

**INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL**

**Av. Leandro N. Alem 1067 - 7° piso - Buenos Aires. Tel. 313-3013**

**Queda hecho el depósito que fija la ley 11.723. Todos los derechos, reservados.  
Prohibida la reproducción parcial o total sin autorización escrita del editor. Impreso  
en la Argentina.**

**Printed in Argentina.**

# CIRSOC

## ORGANISMOS PROMOTORES

Secretaría de Obras Públicas y Comunicaciones  
Instituto Nacional de Tecnología Industrial  
Secretaría de Estado de Desarrollo Urbano y Vivienda  
Municipalidad de la Ciudad de Buenos Aires  
Comisión Nacional de Energía Atómica

## MIEMBROS ADHERENTES

Consejo Interprovincial de Ministros de Obras Públicas  
Empresa del Estado Agua y Energía Eléctrica

## AUTORES:

**MARIA LUISA ALTINGER DE SCHWARZKOPF**  
Doctora en Ciencias Meteorológicas

- Profesora Asociada de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- Investigadora independiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.
- Directora del Proyecto "Estudio de los Tornados en la República Argentina".

**LUIS CESAR ROSSO**  
Licenciado en Ciencias Meteorológicas

- Jefe de División de Procesamiento Automatizado de Datos del Departamento de Pronóstico del Servicio Meteorológico Nacional.
- Integrante del Proyecto "Estudio de los Tornados en la República Argentina".

## **PROLOGO :**

La publicación del estudio del Riesgo de Tornados y Corrientes Descendentes en la Argentina, realizado por la Dra. María Luisa Altinger de Schwarzkopf y el Lic. Luis César Rosso, tiene por objeto ampliar el conocimiento de la importancia de los tornados y tormentas severas que ocurren en nuestro país.

En él se analizan las trazas de daños producidos por estos fenómenos y sus características, se estudian estadísticamente las variables que intervienen, se presentan ejemplos, un modelo de cálculo de riesgo de tornados y de tormentas severas, y finalmente, se comparan resultados.

El CIRSOC agradece a los autores la autorización para publicar este trabajo, que será seguramente un valioso aporte al conocimiento de fenómenos estrechamente relacionados con la acción del viento, y que debido a sus características especiales, no están contemplados en el Reglamento CIRSOC 102 "Acción del Viento sobre las Construcciones".

Dirección Técnica  
CIRSOC

## PROLOGO DE LOS AUTORES

El Estudio de los tornados en la República Argentina es una investigación que se lleva a cabo en la Universidad de Buenos Aires desde 1971. Tiene como objetivo principal la evaluación de la importancia de estos fenómenos en distintas zonas del país.

Los resultados de la investigación se aplican en el diseño de obras de ingeniería que deben cumplir con requisitos de seguridad altamente exigentes o en aquellas que por su extensión sufren impactos frecuentes. Se realizaron estudios especiales para centrales nucleares y para sistemas de transmisión de energía eléctrica de alta tensión situados en nuestro país.

Se ha organizado una base de datos que comienza en 1930 y que constituye la única fuente de información para investigaciones actuales y futuras.

Este proyecto es auspiciado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas y cuenta con el apoyo de empresas nacionales.

Los Autores

## RIESGO DE TORNADOS Y CORRIENTES DESCENDENTES EN LA ARGENTINA

María Luisa Altinger de Schwarzkopf \*  
Luis César Rosso

Docentes del Departamento de Ciencias de la Atmósfera -  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales -  
Universidad de Buenos Aires

\* Investigador Independiente del CONICET

### RESUMEN

Las tormentas severas generan corrientes descendentes y, en ocasiones, tornados. Debido al intenso campo de viento que inducen producen trazas de daños a nivel del suelo.

En este trabajo se analizan las características de las trazas de daños producidas por corrientes descendentes, en tormentas severas en la Argentina. Se definen cuatro variables: intensidad, dirección media del viento, área total afectada y su relación de aspecto. Se demuestra que estas variables son estadísticamente independientes entre sí. Se presentan ejemplos de trazas de daños estudiadas.

Se detectaron casos de tornados en todo el país, excepto la Patagonia. El 90 % de los casos registrados ocurrieron al este del meridiano 65°W. Los tornados más violentos ocurrieron al norte de los 35° de latitud.

Se aplica el modelo de cálculo de riesgo de tornados de Twisdale, L. A. y Dunn, W. L. (1981). Se muestra el resultado para un blanco puntual y se lo compara con el obtenido para un blanco lineal de 140 km de extensión.

Se propone una metodología similar para el cálculo de riesgo de corrientes descendentes y se comparan sus resultados con valores extremos de viento obtenidos con la aplicación de metodologías convencionales.

Para la aplicación de los dos modelos de riesgo se utilizaron datos sobre tornados y tormentas severas recopilados sobre un período de más de 50 años.

## 1. ORIGEN DE LOS VIENTOS EXTREMOS

Hay diversos sistemas y procesos atmosféricos que pueden generar vientos huracanados a nivel del suelo. Los más importantes son:

- el ciclón extratropical, que es un sistema de baja presión cuyo diámetro es del orden de los 1000 km. En nuestro país, valores extremos de la velocidad del viento se producen por efecto de los intensos gradientes de presión que se establecen cuando un ciclón de este tipo se intensifica durante su trayectoria sobre el continente o a lo largo de la costa atlántica, en especial la patagónica. Los accidentes topográficos producen valores extremos locales. La rugosidad del terreno perturba el flujo general del aire con torbellinos menores que se manifiestan en el carácter rafagoso del viento en superficie. Por ejemplo, el sistema de baja presión que se originó el 18 de junio de 1971 sobre el centro del país, produjo, durante el día 19 en su desplazamiento hacia el Sureste, en Mar del Plata, vientos, promediados sobre 10 minutos, superiores a 100 km/h y ráfagas de 120 km/h.

- el viento Zonda y los vientos catabáticos. Se originan en regiones montañosas por el repentino drenaje, ladera abajo, de aire más denso acumulado en valles o grandes hondonadas.

- las nubes de tormentas (Cumulonimbus). Generan corrientes descendentes y en ocasiones tornados. Las corrientes descendentes al impactar sobre el suelo pueden producir ráfagas destructivas.

- el huracán o ciclón tropical. Es un intenso vórtice de aire cálido y húmedo que se traslada de Este a Oeste sobre latitudes ecuatoriales. Su diámetro es del orden de los 100 km. No ocurren en la Argentina.

Los datos de viento registrados en una red nacional de estaciones meteorológicas son, por lo general, valores promediados sobre un intervalo de tiempo, por ejemplo, 1 hora, 10 minutos, 5 segundos, etc. Los distintos valores pueden relacionarse estadísticamente. Existen numerosos trabajos sobre este tema. En general, el viento es el valor medio de la velocidad del aire sobre un periodo de 10 minutos y la ráfaga es el valor máximo instantáneo.

Se denomina factor de ráfaga a la relación entre el valor de la ráfaga instantánea y el valor medio del viento.

## 2. VIENTOS GENERADOS POR CELDAS DE TORMENTAS

### 2.1 Corrientes descendentes

La convección atmosférica, proceso de intercambio vertical, origina los movimientos de escala menor más importantes. En condiciones favorables de humedad genera nubes de tormenta.

Hay tres formas características netamente diferenciables bajo las cuales se presenta la actividad tormentosa sobre nuestro país:

a) en forma de celdas aisladas, independientes entre sí en cuanto a su hora de formación, tamaño, trayectoria y su grado de actividad

b) en forma de líneas, donde las celdas de tormenta se hallan alineadas a lo largo de varios centenares de kilómetros y relacionadas entre sí de manera tal que cada una afecta a sus aledañas durante el desarrollo de su propio ciclo de vida. Se las denomina líneas de inestabilidad. (Lichtenstein y Schwarzkopf, 1970)

c) en forma de conglomerados nubosos que pueden evolucionar hasta formar los conocidos complejos convectivos de mesoescala (Velasco y Fritsch, 1987).

En el ciclo de vida de una tormenta común, del orden de una hora, se distinguen las etapas de formación, de desarrollo y de disipación. En ocasiones la tormenta en etapa de desarrollo aumenta su tamaño hasta dominar durante varias horas como única celda gigante el conglomerado convectivo produciendo todo tipo de tiempo severo en superficie: precipitación de granizo gigante, chaparrones intensos, fuertes ráfagas descendentes y, ocasionalmente, tornados. Además, esta tormenta genera, sobre su flanco delantero e izquierdo (derecho en el hemisferio norte), un sistema de baja presión de unos 7 a 10 km de diámetro, denominado mesociclón, que produce una circulación ciclónica fuertemente convergente a nivel del suelo. Estas características originaron la denominación de tormenta severa (Severe Local Storm).

Las corrientes descendentes producidas por celdas convectivas severas impactan sobre el suelo y ocasionan daños generales sobre áreas cuyas dimensiones son del orden de  $10^2$  km<sup>2</sup>. Dentro de estas áreas existen zonas menores con daños localizados más intensos. Esta configuración de los daños puede ser asociada a la acción del frente general de ráfagas de la tormenta y a la acción individual de cada corriente descendente.

Fujita (1985) propone la siguiente denominación de las corrientes descendentes.

**MACRODESCENDENTE (Macroburst):** es una amplia corriente descendente que al impactar sobre el suelo genera daños sobre áreas cuyas dimensiones horizontales son superiores a 2,5 millas (4 km). Los vientos pueden actuar durante 5 a 30 minutos con velocidades hasta 60 m/seg (216 km/h).

Fujita describe las características de una macrodescendente de esta forma: "Por su amplia escala horizontal, una macrodescendente está caracterizada por un domo de aire frío generado por una sucesión de corrientes descendentes emitidas por la nube de tormenta. Como el aire frío es más pesado que el aire cálido que lo circunda la presión atmosférica dentro del domo frío es mayor que en el entorno. La fuerza, producida por el gradiente de presión y dirigida hacia afuera impulsa y desplaza al aire frío generando ráfagas de viento sobre sus bordes delanteros. Estas ráfagas alejan las márgenes del domo frío del entorno de la tormenta."

**MICRODESCENDENTES (Microburst):** es una corriente descendente con dimensiones reducidas. Los daños se concentran en áreas con



dimensiones horizontales menores a 2,5 millas (4 km). Una violenta microdescendente puede generar vientos hasta 75 m/seg (270 km/h).

La figura 1 extraida de Fujita (1985) muestra tipos de microdescendentes asociadas a nubes de tormentas.

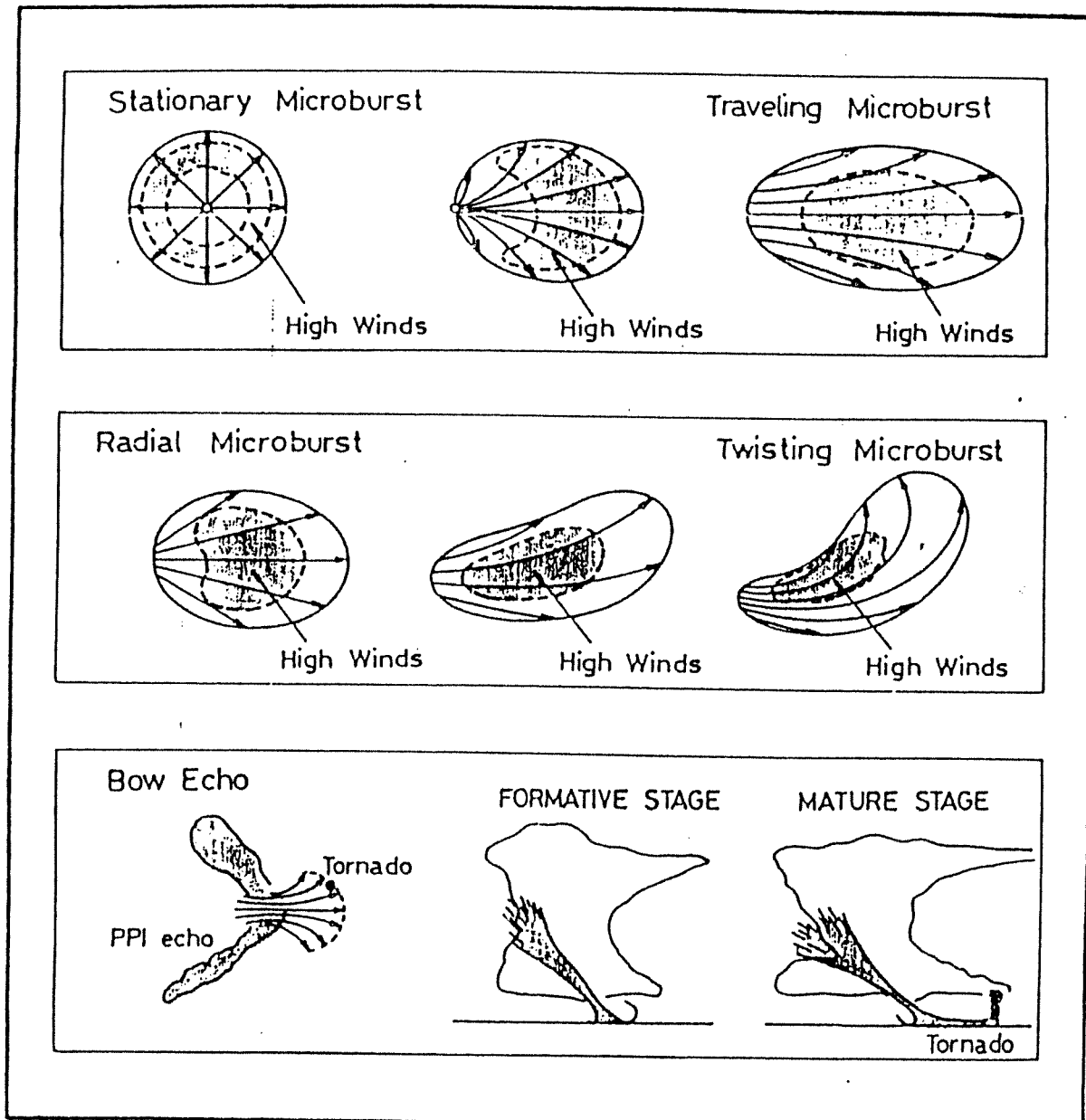


Figura 1 Tipos de microdescendentes asociadas a nubes de tormentas (Fujita, 1985)

Desde 1971, en la Argentina, analizamos las trazas de daños producidas durante el pasaje de tormentas severas y para su estudio hemos definido (Schwarzkopf y Rosso, 1987) cuatro variables características:

- (F) Intensidad: se define por el valor máximo del viento alcanzado dentro del área afectada y a nivel del suelo. Se estima por medio de la escala Fujita (1973).
- ( $\phi$ ) Dirección media del viento sobre el área afectada, en grados de azimut desde donde proviene el viento.
- (A) Área total afectada. Se determina por inspección directa del área y se expresa en km<sup>2</sup>.
- ( $\alpha = W/L$ ) Relación de aspecto: se define como la relación entre el ancho (W) y el largo (L) del área afectada.

La figura 2 muestra un caso de corriente descendente con sus variables características.

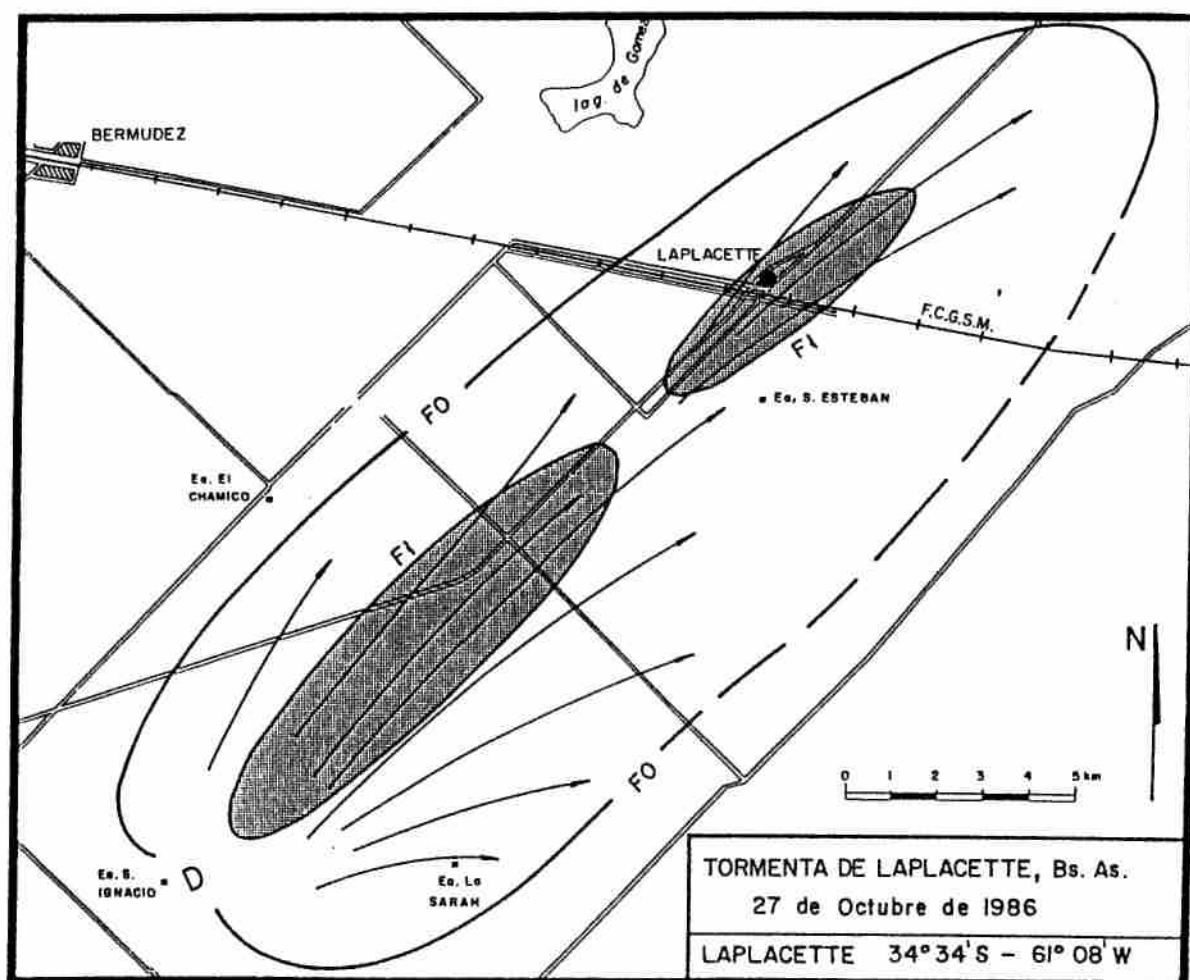


Figura 2 Traza de los daños caracterizados con  $F = 1$ ,  $A = 216 \text{ km}^2$ ,  $\alpha = 0,3$  y  $\phi = SW$

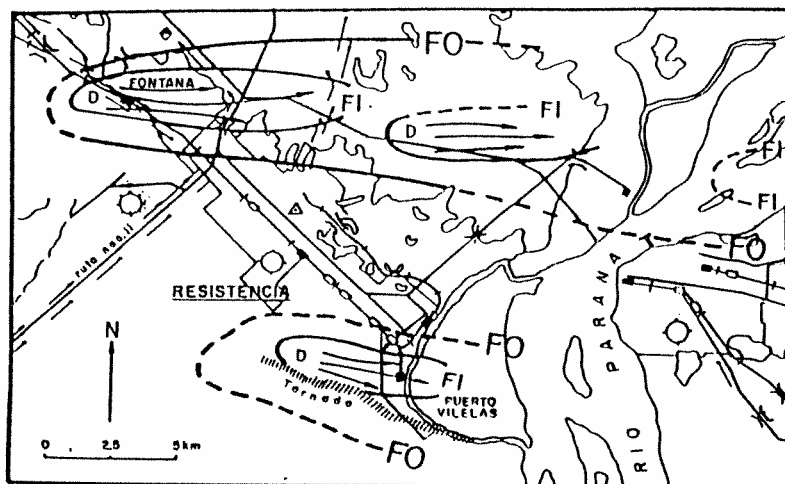
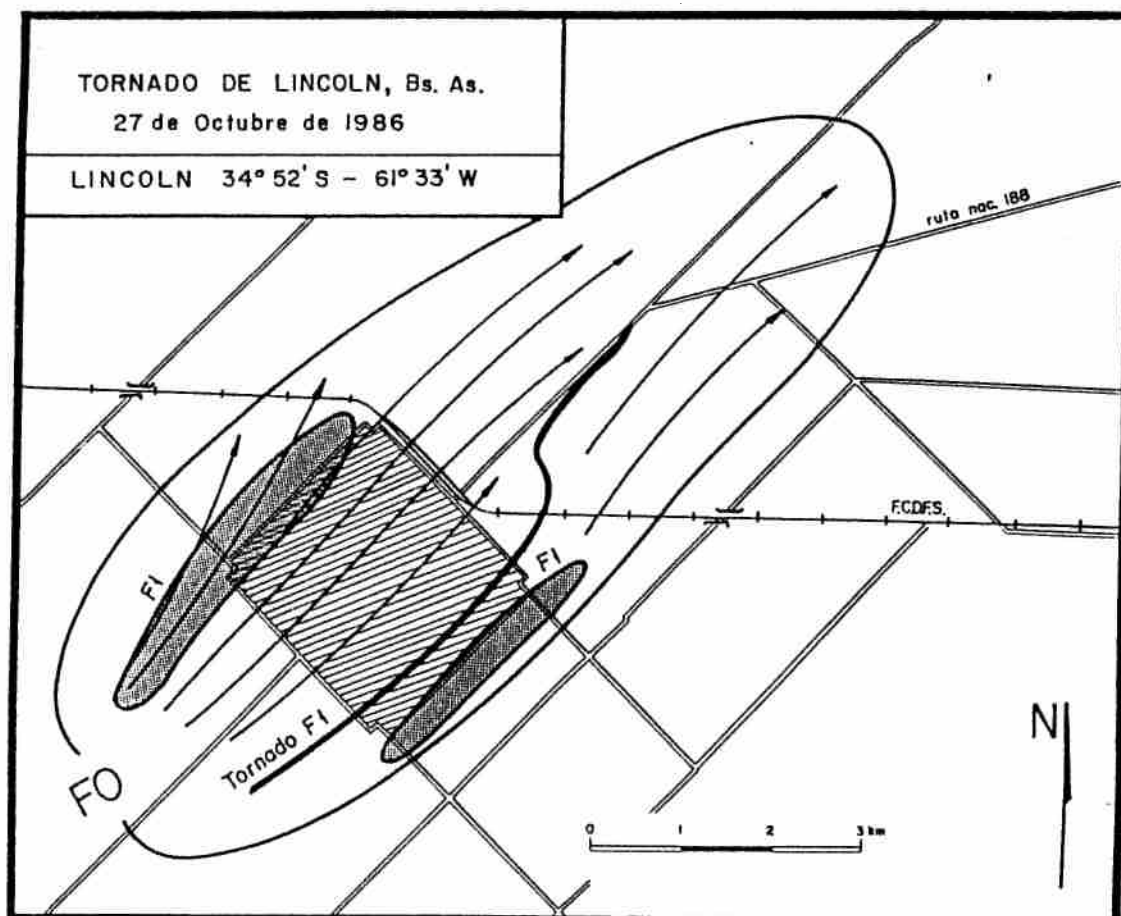


Figura 3:  
Tormenta del  
2-julio-1983  
Resistencia,  
Chaco

Figura 4



Con excepción de un caso, la intensidad observada de las ráfagas no superó la intensidad F1 (180 km/h). Fujita (1978) menciona la ocurrencia de ráfagas de intensidad F2 y aún F3 en los Estados Unidos de Norte América. La tabla 1 muestra ambas distribuciones de frecuencias observadas. Las tormentas en nuestro país no son tan severas como en el país del norte.

Hemos hallado que tanto el área total afectada (A) como su relación de aspecto ( $\alpha$ ) son variables cuyas distribuciones de probabilidad son ajustables a leyes logarítmicas normales.

Tabla 1: Intensidad de las ráfagas descendentes en tormentas severas. Distribución de frecuencias observadas y su comparación con la obtenida por Fujita(1985) en EEUU.

PAIS	INTENSIDAD	F0	F1	F2	F3	F4	TOTAL
Argentina	frec.relat. (%)	46	52	2	0	0	61 casos
EEUU (Fujita 1978)	frec.relat. (%)	47	32	19	1.4	0	142 casos

La tabla 2 muestra la matriz de correlación entre las variables estudiadas. En ella se observa que sólo existe una débil correlación negativa entre la intensidad F y la relación de aspecto ( $\alpha$ ) lo que puede deberse a que las tormentas con mayor velocidad de traslación producen áreas elongadas, ( $\alpha$  pequeño) y en esos casos las corrientes verticales descendentes transportan mayor cantidad de movimiento hacia abajo (intensidad F mayor).

Tabla 2 Correlación entre las variables que caracterizan a las corrientes descendentes

	AREA	ASPECTO	DIRECCION	INTENSIDAD
AREA	1.00	0.16	0.06	0.15
ASPECTO	0.16	1.00	-0.04	-0.41
DIRECCION	0.06	-0.04	1.00	-0.12
INTENSIDAD	0.15	-0.41	-0.12	1.00

Si consideramos, en primera aproximación que las variables son independientes entre sí, es posible representar las corrientes descendentes como un evento aleatorio cuyas características básicas están definidas por la siguiente función de probabilidad conjunta:

$$f_{F,A,d,\Phi}(F,A,d,\Phi) = f_F(F) \cdot f_A(A) \cdot f_d(d) \cdot f_{\Phi}(\Phi)$$

Esta expresión se utiliza en el cálculo de riesgo de corrientes descendentes que se desarrolla más adelante.

## 2.2 TORNADOS

Además de corrientes descendentes las tormentas severas en ocasiones, generan tornados. Las variables características que se utilizan para la clasificación de los tornados son las siguientes:

- (F) Intensidad: se define por el valor máximo del viento alcanzado dentro del área afectada. Se estima por medio de la escala Fujita (1973).
- ( $\Phi$ ) Dirección de desplazamiento: se determina por medio de la orientación de la traza de daños.
- (L, W) Largo y ancho de la traza de daños. Se codifica con la escala  $P_L$   $P_W$  de Pearson.

La unión de la escala Pearson con la escala Fujita es conocida como la escala Fujita-Pearson (1973). De esta forma, las características básicas del tornado quedan representadas por tres cifras: F,  $P_L$ ,  $P_W$ . La tabla 3 muestra esta escala junto con las expresiones que la vinculan con las respectivas variables.

CODIGO	F km/h		$P_L$ km		$P_W$ m	
	RANGO	VALOR CENTRAL	RANGO	VALOR CENTRAL	RANGO	VALOR CENTRAL
0	64-116	90,1	0,5-1,5	0,9	5-15	10,5
1	117-181	148,8	1,6-5,0	3,3	16-51	33,4
2	182-253	217,8	5,1-16,0	10,5	52-160	105,6
3	254-332	292,8	16,1-50,7	33,4	161-508	334,7
4	333-418	374,9	51-160	105,0	509-1608	1058,9
5	419-512	465,8	161-508	335,0	1609-4538	3073,7

Velocidad del viento =  $22,69 (F + 2)^{3/2}$  km/h

Largo de la traza =  $1,609 10^{1/2(P_L - 1)}$  km

Ancho de la traza =  $1,609 10^{1/2(P_W - 5)}$  km

Tabla 3: Escala Fujita - Pearson  $F P_L P_W$

Las figuras 6, 7 y 8 muestran ejemplos de trazas de tornados.

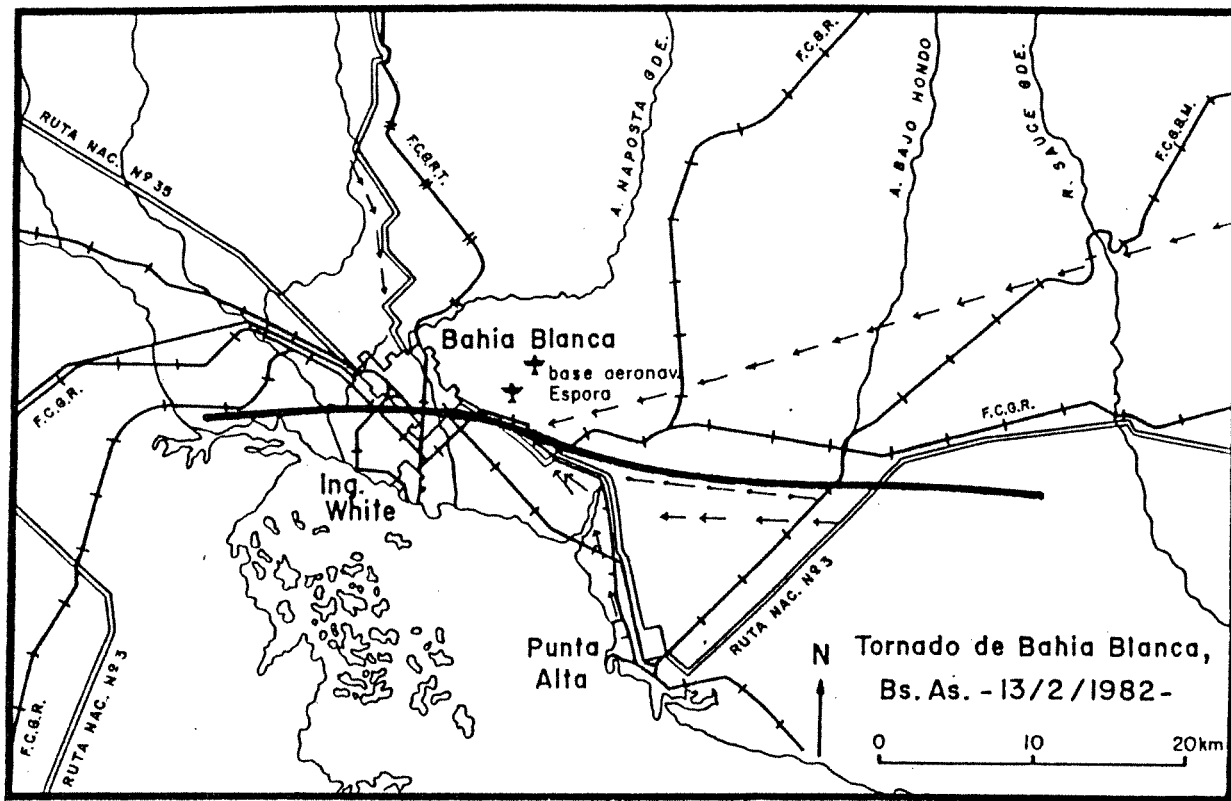


Figura 6

### 2.2.1 Región geográfica afectada por tornados

Se detectaron casos de tornados sobre todo el país, excepto sobre la Patagonia central y sur.

De la figura 9 surge que hay una neta discontinuidad en las frecuencias de ocurrencias a lo largo del meridiano 65°W. Casi el 90 % de los casos registrados ocurrieron al este de esa longitud geográfica. Esta discontinuidad podría ser efecto de la influencia de las sierras de Córdoba en la canalización y contención del aire cálido y húmedo proveniente de las regiones tropicales o generado sobre la cuenca del río Paraná.

Los tornados más violentos registrados ocurrieron al norte de los 35°S y al este del meridiano 65°W y con preferencia sobre la provincia de Córdoba. Los trabajos realizados por Dyer, R. C. (1986) sobre trazas descubiertas con imágenes de satélites indican una segunda zona de tornados violentos sobre la selva paraguaya. Perteneció a esa región el tornado que afectó con intensidad F5 a la ciudad paraguaya de Encarnación el 21 de septiembre de 1926.

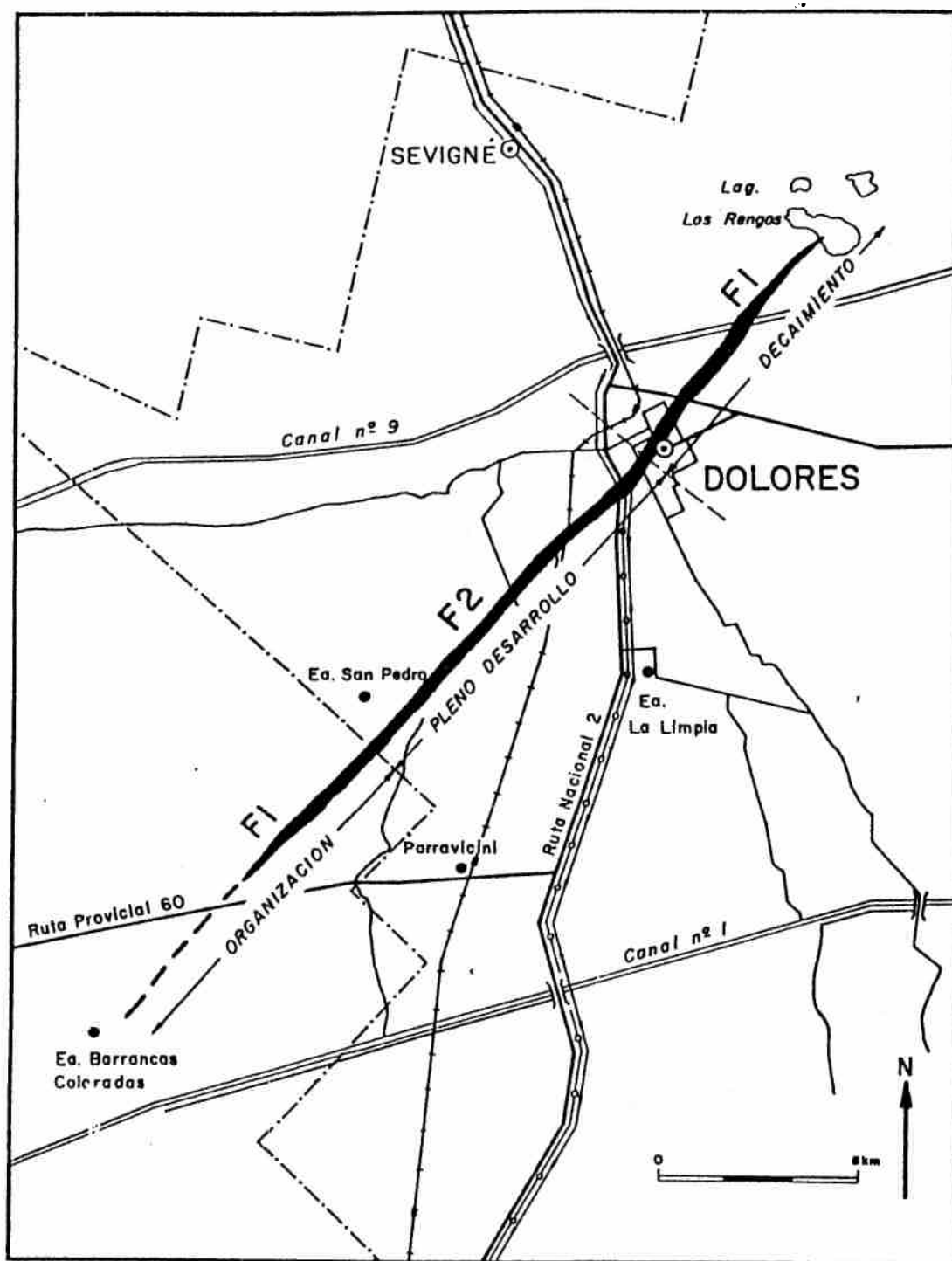


Figura 7

Tornado de Dolores, Buenos Aires  
25 de noviembre de 1985

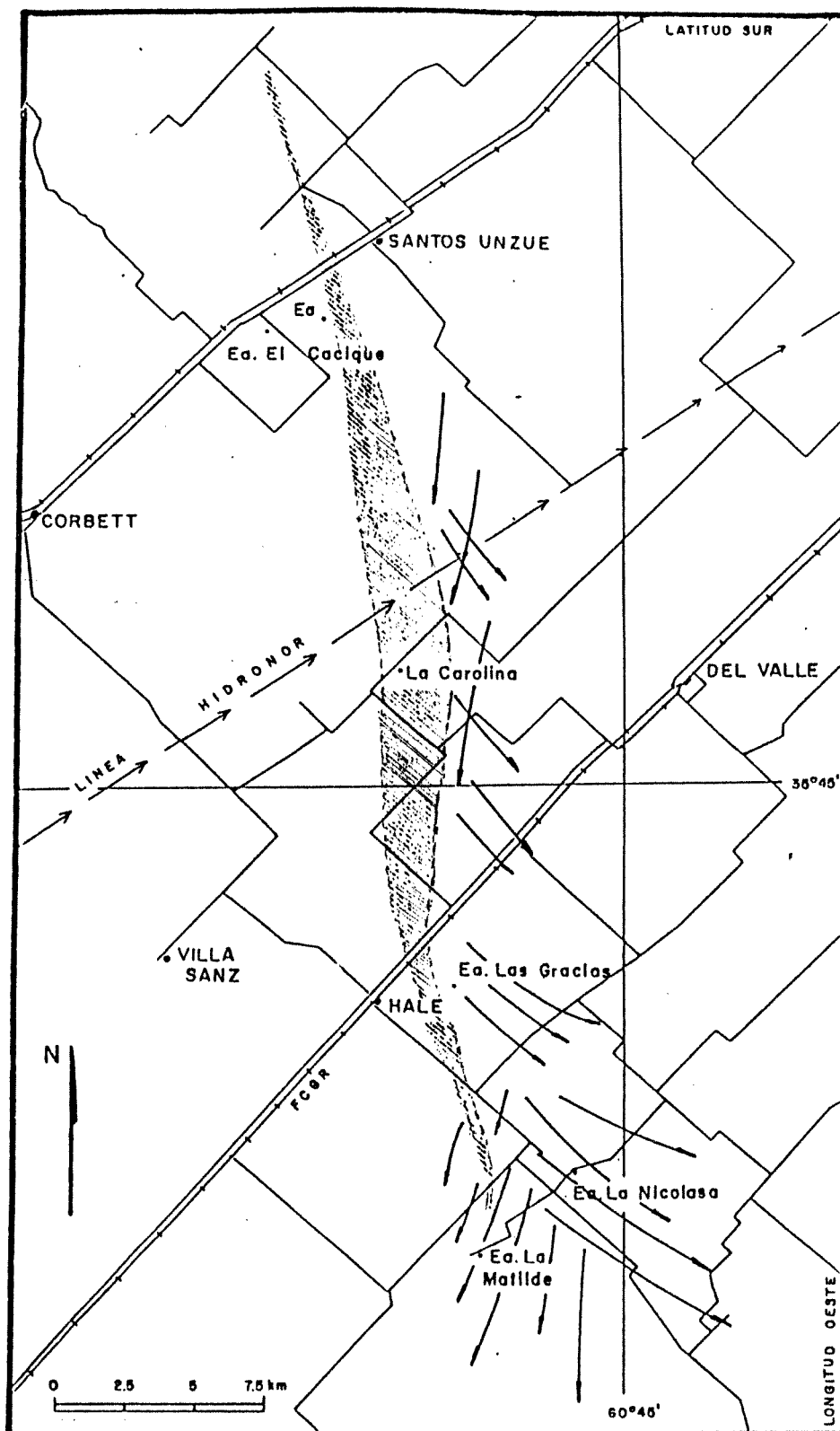


Figura B

Tornado de Hale, Buenos Aires  
23 de febrero de 1987



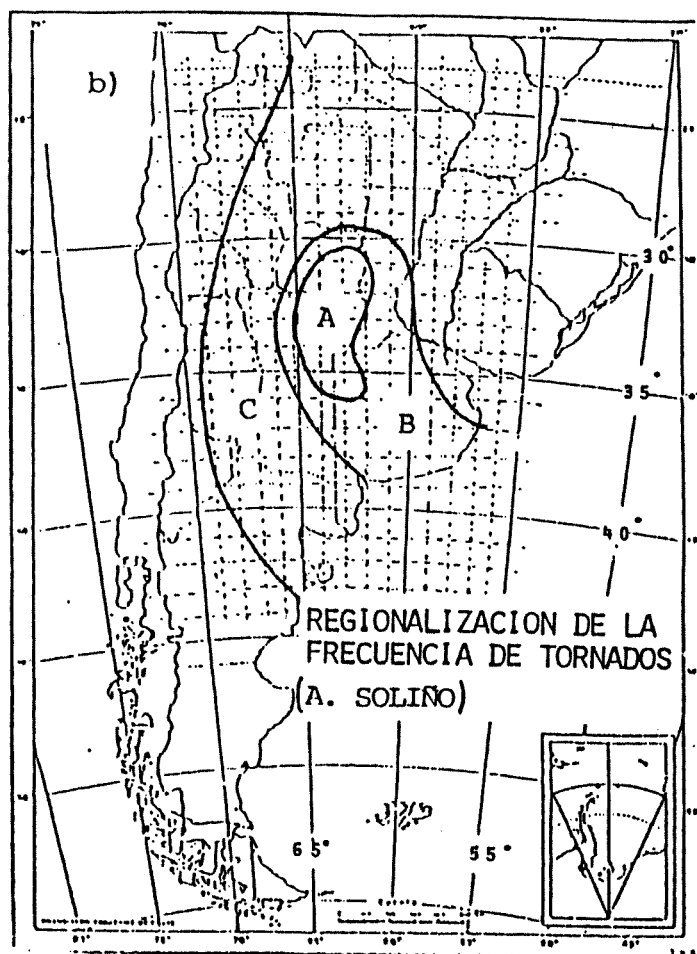


Figura 9 Distribución geográfica de los tornados.  
La zona A es la de máxima frecuencia.

Región al este de los 65°W: Dentro de un campo relativamente homogéneo, existe un máximo de frecuencias entre los 30 y 35°S hasta los 60°W; la falta de estudios sistemáticos de tornados sobre los países de Paraguay, Brasil y Uruguay impide determinar si el carácter decreciente del campo de frecuencias se mantiene al este del meridiano 55°W.

Región al oeste de los 65°W: Dentro de esta región, desértica y de escasa población, que se extiende hasta la cordillera de los Andes hemos detectado casos de tornados en Salta y La Rioja. No pudimos confirmar la ocurrencia de tornados sobre la región de Cuyo a pesar de ser la región más explorada en fenómenos convectivos del país debido a sus campañas antigranizo. Hemos explorado la zona oeste del Neuquén sin encontrar indicios de tornados; recién a partir de la zona de la sierra de Auca Mahuida que linda con la provincia de La Pampa, los pobladores distinguen, por experiencia, la diferencia existente entre un

tornado y los vientos huracanados que acompañan una tormenta.

Región al oeste de la cordillera de los Andes: Hemos detectado la ocurrencia de tornados sobre una región centrada entre las latitudes 35 y 40° S sobre territorio chileno.

### 3. RIESGO DE FENOMENOS SEVEROS: TORNADOS O CORRIENTES DESCENDENTES

#### 3.1 Planteo del problema

Existe una amplia bibliografía que trata la aplicación de la distribución de valores extremos a series de vientos máximos anuales. Los temas de discusión se circunscriben a la elección de la ley de distribución de probabilidad más adecuada, a la determinación de los parámetros de esas distribuciones que mejor ajustan a la influencia del tipo de sistemas meteorológicos que originan los vientos huracanados, al lapso al cual se refieren los valores de viento promedio, y al efecto de la rugosidad del terreno sobre los valores extremos de ráfagas (Riera, Viollaz y Reimundín, 1977), (Davenport, 1960).

El análisis de episodios individuales de roturas indican que, casi sin excepción, los tornados y las corrientes descendentes son los causantes de esos colapsos; surge por lo tanto el interrogante: los valores de diseño obtenidos a través del análisis convencional de extremos, representan los máximos de viento generados por corrientes descendentes, en tormentas severas?

Siendo las corrientes descendentes fenómenos de microescala raros, su probabilidad es del orden de  $10^{-4}$  por año por  $\text{km}^2$ , su registro, por medio de la red de estaciones sinópticas es poco probable; la captación del máximo de viento asociado a la corriente descendente es más improbable aún. En consecuencia la serie de valores extremos anuales, correspondiente a una estación meteorológica dada, puede no contener información sobre ráfagas máximas provenientes de corrientes descendentes severas.

El problema se plantea cuando se extiende esta estimación de vientos extremos, basada en una serie no representativa, a estructuras cuyas dimensiones son mucho mayores a las de la escala del fenómeno.

Para cubrir este aspecto del problema proponemos una metodología, que estima la probabilidad de excedencia de valores de viento, teniendo en cuenta el tamaño de la estructura.

#### 3.2 Riesgo. Definición de variables

El riesgo se define como el producto de dos factores:

- la probabilidad de un suceso y
- el daño que el suceso puede ocasionar

Bajo el punto de vista meteorológico los estudios de

riesgo se limitan al planteo de la probabilidad del suceso.

En el problema del cálculo de riesgo entran en juego diversos conjuntos de variables que pertenecen a dos grupos bien definidos: uno, que reúne los conjuntos de variables que caracterizan el fenómeno y otro, que contiene los conjuntos de variables que caracterizan la estructura expuesta a la acción del fenómeno (blanco de impacto).

Los tornados y las corrientes descendentes no son predecibles y la variabilidad de sus características hacen que estas deban ser descriptas por los siguientes conjuntos de variables aleatorias:

- Macrovariables tales como, intensidad del tornado, largo y ancho de la traza, dirección, etc., intensidad de la corriente descendente, área total afectada, relación de aspecto, etc.
- Microvariables que configuran el campo de viento dentro de un vórtice o, las constantes que definen las ecuaciones empíricas que describen el campo de la velocidad máxima del viento dentro de una descendente.
- Variables geográficas que definen la posición del fenómeno severo.
- Variables estocásticas que especifican el momento y la frecuencia de su ocurrencia.

En cambio, las variables que caracterizan a la estructura (blanco de impacto) pueden ser consideradas como determinísticas y son:

- Propiedades geométricas y estructurales.
- Variables de campo que definen el entorno cercano de la estructura (por ej.: potenciales proyectiles) y la interacción con el fenómeno severo.
- Locación geográfica de la estructura.
- Características que dependen del tiempo. (Por ej.: la vida útil de la estructura)

En general, la estructura es considerada como blanco puntual y sólo los modelos de riesgo más avanzados tienen en cuenta sus dimensiones.

### 3.3 Formulación general del cálculo del riesgo de tornados

El planteo básico del cálculo del riesgo es el siguiente:

a) se formula la probabilidad de un suceso A asociado a un evento que ocurre al azar en el tiempo, mediante la aplicación del concepto de probabilidad total

$$P_T(A) = \sum_{N=0}^{\infty} P(A/N) P_T(N) \quad (1)$$

donde

$P_T(A)$  es la probabilidad del suceso A durante el transcurso del tiempo T;

$P(A/N)$  es la probabilidad del suceso A dado la ocurrencia de N eventos;

$P_T(N)$  es la probabilidad de ocurrencia de N eventos durante el transcurso del tiempo T

b) Se define un proceso adecuado de arriba para la ocurrencia de los N eventos. El modelo estocástico más comunmente aplicado en la ocurrencia de tornados es el que supone que el evento tornado constituye un proceso de Poisson y que por lo tanto los eventos son independientes entre sí y distribuidos homogéneamente en el espacio y en el tiempo o sea que la probabilidad  $P_T(N)$  se expresa como

$$P_T(N) = (\lambda T)^N / N! e^{-\lambda T} \quad (2)$$

donde

$\lambda$  es la frecuencia media anual de ocurrencia

c) Se evalúa la probabilidad condicional  $P(A/N)$  con la expresión

$$P(A/N) = 1 - (1 - P(A))^N \quad (3)$$

donde

$P(A)$  es la probabilidad del suceso (A)

d) Se determinan las condiciones que definen el suceso. En este caso el suceso A ocurre cuando, durante el pasaje de un tornado (evento), el viento impacta sobre la estructura con una velocidad, V, superior a un cierto valor, v, dado.

Hay dos formas de definir el impacto:

- cuando al menos un punto de la estructura es afectado por vientos  $V > v$  (convención aditiva)

- cuando la zona del tornado donde  $V > v$  intersecta totalmente la estructura (convención excluyente)

Sólo en los modelos más avanzados se definen explícitamente las condiciones de impacto.

En la resolución de estos problemas, los distintos autores, citan la aproximación realizada por Wen y Chu (1973) quienes sustituyendo la ec. (2) en la ec.(1) y evaluando  $P(A/N)$  con la ec.(3), obtienen la siguiente expresión del riesgo:

$$P_T(A) = 1 - \exp(-\lambda T P(A)) \quad (4)$$

la cual para  $\bigvee P(A)T \leq 0,01$  puede aproximarse por

$$P_T(A) = \bigvee P(A)T \quad (5)$$

con una precisión del 5 %.

### 3.4 Diferentes aproximaciones del problema

Markee et al., 1974, proponen un modelo de riesgo para un blanco puntual. Consideran la intensidad del tornado constante sobre toda la traza de daño e igual al valor máximo. Este método es una simplificación conservativa del problema y sobrestima el riesgo ya que la intensidad máxima sólo ocurre sobre una pequeña parte de la traza.

McDonald J. R., 1980, corrige la sobrestimación de la probabilidad del modelo anterior teniendo en cuenta la variación del viento dentro del torbellino. Además, este autor considera al área de la traza proporcional a la intensidad del tornado.

Twisdale, L.A. y Dunn, W.L. (1981). Estos autores utilizan la aproximación de Wen y Chu (ec.(5)) mencionada anteriormente. O sea

$$P_T(V \geq v) \approx \bigvee P(V \geq v)T$$

$\bigvee$  es estimada, mediante el estimador de máxima verosimilitud  $\bigvee = n/t_0$ , donde  $n$  = número de tornados ocurridos durante el periodo de tiempo  $t_0$

$P(V \geq v)$  es evaluada, con el concepto de probabilidad total, utilizando el sistema discreto de clasificación de Fujita (1971) mediante la ecuación:

$$P(V \geq v) = \sum_{i=1}^{F_{max}} P(V \geq v/F_i) P(F_i)$$

donde  $F_i$  = categoría  $i$  de la escala  $F$  de intensidades de tornados; y  $F_{max}$  es la máxima intensidad  $F$  de los tornados en la región.

por lo tanto resulta

$$P_T(V \geq v) \approx \bigvee T \sum_{i=1}^{F_{max}} P(V \geq v/F_i) P(F_i) \quad (6)$$

además, los autores expresan la probabilidad de que la estructura sea afectada por velocidades  $V \geq v$  durante el pasaje del tornado de intensidad  $F_i$  como:

$$P(V > v / F_1) = \frac{(A_0)_1}{S} \quad (7)$$

donde  $A_0$  es el lugar geométrico de los centros de todas las trazas de las cuales resulta un impacto sobre la estructura.

Reemplazando las ecuaciones (7) y (6) en la (5), resulta la expresión final

$$P_T(V > v) \approx \frac{1}{S} T \sum_{i=0}^{F_{max}} (A_0)_i P(F_i) \quad (8)$$

#### 4. DESARROLLO DE UN MODELO DE RIESGO PARA SU APLICACION A LOS DATOS DE TORNADOS OBTENIDOS SOBRE LA ARGENTINA

Desarrollamos un modelo de riesgo de tornados basado en el esquema propuesto por Twisdale y Dunn explicado anteriormente. Se trató en forma explícita, las incertidumbres de modelado y las incertidumbres debido a la aleatoriedad del fenómeno mediante un procedimiento de Monte Carlo sobre las variables, con un sistema de cálculo de dos "loops" anidados. La tabla 4 muestra las variables y las distribuciones que se emplearon.

##### 4.1 Fuente de datos

Para determinar los parámetros de las distribuciones indicadas en la tabla 4 utilizamos los datos recolectados por nuestro proyecto "Estudio de los tornados en la República Argentina". Tomamos de L.A. Twisdale y W.L. Dunn (1981) los valores de las variables que por ser propias del campo de viento del tornado se suponen independientes de la situación geográfica de su ocurrencia.

Se modeló la frecuencia anual media con una función de distribución normal truncada, cuyos parámetros fueron determinados con la serie de tornados registrados sobre la región de estudio.

En los casos en que la región de estudio se halle situada en el borde de una zona con tornados violentos definimos  $k$  distribuciones de intensidad  $f_F(F)$  posibles con los pesos  $P(f_F(F)_k)$  correspondientes.

Obtuvimos las distribuciones  $f_F(F)$ ,  $f_{PL/F}(P_L/F)$  y  $f_\phi(\phi_t)$  con la serie de tornados que corresponde a la región de estudio. La distribución de la dirección,  $\phi$ , se supuso uniforme dentro de cada octante  $\phi$ .

Para el muestreo de la velocidad máxima,  $U_{max}$ , dentro de cada categoría de intensidad  $F$ , adoptamos una distribución  $f_{U_{max}/F}(U_{max}/F)$  lineal con parámetros distintos dentro de cada intervalo.

Extrajimos de Twisdale y Dunn (1981) los parámetros necesarios para la definición de las demás variables.

Parámetros	Forma	Distribución
1. Errores implícitos	$f_{\xi}(\xi)$	Lognormal
2. Frecuencia de ocurrencia	$f_{v'}(v')$	Normal Truncada
3. Distribución de la escala F	$P f_F(F)_k $	Discreta
1. Escala F de intensidades	$f_F(F)$	Empírica Discreta
2. Categoría del largo de la traza	$f_{P_L} F(P_L F)$	Empírica Discreta
3. Categoría del ancho de la traza	$f_{P_W} P_L, F(P_W P_L, F)$	Empírica Discreta
4. Dirección de la traza en octantes	$f_{\phi_t}(\phi_t)$	Empírica Discreta
5. Velocidad del viento horizontal máximo	$f_{U_{max}} F(U_{max} F)$	Lineal
6. Largo de la traza	$f_{L_t} P_L(L_t P_L)$	Normal Truncada
7. Ancho de la traza	$f_{W_t} P_W(W_t P_W)$	Normal Truncada
8. Dirección de la traza	$f_{\phi_t} \phi_t(\phi_t \phi_t)$	Uniforme
9. Velocidad de traslación	$f_{U_t} F(U_t F)$	Normal Truncada
10. Flujo radial entrante	$f_{\gamma}(\gamma)$	Normal Truncada
11. Radio del núcleo	$f_{\rho_m} F(\rho_m F)$	Normal Truncada
12. Pendiente del núcleo	$f_S(S)$	Uniforme
13. Espesor de la capa límite	$f_{\delta_0}(\delta_0)$	Uniforme
14. Variación de la intensidad a lo largo de la traza	$P_{L_t}(V \geq v_i^* F)$	Empírica

Tabla 4

Riesgo de tornados

#### 4.2 Aplicación del modelo

La figura 10 muestra los intervalos de incertidumbre que surgen en la evaluación de la probabilidad por año  $P(V \geq v)$  sobre un blanco lineal de 140 km de longitud, orientado de oeste a este y situado en la zona del Litoral.

La curva central representa la estimación del valor medio de  $P(V \geq v)$ . Las dos curvas que la flanquean acotan el intervalo de confianza del 90 % para ese valor medio. Representan la incertidumbre debida al proceso de Montecarlo y es función del tamaño de la muestra de los  $n$  tornados involucrados en el loop interno.

Las dos curvas externas representan una estimación de los límites del intervalo de confianza del 90 % para la probabilidad  $P(V \geq v)$ . Esta banda se debe a las incertidumbres de modelado y tiene un ancho de un orden de magnitud. El hecho de que la probabilidad calculada por el modelo puede ser significativamente mayor o menor que la real debe ser tenido en cuenta en las aplicaciones.

En la figura 11 se ve que, para valores de viento de hasta 300 km/h, resulta una diferencia de dos ordenes de magnitud en la probabilidad de excedencia, entre un blanco puntual y un blanco lineal de 240 km de longitud. Para valores mayores de viento parece haber una sobrestimación de las probabilidades, para el caso de riesgo puntual. Esto podría señalar un efecto de la inclusión del tornado F5 de San Justo en la serie de la región.

### 5. RIESGO DE CORRIENTES DESCENDENTES GENERADAS POR TORMENTAS SEVERAS

#### 5.1 Formulación del modelo

Las corrientes descendentes generadas por tormentas severas producen trazas de daños que pueden tratarse, a los fines del cálculo de riesgo, de manera similar a la de los tornados. Como se mostró en 2., estas trazas pueden caracterizarse por cuatro variables independientes entre sí; la intensidad máxima de los daños ( $F$ ), la superficie total afectada ( $A$ ), la relación de aspecto entre el ancho  $W$ , y el largo  $L$  de la traza, ( $\alpha = W/L$ ) y la dirección media del viento ( $\phi$ ).

Dentro de las simplificaciones del problema consideramos que la ocurrencia de tormentas severas puede ser tratada como un proceso de Poisson, es decir, que son fenómenos raros e independientes entre sí. En consecuencia, para la estimación del riesgo, es válida la expresión simplificada de  $P_T(V \geq v)$  dada por las ecuaciones (5) y (8).

Es decir:

$$P_T(V \geq v) = \int P(V \geq v) T$$



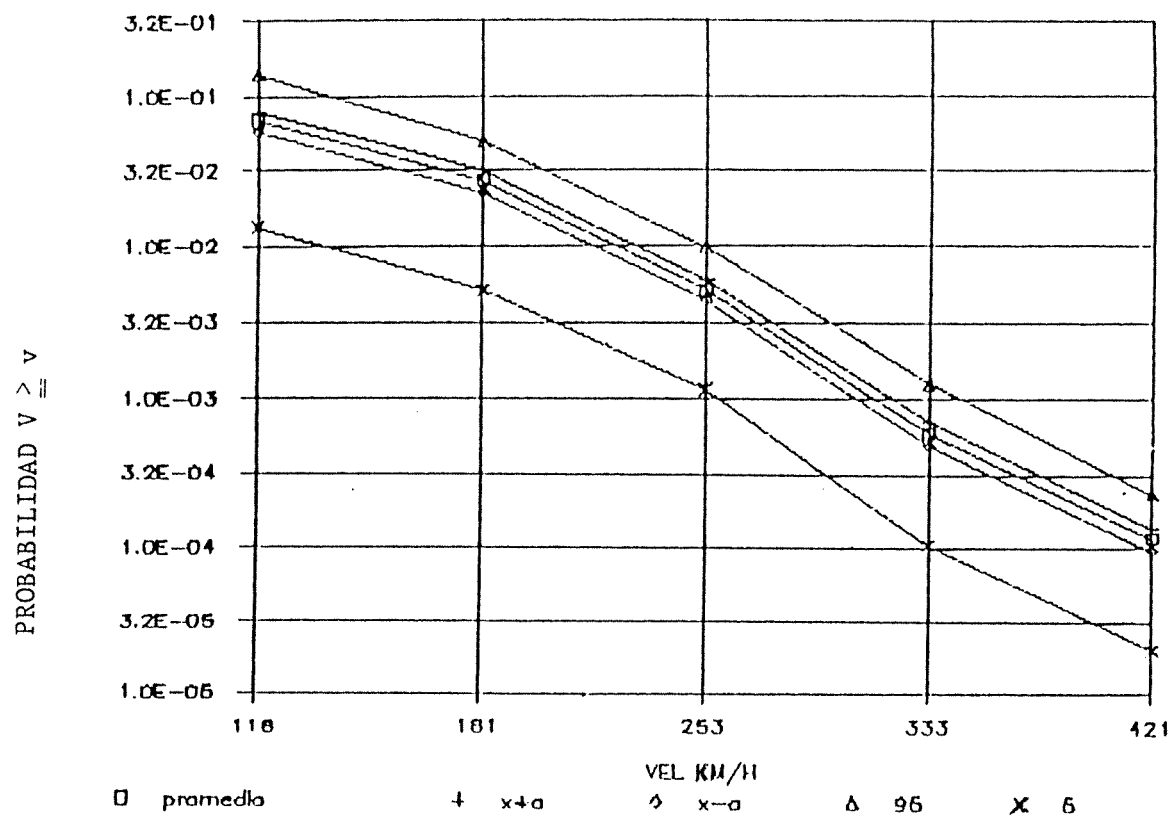


Figura 10 Riesgo de tornados para un blanco lineal de 140 km de longitud

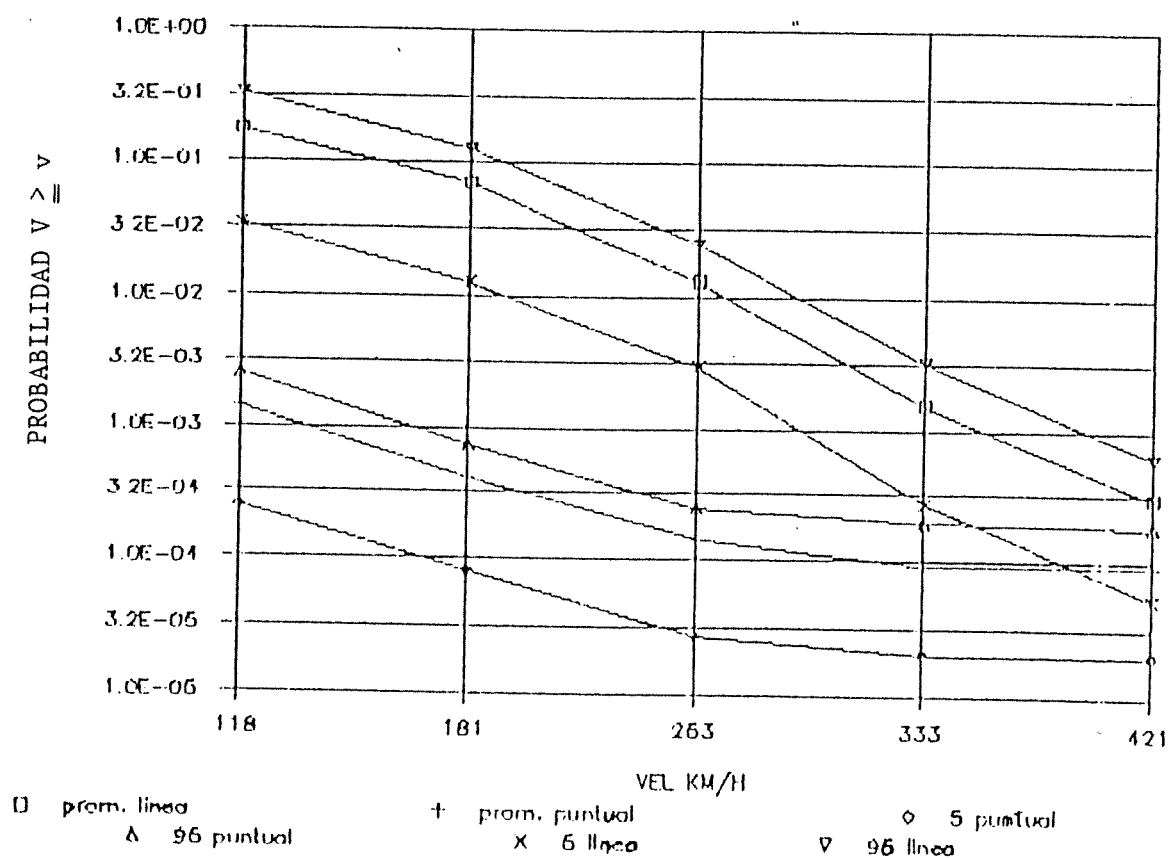


Figura 11 Riesgo de tornados para un blanco puntual y para un blanco de 240 km de longitud

y

$$P_T(V \geq v_i^*) \approx \left\{ \frac{\bar{v}}{S} \right\} T \sum_{i=0}^{F_{max}} (A_0)_{ik} P(F_k)$$

donde

$\xi$  es la variable aleatoria que representa las incertidumbres del modelado.

$\bar{v}$  es la frecuencia anual media de tormentas severas. Es una variable aleatoria cuyo valor medio será estimado por  $\bar{v} = n/t_0$ , donde  $n$  = número de tormentas ocurridas durante el periodo de tiempo  $t_0$ , sobre el área  $S$  de la región de estudio.

$T$  es el periodo de tiempo en años al cual está referida la estimación de la probabilidad  $P_T(V \geq v_i^*)$ .

$A_0$  es el lugar geométrico de los centros de todas las trazas de las cuales resulta un impacto sobre la estructura.

$P(F_k)$  es la probabilidad de ocurrencia de corrientes descendentes de intensidad  $F_k$ .

Adoptamos la representación de la función de densidad de probabilidad conjunta discutida en 2.1

$$f_{F,A,\alpha,\Phi}(F,A,\alpha,\Phi) = f_F(F) f_A(A) f_\alpha(\alpha) f_\Phi(\Phi) \quad (9)$$

En el procedimiento de Monte Carlo, el conjunto multivariado  $F, A, \alpha, \Phi$ , para la simulación de la ráfaga descendente  $j$  de intensidad  $F_k$ , se obtiene tomando en forma secuencial una muestra de cada una de las funciones representadas en la ecuación (9).

Las variables discretas  $F$  y  $\Phi$  se transforman en las continuas  $U_{max}$  y  $\varnothing$  muestreando de

-  $f_{U_{max}/F}(U_{max}/F)$  que es la distribución de la velocidad máxima del viento  $U_{max}$  dada la categoría  $F$ .

-  $f_{\varnothing/\Phi}(\varnothing/\Phi)$  es la función de distribución que relaciona el octante  $\Phi(N, NE, E, \dots NW)$  con la dirección media del viento  $\varnothing$  como variable continua.

El largo  $L$  y el ancho  $W$  se calculan de  $L = (A/\alpha)^{1/2}$   
y  $W = (A\alpha)^{1/2}$

## 5.2 Aplicación del modelo

Aplicamos el modelo considerando las incertidumbres de modelado y las aleatorias, con un esquema de simulación de Monte

Carlo, en dos "loops" anidados, 100 internos y 100 externos.

En cada loop externo se elige el valor  $\gamma$  con la  $f(\gamma)$  y, una de las distribuciones de intensidades  $f_r(F)$  disponibles en base a su peso estadístico; se elige además, el valor de la variable aleatoria ( $\xi$ ).

Cada loop interno simula un total de 100 tormentas en cada categoría  $F$ . Asigna a cada una, por muestreo, sobre las distribuciones correspondientes, valores de  $A$ ,  $\alpha$  y  $\phi$ . Obtiene las variables continuas  $U_{max}$ ,  $L$ ,  $W$  y  $\phi$ . Determina los anchos y los largos de los sectores de la traza en la cual  $V \geq v_i^*$  para  $v_i^* = 70, 117$  y  $182$  km/h. Calcula las áreas  $(A_0)_i$ , el promedio de  $P_r(V \geq v_i^*)$ , estima el valor medio y la varianza de  $P(V \geq v_i^*)$  que resulta de las 100 simulaciones, calcula los límites de los intervalos de confianza del 90 %.

La tabla 5 muestra las distribuciones adoptadas en el modelo.

La figura 12 muestra la aplicación del modelo a una región

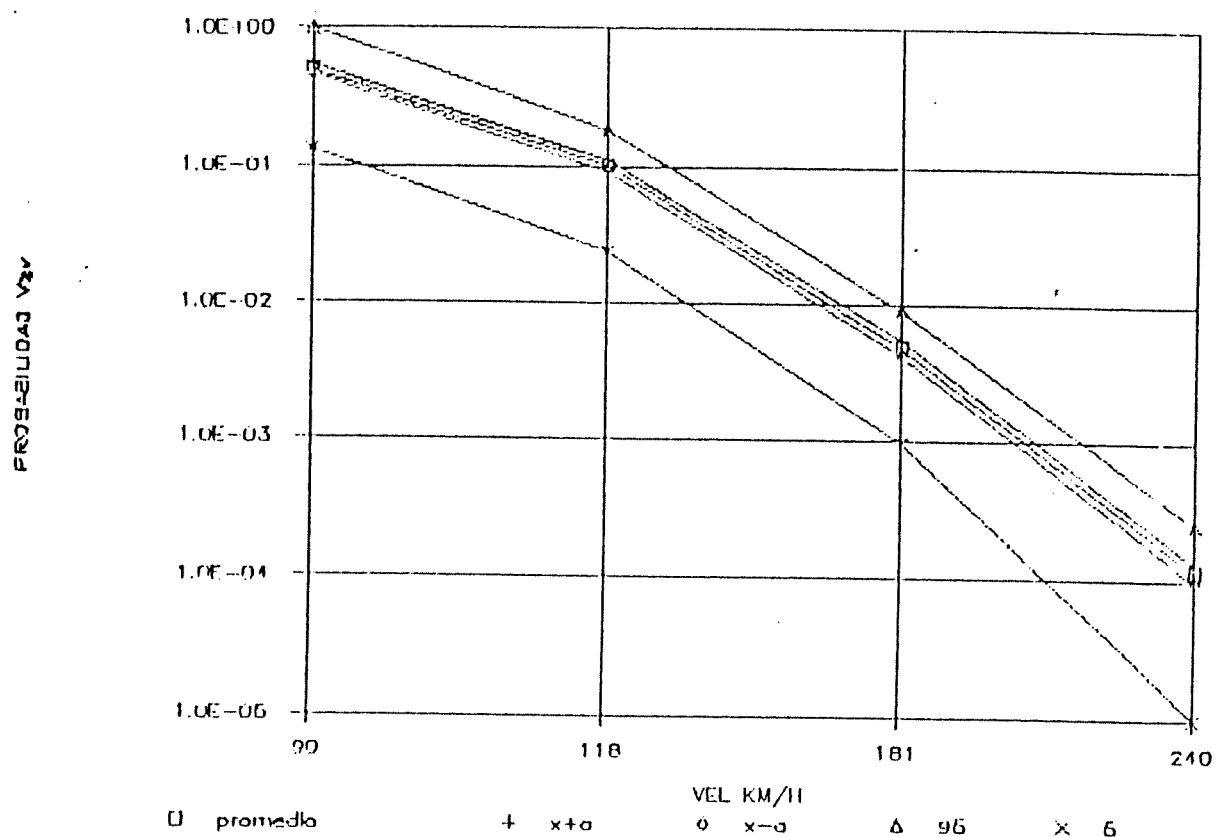


Figura 12 Riesgo de corrientes descendentes sobre una estructura cuya extensión es de 140 km.

del noreste argentino. La frecuencia media anual de tormentas severas se modeló con una distribución normal truncada cuyos parámetros  $\gamma = 3.5$  tormentas año<sup>-1</sup> 10<sup>-4</sup> km<sup>-2</sup> y  $\sigma = 0.5$ .

Categorías	Parámetros	Forma	Distribución
Modelado, M	1. Errores implícitos	$f_{\xi}(\xi)$	Lognormal Normal Truncada Discreta
	2. Frecuencia de ocurrencia	$f_{\nu}'(\nu')$	
	3. Distribución de la escala F	$P f_F(F)_K $	
Aleatoria, R	1. Escala F de intensidades	$f_F(F)$	Empírica Discreta Empírica Discreta
	2. Dirección de la traza en octantes	$f_{\phi}(\phi)$	
	3. Velocidad del viento horizontal máximo	$f_{U_{\max} F}(U_{\max} F)$	Lineal
	4. Área afectada	$f_A(A)$	Lognormal
	5. Relación de forma	$f_{\alpha}(\alpha)$	Lognormal
	6. Dirección de la traza	$f_{\phi \phi}(\phi \phi)$	Uniforme

Tabla 5 Funciones de distribución de los distintos parámetros utilizados en el modelo. Riesgo de tormentas severas.

En el gráfico se observan las bandas de incertidumbre debidas al procedimiento de cálculo y a las de modelado para un blanco lineal de 140 km de extensión.

### 5.3 Comparación con otras metodologías

Con el fin de comparar los resultados obtenidos con el modelo de riesgo desarrollado, aplicamos la distribución de valores extremos de Gumbel a los máximos anuales de viento correspondientes a las estaciones meteorológicas situadas sobre la región del noreste argentino.

Determinamos por medio de la información meteorológica disponible en el Servicio Meteorológico Nacional el fenómeno que originó cada uno de los valores máximos de las series y, además, verificamos que para el período 1968-1980 estos valores corresponden a máximos instantáneos que pueden ser considerados como ráfagas sobre 5 segundos.

La tabla 6 muestra para cada una de las estaciones los valores ordenados en orden creciente y señalados con un asterisco aquellos que no fueron originados por ráfagas de tormentas. En la misma tabla se indican las estaciones cuyas series fueron desechadas por no confiables debido a la poca eficiencia de su instrumental y la baja frecuencia de observación diaria (tridiurna) inadecuada para la captación de la variable meteorológica en estudio.

En algunos casos la estación presentaba discontinuidad marcada en su funcionamiento.

Como resultado del análisis se desearon casi la mitad de las 14 estaciones disponibles y se aceptaron como válidas para el estudio las series de Monte Caseros, Gualeguaychú, Posadas, Paraná, Corrientes y Resistencia.

Debido a que en estos casos, casi la totalidad de los valores fueron originados por tormentas, se utilizaron las series completas.

#### 5.3.1 Aplicación de la distribución de extremos tipo I

La distribución de densidad de probabilidad para la distribución de valores extremos tipo I es

$$P_x(X) = \exp((-x-\xi)/\theta - \exp(-(x-\xi)))/\theta \quad -\infty < x < \infty ; -\infty < \xi < \infty ; \theta > 0$$

$\theta$  y  $\xi$  son los parámetros de escala y de posición respectivamente, siendo  $\xi$  la moda de la distribución.

	X <sub>1</sub> '	X <sub>2</sub> '	X <sub>3</sub> '	X <sub>4</sub> '	X <sub>5</sub> '	X <sub>6</sub> '	X <sub>7</sub> '	X <sub>8</sub> '	X <sub>9</sub> '	X <sub>10</sub> '	X <sub>11</sub> '	X <sub>12</sub> '	X <sub>13</sub> '		
RESISTENCIA	78	91	93	93	98	100	102	106	106	115	120	124	133		
CORRIENTES	56	81	100	100	100	109	116	118	119	120	130†	130	155		
SAUCE VIEJO	52	56†	56†	65	65	65	78	80	81	87	96	130	130	NO CONFIABLE	
RECONQUISTA	69	69	69	74	74	81	81	100	125	126	144	144	148	NO CONFIABLE	
GOYA	69	83	89	111	119	120	122	127	INCOMPLETA						
PARANA AERO	100	102	102	103	107	115	120	122	128	130	141	144	155		
A. GALLARDO	33	33	44	44	44	56	78	INCOMPLETA						NO CONFIABLE	
ESPERANZA	56	56	56	56	56	69	69	81	INCOMPLETA						NO CONFIABLE
POSADAS	70	76	83†	89	91	102	104	109	113	115	117	120	120		
MAZARUCA	44†	50†	50†	59†	59†	61†	65†	65	79	80	80	83	113	NO CONFIABLE	
GUALEGUAYCHU	52†	70	70	70	80	85	91	93	93	100	111	122	122		
MONTE CASEROS	93	94	98	98	98	106	111	111	113	119	130	135	141		

Tabla 6                      Análisis de la calidad de las series. Valores de viento máximos anuales (5") (1968-1980)

Utilizamos la aproximación de Kimball de los estimadores de máxima verosimilitud propuestos por Lowery and Nash, 1970, que aventajan en eficiencia a los estimadores obtenidos por el método de los momentos.

La tabla 7 muestra los valores de ráfagas y sus rangos de variación, correspondientes a los periodos de retorno de 50 y 150 años, que resultaron de aplicar la distribución de extremos, tipo I.

Dado que estos valores corresponden a valores de ráfagas producidos por tormentas y siendo la región de estudio climáticamente homogénea en cuanto a la actividad de tormentas, es de interés considerar a:

$$V_{max\ 50} = 165 \pm 5 \text{ km/h}$$

$$V_{max\ 100} = 179 \pm 7 \text{ km/h}$$

como promedio regional del Litoral.

# PERIODO DE RETORNO

	50 AÑOS	150 AÑOS
MONTE CASEROS	155	166
GUALEGUAYCHU	158	175
POSADAS	159	173
PARANA	172	184
CORRIENTES	194	215
RESISTENCIA	151	163

Tabla 7 Velocidades máximas instantáneas del viento (ráfaga de 5 seg) para periodos de retorno de 50 y 150 años. (Método de Gumbel). Velocidad en km/h.

## 5.3.2 Obtención de los valores extremos de la velocidad del viento promediada sobre 10 minutos, $V_{10}$ .

Para analizar los valores extremos de la velocidad del viento promediada sobre 10 minutos,  $V_{10}$ , utilizamos datos de  $V_{10}$  obtenidos cuatro veces por día en las estaciones meteorológicas situadas en la misma región anterior. Estos datos constituyen una muestra extraída de la población de  $V_{10}$ . La distribución empírica de las frecuencias relativas de los valores de  $V_{10}$  fueron ajustadas a una distribución Gamma.

Para obtener la probabilidad anual  $P(V > v)$  aplicamos la expresión

$$F(V > v) = 1 - [1 - F(v)]^N$$

Conocida la  $F(v)$ , función de distribución Gamma, es posible reconstruir la distribución del valor máximo anual,  $F(V > v)$ , teniendo en cuenta que, en el caso de la velocidad media en 10', el valor de  $N$  es 52560, resultante de dividir al año en intervalos de 10 minutos.

Calculando esta expresión para  $P(V_{max} > v) = 0,02$ ; 0,0067 se obtiene el valor de la velocidad correspondiente a un período de retorno de 50 y 150 años respectivamente a través de la función de distribución Gamma conocida.

En el enfoque anterior se supuso que las 52560 observaciones de la velocidad media en 10 minutos son independientes. Obviamente no lo son; por lo tanto debería reemplazarse por un número equivalente de observaciones independientes. Observando los registros del viento y también por consideraciones teóricas basadas en el tratamiento del viento como proceso estocástico, el número de muestras equivalentes es considerablemente menor al número de muestras originales. El hecho de que la velocidad media de 10' no parezca ser sustancialmente distinta a la velocidad media de 1 hora, da fundamentos para tomar a 6 como factor de reducción al que por

razones de seguridad conviene reemplazar por 4.

Debido a estas consideraciones se recalculó el procedimiento analítico por  $N=52560 / 4 = 13140$  para todas las estaciones.

Los resultados de aplicar estas metodologías se muestran en la tabla 8 para cada una de las estaciones.

	PERIODO DE RETORNO	
	50 AÑOS	150 AÑOS
MONTE CASEROS	108	116
GUALEGUAYCHU	93	96
POSADAS	86	92
MAZARUCA	96	103

Tabla 8 Velocidades máximas medias en 10 minutos para períodos de retorno de 50 y 150 años (N = 13140). Velocidad en km/h.

### 5.3.3 Discusión de resultados

Para una mejor visualización de los resultados resumimos en la tabla 9 los valores de viento cuyos períodos de retorno son de 50 y 150 años obtenidos por los distintos métodos.

Cada uno de los métodos trata poblaciones distintas. El método de Gumbel se aplica en los casos de variables cuyos extremos anuales hayan sido realmente registrados, como puede ser la altura del agua en casos de inundaciones generalizadas o el campo de viento generado por sistemas de gran escala (escala sinóptica). En estos casos las dimensiones del fenómeno que ocasiona los valores extremos son superiores a la separación entre cada punto de la red de estaciones y por eso queda garantizada la captación de los extremos anuales. La serie representa fielmente la historia o la totalidad de los casos ocurridos.

En el caso particular de los fenómenos convectivos esta captación exhaustiva por medio de la red de estaciones meteorológicas podría estar asegurada en dos casos: 1) La convección es tal que las celdas cubren una gran parte del espacio disponible, p.ej. las celdas convectivas en una irrupción de aire polar marítimo, 2) Las celdas se alinean sobre distancias cuyo orden de magnitud es al menos igual a la separación entre estaciones meteorológicas y además se trasladan. La superficie barrida es suficiente como para garantizar su registro. Es el caso de las líneas de inestabilidad y de la convección sobre zonas frontales. Es muy probable entonces que los valores extremos que figuran en la tabla 7 pertenezcan a estas poblaciones. Los extremos pronosticados por el método de Gumbel deberán referirse a ellas.



	50 años	150 años
Valor regional Gumbel	160 a 170 km/h	172 a 186 km/h
Viento medio (10 min)	96 km/h	102 km/h
Blanco puntual ( 1 km <sup>2</sup> )	77 a 99 km/h	88 a 114 km/h
Blanco lineal (140 km)	121 a 161 km/h	140 a 185 km/h
Blanco lineal (240 km)	138 a 183 km/h	160 a 200 km/h

Tabla 9 Velocidades de viento con periodos de retorno de 50 y 150 años estimados empleando los distintos métodos.

El modelo de riesgo trata la población de las ráfagas provenientes de celdas convectivas severas, que son fenómenos raros. Es decir están separadas tanto espacial como temporalmente. Los valores de viento están referidos a tiempos de 7 a 10 segundos. Los vientos de la escala F corresponden al "1/4 de milla más veloz".

El tercer método trata los extremos del viento promedio sobre 10 minutos y por lo tanto describe el comportamiento de la corriente general originada por sistemas de escala sinóptica.

De la tabla 9 surgen las siguientes ideas:

La comparación entre los valores de velocidad para blancos puntuales del método de corrientes descendentes y los valores obtenidos por el método de Gumbel reflejan el hecho de que la probabilidad puntual de ráfagas severas es mucho menor que la de las ráfagas de tormentas comunes. Se equiparan cuando el blanco lineal alcanza dimensiones de 100 km y es superado en blancos superiores a 200 km.

El valor extremo de la corriente general,  $V_{10}$ , o sea los vientos de origen sinóptico, es de 100 km/h. Un sistema de baja presión ocasionaría como máximo, daños de intensidad F0. Es el caso de ciclogénesis sobre el Litoral. La aplicación de factores de ráfagas comunmente en uso, con el objeto de hacerlos comparables a los obtenidos por los otros métodos que dan valores referidos a 5 segundos, da como resultado valores menores a los predichos por estos.

Quiere decir entonces que este aspecto de los vientos extremos se evidencia ante posibles daños en estructuras de gran extensión, p. ej. sistemas de transmisión de energía eléctrica; para las demás obras civiles las tormentas severas representan un riesgo menor.

Agradecimientos. Los autores agradecen al Dr. Aldo Viollaz, de la Universidad de Tucumán, por su valioso asesoramiento en el desarrollo de los métodos comparativos.

#### Referencias Bibliográficas

- DAVENPORT, A. G., 1960: "Rationale for determining design wind velocities". Journal of the Structural Division. May, 1960.
- DYER, R. C., 1986: "Rastros de tornados no sudoeste do Brasil, este do Paraguai e nordeste da Argentina".
- FUJITA, T. T., 1971: "Proposed Characterization of Tornadoes and Hurricanes by Area and Intensity". Satellite and Mesometeorological Research Project, Research Paper Nº 91. University of Chicago.
- FUJITA, T. T. and PEARSON, A. D., 1973: "Results of FPP Classification of 1971 and 1972 Tornadoes". Preprint Volume, Eighth Conference on Severe Local Storms.
- FUJITA, T. T., 1985: "The Downburst, Microburst and Macrobust". University of Chicago.
- LICHTENSTEIN, E. R. y SCHWARZKOPF, M. L. A., 1970: "Aspectos estadísticos de las líneas de inestabilidad en la Argentina". Meteorológica, Vol 1 Nº 1.
- MARKEE, E. H. and BECKERLEY, J. G., 1974: "Technical Basis for Interim Regional Tornado Criteria". WASH Report - 1300(UC-11), US AEC, Office of Regulation.
- MCDONALD, J. R., 1980: "A Methodology for Tornado Hazard Probability Assessment".
- RIERA, J. D.; VIOLLAZ, A. J. and REIMUNDIN, J. C., 1977: "Some recent results on probabilistic models of extreme wind speeds". Journal of Industrial Aerodynamic, 2 (1977).
- SCHWARZKOPF, M. L. A. y ROSSO, L. C., 1987: Informe Final. Contrato Agua y Energía Eléctrica - Universidad de Buenos Aires. Expte. 433.244/84.
- TWISDALE, L. A. and DUNN, W. L., 1981: "Tornado Missile Simulation and Design Methodology", EPRI, NP-2005. August 1981.
- VELASCO, I. y FRITSCH, J. M., 1987: "Mesoscale Convective Complexes in the Americas". Journal of Geoph. Research, Vol 92 pag. 1503-1527.
- WEN, Y. K. and CHU, S. L., 1973: "Tornado Risks and Design Wind Speed". Journal of the Structural Division, Proceedings ASCE, Vol 99, NºST12, december 1973.

Impreso en Octubre de 1997  
en Ediciones (INTI), Av. General Paz entre Av. Albarelos y Av. de los Constituyentes, Miguelete,  
Provincia de Buenos Aires.

Edición de 600 ejemplares.