

**XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRAÚLICA  
CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA, SEPTIEMBRE 2008**

**CARACTERIZACIÓN DE TORMENTAS PRODUCTORAS DE  
ALUVIONES PARA LA CALIBRACIÓN DE UN MODELO DE  
TORMENTA**

*Pedro C. Fernández<sup>(1)</sup>; Sergio Fattorelli<sup>(2)</sup>; Luis Fornero<sup>(3)</sup>*

*<sup>(1)</sup> CONICET-INA - Mendoza, (Argentina), [pcfer@itcsa.net](mailto:pcfer@itcsa.net)*

*<sup>(2)</sup> Universidad de Padua (Italia), [sergio.fattorelli@unipd.it](mailto:sergio.fattorelli@unipd.it)*

*<sup>(3)</sup> INA - Mendoza, (Argentina), [cra@ina.gov.ar](mailto:cra@ina.gov.ar)*

**RESUMEN:**

En una región árida en el norte de la provincia de Mendoza (Argentina) entre las latitudes de 32° y 34° grados de latitud Sur y en las vertientes orientales de la cordillera de Los Andes, un estudio muy detallado de tormentas convectivas se ha llevado a cabo durante un periodo de 18 años. En este trabajo se presenta una caracterización del comportamiento de las celdas convectivas a través de la determinación de parámetros geométricos y físicos. Los datos para esta investigación incluye lluvias medidas con pluviógrafos terrestres en una red telemétrica densa, así como datos de radar de 4500 celdas convectivas medidas en numerosos eventos mediante barridos horizontales (PPI-Plan Position Indicator) y verticales (RHI-Range Height Indicator). Celdas convectivas prevalecen en el área en primavera tardía, verano y otoño temprano y son las principales causantes de la producción de tormentas generadoras de aluviones (Flash floods). El objetivo de esta investigación es realizar una descripción detallada del comportamiento de celdas convectivas para ser aplicado en la calibración de un modelo de simulación de tormentas.

**ABSTRACT:**

For an arid region located in the North of Argentine Mendoza Province between 32 and 34 degrees of South latitude and on the eastern slopes of Los Andes mountains a very detailed study of convective thunderstorms was carried out. A characterization and behavior of the storms and cells are described through the determination of geometric and physical parameters. Data for this investigation includes rainfall on the ground measured by raingauges of a dense telemetric network as well as the radar Plan Position Indicator (PPI) scans of many storm events and the vertical development of the cell Range Height Indicator (RHI). Convective cells prevail in the area in late spring and summer time and are the main units of the flash flood producing thunderstorms. The objective of this investigation is a detailed description of the storm and cells to be applied in the calibration of a convective storm simulation model.

**PALABRAS CLAVE:**

Celdas convectivas; tormentas móviles; modelo de tormenta.

## INTRODUCCIÓN

En muchas regiones áridas e incluso en otras áreas afectadas por tormentas convectivas, la intensa precipitación producida por ellas es la principal causa de crecientes.

La magnitud y extensión de estas tormentas es frecuentemente menor que el área total de la cuenca afectada (Iacobellis y Fiorentino, 2000). Por consiguiente la localización de la tormenta y su distribución espacial en la cuenca, es importante en la producción de escorrentía (Fernández et al., 2002; Fernández et al., 2000a).

Debido a esto es muy importante conocer, lo mejor posible, la estructura de la tormenta y el comportamiento de las celdas. Además en los estudios de diseño hidrológico, la “Tormenta de Proyecto” es una plantilla de precipitación usada en los modelos hidrológicos de lluvia-escorrentía (Chow et al., 1988; Fernández et al., 2000a).

Cuando se trabaja con tormentas de proyecto para el diseño de obras de control y estructuras relacionadas en áreas sujetas a tormentas convectivas es necesario (principalmente por condiciones de seguridad y económico) simular, lo mejor posible, la situación natural de la precipitación. Es importante no solo reflejar la variación temporal y espacial del campo de lluvia, como es reflejado en la tormenta de proyecto, pero también considerar una caracterización de la ubicación en la cuenca de las celdas y de sus desplazamientos (Rulli and Rosso, 2002; Houze and Hoobs, 1982; Fernández et al., 1999; Fattorelli et al., 2007).

Modelos estocásticos de campos de tormentas, basados en teorías de procesos puntuales, son frecuentemente usados en diseño hidrológico para simular estadísticamente escenarios posibles de lluvias (Cowpertwait, 1995; Fernández et al., 1999). Usualmente los modelos contruidos por bloques (“building block models”) en su componente espacial del campo de lluvias, son modelos de procesos puntuales que representan localizaciones espaciales de las celdas de tormenta, así como el espaciamiento relativo, el movimiento, la velocidad de desplazamiento, la agrupación de celdas formando “clusters” (racimos).

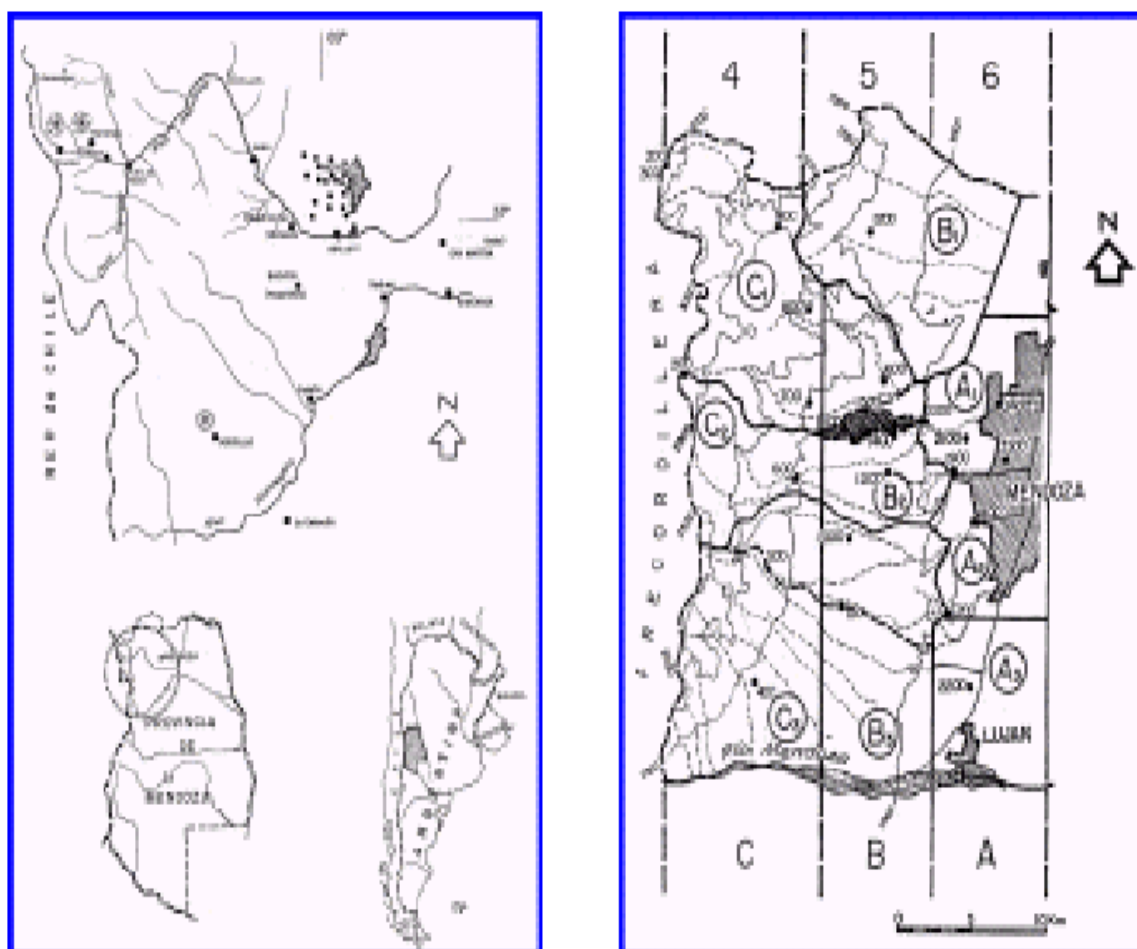
Modelos estocásticos de tormentas, calibrados para las condiciones locales, simulan las condiciones reales de las tormentas de estructura celular, consiguiendo resultados mas ajustados que las tormentas fijas en un lugar de la cuenca o subcuenca. Basado en trabajos anteriores (Le Cam, 1961; Amorocho et al., 1977; Amorocho et al., 1973; Corotis, 1976), se ha logrado, con técnicas modernas de computación un modelo que introduce un grado adicional de organización, tal como aquel que simula la formación de racimos de celdas (clusters) generados a partir de un proceso estocástico que tiene en cuenta la no linealidad del proceso físico involucrado (Cowpertwait, 1998).

En nuestra región (Figura 1) la actividad de tormenta de verano es normalmente inducida por una fuerte aducción de bajo nivel de aire húmedo del Atlántico que ingresa en una dirección sudoeste en presencia de condiciones de baja presión de altura (baguadas) asociadas con aire del Pacífico penetrando al área por sobre Los Andes en dirección noreste.

Nuestros estudios de radar muestran que muchas celdas convectivas emergen de las montañas en las planicies del oeste Argentino desplazándose en una dirección Noreste. Krauss (1999) informa que en general en el hemisferio Sur las tormentas se mueven en dirección Nordeste y en dirección Sudeste en el hemisferio Norte.

La simulación hidrológica inducida por lluvias uniformes sobre toda la cuenca produce una sobrestimación de la creciente especialmente cuando se trata de cuencas extensas y de lluvias convectivas fuertemente concentradas. Por esta razón una organización espacial de los campos de tormenta es necesaria y esta información solo es posible obtenerla a través de un detallado estudio de datos terrestres en redes densas y de imágenes digitalizadas de radar de

numerosos eventos para definir: dimensiones de las tormentas, área y movimiento de las celdas, dirección más frecuente del desplazamiento y muchos otros parámetros que acá se determinan.



**Figura 1.** - Área del estudio y red telemétrica de estaciones de lluvia

## **MATERIAL Y METODOS**

El área del estudio se muestra en la figura 1. La ciudad de Mendoza, localizada en la región centro-oeste de Argentina a una latitud de 33° Sur y su entorno urbano, industrial y agrícola, es la cuarta área metropolitana del país. Localizada en el piedemonte árido de la precordillera, está sujeta a aluviones producidos por las intensas lluvias de primavera y verano.

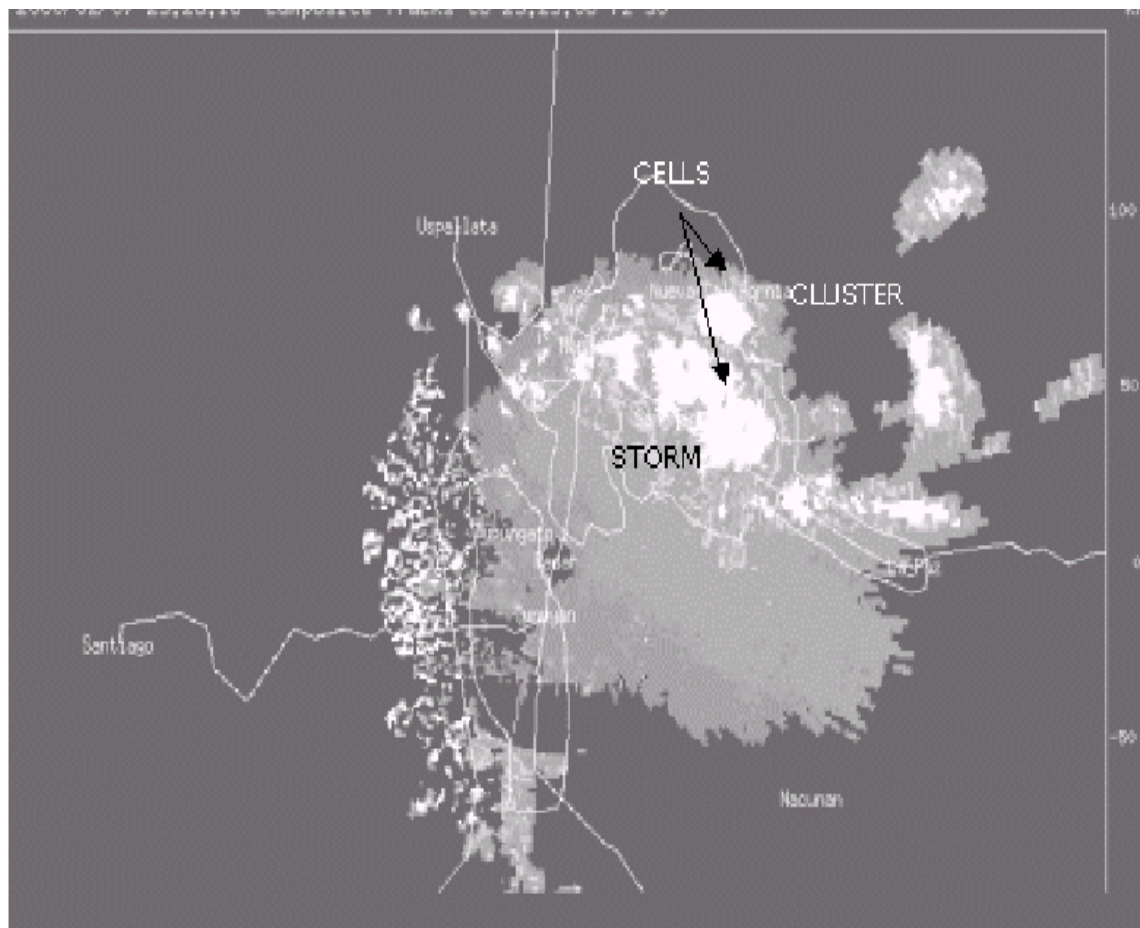
Siete cuencas torrenciales situadas al oeste del área metropolitana, constituyen las unidades de respuesta hidrológica (URH) que generan problemas de crecientes torrenciales.

Tres tienen diques de detención para controlar las subcuencas altas y medias. Las descargas de esos diques con vertederos y descargadores no controlados mas las descargas naturales de las zonas bajas (urbanas y agrícolas) desaguan en un colector (que es además canal de riego) produciendo frecuentemente su rebalse, hacia zonas urbanas e industriales del este.

Esta es un área de muy importante recolección de datos, provenientes de una densa red de estaciones telemétricas terrestres más imágenes digitalizadas de un radar meteorológico. Con el análisis de una muestra de más de 4500 celdas ocurridas en 380 días/tormenta.

Los estudios del radar meteorológico muestran claramente que los eventos convectivos están formados por tres componentes: **la tormenta, la celda y el “cluster” (racimo de celdas)**.

La figura 2, muestra una imagen de radar de una tormenta y sus componentes. Esta estructura es el punto clave para desarrollar y entender el comportamiento del modelo de tormenta convectiva que acá se presenta.



**Figura 2.** – Tormenta del 07 de Febrero del 2000 a las 23:28; 6 hora GMT con tormenta, celdas y cluster

La celda es el componente principal en la generación de lluvias intensas y es una subunidad de tormentas mayores (Fattorelli et al., 1995). Las tormentas de este tipo están compuestas por una o más celdas. Es muy frecuente en una tormenta la existencia de celdas esparcidas que se mueven y que finalmente se reúnen en un extenso “cluster”. Además, una celda se considera como un eco de radar que contiene un solo pico de reflectividad, el cual es frecuentemente pequeño en extensión horizontal y grande en el desarrollo vertical.

Hay también “clusters” que tienen dos o más picos de reflectividad dentro del límite de un mismo eco. Los datos para esta investigación incluyen precipitación medida en el terreno, mediante una densa red telemétrica (Fernández et al., 1999) e imágenes escaneadas de radar en cortes horizontales a altitud constante, “Constant Altitude Plan Position Indicator” (CAPPI) y cortes verticales “Range Height Indicator” (RHI).

En relación al banco de datos el mismo consiste en los datos terrestres de 28 pluviógrafos con 22 años de funcionamiento (1983 – 2005) y una selección de más de 140 tormentas productoras de aluviones. La principal contribución para esta investigación fue la información adquirida a través del radar meteorológico de 3.2 y 10.0 centímetros propiedad del gobierno de Mendoza. Una muestra de 4500 celdas detectadas en 380 días/tormenta que fueron

seleccionadas de los archivos de datos de celdas, típicamente del campo de radar de 360° y un radio de 100 km (31400 km<sup>2</sup>) (Fernandez et al., 2000a).

La primera clasificación de las celdas del radar fue realizada de acuerdo a su desarrollo vertical. Los datos de celdas se fueron registrando en un “libro de bitácora” con toda la información dada por el radar: posición de la celda o del “cluster” (en coordenadas polares desde la localización del radar). Después de este análisis, las celdas seleccionadas, se registran en hoja electrónica para diferentes cálculos. Desde esta tabla, mapas estandar de campos de radar para los 380 días/tormenta fueron dibujadas con la indicación de la posición de la celda dada por su radio vector ( $\rho$ ) y su ángulo ( $\varnothing$ ); hora del registro de máxima intensidad y la elevación de la celda de mayor reflectividad dentro del cluster.

Desde estos mapas se generaron tablas (por filtrado) con el número de celdas simultánea y el área de cobertura en el mapa (Fernández et al., 2000b).

En adición a esto hay también datos de radar provistos por el radar digitalizado de 5 cm WRS-74C de una empresa privada que operaba en el área un programa de lucha antigranizo (Krauss, 1999).

Desde este radar digitalizado se evaluaron 27 días/tormenta con 211 situaciones, obteniendo información adicional en relación con reflectividad (dbZ) de celdas más activas, duración de las etapas de desarrollo, maduración y disipación de la intensidad de la precipitación. La lluvia producida por una celda individual dura desde pocos minutos hasta 30 y 45 minutos. Debido al hecho que frecuentemente, una tormenta, está compuesta por varias celdas contiguas y las celdas tienden a generar nuevas celdas, la duración de la tormenta es mas larga que la de la celda individual. Algunas celdas pueden generar “superceldas” (con elevaciones tope de 15 a 18 km) las cuales pueden durar periodos más largos y generar fuertes vientos.

Para los periodos 2002-03 al 2005-06 se ha contado también con imágenes en infrarrojo del satélite Goes que permiten visualizar sistemas mayores (Estas imágenes en tiempo real se bajan por internet en la página del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina).

## **ANÁLISIS DE CELDAS CONVECTIVAS**

El análisis de esta importante muestra de celdas de radar digitalizadas con la ayuda de un software CAD permite una definición del mundo real de las celdas, su desplazamiento (dirección y velocidad), periodo de crecimiento, desarrollo y descomposición, formación de “cluster” y sus dimensiones.

Toda esta información es importante para la calibración del modelo de tormenta y para mejorar las bases teóricas y la calibración de modelos de precipitación en espacio y tiempo (Valdes et al., 1985; Fattorelli y Fernández ,2007).

Al ser la celda el principal factor en la producción de lluvias convectivas todas estas características físicas y geométricas son relevantes.

### **Ocurrencia de celdas**

Durante un periodo de 380 días/tormenta registradas la ocurrencia de dos o más celdas simultáneas se han dado según se muestra en las tablas 1 y 2.

### **Velocidad de desplazamiento**

En tormentas convectivas la velocidad de desplazamiento es un parámetro muy importante en la producción de crecientes torrenciales (flash floods).

El modelo de tormenta movil es muy sensible a la aplicación de este parámetro especialmente en cuencas medianas o chicas.

**Tabla 1** – Frecuencia Absoluta (Xi) de Celdas Simultáneas (Ni) sobre áreas de tamaño creciente.

Ni	Áreas (km <sup>2</sup> )							
	100	200	300	500	1000	3500	10000	20000
	Xi	Xi	Xi	Xi	Xi	Xi	Xi	Xi
2	144	226	273	334	428	547	583	594
3	18	40	63	86	141	229	259	271
4	1	5	7	12	30	63	90	92
5		1	1	2	5	20	28	32
6				1	2	7	8	10
7					1	5	7	6
8					2	5	6	6
9					1	1	1	2
10							1	2
11							1	1
12							1	1
Total	163	272	344	435	611	878	985	1017
Xp	2.12	2.19	2.24	2.29	2.42	2.59	2.67	2.68

Ejemplo de Xp:  $144 \times 2 + 18 \times 3 + 4 \times 1 = 288 + 54 + 4 = 346 / 163 = 2.12$  ( promedio de celdas)

**Tabla 2** – Frecuencias Acumuladas en % de Celdas Simultáneas (Ni) sobre Áreas de tamaño creciente

Ni	Áreas (km <sup>2</sup> )							
	100	200	300	500	1000	3500	10000	20000
2	88.33	83.09	79.13	76.60	70.05	62.16	59.01	58.63
3	99.37	97.79	97.39	96.32	93.13	88.18	85.23	85.33
4		99.62	99.42	99.07	98.04	95.34	94.55	94.20
5					98.86	97.61	97.39	97.35
6					99.19	98.41	98.21	98.33
7						98.98	98.93	98.92
8						99.55	99.56	99.51

## MAGNITUD DE LA TORMENTA

Como la investigación está dirigida al modelo de simulación de la Tormenta de Proyecto, el valor de la precipitación en el centro de la tormenta se representa en la tabla 3 expresada en mm/minuto (Ball et al., 1998; Fernandez et al., 1999).

Estos valores, válidos para Mendoza norte, surgen de un análisis estadístico de 140 tormentas registradas en la red telemétrica de pluviógrafos que se indican en la figura 1(Fernandez et al., 2000b).

**Tabla.-3** Magnitud del Centro de la Tormenta (mm/minuto) para diferentes tiempos de retorno (TR) y duraciones

TR	Duración (minutos)								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
5	2.8	2.01	1.60	1.32	1.13	1.00	0.89	0.81	0.75
10	3.3	2.37	1.86	1.55	1.33	1.17	1.05	0.95	0.87
25	4.08	2.89	2.26	1.88	1.61	1.41	1.27	1.15	1.06
50	4.66	3.30	2.57	2.13	1.83	1.61	1.44	1.31	1.20
100	5.33	3.76	2.93	2.42	2.08	1.82	1.64	1.48	1.36
200	6.02	4.22	3.22	2.67	2.33	2.05	1.83	1.66	1.52

## ECUACIONES DE DECAIMIENTO ESPACIAL

Un detallado estudio de la observación de la lluvia convectiva en una localidad específica, sugiere claramente que estas tormentas presentan un marcado decaimiento espacial (Shaw, 1983; Steward, 1989; Corotis, 1976; Von Hardenberg, 2003; De Lannoy et al., 2005; Fernández et al., 1999).

En esta investigación de las 140 tormentas intensas registradas se hicieron mapas de isoyetas con un software específico. Se aplicó una técnica de correlación y se determinó la ecuación de regresión de mejor ajuste para definir sus parámetros y generalizar los resultados en el área.

En el área norte de Mendoza la ecuación de decaimiento espacial para duraciones de 30-60 y 90 minutos y áreas ( $Ar$ ) entre 1.0 y 850 km<sup>2</sup>.

$$\frac{Lm}{L} = 1 - 0.09855 \ln (Ar) \quad [1]$$
$$r^2 = 0.98$$

Ecuación válida para  $Ar > 1$

$$\text{para } Ar = 1; \frac{Lm}{L} = 1$$

$L$  = lámina total en mm en el centro de la tormenta

$Lm$  = lámina promedio en mm en el área  $Ar$ , expresada en km<sup>2</sup>

Esto significa que para un área de 100 km<sup>2</sup>, por ejemplo, la precipitación media es 54.6% de la lluvia en el centro de la tormenta.

## DETERMINACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA TORMENTA

Con el objeto de discriminar lluvias de tormentas simples dentro de las imágenes del radar, se desarrolló una técnica para ser utilizado en un software CAD, usando la evolución de las imágenes (evolución temporal) del área total y el perímetro total (Figura 2).

En el banco de imágenes del radar se seleccionaron solo aquellas que habían generado registros de lluvia significativas en sensores terrestres (Hoobs and Locatelli, 1978; Pani and Haragan, 1985; Fernández et al., 2002).

El origen de coordenadas para este sistema es la localización del radar. Desde ese punto el CAD da vectores para medir diferentes dimensiones geométricas. También se obtiene la distribución espacial de los "clusters", así como el número de celdas por tormenta.

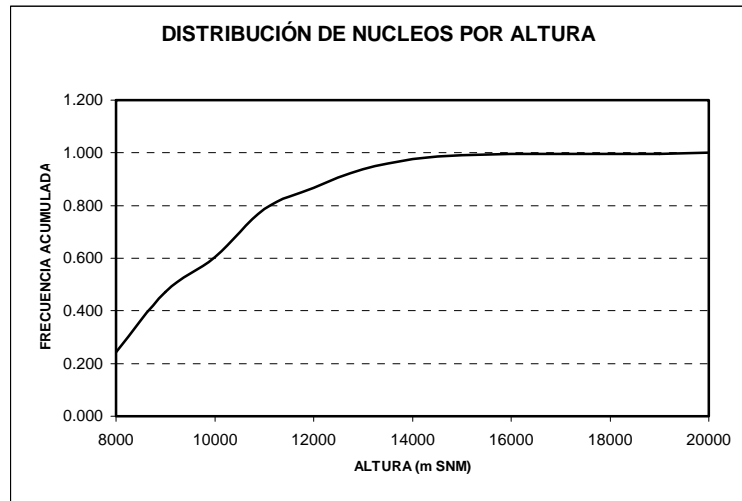
## RESULTADOS

De acuerdo con los estudios de la muestra de 4500 celdas (Fernández et al., 2002) 98% de ellas en el área están incluidas en un rango de elevaciones en el tope de hasta 15000 (ms.n.m.) Figura 3.

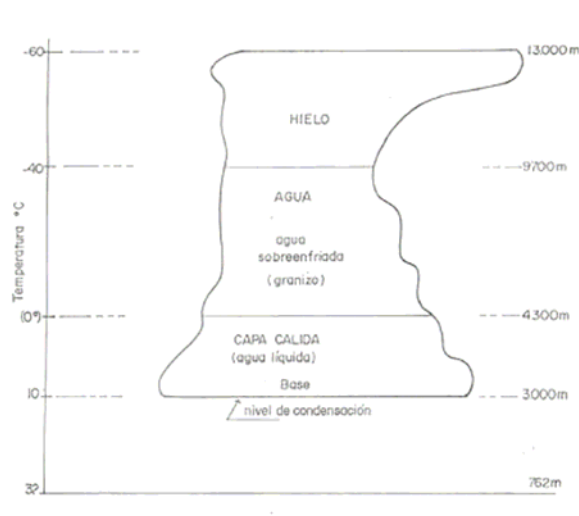
Un perfil típico de una celda se presenta en la Figura 4, en la cual se individualizan los siguientes parámetros físicos:

- **Temperatura de la base de la nube**

Este es un parámetro meteorológico importante, porque el determina las condiciones iniciales para muchos de los procesos microfísicos que se desarrollan en el interior de la celda. Se ha encontrado un valor medio, en el área de +4°C. (Krauss, 1999).



**Figura 3.-** Elevación del tope de las celdas



**Figura 4.-** Perfil típico de una celda en el área (no a escala)

- **Capa cálida**

El espesor de la capa cálida mantiene una estrecha correlación con las lluvias intensas, siendo un parámetro fundamental en el cálculo del pronóstico cuantitativo de la precipitación “QPF” (“Quantitative Precipitation Forecasting”) (Henz, 1997; Fernández et al., 2003).

- **Franja de agua sobre enfriada**

Está principalmente relacionada con la producción de granizo.

- **Número de celdas simultáneas por evento**

Se consideran simultáneas aquellas celdas separadas por menos de 15 minutos.

En el diseño hidrológico, la aplicación de la tormenta de proyecto sobre áreas crecientes, define una importante consideración a ser contemplada (Fernández et al., 2002).

Esta investigación establece, para la región, un importante parámetro para el desarrollo del modelo de tormenta (Tablas 1 y 2).

De la tabla 2 hasta 500 km<sup>2</sup>, 99% de los casos corresponden hasta 4 celdas, para 1000 km<sup>2</sup> el número de celdas simultáneas llega hasta 6. Tomando un valor de 98%, el máximo número de celdas simultáneas en una tormenta para 1000 km<sup>2</sup> es de 4 ó 5. Estos son los números considerados en nuestro modelo estocástico de tormenta convectiva.

Estos valores están en coincidencia con el análisis de 27 tormentas y 211 situaciones analizadas con CAD en las imágenes digitalizadas de radar (Tabla 4).

**Tabla 4.**– Muestra parcial obtenida de 211 casos de datos de radar (Fernández et al., 2002)

<b>Fecha de la tormenta</b>	<b>Hora</b>	<b>Celdas por tormenta</b>	<b>Area de la celda (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Area de la tormenta (km<sup>2</sup>)</b>	<b>dbZ de la celda mayor</b>	<b>Tope de la celda mayor m.s.n.m.</b>		
01/07/01	20.38	1	12.937	78.671	60	10000		
		2	13.112		61	14800		
		3	20.979					
		4	11.276	384.615				
	21.09	1	5.787	120.629	61	11800		
	21.39	1	3.269					
		2	0.577	204.545	65>	15000		
		3	6.818	104.895				
		4	3.339	22.727				
	01/21/01	11.09	1	7.063		60	14000	
			2	7.465				
			3	5.455				
4			0.385	17.762	61	15000		
	13.10	2	11.556					
		3	3.969					
		4	0.594					
		5	0.874	332.168				
	13.19	1	11.276		65	16000		
	01/22/01	04.39	1	6.171	59.441			
			2	10.297	75.175	63	14000	
			3	3.706		69	15000	
4			7.867					
	23.09	5	9.196					
		1	6.906	38.811	60	14000		
		2	23.601					
		3	24.476	379.371	60	14000		
		4	0.909					
		5	4.318	37.587	62	15500		
		6	8.129					
		7	5.752	113.636	60	16000		
		8	4.580					
		9	5.507	116.783	60	16000		
		12	6.276	40.210				
		01/23/01	03.09	1	3.584	45.455	59	14000
2	4.143							
1	14.336			68.182	59	14000		
1	10.664			143.357				
		2	6.608	47.203				
		3	1.696	192.308				
		1	1.294	24.476	59	12000		
		2	5.892	101.399				
01/24/01	03.09	1	3.059	41.958	59	14000		
		2	10.664	52.448				
		3	3.427	120.629				
	08.09	1	0.455	75.175	50	10000		
	01/25/01	21.09	1	3.077	69.493	69>	16000	
			2	38.462				
3			2.168					
		4	2.133	372.378				
		01/26/01	01.09	1	2.990		64	16000
				1	38.452		69	16000
1	41.958				57	12000		
Promedio			25.84	364.875				
Desviación standard			9.810	592.551				
Coeficiente de variación			1.304	1.624				

Estos valores están de acuerdo con el estudio de 27 tormentas y 211 situaciones analizadas con CAD en imágenes digitalizadas de radar. (Tabla 5).

**Tabla 5.-** Dimensiones de celdas (solo parte del total se muestra)

Fecha	Hora	N° de celdas/tormenta	Elevación del tope de la celda principal msnm	Dimensiones de la base	
				a (km)	b (km)
12/15/93	22.50	2	8000	4	4
12/15/93	23.20	3	7000	4	4
12/21/93	12.30	2	8000	2	2
12/21/93	12.45	3	11000	5	5
12/21/93	20.04	2	11000	4	4
12/21/93	20.37	3	10000	4	4
12/26/93	17.20	3	12500	10	10
12/21/93	18.35	2	13000	3	4
01/01/94	16.15	2	11000	3	3
01/01/94	17.16	3	9500	4	4
01/04/94	20.20	2	10000	2	2
01/05/94	20.45	2	13000	7	7
01/05/94	21.38	4	16000	3	3
01/05/94	22.30	2	14000	6	6
01/31/94	15.00	3	11000	3	3
01/31/94	20.54	2	10000	3	3
01/31/94	21.40	2	12000	6	5
02/01/94	00.00	2	10000	8	8
02/01/94	00.00	2	13000	5	5
02/08/94	12.00	2	9500	3	3
02/08/94	12.00	2	12000	4	4
02/08/94	12.45	2	11500	4	4
02/08/94	12.45	2	9500	3	3
-----	-----	-----	-----	-----	-----
03/04/01	23.20	5	10500	3	4
03/04/01	00.00	3	8000	2	2
04/03/01	19.50	2	10000	2	3
04/03/94	22.00	2	9000	2	3
04/03/01	22.40	3	9000	5	5
Promedio aritmético				5.69	5.60
Desviación Standard				3.64	3.51
Coeficiente de variación				0.64	0.63

Area media = 31.86 km<sup>2</sup>

Rodríguez Iturbe and Mejía (1973) indica valores de áreas de 31 km<sup>2</sup> para lluvias en el centro del área de 19 mm llegando a valores de 1165 km<sup>2</sup> para valores en el centro de la tormenta de 127 mm. se indican valores de diámetros de las celdas de 4 km y otros investigadores (Shaw, 1983) observan celdas cuyos diámetros van desde 0.5 km hasta 10.0 km.

En relación con estos estudios se pueden puntualizar dos situaciones:

1. La duración de la tormenta supera en general a la duración de la celda.
2. La dimensión del campo de la tormenta es mayor que la dimensión de la celda.

Un sumario de los parámetros principales de las tormentas convectivas en la región norte de Mendoza, para ser usados en la definición y calibración del modelo de simulación de tormentas ( Felgate and Read, 1975; Goodrich et al., 1995; Krauss, 1999; Fernández et al., 2000a; Fernández et al., 2003) se reporta a continuación.

Periodo del año de ocurrencia: Octubre a Abril (primavera-verano-otoño)  
 Promedio de duración de la tormenta: 20-90 minutos  
 Promedio de distancia entre celdas: 7-9 km  
 Número más probable de celdas simultáneas en una tormenta: 2-5  
 Número máximo de celdas registradas en una tormenta: 12  
 Número máximo de celdas registradas en un día: 65  
 Velocidad promedio de la tormenta: 24 km/h  
 Dirección más frecuente de desplazamiento: Sudoeste a Noreste  
 Promedio de elevación del tope de la celda: 13000 m.s.n.m.  
 Dimensiones promedio de la celda: 5.7 x 5.6 km  
 Promedio de área de la celda: 31.9 km<sup>2</sup>  
 Duración de la celda: 15 a 30 minutos  
 Elevación de la base: 2.500 m.s.n.m.  
 Valor crítico de dbZ  $\geq 45$   
 Valores puntuales de precipitación en 60 minutos (Fernandez et al., 1999).

TR = 10 años: 70 mm; TR = 50 años: 97 mm; TR = 200 años: 123 mm

## REGIÓN DE ACTIVIDAD CONVECTIVA

En la aplicación del modelo de tormenta un punto importante es la definición de áreas de condiciones meteorológicas similares llamada “Región de Actividad Convectiva”, “Storm Activity Region”, SAR (Amorocho et al., 1973). El análisis de la SAR con una densa red de pluviógrafos telemétricos en el área de estudio de 700 km<sup>2</sup> (Figura 1) se muestra en la tabla 6.

**Tabla 6 .–** Días /Tormenta por periodos de 30 días para 15 años de registros en 17 estaciones

ID Nº de la estación	2-31 Oct (x)	1-30 Nov	1-30 Dic	31 Dic 29 Ene	30 Ene 28 Feb	1-30 Mar	Total
100	2	6	6	19	17	11	61
400	2	3	10	18	19	11	63
500	2	6	10	15	18	10	61
600	2	6	9	23	20	10	70
700	2	6	10	24	21	11	74
1000	2	6	9	25	20	11	73
1400	2	6	10	24	22	14	78
1500	2	6	9	20	18	13	68
1600	2	6	9	23	17	10	67
1700	1	5	8	20	19	9	62
1800	1	7	10	24	21	10	73
1900	1	6	10	24	22	11	74
2000	1	6	10	21	19	13	70
2100	1	3	5	16	20	10	55
2200	1	6	8	19	20	7	61
2300	1	6	9	24	21	10	71
2400	0	7	9	23	20	11	70
Total en el periodo (XT <sub>i</sub> )	25	97	151	362	334	182	1151
XT	1.471	5.706	8.882	21.294	19.647	10.706	67.706
$\sigma$	0.624	1.105	1.453	3.077	1.539	1.611	6.223
Cv	0.424	0.194	0.1636	0.145	0.078	0.150	0.092

(x) Hay periodos de 30 días que corresponden aproximadamente a meses calendario como se indica.

El registro de datos de 140 tormentas convectivas provee información para este análisis (Fernández et al., 2002).

$N$  = Número de estaciones con registro = 17

$T$  = Número de años del record = 15

$X_{ti}$  = Número de tormentas en cada periodo de 30 días en el total de años de record ( $T$ )

$XT$  = promedio de días/tormenta en la región para  $T$  años =  $X_{ti}/N$

$\sigma$  = desviación estándar de los días/tormenta para cada periodo de 30 días

$C_v$  = coeficiente de variación de los días/tormenta para cada periodo de 30 días =  $\sigma/XT$

De la tabla 6 resulta evidente la existencia de una **Región de Actividad Convectiva (RAC)**.

Tomando el coeficiente de variación ( $C_v$ ) como un parámetro adimensional de regionalización, se muestra la variación relativa del número de tormentas en el área por cada periodo de 30 días.

Para el primer periodo  $C_v = 0.424$  y el mismo desciende a 0.145 y 0.078 en enero y febrero, los cuales son los periodos de máxima actividad convectiva. En octubre las condiciones termodinámicas de la atmósfera que generan esta actividad comienza y va desarrollándose gradualmente para alcanzar su máximo valor en enero y febrero, descendiendo nuevamente en marzo. Esta variación se nota con la evolución de  $C_v$  desde un máximo de 0.424 (baja actividad) a un mínimo de 0.078 (alta actividad).

El valor de  $C_v$  para toda la región y para todo el periodo de 0.092 (9.2%) es muy baja, confirmando el concepto de una sola **Región de Actividad Convectiva**.

## CONCLUSIONES

- Los estudios con radar de tormentas convectivas indican claramente la existencia de tres unidades: La tormenta, la celda y el “cluster”. La tormenta se compone de una o mas celdas. \*Se observa, en esta muestra que es frecuente la existencia de tormenta unicelulares.
- El número de celdas por tormenta, en el área, varía de una a doce. Debido al proceso frecuente de regeneración de celdas.
- La distancia entre celdas adyacentes es alrededor de 8 km.
- En la región, además de la presencia de humedad, la actividad de tormentas es normalmente inducida por un proceso de transferencia (aducción) de bajo nivel de aire húmedo del Atlántico en presencia de una situación de baja presión (baguada) en las capas altas de la atmósfera asociada con sistemas que llegan al área desde el Pacífico sobre la cordillera de Los Andes.
- En relación con ciertos parámetros de las celdas, la elevación típica del tope es de 13000 m.s.n.m. El valor crítico de reflectividad del radar es de 45 dbZ o mayor.
- La elevación crítica de la celda para tormentas intensas es mayor de 8000 m.s.n.m.
- Para un buen desarrollo y aplicación del modelo de simulación de tormenta convectiva es imprescindible tener una buena caracterización de la tormenta, de la celda y del “cluster”.
- La determinación de la Región de Actividad Convectiva es también un importante elemento para definir los límites de aplicación del modelo.
- Se deben realizar nuevos análisis de tormentas para agregar información y ratificar o corregir los parámetros encontrados, para una mejor descripción cualitativa y cuantitativa de estos eventos.
- Una visión futura para esta investigación es completar, el desarrollo del modelo para lograr un modelo generalizado para cualquier tipo de tormentas y áreas diversas, así como su integración directa a modelos de lluvia-caudal.

- En cuencas grandes (ej.: 30000 o más km<sup>2</sup>) es aconsejable considerar que las tormentas convectivas afectan solo subcuencas parciales.

## REFERENCIAS

- Amorocho, J. and Wu, B.,** (1977). "Mathematical Models for the Simulation of Cyclonic Storm Sequences and Precipitation Fields". *Journal. of Hidrology*. 32 pp 329-345.
- Amorocho, J., J. De Vries, D. Morgan,** (1973). "Simulation of Runoff from Arid and Semiarid Climatic Watershed". *Vol I Water Science and Eng. Paper 3002 U. C.Davis California USA*.
- Ball, J., C., Kin,** (1998). "Modeling Spatial Variability of Rainfall Over Catchment". *Journal of Hydrologic Engineering*". ASCE, April 1998 pp, 122-1930.
- Chow, Ven Te, D.Maidment and L. Mays,** (1988). "Applied Hydrology". McGraw-Hill.
- Corotis, R.,** (1976). "Stochastic Considerations in Thunderstorm Modeling". *Journal of Hydraulic Division-ASCE*, P.p 865-879.
- Cowpertwait, P.S.P.,** (1998) "A Poisson-Cluster Model of Rainfall: High-Order Moments and Extreme Values". *Proc. R.Soc, London, Ser. A. 454,885-898*
- Cowpertwait, P.S.P.,** (1995). "A Generalized Spatial-Temporal Model of Rainfall Based on a Clustered Point Process". *Proc. R. Soc. London, Ser. A. 450. 163-175*.
- De Lannoy, G.; N. Verhoest and F. De Troch,** (2005). "Characteristics of Rain Storms Over a Temperate Region Derived From Multiple Time Series of Weather Radar Images". *Journal of Hydrology*. Volume 307. pp.126-144.
- Fattorelli, S., R. Casale, M. Borga and D. Da Ros,** (1995). "Integrating Radar and Remote Sensing Techniques of Rainfall Estimation in Hydrologic Applications for Flood Hazard Mitigation". *European Commission Environment Programme, Associazione Italiana di Idronomia (AIDI)*. EURn 16494
- Fattorelli, S. y P. Fernández,** (2007). "Diseño Hidrológico". *Zeta editores*. 614 páginas y un CD. ISBN: 978-987-05-2738-1
- Felgate, D. and D. Read,** (1975). "Correlation Analysis of the Cellular Structure of Storm Observed by Raingauges". *Journal of Hydrology* 24 n° 3/4 pp 191-200.
- Fernández, P., S. Fattorelli and S. Rodríguez,** (2003). "A QPF Method for Mendoza Province ALERT System" *Proceedings of the NHWC Conference Dallas Texas USA*. (<http://www.NHWC.udfcd.org>)
- Fernández, P., L. Fornero y S. Rodríguez,** (2002). "Análisis del Comportamiento de Celdas Convectivas y su Aplicación al Diseño Hidrológico". *Proceedings of the XIX Congreso Nacional del Agua*. Carlos Paz, Córdoba-Argentina. Agosto 2002 (CD Rom)
- Fernández, P., L. Fornero y S. Rodríguez,**(1999). "Sistemas Hidrometeorológicos en Tiempo Real Lluvias y Tormentas de Mendoza". *Serie de la Academia Nacional de Agronomía de la Rep. Argentina n° 27 210 páginas*.
- Fernández, P., L. Fornero and S. Rodríguez,** (2000a). A "Realistic Design of Flash-Flood Control Works With the Aid of Radar Information". *Proceedings of the ASCE's 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management Minneapolis, USA, July 30 August 2, 2000*.
- Fernández, P., L. Fornero and S. Rodríguez,** (2000b). "Información de Radar para Aplicaciones Racionales de la Tormenta de Proyecto". *Proceedings de la XVIII Congreso Nacional del Agua*. Santiago del Estero (Argentina). CD-Rom)
- Fernández, P.; S. Fattorelli; S. Rodríguez and L. Fornero,** (1999). "Regional Analisis of Convective Storms". *Journal of Hydrologic Engineering ASCE Vol 4 n° 4 pp.317-325*.
- Goodrich, D.C., J.M. Faures, D.A. Woolhiser, I.J.Laner and S. Sorooshian,** (1995). "Measurement and Analysis of Small-Scale Convective Storm Rainfall Variability". *Journal of Hydrology*. 173, 283-308.

- Henz, John**, (1997). "Probabilistic Quantitative Precipitation Forecasts (PQPF) Successes in Denver and Phoenix". *Proceedings of the NHC/SAAS conference* ST. Louis, Missouri, USA.
- Hoobs, P.V. and J.D.Locatelli**, (1978). "Rainbands, Precipitation Cores and Generating Cells in a Cyclonic Storm". *Journal of Atmospheric Science*. 35, 230-241.
- Houze, R.A. and P.V.Hoobs**, (1982). "Organization and Structure of Precipitating Cloud System". 82. *Adv.in Geophysics*, Academic Press, 24, 225-315.
- Iacobellis, V. and M. Fiorentino**, (2000). "Derived Distribution of Floods Based on the Concept of Partial Area Coverage With a Climatic Appeal". *Water Resour. Research*. 36 (2), 469-482.
- Krauss, T.** Editor, (1999). "Mendoza Hail Suppression Project-Operational Manual". *Weather Modification Inc. Edición Gobierno de Mendoza* (Argentina).
- LeCam L.A.**, (1961). "A Stochastic Description of Precipitation" *Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. Vol.3, pp.165-186 University of California, Berkeley.
- Pani, E. and D.R. Haragan**, (1985). "Storm Characteristics of Convective-Scale Precipitation". *Water Resources Bulletin*, June, 1985. pp.393-405.
- Rodriguez-Iturbe, I. and J. Mejía**, (1973). "The Design of Rainfall Networks in Time and Space". *MIT Department of Civil Engineering Report* n° 176.
- Rulli, M.C. and R. Rosso**, (2002). "An Integrated Simulation Method for Flash-Flood Risk Assessment: 1. Frequency predictions in the Bisagno River by Combining Stochastic and Deterministic Methods". *Hydrology and Earth System Sciences*, (6), 267-283.
- Shaw, S.**, (1983). "An Investigation of the Cellular Structure of Storms Using Correlation Techniques". *Journal of Hydrology* 62 n° 1/4 pp.63-79.
- Steward, E.J.**, (1989). "Area Reduction Factors for Design Storm Construction Joint Use of Rain gauge and Radar data". *IAHS Publication* n° 181.
- Syed, K.D. Goodrich, D. Myers and S.Sorooshian**, (2003). "Spatial Characteristics of Thunderstorm Rainfall Fields and Their Relation to Runoff". *Journal of Hydrology* 271, pp.1-21.
- Valdes, J., Rodriguez Iturbe I. y Gupta, V.**, (1985). "Approximations of Temporal Rainfall From a Multidimensional Model". *Water Resources Research*, Vol. 21 n° 8 pp 1259-1270.
- Von Hardenberg, L.Ferraris and A. Provenzale**, (2003). "The Shape of Convective Rain Cells". *Geophysical Research Letters*, 30,10.1029/2003 GLO185