Área de Física Aplicada
Departamento de Química y Física Aplicadas
Facultad de CC. Biológicas y Ambientales
UNIVERSIDAD DE LEÓN

MODELIZACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES DE GRANIZO

MODELLING OF HAIL PRECIPITATION

BEATRIZ GIL ROBLES

NOVIEMBRE DE 2009

MODELIZACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES DE GRANIZO

MODELLING OF HAIL PRECIPITATION

BEATRIZ GIL ROBLES

MEMORIA DE TESIS DOCTORAL PARA LA CONSECUCCIÓN DEL TÍTULO
DE **DOCTOR CON MENCIÓN EUROPEA**

Dirigida por el Dr. Jose Luis Sánchez Gómez
y la Dra. Laura López Campano

Programa de Doctorado de Ecología y Tecnología Ambiental
Área de Física de la Atmósfera
Departamento de Química y Física Aplicadas
Facultad de CC. Biológicas y Ambientales
UNIVERSIDAD DE LEÓN

NOVIEMBRE DE 2009

**INFORME DEL DIRECTOR DE LA TESIS
(Art. 11.3 del R.D. 56/2005)**

El Dr. D. **Jose Luis Sánchez Gómez** y la Dra. Dña. **Laura López Campano**, como Directores¹ de la Tesis Doctoral titulada “**Modelización de las precipitaciones de granizo**” realizada por Dña. **Beatriz Gil Robles** en el Departamento de Química y Física Aplicadas, informa favorablemente el depósito de la misma, dado que reúne las condiciones necesarias para su defensa.

Lo que firmo, para dar cumplimiento al art. 11.3 del R.D. 56/2005, en León a ____ de noviembre de 2009

Fdo. Dr. D. Jose Luis Sánchez Gómez

Fdo. Dra. Dña. Laura López Campano

¹ Si la Tesis está dirigida por más de un Director tienen que constar los datos de cada uno y han de firmar todos ellos.

**ADMISIÓN A TRÁMITE DEL DEPARTAMENTO
(Art. 11.3 del R.D. 56/2005 y
Norma 7ª de las Complementarias de la ULE)**

El Departamento de **Química y Física Aplicadas** en su reunión celebrada el día ____ de noviembre de 2009 ha acordado dar su conformidad a la admisión a trámite de lectura de la Tesis Doctoral titulada “**Modelización de las precipitaciones de granizo**”, dirigida por el Dr. D. **Jose Luis Sánchez Gómez** y la Dra. Dña. **Laura López Campano**, elaborada por Dña. **Beatriz Gil Robles** y cuyo título en inglés es el siguiente “**Modelling of hail precipitation**”.

Lo que firmo, para dar cumplimiento al art. 11.3 del R.D. 56/2005, en León a ____ de noviembre de 2009.

El Secretario,

Fdo.: Olegario Martínez Morán

Vº Bº

El Director del Departamento,

Fdo.: D. Javier Martín Villacorta

AGRADECIMIENTOS

A lo largo de estos cuatro años de doctorado, muchas personas me han brindado su confianza, su ayuda y su apoyo, tanto científico como personal, por lo que se merecen mi más sincera gratitud.

En primer lugar, debo expresar mi agradecimiento y reconocimiento a los directores de esta Tesis Doctoral, el Dr. Jose Luis Sánchez y la Dra. Laura López, por todos los conocimientos aportados y el tiempo dedicado para el desarrollo de este trabajo, sin los cuales no habría sido concebido ni finalizado.

Esta Tesis Doctoral ha sido realizada gracias a una beca FPI de la Junta de Castilla y León. Los trabajos de investigación se han desarrollado en el marco de los proyectos PAIRAGRA (REN 200-1210 CLI), MONEGRO (REN2003-09617-C02-01) y SEVERUS (CGL2006-13372-C02-01/CLI), todos ellos financiados por la CICYT, y también de los proyectos LE004A06 y LE017B06 financiados por la Junta de Castilla y León. Además, han existido diferentes convenios con la Consejería de Agricultura del Gobierno de Aragón y la Confederación Hidrográfica del Ebro.

En cuanto a los datos, tengo que agradecer la estrecha colaboración de organismos como ADV Terres de Ponent (Lérida) personalizada en Maite Torà, la ANELFA (Francia) con Jean Dessens y Claude Berthet al frente y la DACC (Mendoza, Argentina) representada por Eduardo Martín, que nos han proporcionado los valiosos datos de sus respectivas redes de granizómetros para el análisis de los mismos. Por supuesto, doy las gracias a las personas que desde 2005 me han ayudado a medir los granizómetros de cada campaña de nuestra propia red: Raquel García, Manuel González, Fidel Rodríguez y Ruth Ferrajón respectivamente. También ha sido imprescindible la contribución de los numerosos informadores telefónicos anónimos de Aragón que han respondido pacientemente a las insistentes preguntas sobre el “pedrisco”.

Además de mis directores, agradezco al resto de integrantes del Grupo de Física de la Atmósfera (GFA) de la Universidad de León: a los doctores Jose Luis Marcos, Eduardo García y Juan Tomás Fernández, por escucharme y resolver mis dudas pacientemente, a Rafael Posada, Andrés Merino, Santiago Gómez y Alba Vázquez por su diversa ayuda y apoyo moral, así como a otros que ya no forman parte de él como Javier Robles, Antonio M. Ortín y Cecilia Pérez, además de las personas que se ocuparon de la medida de los granizómetros.

Se merecen una especial mención los compañeros del GFA con las que he vivido las inolvidables campañas experimentales en Zaragoza (principalmente Marcos, Juan Tomás, Rafa, Fidel, Santi y Andrés). Han sido cinco intensos veranos en los que hemos aprendido a hacer de todo y hemos disfrutado y sufrido largos días de tormenta en nuestro “zulo”, difíciles tomas de decisión, amables

y no tan amables respuestas telefónicas de los maños, variados trayectos en nuestro “maravilloso parque móvil”, improvisadas cenas “de supervivencia” en el radar, etc. También he compartido buenos y difíciles momentos con Hugo Videla, Carlos Bustos, Marcelo Peña, y Andrés Odiard (gracias por toda la ayuda con el TITAN), de la DACC de Mendoza; Manel Ceperuelo, de la Universidad de Barcelona; Fernando Pelijero, Ana Calmarza, Javi y Nicole, de la Mancomunidad de Lucha Antigranizo de Aragón; y Farren Hiscutt (gracias por toda la ayuda técnica con el radar), de *Electronic Systems Development*.

Siguiendo con los “destierros”, debo agradecer a las personas que me hicieron más agradable mi estancia en Toulouse y me propusieron ideas interesantes para profundizar en mi tesis, los profesores Henri Sauvageot, Jean-François Georgis y Jean Dessens. También debo reconocer a mis amigos internacionales que me hicieron sentir *chez moi* en la *ville rose* y me permitieron conocer nuevas culturas, practicando un divertido “franglish” con toques de español, especialmente René, Fernando y Nedía, y también Ruslan, Issa, Xiomara, Roberto y Mao.

No me puedo olvidar de todos los becarios y compañeros del IMA y de la facultad, a los que la causa común nos ha convertido en amigos: Alejandra, Amando, Ana (gracias por los consejos sobre las dimensiones finales), Antonio (gracias por la portada y toda la ayuda con Corel), Cristina, Cynthia, Irene, Iván, Jose, Luis, Manu, Natalia, Patricia, Paula, Rocío, Servi...

Muchas gracias a mis amigos de siempre, que me han escuchado y apoyado cuando lo he necesitado y han hecho desconectar mi mente de “esas cosas de la universidad”, sobre todo a las “monstruas” Andrea, Esther, Eva, María, Patri, Paula y Raquel, con las que he crecido en todos los sentidos, y también a Héctor, Juárez, David, Ángel...

Y el agradecimiento más especial y sincero es para mi familia, en concreto para mis padres y para mi hermana (gracias por la revisión final), que con todo su apoyo en todos los ámbitos, ánimos, paciencia y cariño han permitido que me dedique a esta “locura” que por fin se ha visto materializada. También se lo agradezco a mi tía y a mi abuela y al resto de mi familia, que siempre se interesan aunque todavía no saben muy bien “qué es lo que hago con las tormentas”.

A TODOS VOSOTROS, MUCHÍSIMAS GRACIAS, THANK YOU, MERCI.

*A mis padres
y a mi hermana*

ÍNDICE

RESUMEN.....	VII
RESUMEN	VIII
SUMMARY	XII
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. INTRODUCCIÓN	2
1.2. EL GRANIZO.....	3
1.3. OBJETIVOS.....	5
1.4. MARCO DEL TRABAJO	6
1.5. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	6
1.6. BIBLIOGRAFÍA	7
2. DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL	11
2.1. INTRODUCCIÓN	12
2.2. OBSERVACIÓN Y MEDIDA DE GRANIZO EN EL SUELO	12
2.2.1. OBSERVADORES	13
2.2.2. ASEGURADORAS AGRÍCOLAS.....	14
2.2.3. GRANIZÓMETROS	15
2.2.3.1. Sensor meteorológico	15
2.2.3.2. Características de los granizómetros del estudio	17
2.2.3.3. Redes de granizómetros del estudio.....	19
2.2.4. ESCALAS DE TAMAÑO DE GRANIZO.....	33
2.3. DETECCIÓN DE GRANIZO Y RADAR METEOROLÓGICO	35
2.3.1. RADAR METEOROLÓGICO.....	35
2.3.2. DETECCIÓN DE GRANIZO	40
2.3.3. DIFERENCIAS ENTRE RADARES DE LA BANDA C Y LA BANDA S	43
2.3.4. RADARES UTILIZADOS EN EL ESTUDIO.....	46
2.3.4.1. Radar de Zaragoza (España)	46
2.3.4.2. Radar de San Rafael (Argentina)	48
2.3.5. SISTEMAS DE ADQUISICIÓN Y PROCESADO DE DATOS	49
2.3.6. VARIABLES DE RADAR OBTENIDAS	53
2.4. BIBLIOGRAFÍA	58

3. BASES DE DATOS Y METODOLOGÍA	65
3.1. INTRODUCCIÓN	66
3.2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL DE TOMA DE DATOS	66
3.3. MEDIDA DE GRANIZÓMETROS.....	68
3.3.1. CALIBRACIÓN, LIMPIEZA Y REVELADO DEL GRANIZÓMETRO.....	68
3.3.2. SISTEMA DE MEDIDA SEMIAUTOMÁTICO	69
3.3.3. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS OBTENIDOS	71
3.4. BASE DE DATOS DE GRANIZÓMETROS	72
3.5. BASE DE DATOS DE RADAR	74
3.6. BIBLIOGRAFÍA	77
 4. CARACTERIZACIÓN DE LAS TORMENTAS CON GRANIZO EN LAS ÁREAS DE ESTUDIO	79
4.1. INTRODUCCIÓN	80
4.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS TORMENTAS DE ARAGÓN	80
4.2.1. DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LAS GRANIZADAS	80
4.2.1.1. Hora de formación de las primeras células convectivas	80
4.2.1.2. Duración de las tormentas	81
4.2.1.3. Distribuciones diarias y mensuales de los granizómetros impactados.....	82
4.2.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS GRANIZADAS	88
4.2.2.1. Áreas de formación de las tormentas	88
4.2.2.2. Áreas de riesgo de granizo	89
4.2.3. INTENSIDAD DE LAS GRANIZADAS EN LA RED DE GRANIZÓMETROS.....	93
4.2.3.1. Distribución espacial de las variables medidas en los granizómetros	93
4.2.3.2. Valores característicos medidos en los granizómetros.....	98
4.2.3.3. Histogramas de frecuencias de las variables medidas en los granizómetros	101
4.2.3.4. Condiciones atmosféricas en situación de tormenta.....	106
4.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS TORMENTAS DE MENDOZA.....	109
4.3.1. DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LAS GRANIZADAS	109
4.3.1.1. Hora de formación de las primeras células convectivas	109
4.3.1.2. Duración media de la actividad convectiva.....	110
4.3.1.3. Distribuciones diarias y mensuales de los granizómetros impactados.....	111
4.3.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS GRANIZADAS	118
4.3.2.1. Áreas de formación de las tormentas	118
4.3.2.2. Áreas de riesgo de granizo	119
4.3.3. INTENSIDAD DE LAS GRANIZADAS EN LA RED DE GRANIZÓMETROS.....	121
4.3.3.1. Distribución espacial de las variables medidas en los granizómetros	121
4.3.3.2. Valores característicos medidos en los granizómetros.....	127
4.3.3.3. Histogramas de frecuencias de las variables medidas en los granizómetros	127
4.3.3.4. Condiciones atmosféricas en situación de tormenta.....	133
4.4. COMPARACIÓN ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS TORMENTAS EN ARAGÓN Y EN MENDOZA	135
4.5. BIBLIOGRAFÍA	136

5. DISTRIBUCIONES DE TAMAÑO Y DE ENERGÍA DEL GRANIZO EN EL SUELO 139

5.1. INTRODUCCIÓN	140
5.2. DISTRIBUCIONES DEL TAMAÑO DEL GRANIZO. RESUMEN.....	140
5.3. DISTRIBUCIONES DE LA ENERGÍA CINÉTICA DEL GRANIZO.....	141
5.3.1. BASE DE DATOS Y METODOLOGÍA.....	141
5.3.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	143
5.4. BIBLIOGRAFÍA	146

6. RELACIÓN ENTRE LA ENERGÍA Y EL TAMAÑO DEL GRANIZO EN EL SUELO Y LAS VARIABLES RADAR 147

6.1. INTRODUCCIÓN	148
6.2. RELACIONES ENTRE LA ENERGÍA CINÉTICA DEL GRANIZO EN EL SUELO Y LA REFLECTIVIDAD	149
6.2.1. RELACIONES ENTRE EL FLUJO DE ENERGÍA CINÉTICA, LA ENERGÍA CINÉTICA TOTAL Y LA REFLECTIVIDAD: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	149
6.2.2. RELACIONES ENTRE LA ENERGÍA Y LA REFLECTIVIDAD EN LA RED DE GRANIZÓMETROS DE ZARAGOZA	153
6.2.2.1. Base de datos y metodología	153
6.2.2.2. Resultados y discusión	153
6.2.3. RELACIONES ENTRE LA ENERGÍA Y LA REFLECTIVIDAD EN LA RED DE GRANIZÓMETROS DEL OASIS SUR DE MENDOZA.....	157
6.2.3.1. Base de datos y metodología	157
6.2.3.2. Resultados y discusión	157
6.3. RELACIONES ENTRE LA ENERGÍA Y EL TAMAÑO DEL GRANIZO EN EL SUELO Y LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS TORMENTAS EVALUADAS A TRAVÉS DE VARIABLES RADAR	161
6.3.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS TORMENTAS CON PRECIPITACIONES DE GRANIZO EN LA RED DE GRANIZÓMETROS DE ZARAGOZA.....	161
6.3.1.1. Base de datos y metodología	161
6.3.1.2. Estadísticos descriptivos	163
6.3.1.3. Correlaciones	166
6.3.1.4. Análisis cluster.....	169
6.3.1.5. Análisis de componentes principales	171
6.3.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS TORMENTAS CON PRECIPITACIONES DE GRANIZO EN LA RED DE GRANIZÓMETROS DEL OASIS SUR DE MENDOZA	179
6.3.2.1. Base de datos y metodología	179
6.3.2.2. Estadísticos descriptivos	179
6.3.2.3. Correlaciones	184
6.3.2.4. Análisis cluster.....	186
6.3.2.5. Análisis de componentes principales	187

6.3.3. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA LAS REDES DE GRANIZÓMETROS DE ZARAGOZA Y EL OASIS SUR DE MENDOZA	195
6.4. BIBLIOGRAFÍA	198
7. REGRESIÓN LOGÍSTICA APLICADA A LA DISCRIMINACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA DEL GRANIZO	201
7.1. INTRODUCCIÓN	202
7.2. FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS DE REGRESIÓN LOGÍSTICA.....	202
7.3. APLICACIÓN EN LA RED DE GRANIZÓMETROS DEL OASIS SUR DE MENDOZA	204
7.3.1. BASE DE DATOS Y METODOLOGÍA.....	204
7.3.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	205
7.3.2.1. Verificación de los supuestos del análisis multivariante.....	205
7.3.2.2. Selección de las variables explicativas y ajuste del modelo.....	206
7.3.2.3. Evaluación del modelo logístico de energía.....	208
7.3.2.4. Interpretación meteorológica	209
7.4. APLICACIÓN EN LA RED DE GRANIZÓMETROS DE ZARAGOZA	211
7.4.1. LIMITACIONES DE LOS RADARES DE BANDA C EN LA ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA DE LAS PRECIPITACIONES	211
7.4.2. BASE DE DATOS Y METODOLOGÍA.....	212
7.4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	212
7.4.3.1. Construcción del modelo logístico de energía	212
7.4.3.2. Evaluación del modelo logístico de energía.....	212
7.5. BIBLIOGRAFÍA	213
CONCLUSIONES.....	215
CONCLUSIONES	216
CONCLUSIONS	219
GLOSARIOS	223
GLOSARIO DE FIGURAS.....	224
GLOSARIO DE TABLAS.....	229
GLOSARIO DE ECUACIONES	233
GLOSARIO DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS.....	238
GLOSARIO DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS DE VARIABLES	244

ANEXO I. PUBLICACIÓN “Characterization of hailstone size spectra in hailpad networks in France, Spain and Argentina”	251
---	------------

SHORT INDEX

SUMMARY	VII
1. INTRODUCTION AND OBJECTIVES	1
2. EXPERIMENTAL DESCRIPTION	11
3. DATABASES AND METHODOLOGY	65
4. CHARACTERISATION OF THE HAILSTORMS IN THE STUDY AREAS	79
5. SIZE AND ENERGY DISTRIBUTIONS OF HAIL ON THE GROUND	139
6. RELATIONSHIP BETWEEN THE SIZE AND ENERGY OF HAIL ON THE GROUND AND THE RADAR VARIABLES	147
7. LOGISTIC REGRESSION APPLIED TO THE DISCRIMINATION OF THE KINETIC ENERGY OF HAIL	201
CONCLUSIONS	215
GLOSSARIES	223
APPENDIX I. PUBLICATION: “Characterization of hailstone size spectra in hailpad networks in France, Spain and Argentina”	251

RESUMEN

RESUMEN

El granizo puede provocar daños significativos en la agricultura y las infraestructuras, causando pérdidas económicas importantes. Es por ello que en numerosas partes del mundo se realizan trabajos de investigación para profundizar sobre el conocimiento de este riesgo meteorológico. Así, en el marco de varios Proyectos del Plan Nacional de I+D (PAIRAGRA, MONEGRO y SEVERUS) y de convenios internacionales (con organizaciones de Francia y Argentina), surge el tema de estudio de esta Tesis Doctoral que pretende desarrollar herramientas para la observación y vigilancia del granizo.

Para el estudio de dicho hidrometeoro sólido, es necesario, por un lado, registrar su precipitación en el suelo de la manera más fiable y exacta posible, y por otro, analizar las características de las tormentas que lo generan.

En cuanto a la medida directa del granizo en el suelo, los métodos más utilizados son: la observación directa a través de una red de *observadores*, los datos estadísticos proporcionados por los *seguros agrarios* y la medida de las variables de los impactos registrados en unos sensores específicos denominados *granizómetros*. Cada uno de estos tres métodos presenta ventajas e inconvenientes, pero se considera que una red de granizómetros proporciona los datos más objetivos, fiables y completos. De hecho, a través de ellos se puede conocer el *número de piedras* precipitado, la *masa total de hielo* precipitada, la *energía cinética* total (todos ellos por unidad de superficie) y el *diámetro máximo* registrado en sobre esa área.

Para la realización de esta Tesis Doctoral se dispone de los datos de ocho redes de granizómetros situadas en tres áreas con especial riesgo de granizo: el Valle Medio del Ebro en España (red de Zaragoza y red de Lérida); la provincia de Mendoza en Argentina (tres redes en otros tantos oasis cultivados, denominados según su localización: noreste, centro y sur); y las zonas de la ANELFA (*Association Nationale d'Étude et Lutte contre les Fléaux Atmosphériques*) en Francia (tres áreas divididas en función de su localización e influencia climática: atlántica, interior y mediterránea). En todas ellas, los procesos de medida y tratamiento de datos utilizados son los mismos.

Los *radares meteorológicos* resultan ser la mejor y más confiable tecnología para detectar células tormentosas que dan lugar a precipitaciones intensas. En concreto, para el estudio de la lluvia y el granizo, los radares más utilizados desde el punto de vista operacional son los de la banda C ($\lambda = 5$ cm aprox.) y S ($\lambda = 10$ cm aprox.). Los segundos sufren menor atenuación a partir de tamaños grandes de granizo, por lo que son más adecuados para detectar granizo severo. Con ellos se obtienen las denominadas *variables radar* a partir de las cuales se construyen las herramientas de vigilancia e interpretación en tiempo real.

En dos de las ocho redes de granizómetros, se dispone, además, de los datos proporcionados por dos radares meteorológicos. En concreto, en el área de Zaragoza (España) se encuentra ubicado un radar de la banda C, mientras que en el oasis sur de Mendoza (Argentina) está instalado un radar de la banda S. Ambos comparten los mismos sistemas de adquisición y procesamiento de datos y también disponen de sendos algoritmos de detección de granizo, previamente contrastados.

Con este dispositivo experimental, los tres objetivos generales que se pretenden alcanzar en esta Tesis Doctoral son:

1. Caracterizar las precipitaciones de granizo en distintas latitudes del mundo y proceder a su comparación.
2. Seleccionar y agrupar las *variables radar* que expliquen los valores de la *energía cinética* del granizo en el suelo.

3. Desarrollar algoritmos que pronostiquen, a partir de *variables radar*, la *energía cinética* de las piedras precipitantes.

Para alcanzar el **primer objetivo**, se caracteriza la climatología de las tormentas que generan granizo en las dos zonas en las que están instalados los radares meteorológicos de este estudio. Se observa que las tormentas en el área de Zaragoza son de origen principalmente convectivo, con una duración media de las células individuales de 30 a 40 minutos. El Sistema Ibérico es la zona de formación de tormentas más importante, y, dado que su trayectoria habitual es hacia el NE, la zona con mayor riesgo de granizo se sitúa en torno al valle por donde discurre el río Ebro. En cuanto a Mendoza, se aprecia que las tormentas tienen un origen frontal, si bien están influenciadas por la compleja orografía de la zona. La duración de la actividad convectiva, habitualmente, se extiende entre 9 y 12 horas. Las regiones de formación de tormentas más frecuentes son aquellas que se encuentran cerca de la precordillera, y las áreas de mayor riesgo de granizo dentro del oasis cultivado del sur son los extremos NW y SE.

En ambas zonas estudiadas, la mayor actividad convectiva se registra en los meses centrales de verano (junio en Zaragoza y diciembre en Mendoza). La intensidad de las granizadas sobre los granizómetros es mayor en Mendoza ya que en esa red se encuentran valores más elevados de las variables.

A continuación, se analizan dos de las variables más importantes medidas en los granizómetros. Por un lado, en las ocho redes de granizómetros disponibles se estudian las distribuciones del *diámetro* del granizo, también llamadas *espectros de tamaños*. Estos espectros se ajustan a una *distribución exponencial*, y a partir de los parámetros de la misma se halla el *diámetro medio* característico. Comparando las tres áreas de estudio generales, los *diámetros medios* menores se encuentran en Francia, en torno a 8 mm, los mayores en Mendoza (Argentina), superando los 9 mm, y los valores intermedios se sitúan en el Valle Medio del Ebro (España). Aplicando una técnica de *regresión por partes*, se obtiene que en cuatro de las cinco redes analizadas en Argentina y España existe un diámetro que separa dos distribuciones con parámetros diferentes, por lo que se trata de distribuciones bimodales. A ese diámetro se le denomina *breakpoint* o *punto de ruptura*, y varía entre 2 cm y 3.7 cm en esas cuatro redes. Solamente en dos de ellas, la distribución de los diámetros antes y después de este *breakpoint* se ajusta a una *distribución exponencial* de forma estadísticamente significativa. Esta distribución bimodal apunta a un distinto comportamiento del granizo antes y después de cierto umbral de diámetro, pudiendo marcar la diferencia entre dos tipos de mecanismos que predominan en el crecimiento de las piedras. No obstante, persiste la incertidumbre en cuanto a los procesos que dan lugar en la aparición de granizo de gran tamaño en el suelo.

Por otro lado, se estudian las distribuciones de la *energía total diaria* del granizo, es decir, los *espectros de energía* en las redes españolas y argentinas. En estas cinco redes, el logaritmo de la *energía total diaria* del granizo se ajusta a una *distribución normal*, o lo que es lo mismo, la *energía total diaria* del granizo sigue una *distribución log-normal*. Comparando los valores obtenidos se observa que la *energía total diaria* media es, en general, mayor para las redes argentinas que para las españolas. De esta forma, se considera completado el primer objetivo de caracterización y comparación de las precipitaciones de granizo.

El **segundo objetivo** de la Tesis doctoral se centra en establecer relaciones entre las *variables radar* y la *energía cinética* medida en los granizómetros de las áreas de estudio de Zaragoza y el oasis sur de Mendoza. En primer lugar, al utilizar ajustes lineales o potenciales entre la *reflectividad máxima* medida por el radar y la *energía cinética* registrada en el suelo, los resultados encontrados no son satisfactorios, con varianzas explicadas inferiores al 42 %. Esto indica que es necesario incluir más variables con la finalidad de obtener un modelo adecuado para estimar la *energía cinética* en el suelo.

Por ello, se aplican diferentes técnicas estadísticas para analizar las *variables radar*. Los estadísticos descriptivos indican que en la red argentina, en general, se registran valores mayores tanto de las variables de granizómetros como de las *variables radar*. En ambas redes se propone una clasificación de los casos en dos grupos según dos variables: la *energía cinética* (*granizo de alta / baja energía* con un umbral de 20 J m^{-2}) y el *diámetro máximo* (*granizo de diámetro grande / pequeño* con un umbral de 15 mm). En la muestra de la red argentina se encuentran más casos de granizo de *alta energía* y de *diámetro grande* que en la española.

Cabe destacar que en la red argentina se encuentran más correlaciones entre las variables medidas en los granizómetros y las *variables radar* que en la red española, y además, los coeficientes de correlación son más elevados, apuntando a que el radar de la banda S puede ser más adecuado para este objetivo.

Al aplicar el *análisis cluster* a las bases de datos, se establecen cuatro grupos de *variables radar* que se interpretan como: las dimensiones de la tormenta, su dinámica temporal, su estructura vertical y la cantidad de agua disponible dentro de ella. En el caso de Mendoza, estos grupos resultan estar menos jerarquizados que en Zaragoza. Con el objeto de conocer qué variables tienen mayor importancia en la explicación de varianza y cómo se agrupan entre ellas, posteriormente se aplica un *análisis de componentes principales* (ACP).

En la red de Zaragoza, las componentes principales reflejan fielmente los grupos formados en el *análisis cluster*. La componente que más varianza explicada aporta es la que contiene las variables relacionadas con las dimensiones físicas de la tormenta, seguida por la dinámica temporal, la estructura vertical y por último, la cantidad de agua disponible. Tanto la *energía cinética* como el *diámetro máximo* medidos en los granizómetros se asocian a esta última componente. Con esas cuatro componentes, se llega a explicar el 78 % de la varianza total acumulada. En el caso del granizo de *alta energía* y de *diámetro grande*, los resultados son análogos, con porcentajes de varianza explicada total ligeramente mayores (87 y 91 % respectivamente). En el caso del granizo de *baja energía* y de *diámetro pequeño*, las componentes segunda y tercera están intercambiadas con respecto al granizo de *alta energía* y de *diámetro grande*, la varianza total explicada es un poco menor (76 % en los dos casos), y los valores de *energía cinética* no pueden ser asociados a ninguna componente. Se concluye, por tanto, que para el caso de granizo pequeño resulta más difícil relacionar la *energía cinética* medida en los granizómetros con las *variables radar*.

En cambio, en la red del oasis sur, las componentes principales agrupan variables de forma algo diferente a como lo hace el *análisis cluster*. Así, la componente que más varianza explica está formada por las variables relacionadas con la cantidad de agua disponible y con algunas de las referidas a la estructura vertical. La segunda está compuesta por las variables relativas a las dimensiones físicas de la tormenta y su dinámica temporal. Las componentes tercera, cuarta y quinta están formadas por una o dos variables cada una, aportando poca varianza al total. Tanto la *energía cinética* como el *diámetro máximo* medidos en los granizómetros están ligados a la primera componente principal. A través de esas cinco componentes principales se explica el 80 % de la varianza. Al aplicar esta técnica a las dos clases de energía y de diámetro, se observa que en los casos con granizo de *baja energía* y *diámetro pequeño*, la primera componente agrupa variables relacionadas con la cantidad de agua disponible y las dimensiones de la tormenta, asociándose la *energía cinética* a esta primera componente. Sin embargo, para los casos con granizo de *alta energía* y *diámetro grande*, la componente más importante está formada por las dimensiones de la tormenta y su dinámica temporal. Es la segunda componente la que reúne las variables de la cantidad de agua disponible y a la que se asocia la *energía cinética* medida en los granizómetros.

A la vista de estos resultados, se corrobora que los radares de la banda S son más apropiados que los de la banda C para establecer relaciones entre las *variables radar* y la *energía cinética* en el suelo, ya que consiguen explicar un porcentaje de la varianza más alto, siendo aún mayor, para la clase

de *alta energía*. Además, la *reflectividad máxima* no es suficiente para estimar la *energía cinética*, sino que es necesario tener en cuenta otras *variables radar*.

Para conseguir el **tercer objetivo** que pretende crear un algoritmo para pronosticar dicha energía en el suelo, se aplica una *regresión logística* utilizando el método *stepwise* de incorporación de variables, con el fin de discriminar entre granizo de *baja energía* y de *alta energía*. Para ello, se continúa con la clasificación propuesta anteriormente utilizando el umbral de 20 J m^{-2} .

Respecto al oasis sur de Mendoza, con el radar de la banda S, se obtiene un modelo logístico tras tres iteraciones, que incluye el *VIL*, la *altura de la máxima reflectividad* (su raíz cuadrada) y el *techo* de la tormenta (su inversa), con unos índices de precisión satisfactorios (un ratio de falsas alarmas del 14.3 % y una probabilidad de detección del 85.7 %). Estas variables incluidas en la ecuación, se corresponden con los ingredientes necesarios para la formación de tormentas con granizo, es decir, la cantidad de agua disponible en el interior de la tormenta y la estructura vertical de la misma. Así, según esta ecuación, cuanto más *agua líquida disponible* presente la nube, cuanto mayor sea el *techo de la tormenta* y cuanto más baja esté la *altura de la máxima reflectividad*, mayor será la probabilidad de que una tormenta dé lugar a granizo de *alta energía*.

Por el contrario, al utilizar la misma metodología con la base de datos de Zaragoza, con el radar de la banda C, no es posible construir un modelo logístico para la discriminación de granizo de *alta* o *baja energía* con resultados satisfactorios. Esto puede atribuirse a que los diámetros del granizo de *alta energía* se encuentran en la parte no lineal de la curva que establece la relación entre la *reflectividad* del radar y el diámetro de los blancos dispersores.

SUMMARY

Hail can cause significant damage to agriculture and infrastructures, leading to major economic losses. For this reason, research projects are carried out in numerous parts of the world to provide more detailed knowledge about this type of meteorological risk. As a result, the topic of this Doctoral Thesis, aimed at developing tools for observing and monitoring hail, is set against the backdrop of a series of Projects from the National R&D Plan (PAIRAGRA, MONEGRO and SEVERUS) and international agreements (with organizations in France and Argentina).

In order to study this solid hydrometeor, it is necessary, on the one hand, to record its precipitation at ground level in the most exact and reliable way possible, and on the other, to analyse the characteristics of the storms that produce it.

The most frequently used methods for directly measuring hail on the ground are: direct observation through a network of *observers*, the statistical data provided by *agricultural insurance companies* and measuring the variables for the impacts recorded on specific sensors known as *hailpads*. Each of these three methods has its advantages and disadvantages, although it is considered that a network of hailpads provides the most objective, reliable and complete data. In fact, by using them it is possible to know the *number of hailstones* precipitated, the *total ice mass* precipitated, the total *kinetic energy* (all in terms of surface units) and the *maximum diameter* recorded on this surface.

In the production of the Doctoral Thesis, data are used from eight hailpad networks located in three areas at particular risk from hail: the mid-Ebro Valley in Spain (Zaragoza network and Lérida network); the province of Mendoza in Argentina (three networks in three cultivated oases, named according to their location: northeast, centre and south); and the zones of the ANELFA (*Association Nationale d'Étude et Lutte contre les Fléaux Atmosphériques*) in France (three areas divided according to their location and climatic influence: Atlantic, interior and Mediterranean). All of them use the same measurement and data treatment processes.

Weather radar is the best and most reliable technology for detecting storm cells that lead to intense precipitation. Specifically, the most widely used radars from an operational point of view for studying rain and hail are C-band radars (λ = approx. 5 cm) and S-band radars (λ = approx. 10 cm). The second type suffers from less attenuation with larger hail sizes, meaning that they are more suitable for detecting severe hail. These are used to obtain what are known as *radar variables*, used to construct the tools for surveillance and interpretation in real time.

In two of the eight hailpad networks, data provided by two weather radars is also available. Specifically, in the area of Zaragoza (Spain), there is a C-band radar, while in the southern oasis of Mendoza (Argentina), an S-band radar is installed. Both share the same data gathering and processing systems, and are also equipped with previously contrasted hail detection algorithms.

Using these experimental devices, the three general objectives of this Doctoral Thesis are:

1. To characterise hail precipitation in different latitudes of the world and compare them.
2. To select and group the *radar variables* that explain the values of the *kinetic energy* of hail on the ground.
3. To develop algorithms based on *radar variables*, which are capable of forecasting the *kinetic energy* of the precipitated hailstones.

In order to achieve the **first objective**, the climatology of the storms that generate hail is characterised in the two zones where the weather radars are installed in this study. It has been observed that the storms in the area of Zaragoza are mainly convective in origin, with individual cells having a

mean duration of 30 to 40 minutes. The Iberian System is the most important zone where storms are formed, and as a result of their usual trajectory being towards the NE, the zone with the highest risk of hail is situated in the valley of the River Ebro. In the case of Mendoza, the storms have a frontal origin, although they are influenced by the complex orography of the zone. Here, convective activity normally has a duration of between 9 and 12 hours. The regions where storms are most frequently formed are those that are close to the foothills of the mountains, and the areas with the highest risk of hail in the southern cultivated oasis are the NW and SE boundaries.

In both of the study areas, the greatest convective activity is recorded in the midsummer months (June in Zaragoza and December in Mendoza). The intensity of hailstorms on the hailpads is greater in Mendoza, as higher values of the variables are found in this network.

Then, two of the most important variables measured on the hailpads are analysed. Firstly, the distributions of the hailstone *diameter*, also known as *size spectra*, are studied in the eight available hailpad networks. These spectra fit an *exponential distribution*, and it is possible to obtain the characteristic *mean diameter* based on the parameters of this distribution. Comparing the three general study areas, the smallest *mean diameters* are found in France, at around 8 mm, and the largest in Mendoza (Argentina), in excess of 9 mm; intermediate values are found in the mid-Ebro Valley (Spain). By applying a *piecewise regression* technique, we find that in four out of the five networks analysed in Argentina and Spain, there is a diameter that separates two distributions with different parameters, meaning that these are bimodal distributions. This diameter is known as the *breakpoint* and varies between 2 cm and 3.7 cm in these four networks. In only two of them, the distribution of the diameters before and after this *breakpoint* fits an *exponential distribution* in a statistically significant manner. This bimodal distribution points towards a different behaviour of the hail before and after a given diameter breakpoint, making it possible to define the difference between two types of mechanisms that predominate in the growth of the hailstones. However, uncertainty still exists regarding the processes that lead to the appearance of large size hailstones on the ground.

Secondly, the distributions of the *total daily energy* of the hail are studied, meaning the *energy spectra*, in the Spanish and Argentinean networks. In these five networks, the logarithm for the *total daily energy* of the hail fits a *normal distribution*, or, in other words, the *total daily energy* of the hail fits a *log-normal distribution*. Comparing the values obtained, we see that the mean *total daily energy* is generally higher for the Argentinean networks than for the Spanish networks. As a result, the first objective of characterising and comparing hail precipitation is considered as having been completed.

The **second objective** of the Doctoral Thesis focuses on establishing relationships between the *radar variables* and the *kinetic energy* measured on the hailpads from the study zones in Zaragoza and the southern oasis of Mendoza. Firstly, on using linear or potential adjustments between the *maximum reflectivity* measured by the radar and the *kinetic energy* recorded on the ground, the results obtained are not satisfactory, with explained variances of less than 42%. This means that it is necessary to include more variables in order to obtain a suitable model for estimating the *kinetic energy* on the ground.

As a result, different statistical techniques are applied in order to analyse the *radar variables*. The descriptive statistics indicate that in the Argentinean network, in general, higher values are recorded both for the hailpad variables and the *radar variables*. In both networks, it is proposed to classify the cases in two groups according to two variables: the *kinetic energy* (*high/low energy hail* with a threshold of 20 J m^{-2}) and the *maximum diameter* (*large/small diameter hail* with a threshold of 15 mm). In the sample from the Argentinean network, there are more cases of *high energy* and *large diameter* hail than in the Spanish network.

It should be noted that in the Argentinean network, there are more correlations between the variables measured on the hailpads and the *radar variables* than in the Spanish network, and also that the correlation coefficients are higher, indicating the S-band radar is more suitable for this purpose.

On applying a *cluster analysis* to the databases, four groups of *radar variables* are established which are interpreted as: the dimensions of the storm, its temporal dynamics, its vertical structure and the amount of available water within it. In the case of Mendoza, these groups are less hierarchized than in Zaragoza. In order to know which variables are the most important in explaining the variance, and how they are grouped together, a *principal components analysis* (PCA) is subsequently applied.

In the network in Zaragoza, the principal components accurately reflect the groups formed in the *cluster analysis*. The component that provides most of the explained variance is that which contains the variables connected with the physical dimensions of the storm, followed by the temporal dynamics, the vertical structure, and finally, the amount of available water. Both the *kinetic energy* and the *maximum diameter* measured on the hailpads are associated with this last component. With these four components, it is possible to explain 78% of the total accumulated variance. In the case of the *high energy* and *large diameter* hail, the results are similar, with slightly higher percentages of total explained variance (87% and 91% respectively). In the case of *low energy* and *small diameter* hail, the second and third components are exchanged with regard to the *high energy* and *large diameter* hail; the total explained variance is slightly less (76% in both cases); and the *kinetic energy* values cannot be associated with any component. It is therefore concluded that in the case of small hail, it is more difficult to relate the *kinetic energy* measured on the hailpads to the *radar variables*.

However, in the network in the southern oasis, the PCA groups variables in a slightly different way to the cluster analysis. In this case, the component that explains most variance is formed by the variables connected with the amount of available water, and some of those that refer to the vertical structure. The second is composed of variables related to the physical dimensions of the storm and its temporal dynamics. The third, fourth and fifth components are each comprised of one or two variables, which provide little variance to the total. Both the *kinetic energy* and the *maximum diameter* measured on the hailpads are connected with the first principal component. 80% of the variance is explained by these five principal components. On applying this technique to the two classes of energy and diameter, we see that in the cases with *low energy* and *small diameter* hail, the first component groups variables related to the amount of available water and the dimensions of the storm, with the *kinetic energy* associated with this first component. However, in the cases of *high energy* and *large diameter* hail, the most important component consists of the dimensions of the storm and its temporal dynamics. The second component is the one which combines the variables for the amount of available water, and which is associated with the *kinetic energy* measured on the hailpads.

In the light of these results, it is corroborated that S-band radars are more suitable than C-band radars for establishing relationships between the *radar variables* and the *kinetic energy* on the ground, as they are able to explain a higher percentage of the variance, which is even higher for the *high energy* class. Also, the *maximum reflectivity* is not sufficient to estimate the *kinetic energy*, and it is necessary to take other *radar variables* into account.

To achieve the **third objective**, aimed at creating an algorithm to predict this energy on the ground, a *logistical regression* is applied using the *stepwise* method to include the variables, in order to discriminate between *low energy* and *high energy* hail. To do so, the previously proposed classification is used with the threshold of 20 J m^{-2} .

With respect to the southern oasis of Mendoza, with the S-band radar, a logistical model is obtained after three iterations, which include the *VIL*, the *maximum reflectivity height* (its square root) and the *top* of the storm (its inverse), with satisfactory precision indices (a false alarm ratio of 14.3% and a probability of detection of 85.7%). These variables included in the equation correspond to the necessary ingredients for the formation of hailstorms, namely the amount of available water inside the storm, and its vertical structure. As a result, the more *available liquid water* in the cloud, the higher the *top* of the storm and the lower the *maximum reflectivity height*, then the higher the probability of a storm producing *high energy* hail.

On the contrary, on using the same methodology with the database from Zaragoza, with the C-band radar, it is not possible to construct a logistical model for discriminating *high* or *low energy* hail with satisfactory results. This may be due to the fact that the diameters of the *high energy* hail are situated on the non-linear part of the curve that establishes the relationship between the *reflectivity* of the radar and the diameter of the scatters.

1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

Los riesgos naturales provocan numerosas pérdidas tanto económicas como humanas en todo el mundo. En las últimas décadas, los efectos de dichos riesgos han aumentado debido al incremento de la frecuencia de algunos de estos fenómenos, al crecimiento de la población mundial, al aumento de la superficie agrícola y a la degradación ambiental.

En nuestras latitudes, los riesgos más habituales son los de origen meteorológico. En concreto, en los países mediterráneos, los más importantes en términos de frecuencia de aparición y daños producidos son las sequías, las inundaciones, las tormentas de viento y las tormentas de granizo. La presente Tesis Doctoral se centra en el análisis y desarrollo de *herramientas* para la observación y vigilancia de este tipo riesgos.

Los daños generados por el granizo en todo el mundo son cuantiosos. Principalmente, produce pérdidas económicas en la agricultura y las infraestructuras. En cuanto a los daños en la agricultura, según la *Asociación Internacional de Aseguradores de Granizo (IAIS, International Association of Hail Insurers)*, las indemnizaciones debidas al granizo presentan una tendencia a aumentar a lo largo de los últimos años en España. Además, dentro de Europa, se observa que España es el país con mayores indemnizaciones por daños generados por el granizo. Es probable que las pérdidas totales anuales oscilen entre 30 y 60 millones de euros.

Según AGROSEGURO (Agrupación Española de los Seguros Agrarios Combinados), en comparación con otros riesgos, el granizo es el responsable del mayor porcentaje de siniestros en la agricultura dentro de España (en torno al 45 % de los siniestros nacionales), por delante de los incendios, las heladas, la sequía, el viento, las inundaciones, etc. En la Comunidad Autónoma de Aragón, se supera la media nacional ya que en torno al 55 % de los siniestros registrados son debidos al granizo.

Dada la cuantía de los daños y la tendencia al alza de los mismos, es muy importante la predicción, la observación y la vigilancia de las tormentas de granizo. Una adecuada estrategia puede permitir disminuir el impacto social y económico que producen las precipitaciones de granizo.

En primer lugar, la predicción de las tormentas de granizo, o más bien, de las condiciones favorables para su formación (humedad, inestabilidad y mecanismo de disparo, según Johns y Doswell III, 1992) y desarrollo se realiza a través de *modelos meteorológicos* sinópticos y a mesoescala como el MM5 (*Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model*, es decir, *Modelo a Mesoescala de Quinta Generación*, Grell et al., 1994; Dudhia et al., 2004), el GFS (*Global Forecasting System*, es decir, *Sistema de Predicción Global*) o el ECMWF (*European Center for Medium-Range Weather Forecast*, es decir, *Centro Europeo para la Predicción Meteorológica a Medio Plazo*). Sin embargo, no siempre que se cumplen los criterios de humedad e inestabilidad, se acaban produciendo tormentas, por lo que el pronóstico de fenómenos tormentosos no resulta sencillo.

En segundo lugar, la observación de este hidrometeoro en el suelo se puede llevar a cabo a través de los datos de los daños facilitados por las *aseguradoras agrícolas*, de los datos proporcionados por *informadores* o de los datos numéricos medidos en sensores meteorológicos específicos llamados *granizómetros*. Además, la observación de los sistemas tormentosos que producen granizo se efectúa mediante sensores remotos como el *radar meteorológico*. La ventaja de este último respecto a los anteriores es que realiza la observación de forma automática en áreas extensas independientemente de si están pobladas o no.

Por último, para el desarrollo de la vigilancia de dicho fenómeno meteorológico se necesitan herramientas que permitan el seguimiento de las tormentas y de sus precipitaciones en tiempo real, así como de su intensidad y características.

Por ello, debido a la gran importancia de estos tres aspectos, está justificada la creación de herramientas que permitan predecir, observar y vigilar la precipitación del granizo. Así, el principal objetivo de la presente Tesis Doctoral consiste en hallar una herramienta que estime la intensidad de las granizadas en tiempo real a través del radar meteorológico.

1.2. EL GRANIZO

El objeto de estudio de esta Tesis Doctoral es el *granizo*, hidrometeoro sólido con diámetro mayor de 5 mm. Huschke (1959) lo definió en el *Glosario de Meteorología* de la *Asociación Americana de Meteorología* (AMS) como “una bola o terrón regular de hielo con un tamaño entre un guisante y un pomelo”.

Los procesos de formación del granizo han sido estudiados por muchos autores (por ej.: Browning, 1963, 1977; Browning y Foote, 1976; Nelson, 1983; Foote, 1984; List, 1986; Cheng y Rogers, 1988; Rogers y Yau, 1989; Conway y Zrnica, 1993; Brandes et al., 1995; Bringi et al., 1996; Hubbert et al., 1998; Knight y Knight, 2001). Se trata de un proceso complicado ya que la dinámica y la termodinámica de la tormenta interaccionan con los procesos microfísicos de las nubes. La primera condición necesaria es la existencia de una corriente ascensional fuerte que soporte las piedras de granizo creciendo. Así, a mayor CAPE (del inglés, *Convective Available Potential Energy*, es decir, *energía convectiva potencial disponible*), más posibilidades de que se forme granizo de gran tamaño en una tormenta. De forma muy simplificada la formación del granizo se produce en dos etapas bien diferenciadas: la formación del *embrión de granizo* en la *región de formación de embriones* (EFR, del inglés *Embryos Formation Region*); y el crecimiento del mismo en la *región de crecimiento de granizo* (HGR, del inglés *Hail Growth Region*). La velocidad de la corriente ascensional está relacionada con el tamaño alcanzado por el granizo (Johns y Doswell III, 1992). Sin embargo, las corrientes mayores de 40 m s^{-1} son demasiado fuertes para mantener los hidrometeoros suficiente tiempo en la *región de crecimiento* para que alcancen grandes tamaños (Miller et al., 1988). De hecho, Nelson (1987) comprobó que las tormentas que presentan regiones anchas con corrientes ascensionales moderadas de 20 a 40 m s^{-1} son las más adecuadas para producir granizadas considerables que las que tienen corrientes fuertes pero más estrechas.

Figura 1.1. Número estimado de días al año con condiciones favorables para el desarrollo de tormentas severas.
(Fuente: Brooks, 2004)

Respecto a su climatología, muchos estudios señalan que las tormentas de granizo se desarrollan mayoritariamente en verano, durante la tarde o la noche, es decir, cuando la inestabilidad atmosférica es máxima y aparecen los mecanismos de disparo. Además, son más frecuentes en el interior de los continentes que en las zonas costeras, y en latitudes medias que en los polos, debido a que la formación de corrientes ascendientes fuertes se ve favorecida. Algunas de las regiones más expuestas a los daños provocados por el granizo y donde se han realizado estudios sobre el mismo se reparten por varios continentes: Dakota del Norte en Estados Unidos, Alberta en Canadá (Etkin y Brun, 1999; Ragette, 1973), Mendoza en Argentina (Pérez, 2007), Sydney en Australia (Schuster et al., 2005), el norte de Italia (Giaiotti et al., 2003), Grecia (Sioutas y Flocas, 2003) y el noreste de la Península Ibérica (López et al., 2001). Brooks (2004) utilizó los reanálisis de los modelos meteorológicos para definir las situaciones favorables para el desarrollo de tiempo severo en superficie y obtener la distribución espacial de las zonas con mayor probabilidad de tormentas severas en el mundo (figura 1.1). Así, las zonas con mayor probabilidad se observan en las grandes llanuras de Estados Unidos, el NW de Argentina, regiones cercanas al Himalaya y la zona oriental de África. También tienen cierta probabilidad la parte meridional de Europa y la costa australiana (excepto la parte sur).

De hecho, en nuestro país, Rivas et al. (2001) concluyeron que el cuadrante nororiental es la zona de la Península Ibérica donde más frecuentemente se producen situaciones de convección profunda. Esto se corresponde con los mapas de daños por granizo de AGROSEGURO, que señalan al Valle Medio del Ebro como la zona de la geografía española con mayor riesgo de granizo.

Sin embargo, no sólo el medio ambiente atmosférico afecta al hombre. El hombre también puede causar efectos en el ambiente (Duplessy, 2001). Por ejemplo, Changnon (1973) afirmó que las actividades industriales incrementan la temperatura, la cantidad de núcleos de condensación y congelación y la cantidad de vapor de agua, potenciando las corrientes ascensionales y por tanto, la convectividad. También Changnon (1978) concluyó que en verano las ciudades afectan a la precipitación y las tormentas en una distancia de al menos 40 km, aumentando la frecuencia de tormentas de granizo del 3 al 330 %. En cambio, Goudi (1990) comparando tormentas convectivas en zonas urbanas y rurales, observó que el porcentaje de estas últimas aumenta de un 67 a un 430 %. Por el contrario, otros autores como Dessens et al. (2001) señalaron que durante los fines de semana, cuando la actividad industrial es más reducida, la frecuencia de tormentas de granizo es mayor.

Por otro lado, el cambio climático también puede estar dando lugar a un incremento del número de tormentas severas (Dessens, 1995). Mossmann et al. (2004) observaron un aumento significativo de la precipitación convectiva en el sur de la Península Ibérica.

Como se adelanta en el apartado anterior, debido a los daños producidos por el granizo en muchos sectores y sus grandes repercusiones económicas, resulta completamente necesaria la detección del mismo. Por ejemplo, en Aragón, se estima que se pierde por el granizo entre el 7 y el 10 % de la producción agrícola anual, lo que supondría más de 6 millones de euros de pérdidas económicas.

La observación del granizo no presenta muchas complicaciones, pero su detección y medida, tanto por métodos directos como indirectos, no es un asunto menor. De hecho, existe escasa información sobre la caída de granizo dado que se trata de un fenómeno a pequeña escala, afectando áreas muy localizadas. Respecto a nuestro estudio, para la caracterización de las precipitaciones en forma de granizo se debe tener en cuenta, por un lado, la medida de ese hidrometeoro en el suelo, y por otro, el estudio de la tormenta que lo ha producido.

Así, resulta fundamental aplicar instrumentación que proporcione una correcta medida del granizo que llega al suelo. Para ello, se utilizan los sensores meteorológicos denominados *granizómetros*, desarrollados inicialmente por Schleusener y Jennings (1960). El número y el tamaño de las piedras de granizo registradas en estas placas están directamente relacionados con la energía de las mismas, y en cierta medida, con el daño que producen. Por ello, en los estudios sobre tormentas

severas, en primer lugar se analiza la distribución de los tamaños de las piedras de granizo y adicionalmente, se calcula la distribución de la energía del granizo.

Por otro lado, la observación y detección a tiempo real de tormentas de granizo se realiza a través de diferentes sistemas, entre ellos, los *radares meteorológicos* de diferentes bandas. En éstos, se pueden implementar ciertos algoritmos para obtener las variables de las tormentas. Desde los años 70, se han planteado relaciones teóricas y semiempíricas para calcular la *energía cinética* del granizo medida en el suelo a partir de ciertas variables de radar.

Por tanto, es necesario el estudio de las tormentas de granizo tanto para conocer los procesos que las provocan, como para medir y prever sus consecuencias. El conocimiento adquirido proporciona información para otros estudios, así como tiene valor por sí mismo, permitiendo profundizar en el entendimiento del Medio Ambiente del que formamos parte.

1.3. OBJETIVOS DE LA TESIS DOCTORAL

Para trazar los objetivos de esta Tesis Doctoral, se han tenido en cuenta los resultados encontrados en trabajos anteriores realizados en el Grupo de Física de la Atmósfera de la Universidad de León. Especialmente, aquellos que tienen en cuenta la caracterización de las precipitaciones de granizo en el suelo y la identificación de los procesos que tienen lugar en el interior de las tormentas.

Los objetivos generales que se pretenden alcanzar con este trabajo son los siguientes:

- Caracterizar las precipitaciones de granizo en distintas latitudes del mundo y proceder a su comparación.
- Seleccionar y agrupar las *variables radar* que expliquen los valores de la *energía cinética* del granizo en el suelo.
- Desarrollar algoritmos que pronostiquen, a partir de *variables radar*, la *energía cinética* de las piedras precipitantes.

Para la consecución de estos objetivos, se seleccionan tres áreas de estudio distintas en las que resultan ser frecuentes e intensas las caídas de granizo: el Valle Medio del Ebro, las zonas de la ANELFA (*Asociación Nacional de Estudio y de Lucha contra las Adversidades Atmosféricas*) de Francia y la provincia de Mendoza en Argentina. En total se dispone de ocho redes diferentes de sensores de granizo (en lo sucesivo, *granizómetros*). Con las bases de datos correspondientes, se caracterizan los espectros de tamaños y de energía cinética de las piedras precipitantes.

Además, en el Valle Medio del Ebro se utiliza un radar de la banda C y en el caso de Mendoza otro de la banda S. En ambos, se emplea el mismo tipo de software de adquisición de datos y metodología. Con ello se pueden comparar las *variables radar* que explican los valores de la *energía cinética* en el suelo. Finalmente en el caso del radar de la banda S, se construye un algoritmo que pronostica la energía del granizo precipitado.

En esta Memoria de Tesis Doctoral se exponen los resultados encontrados y las conclusiones obtenidas a partir de ellos.

1.4. MARCO DEL TRABAJO

Cabe destacar que el presente trabajo de Tesis Doctoral surge en el marco de sendos proyectos de investigación, todos ellos financiados por la CICYT (Comisión Interministerial de Ciencia Y Tecnología). Para más información sobre dichos proyectos, se puede consultar la lista de abreviaturas y acrónimos (glosarios).

El primero de ellos, desarrollado entre 2001 y 2003, es el abreviado PAIRAGRA, cuyo título completo es *“Desarrollo de metodologías y de sus aplicaciones para el Pronóstico, Análisis e Identificación mediante un Radar meteorológico de Alta resolución temporal, de las precipitaciones de GRANizo que afectan al Valle Medio del Ebro”*. Sus objetivos fueron crear una metodología que identifique tormentas que generan granizo, desarrollar modelos de predicción de situaciones de riesgo de caída de granizo e identificar situaciones meteorológicas que puedan dar lugar a precipitaciones intensas. Los resultados del proyecto fueron recogidos en la Tesis Doctoral de López (2003), que desarrolló un modelo logístico de probabilidad de caída de granizo, actualmente operativo a tiempo real.

A continuación, entre 2004 y 2006, se llevó a cabo el proyecto abreviado MONEGRO, *“MODELIZACIÓN de la eNERgía cinética de las precipitaciones de GRANizo”*. Su objetivo era establecer un modelo de estimación de la *energía cinética* del granizo precipitado para un radar de la banda C, a partir de la verdad terreno obtenida haciendo uso de los granizómetros. En el marco de este proyecto se realizaron las campañas experimentales de toma de datos del presente trabajo.

Por último, el proyecto actualmente vigente (desde 2006 hasta 2009) para continuar con dichas investigaciones, es el conocido como SEVERUS, cuyo título completo es *“Observaciones, análisis y modelización de las situaciones de granizo sobre el NE Peninsular”*.

Por otro lado, se deben tener en cuenta los convenios con diferentes organismos internacionales como son la *Asociación Nacional de Estudio y de Lucha contra las Adversidades Atmosféricas* (ANELFA) de Francia y la *Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas* (DACC) de Mendoza (Argentina). Ambos entes se ocupan desde hace tiempo del estudio del granizo y sus efectos en la agricultura y desarrollan la lucha antigranizo de manera activa. Para estos propósitos, existen sendas redes de granizómetros que proporcionan datos objetivos sobre las granizadas. Estos datos han sido provistos al Grupo de Física de la Atmósfera para el estudio de los mismos y para su comparación con el área de estudio española.

1.5. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La presente Memoria de Tesis Doctoral consta de un resumen, siete capítulos, las conclusiones, los glosarios y el anexo I con una publicación.

En primer lugar, aparece el resumen del presente trabajo, y el correspondiente *summary* en inglés para cumplir con los requisitos de la Mención Europea.

El capítulo 1 realiza una breve introducción para enmarcar el tema de estudio. También señala los objetivos planteados inicialmente, el marco en el que se desarrolla la investigación y la estructura de esta Memoria.

El capítulo 2 recopila los materiales y métodos empleados en el estudio, detallando las características de los granizómetros y de los radares meteorológicos. Además, se describen las tres áreas de estudio a las que se hace referencia a lo largo de los demás capítulos.

El capítulo 3 especifica la metodología llevada a cabo, desde la obtención de los datos a través de las campañas experimentales, pasando por la preparación y depuración de los mismos, hasta la creación de las dos bases de datos más importantes del estudio a partir de las cuales se realizan los posteriores análisis.

El capítulo 4 pretende caracterizar las tormentas que producen granizo en las dos áreas de estudio más importantes (Aragón y Mendoza), a través del estudio de su distribución temporal, de su distribución espacial y de su intensidad en las redes de granizómetros.

El capítulo 5 presenta los resultados obtenidos respecto a las distribuciones de tamaños del granizo en el Valle Medio del Ebro y comparado con otras zonas como son Francia y Argentina. La publicación fruto de este trabajo se adjunta como anexo al final de la Memoria. También en este capítulo se estudian las distribuciones de *energía cinética* en las redes de granizómetros españolas y argentinas.

El capítulo 6 trata diferentes aspectos de las variables medidas por el radar meteorológico (denominadas *variables radar*), y su relación con la *energía cinética* y el *diámetro máximo* del granizo medidos en los granizómetros. Así, se realiza un estudio pormenorizado del comportamiento de dichas *variables radar*, para comprender su funcionamiento y poderlo aplicar en el siguiente capítulo.

El capítulo 7 se centra en el desarrollo de algoritmos que pronostican, a partir de *variables radar*, la *energía cinética* de las piedras de granizo. Los resultados encontrados se aplican a radares de la banda C y de la banda S.

A continuación, se presentan las conclusiones de la Tesis Doctoral. Al igual que el resumen, se traducen al inglés para optar a la Mención de Doctorado Europeo.

Para facilitar la lectura de la Memoria, se adjuntan los glosarios de figuras, tablas, ecuaciones, abreviaturas y acrónimos y símbolos y abreviaturas de variables.

Por último, formando parte del anexo I, se adjunta la publicación relativa a los *espectros de tamaños* del granizo a la que se hace referencia en el capítulo 5.

1.6. BIBLIOGRAFÍA

- Brandes, E., Vivekandan, A.J., Tuttle, J.D. and Kessinger, C.J. 1995. A study of thunderstorm microphysics with multiparameter radar and aircraft observations. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 3129 – 3143.
- Bringi, V.N., Piu, L., Kennedy, P.C., Chandrasekar, V. and Rutledge, S.A., 1996. Dual multiparameter radar observation of intense convective storms: The 24 June 1992 case study. *Meteor. Atmos. Phys.* **59**, 3 – 31.
- Brooks, H.E., 2004. Estimating the distribution of severe thunderstorms and their environments around the world. *Preprints, International Conference on Storms, Brisbane, Queensland, Australia*.
- Browning, K.A. 1963. The growth of large hail within a steady updraught. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **89**, 490 – 506.
- Browning, K.A., and Foote, G.B., 1976. Airflow and hail growth in supercell storms and some implication for hail suppression. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **102**, 499 – 533.
- Browning, K.A., 1977. *The structure and mechanisms of hailstorms. Hail a Review of hail Science and hail Suppression*. Meteor. Monogr., Amer. Meteor. Soc., **38**, 1 – 43.

- Changnon, S.A., 1973. Atmospheric alterations from man-made biospheric changes. *W.R.D. Sewell (ed.), Modifying the weather: a social assessment*. Adelaide, University of Victoria, 135 – 184.
- Changnon, S.A., 1978. Urban effects on severe local storms at St Louis. *J. Appl. Meteorol.*, **17**, 578 – 586.
- Cheng, L. and Rogers, D.C., 1988. Hailfalls and Hailstorm feeder clouds- An Alberta case study-. *J. Atmos. Sci.* **45**, 3533 – 3545.
- Conway, J.W. and Zrnic, D.S. 1993. A study of embryo production and hail growth using dual-Doppler and multiparameter radars. *Mon. Wea. Rev.* **121**, 2511 – 2528.
- Dessens, J., 1995. Severe convective weather in the context of a nighttime global warming. *Geophys. Res. Letters*, **22**, 1241 – 1244.
- Dessens, J., Fraile R., Pont V. and Sánchez J.L., 2001. Day-of-the-week variability of hail in southwestern France. *Atmos. Res.*, **59 – 60**, 63 – 76.
- Dudhia, J., Gill D., Manning, K., Wang W. and Bruyere, C., 2004. PSU/NCAR Mesoscale modeling system. Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3. Disponible en <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/documents/tutorial-v3-notes.html>
- Duplessy, J.C., 2001. État des connaissances et incertitudes sur le changement climatique induit par les activités humaines. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **333**, 765 – 773.
- Etkin, D. and Brun, S.E., 1999. A note on Canada's hail climatology: 1977-1993. *J. Climatol.*, **19**, 1357 – 1373.
- Foote, G.B., 1984. A study of hail growth utilizing observed storms conditions. *J. Clim. Appl. Meteor.*, **23**, 84 – 101.
- Giaiotti, D., Nordio, S. and Stel, F., 2003. The climatology of hail in the plain of Friuli Venezia Giulia. *Atmos. Res.*, **67 – 68**, 247 – 259.
- Goudie, A.S., 1990. *The Human Impact on the Natural Environment*. The MIT Press, Massachusetts, 387 pp.
- Grell, G. A., Dudhia J. and Stauffer, D. R., 1994. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR, 117 pp.
- Hubbert, J., Bringi, V.N., Carey, L.D and Bolen, S., 1998. CSU-CHILL polarimetric radar measurements from a severe hail storm in Eastern Colorado. *J. Appl. Meteor.*, **37**, 749 – 775.
- Huschke, R.E., 1959. *Glossary of meteorology*. Amer. Meteorol. Soc., 638 pp.
- Johns, R.H. and Doswell III C.A., 1992. Severe local storms forecasting. *Wea. and Forecasting*, **7**, 588 – 612.
- Knight, C.A. and Knight, N.C., 2001. Hailstorms. *Severe Convective Storms. Meteor. Monogr.*, Vol 28, No. 50, Amer. Meteor. Soc., 223 – 254.
- List, R., 1986. *Properties and growth of hailstones*. Thunderstorm Morphology and Dynamics, E. Kessler, Ed., University of Oklahoma Press, 259 – 276.
- López, L., J.L. Marcos, J.L. Sánchez A. Castro y R. Fraile, 2001. CAPE values and hailstorms on northwestern Spain. *Atmos. Res.*, **56**, 147 – 160.
- López, L., 2003. Convección atmosférica severa: pronóstico e identificación de tormentas con granizo. *Tesis Doctoral*, Universidad de León, 207 pp.
- Miller, L.J., Tuttle, J.D. and Knight, C.A., 1988. Airflow and hail growth in a severe northern High Plains supercell. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 736 – 62.
- Mossmann, V., Castro, A., Fraile, R., Dessens, J. and Sánchez, J.L., 2004. Detection of statistically significant trends in the summer precipitation of mainland Spain. *Atmos Res.*, **70**, 43 – 53.
- Nelson, S.P., 1983. The influence of storm flow structure on hail producer. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1965 – 1983.
- Nelson, S.P., 1987. The hybrid multicellular-supercellular storm - an efficient hail producer. Part II. General characteristics and implications for hail growth. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 2060 – 2073.

- Pérez, R.C., 2007. *Dinámica atmosférica y los procesos tormentosos severos*, Universidad Tecnológica Nacional de Mendoza, 137 pp.
- Ragette, G., 1973. Mesoscale Circulations Associated with Alberta Hailstorms. *Mon. Wea. Rev.*, **101**, 150 – 159.
- Rivas, L.J., de Pablo, F. and García, E., 2001. Meteorological and geo-orographical relationships with lightning activity in Castilla-León (Spain). *Meteorol. Appl.*, **8**, 169 – 175.
- Rogers, R.R. and Yau, M.K., 1989. *A short course in cloud physics*. 3d ed. Elsevier, 290 pp.
- Schleusener, R.A. and Jennings, P.C., 1960. An energy method for relative estimates of hail intensity. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **41**, 372 – 376.
- Schuster, S.S., Blong, R.J. and Speer, M.S., 2005. A hail climatology of the greater Sydney area and New South Wales, Australia. *J. Climatol.*, **25**, 1633 – 1650.
- Sioutas, M.V. and Flocas, H.A., 2003. Hailstorms in Northern Greece: synoptic patterns and thermodynamic environment. *Theor. Appl. Climatol.*, **75**, 189 – 202.

2

DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

2.1. INTRODUCCIÓN

Antes de entrar de lleno en el estudio de caracterización de las precipitaciones en forma de granizo realizada en este trabajo, en este capítulo se exponen las formas de medición directa e indirecta de dicho meteoro.

Por un lado, se describen los métodos de medida directa de granizo en el suelo, centrándonos en el más ampliamente utilizado, el denominado *granizómetro*, y detallando las características de las redes de estos sensores que proporcionan los datos para el presente estudio. Debido a que las granizadas están ampliamente distribuidas y presentan grandes variaciones temporales, mayores que las de la precipitación líquida, la observación y medida del granizo en el suelo es difícil de conseguir.

Por otro lado, los sensores remotos instalados en algunos satélites o los radares meteorológicos permiten efectuar el seguimiento de las tormentas y estimar, de forma indirecta, aquellas con granizo. Por ello, en este capítulo también se fijan las bases teóricas del *radar meteorológico* como instrumento que posibilita desarrollar técnicas de detección de granizo, especificándose también los radares empleados en el estudio.

2.2. OBSERVACIÓN Y MEDIDA DE GRANIZO EN EL SUELO

Para realizar un estudio sobre el granizo, además de analizar las tormentas que lo generan, es necesario registrar la precipitación en el suelo y sus características. Se trata de conocer de la manera más exacta posible la llamada *verdad terreno* y por tanto, se necesita una amplia base de datos sobre la misma.

De hecho, la medida de granizo en el suelo presenta gran importancia tanto en el ámbito de la meteorología como en otros campos directa o indirectamente relacionados. Así, el hecho de poseer una correcta medida es fundamental para el estudio de la climatología del granizo de un área concreta, para el establecimiento de las relaciones entre las tormentas y sus precipitaciones, para la calibración de modelos de identificación y predicción de granizo y por último, para el análisis de riesgos de las compañías de seguros.

Así, a lo largo de la historia se ha recurrido a diferentes y variados sistemas para medir el granizo en el suelo: almacenamiento en congeladores (Douglas, 1963), láminas de papel de aluminio (Schleusener y Jennings, 1960), fotografía de piedras de granizo recién caídas, sensor electrónico del momento (Dennis, 1971), espectrómetros de lluvia y granizo (Federer y Waldvogel, 1975), etc.

A continuación, se describen los tres métodos tradicionalmente más utilizados para la medida de este hidrometeoro en el suelo. El más clásico consiste en la observación directa a través de una red de *observadores*. Sin embargo, no deja de ser una estimación subjetiva. Históricamente, también se ha recurrido a datos estadísticos proporcionados por los *seguros agrarios*, aunque sólo son parcialmente fiables debido al propio sesgo de la muestra ya que únicamente se consideran parcelas aseguradas. Por último, los sensores de granizo o *granizómetros* proporcionan una medida más objetiva, aunque más complicada de obtener que los métodos anteriores.

A parte de estos tres métodos más comunes, los *espectrómetros de granizo* fueron utilizados para registrar las distribuciones de tamaño de granizo en experimentos especiales como el llevado a cabo por Federer y Waldvogel (1975) o Waldvogel et al. (1978a). El dispositivo consiste en una plataforma móvil de 40 x 40 cm, sobre la que una cámara automática graba cada 30 segundos las piedras de granizo caídas. Una vez que la plataforma está saturada tras ese periodo, la superficie cambia automáticamente. La gran limitación de este método es su costoso mantenimiento.

2.2.1. OBSERVADORES

El estudio del granizo se ve dificultado por su carácter local y su corto periodo de vida (Smith y Waldvogel, 1989). Por ello, en los primeros trabajos realizados sobre tormentas con granizo usando radares meteorológicos, se emplearon redes de observadores voluntarios para evitar estos inconvenientes (Donaldson, 1990). Otros autores (Changnon, 1977; Nicholas, 1977; Vento et al., 1983) también utilizaron estos datos para estudiar la climatología del granizo.

En primer lugar, es necesario aclarar que este tipo de redes informa sobre la *existencia* o no de precipitación en forma de granizo sobre una determinada zona. También proporciona la *hora* de la granizada (Vento et al., 1983) y los *tamaños máximos* de granizo en el suelo detectados por los observadores.

La fiabilidad de los datos obtenidos a través de las redes de informadores fue discutida por Changnon (1971a). A pesar de cierta subjetividad, Changnon (1971b) obtuvo correlaciones significativas entre distintos parámetros de granizo estimados de esta forma y los daños en los cultivos. Charlton et al. (1995) concluyeron que los observadores cometen una sobreestimación del tamaño máximo del granizo del orden del 20 %.

En la Península Ibérica, las precipitaciones en forma de granizo se producen normalmente de forma local, es decir, afectan a extensiones de unos pocos miles de hectáreas (Font, 1983; García de Pedraza, 1964). Font (1983) se basó en los datos de la red de observatorios del antiguo Instituto Nacional de Meteorología (INM) para identificar las zonas más afectadas por el granizo dentro de la Península Ibérica. Dentro de éstas, se encuentran la comunidad de Aragón y la provincia de Lérida, las cuales son objeto de estudio en este trabajo.

Según Font (1983), la probabilidad de que granice en un lugar determinado es siempre baja. Por ello, al registrar la frecuencia de granizo en un lugar de observación concreto, el número de días es pequeño. En cambio, si se amplía el lugar de observación a un área de algunas decenas de kilómetros, el número de días sería mayor y más representativo de la frecuencia de caída de granizo.

Por lo tanto, para tener constancia de la caída de granizo con cierta rigurosidad, se necesita una densa red de informadores en el área de estudio. De esta forma, cuanto más densa sea, menor será la probabilidad de que precipite granizo entre dos observadores sin que ninguno de ellos lo registre. Aún así, con un número de informadores elevado no se puede afirmar que se posean los datos de todas las granizadas ocurridas. No obstante, esas granizadas no localizadas tendrán una extensión reducida y el granizo será previsiblemente pequeño.

A la hora de emplear la información obtenida a través de este método, la mayor dificultad es la derivada de la heterogeneidad espacial de la distribución de los informadores. En realidad, la red de observadores viene dada por la ubicación de las localidades en las áreas de estudio. Por ello, la densidad de población en el área condiciona la representatividad de la red. Por ejemplo, Wyatt y Witt (1997) estudiaron regionalmente la medida en la que densidad de población afecta a la información de los observadores. En las zonas rurales con menor densidad, los problemas de verificación son difíciles de solventar. Por otro lado, además de las propias localidades, las infraestructuras asociadas a vías de comunicación, como gasolineras o áreas de servicio también pueden proporcionar información, muy valiosa en zonas despobladas.

Algunos autores como Sánchez et al. (1991) llevaron a cabo un método de información diaria para comprobar la precipitación en el suelo. En cada municipio y a diario, un informador enviaba por correo una tarjeta describiendo las características meteorológicas de cada día. Entre otras, se indicaba la presencia de granizo y su diámetro aproximado.

En el presente estudio como en otros muchos (por ejemplo, los proyectos PAIRAGRA y MONEGRO, previamente citados), la información de los observadores únicamente se utiliza para la comprobación de los lugares en los cuales se han producido precipitaciones de granizo y para poder efectuar una estimación del tamaño máximo. De esta forma, la cobertura espacial es más extensa que solamente utilizando redes de granizómetros. Para ello, inicialmente, se localizan geográficamente las tormentas en el radar y en tiempo real se siguen las trayectorias. Paralelamente, se realizan llamadas telefónicas al azar dentro de las localidades potencialmente afectadas. Se les pregunta a los observadores si ha granizado y cuál es el tamaño aproximado de las piedras, comparándolas con objetos cotidianos (tabla 2.1). Además, gracias a la localización a través del radar y apoyados por la información de los observadores de localidades situadas dentro de la red de granizómetros, se acude a revisar y recoger los granizómetros posiblemente afectados por la tormenta. Esta metodología se detalla en el capítulo 3 de la presente Memoria.

Se trata de un sistema económico que mejora la calidad de la base de datos. La hora de la granizada es bastante fiable ya que el contacto telefónico suele ser en *tiempo real*. Además, es efectivo en los solapamientos de tormentas, ya que si se suceden varias tormentas sobre la misma área geográfica en un periodo corto de tiempo, se puede conocer la precipitación de cada una de ellas.

En resumen, los datos aportados por una red de observadores son:

- Presencia o ausencia de granizo.
- Tipo de granizo (húmedo o seco).
- Hora de granizada.
- Tamaño máximo observado.
- Área aproximada afectada por la granizada.

Tabla 2.1. Equivalencias de tamaño utilizadas en la interpretación de los datos obtenidos a partir de encuestas telefónicas.

Tamaño observado	Tamaño de granizo equivalente
Lenteja	0.5 cm
Garbanzo	0.5 cm – 1.5 cm
Avellana o cereza	1.5 cm – 2 cm
Nuez	2 cm – 3 cm
Superior a nuez	> 3 cm

La mayor dificultad que entraña este método es la estimación del tamaño representativo del granizo en una zona, debido a la gran subjetividad en su estimación por parte de los observadores.

2.2.2. ASEGURADORAS AGRÍCOLAS

A lo largo de la historia, los principales proveedores de datos de granizo en el suelo han sido, además de los servicios meteorológicos oficiales, las entidades aseguradoras, a través de los informes de daños causados por el granizo. De hecho, todavía actualmente se utilizan los datos de las aseguradoras en estudios del granizo (Holleman et al., 2000).

Estos datos presentan una serie de limitaciones. En primer lugar, únicamente se refieren a las parcelas aseguradas y, por tanto, pueden variar de año en año. Además, las bases de datos sólo se refieren a aquellas tormentas de granizo que hayan causado daños en las parcelas aseguradas y que cumplan las condiciones del contrato correspondiente. Así, se produce un sesgo importante. Las aseguradoras sólo registran zonas dañadas en función del tipo de cultivo afectado. Por ejemplo, puede

haber grandes diferencias entre zonas de frutales y cereales. También hay que conocer el estado vegetativo de la planta.

2.2.3. GRANIZÓMETROS

2.2.3.1. Sensor meteorológico

Desde la década de los 60, se han utilizado instrumentos para medir parámetros relacionados con el granizo como el tamaño, la energía, la velocidad de caída, etc. (Changnon, 1969; Towery y Changnon, 1974; Nicholas, 1977). Sin embargo, la mayoría de ellos son demasiado costosos (Towery y Changnon, 1974). En realidad, se necesita un sistema de medida más objetivo que las redes de observadores, que sea sencillo y barato y que pueda ser usado en amplias zonas de estudio. En la actualidad y desde hace varias décadas, el sensor más apropiado debido a su simplicidad, bajo coste y uso sencillo, es el llamado *granizómetro* (*hailpad* en inglés). A lo largo de muchos años, ha sido utilizado por numerosos grupos de investigación (por ej: Changnon, 1969; Morgan y Towery, 1975; Strong y Lozowski, 1977; Waldvogel et al., 1978b; Mezeix y Admirat, 1978; Mezeix y Doras, 1981; Dessens, 1986; Smith and Waldvogel, 1989; Fraile et al., 1999; Vinet, 2001; Giaioti et al., 2001).

Figura 2.1. Esquema de un granizómetro.
(Fuente: Fraile et al., 1992)

Figura 2.2. Granizómetro de la red de Lérida. (Fuente: ADV Terres de Ponent)

Figura 2.3. Granizómetro de la red de Zaragoza.

El denominado *granizómetro* fue desarrollado por Schleusener y Jennings (1960). Originalmente consistía en una placa de un material aislante para la construcción llamado *Styrofoam*[®], cubierta por una lámina de aluminio para evitar su deterioro debido a la exposición a la intemperie. Así, la radiación no

degradaba el material en pocos días. Long et al. (1980) también describieron detalladamente este sensor.

Actualmente se pueden encontrar distintos tipos de granizómetros según el material sensible utilizado, las dimensiones (el área de muestreo) y la forma de sujeción al soporte metálico sobre el que se colocan las placas en el campo (figuras 2.1, 2.2 y 2.3). Por ejemplo, Fraile et al. (1992) describieron detalladamente los granizómetros usados en la red de la provincia de León para el estudio de la climatología de las tormentas.

Estas placas de material sensible están colocadas sobre un soporte metálico horizontal, que está anclado al suelo por medio de un pie metálico central.

A través del radar meteorológico y de las llamadas telefónicas a los observadores, se puede llegar a conocer cuándo una tormenta de granizo ha afectado una zona. Entonces, en el menor plazo posible de tiempo, se revisan y reemplazan los granizómetros impactados.

Las piedras de granizo impactan sobre la placa dejando registradas determinadas zonas hundidas en la superficie (figura 2.4). Estas huellas tienen una forma aproximadamente elíptica. Según Fraile (1991), los ejes mayor y menor se pueden relacionar con el tamaño del sólido incidente.

Figura 2.4. Placa impactada después de su entintado.

Anteriormente, se usaba un sistema de medida manual de los impactos gracias a una tableta digitalizadora. Era un trabajo laborioso que requería mucho tiempo. Debido a estas desventajas, actualmente se trabaja con un sistema de medida semiautomática que agiliza el proceso de medida. Este proceso se detalla en el apartado 3.3.2 del capítulo 3 de metodología.

Finalmente, una red de granizómetros aporta la siguiente información:

- Presencia o ausencia de granizo.
- Tamaño máximo calculado.
- Número de impactos ($N^\circ \text{ impactos m}^{-2}$).
- Masa total de granizo precipitada (g m^{-2}).
- Energía cinética total (J m^{-2}).
- Área granizada.
- Histogramas de tamaño de granizo ($N^\circ / \text{rango de tamaño}$).
- Parámetros del ajuste a la distribución exponencial.
- Parámetros del ajuste a la distribución gamma.

Así, los datos proporcionados por una red de granizómetros evitan gran parte de la subjetividad propia de una red de observadores, sobre todo en cuanto a la estimación del tamaño del granizo, permitiendo no sólo conocer el diámetro más frecuente sino también la distribución de tamaños. Aún así, el uso de los granizómetros también presenta una serie de limitaciones.

El mayor inconveniente es la falta de resolución temporal. Así, datos de dos granizadas distintas pueden solaparse. Esto sucede cuando dos tormentas han descargado sobre el mismo granizómetro en un intervalo de tiempo muy reducido y no ha sido posible reemplazar la placa.

También, el solapamiento de las huellas representa un problema importante en granizadas con muchos impactos o bien impactos de gran tamaño o granizadas de una duración considerable en el tiempo.

Además, los datos provenientes de los granizómetros pueden estar afectados por errores provocados por las premisas adoptadas en la calibración y la medida (Lozowski et al., 1978; Vento, 1978) o por la propia muestra (Changnon, 1973; Gertzman y Atlas, 1977; Vento y Morgan, 1980).

Es bien conocido que la precisión de las medidas realizadas en las placas de los granizómetros, está afectada por parámetros propios del granizo (tamaño, dureza, ángulo y forma), por la heterogeneidad del material sensible o de la pintura blanca protectora y por el revelado de los impactos con tinta negra. Por ello, se debe extremar el cuidado de toda la metodología para obtener datos representativos. Conviene señalar que en todas las redes de este estudio se emplean materiales previamente calibrados para comprobar la reproducibilidad de los datos.

Changnon, (1971a) comparó los datos procedentes de los granizómetros con los de observaciones directas del granizo. Observó que normalmente los observadores tienden a sobrestimar el tamaño del granizo con respecto a los datos calculados a partir de la red de granizómetros. Por el contrario, Smith y Walvogel (1989), hallaron que el máximo tamaño estimado por los dos métodos puede ser el mismo, sobre todo cuando hay gran cantidad de granizo precipitado y el tamaño no es muy grande (no más de 1.5 cm de tamaño máximo).

Estos resultados contrapuestos pueden deberse a la aleatoriedad del proceso de muestreo o a los efectos de la fusión (que influye más en los resultados de los observadores). Fraile et al. (2003) o Giaiotti y Stel (2006), estudiaron la influencia de la fusión en la distribución por tamaños.

En resumen, cada tipo de red presenta ventajas e inconvenientes. Por un lado, los granizómetros proporcionan datos más objetivos y medidas relativamente precisas, aunque no poseen resolución temporal, provocando el solapamiento de huellas o de granizadas. En cambio, los datos más subjetivos de los observadores evitan estas desventajas.

2.2.3.2. Características de los granizómetros del estudio

Una vez descrito el origen y la aplicación científica del granizómetro, se ha de señalar que para la realización de este estudio, se obtienen y analizan los datos de granizo procedentes de ocho redes de granizómetros situadas en diferentes regiones del mundo: dos en España, tres en Argentina y tres en Francia. Su localización se describe en el siguiente apartado.

Todos los granizómetros utilizados en el estudio consisten en una placa rectangular de material aislante para la construcción llamado *Styrofoam Wallmate CW*[®], en su variante de 3 cm de grosor en el caso de España y Argentina y de 2 cm en Francia. Dichas placas tienen unas dimensiones fijas de 30 x 40 cm en España y Argentina, y de 30 x 42 cm en Francia. La superficie está recubierta por una pintura blanca mate de una densidad de 1.8 kg l⁻¹ para proteger el material de la luz solar, de los agentes atmosféricos y de la degradación mecánica.

En el caso de las placas españolas y argentinas, una banda metálica central sujeta la placa de material sensible al soporte metálico y protege una parte de la superficie de los impactos de granizo para la posterior calibración (figura 2.5), descrita en el capítulo de la metodología. Las dimensiones de

esta banda de calibración varían ligeramente para las diferentes áreas de estudio. Así, la superficie expuesta a los impactos es la diferencia entre la superficie total de la placa y la de la banda de calibración. En cambio, para las placas francesas, se realiza una calibración por lotes del material, por lo que no existe una banda de calibración.

Figura 2.5. Dimensiones de una placa de un granizómetro de la red de Zaragoza.

Una vez medidas las variables del granizo en la placa, se aplica un factor de corrección para obtener las variables por unidad de superficie, en vez de por granizómetro. En la tabla 2.2 se pueden consultar los valores numéricos de cada uno de los granizómetros de las diferentes redes.

Tabla 2.2. Características de los granizómetros de las ocho redes de granizómetros del estudio.

	Total		Banda de calibración		Expuesto	Factor de conversión
	Dimensiones (cm)	Superficie (cm ²)	Dimensiones (cm)	Superficie (cm ²)	Superficie (cm ²)	
Zaragoza	30 x 40	1200	4 x 30	120	1080	9.259
Lérida	30 x 40	1200	5 x 30	150	1050	9.524
Francia	30 x 42	1260	-	-	1040	9.615
Argentina	30 x 40	1200	5 x 30	150	1050	9.524

Figura 2.6. Estructura metálica de un granizómetro de la red de Zaragoza.

Como se indicaba anteriormente, las placas de material sensible están colocadas sobre un soporte metálico horizontal anclado a un metro del suelo (figura 2.6).

2.2.3.3. Redes de granizómetros del estudio

Dado que no es posible cubrir la totalidad de un área geográfica con granizómetros, solamente se instalan en una pequeña superficie localizada. El área y la densidad de la red de granizómetros se establecen de acuerdo con características de las tormentas de granizo que afectan a las respectivas regiones, teniendo en cuenta experiencias en otros proyectos anteriores y las limitaciones del mantenimiento. Así, se deben considerar (Fraile et al., 1992) las zonas con mayor probabilidad de granizo, la superficie media afectada y la existencia de una red de carreteras que permita el mantenimiento periódico.

En concreto, el estudio de espectros de tamaños y de energías del granizo se realiza utilizando los datos de la redes de granizómetros de España (provincias de Lérida y Zaragoza), Francia (zonas de la ANELFA, *Association Nationale d'Etude et de Lutte contre les Fléaux Atmosphériques*) y Argentina (provincia de Mendoza), mientras que la creación del modelo de estimación de energía cinética se lleva a cabo con datos de la red de granizómetros y del radar de la banda C de Zaragoza, y con los datos de la red del oasis sur de Mendoza y el radar de la banda S de San Rafael (situado en Mendoza, Argentina).

Se trata de tres zonas geográficamente alejadas y con características diferentes, que presentan el mayor interés para realizar estudios como el que se contempla en esta memoria. En total, se dispone de los datos de 8 redes de granizómetros: 2 en España, 3 en Francia y 3 en Mendoza.

Pese a la gran distancia que las separa, estas tres áreas tienen en común el hecho de verse afectadas por fuertes y/o frecuentes tormentas estivales. Así, a menudo, presentan precipitaciones en forma de granizo, que, en ocasiones, causan daños materiales, especialmente en la agricultura y las infraestructuras. Es por ello que el estudio del granizo cobra gran importancia en las mismas.

1. ESPAÑA

En España se dispone de dos redes de granizómetros, una instalada en el suroeste de la provincia de Zaragoza y otra instalada en la zona occidental de la provincia de Lérida, ambas estudiadas desde el mismo radar meteorológico situado en Zaragoza.

A. Situación geográfica

La zona de estudio (figura 2.7) se encuentra en el extremo nororiental de la Península Ibérica y comprende una extensión de unos 50000 km². Incluye la totalidad de la Comunidad de Aragón y la parte occidental de la provincia de Lérida. Dicha área se extiende aproximadamente entre los paralelos 39° 51' y 42° 55' de latitud N y los meridianos 2° 06' de longitud W y 0° 44' de longitud E.

Figura 2.7. Zona de estudio y alcance del radar meteorológico en Aragón.

B. Topografía

En general, el relieve de Aragón se caracteriza por una gran heterogeneidad (figura 2.8). Esta gran variedad se debe a su topografía contrastada, su constitución geológica compleja y su distribución climática particular (Peña, 2003).

Así, el área de estudio presenta grandes diferencias entre las partes más altas (Sistema Ibérico y Pirineos) con altitudes superiores a 1500 m e incluso los 3000 en Pirineos, y las zonas más bajas de la cuenca del Ebro con 150 m de altitud media.

Figura 2.8. Relieve de Aragón.

El norte de Aragón está delimitado por los Pirineos; el este, por las Cordilleras Catalanas; y el sur y el oeste, por el Sistema Ibérico. De esta forma, la cuenca del Ebro (figura 2.9) se encuentra cercada por

una *herradura orográfica*, solamente *abierta* a través de la zona del delta, en la parte baja del río. Así, la zona central está ocupada por el valle del Ebro, los somontanos del Pirineo y el Sistema Ibérico. A veces, es interrumpida por mesetas o *muelas* en el interior de la cuenca que pueden superar los 700 m de altitud.

Figura 2.9. Cuenca del Ebro. (Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro)

Se puede apreciar el alargamiento de los relieves de este a oeste en los Pirineos y de noroeste a sureste en la Cordillera Ibérica, debido a las líneas estructurales que los han originado. Por el contrario, la red fluvial tiende a disponerse de forma transversal buscando el nivel de base del Ebro. Así, la mayoría de los valles se encuentran en posición meridiana (Peña, 2003).

C. Climatología

Según la división de la Península Ibérica en regiones climáticas propuesta por Font (1983), la depresión del Ebro está englobada dentro de la llamada *subregión continental extrema*. Ésta comprende las tierras bajas de las provincias de Huesca, Lérida, Zaragoza, Teruel e incluso el extremo noroccidental de Tarragona.

La protección de las montañas evita la entrada de aire frío del noreste, influyendo en el régimen térmico. La temperatura media anual varía entre 6 y 14 °C para todo el año. En verano, la temperatura media es de 24 °C para todo el periodo estival (figura 2.10) y llega hasta los 34 °C en el mes de agosto. Además, las temperaturas mínimas en los meses de julio y agosto no bajan de 16 °C. De hecho, se registran valores de insolación altos, entre 2600 y 2900 horas anuales.

La precipitación estival (figura 2.11) es menor de 125 mm al año en la mayor parte de Aragón. La variación interanual del total de precipitación anual es muy acusada, pero en la mayor parte del área, no supera los 400 mm.

De hecho, dentro del área de estudio existen regiones consideradas áridas (con totales anuales inferiores a 300 mm). Capel (1981) definió dos áreas con un régimen climático árido: el *Núcleo del Oeste de Zaragoza* (al oeste de la capital y delimitado por Borja, Ricla, La Almunia de Doña Godina, la sierra de la Muela y el municipio de Alagón) y el *Núcleo del Bajo Ebro* (en el desierto de Calanda, englobando Híjar, Escatrón, Caspe y Alcañiz)

Figura 2.10. Temperatura media estival en Aragón.

También existe un acusado mínimo invernal. Por tanto, en el régimen pluviométrico se producen máximos equinocciales, produciéndose las precipitaciones más importantes en primavera y otoño como se puede apreciar en los ombrotipos de las ciudades de Zaragoza y Teruel (figuras 2.12 y 2.13 respectivamente).

Figura 2.11. Precipitación media estival en Aragón.

El promedio anual de frecuencia de precipitación en el Valle del Ebro es de 40 a 60 días, llegando a superar los 80 días en el resto de la cuenca según Font (1983).

Frecuentemente las precipitaciones se producen de forma violenta. Las intensidades máximas se registran en los meses otoñales, debido a la mayor influencia mediterránea y la aparición de *gotas frías* en altura. Muchas veces, estas lluvias se deben a núcleos tormentosos y puede superar los 100 mm en 24 horas.

Figura 2.12. Ombrotipo de la ciudad de Zaragoza.

Se tiene constancia de entre 15 y 25 días anuales de actividad tormentosa, de los cuales, más del 60 % se producen entre junio y septiembre. El suroeste de la cuenca presenta un promedio de 32 días de tormenta (Font, 1983). En estas zonas áridas, las precipitaciones debidas a las tormentas son más importantes, como muestra el ombrotipo de la ciudad de Teruel (figura 2.13).

Figura 2.13. Ombrotipo de la ciudad de Teruel.

Frecuentemente, estas tormentas dan lugar a precipitaciones en forma de granizo. Según Font (1983), en promedio se produce una granizada anual en el área. Cerca de los sistemas montañosos la media aumenta a 3 granizadas al año. De hecho, como se muestra en el capítulo 4 de esta Memoria (apartado 4.2.2.2), se encuentran valores superiores en algunas zonas.

La cuenca baja del Ebro se considera una de las zonas más ventosas de España (Capel, 1981). La componente dominante en la rosa de los vientos (figura 2.14) de la zona de estudio es el viento del noroeste, denominado *cierzo* en Aragón.

El viento que sopla en sentido contrario al *cierzo* se llama *bochorno*. Se produce cuando las presiones en el mar Mediterráneo son ligeramente superiores a las del Cantábrico o cuando la disposición de las isobaras favorece el desplazamiento en esta dirección. Son vientos menos constantes y con menor velocidad que el *cierzo*. En verano son muy secos ya que proceden del norte de África y en primavera y otoño son templados y húmedos (Peña et al., 2002).

Figura 2.14. Rosa de los vientos en varias localidades de Aragón.

D. Redes de granizómetros

Como se ha dicho anteriormente, en España se dispone de los datos de dos redes de granizómetros, una instalada en el suroeste de la provincia de Zaragoza y otra en el oeste de la provincia de Lérida, ambas estudiadas dentro del alcance del mismo radar meteorológico situado en Zaragoza.

La red de granizómetros de Zaragoza se encuentra en la parte suroeste de dicha provincia, englobando las comarcas de Valdejalón, Comunidad de Calatayud, Campo de Cariñena y Campo de Daroca y también la parte más septentrional de la comarca turolense de Jiloca (figuras 2.15 y 2.16). Esta red de granizómetros se comenzó a instalar en el verano de 2003 y el número de placas fue aumentando progresivamente hasta llegar a 100 granizómetros en el verano de 2005, manteniéndose constante desde entonces. Los granizómetros están dispuestos en los vértices de una malla de 5 x 5 km de lado, coincidiendo con la red UTM. La nomenclatura de los granizómetros consiste en una letra y un número y se basa en su posición en esta malla. Las columnas se nombran según una letra del abecedario de oeste a este (de A a M), y las filas se nombran con números de norte a sur (de 1 a 15).

Por su parte, la red de granizómetros de Lérida está dispuesta en el extremo occidental de la provincia (figuras 2.17 y 2.18). Está operativa desde el año 2000 y consta de 174 granizómetros dispuestos formando una malla de 4 x 4 km de lado. La nomenclatura es similar a la de Zaragoza.

Figura 2.15. Mapa de localización de la red de granizómetros de Zaragoza.

Figura 2.16. Mapa de la red de granizómetros de Zaragoza sobre las curvas de nivel y superposición de la cuadrícula UTM, huso 30.

Figura 2.17. Mapa de localización de la red de granizómetros de Lérida.

Figura 2.18. Mapa de la red de granizómetros de Lérida sobre las curvas de nivel y superposición de la cuadrícula UTM, huso 31.

2. FRANCIA

Según la *Asociación Internacional de Aseguradores Contra el Granizo (AIAG)*, Francia está considerado como uno de los países europeos más afectados por el granizo. Las zonas con riesgo más alto de precipitación en forma de granizo y mayor frecuencia anual son las partes central y suroeste del país y el suroeste de los Alpes (Vinet, 2001). Esto se puede apreciar en el mapa de riesgo de granizo de la figura 2.19.

Figura 2.19. Distribución espacial del riesgo de granizo en Francia. (Fuente: Vinet, 2001)

Debido a estas circunstancias, en 1951 se creó la ANELFA (*Association Nationale d'Etude et de Lutte contre les Fléaux Atmosphériques*), es decir, la *Asociación Nacional de Estudio y de Lucha contra las Adversidades Atmosféricas*. Esta asociación instaló tres redes de granizómetros en las zonas del país más castigadas por el granizo para el control del mismo, de cuyos datos se dispone para este trabajo de investigación.

A. Situación geográfica

Las áreas de estudio francesas analizadas en el presente trabajo coinciden con las tres zonas adheridas a la ANELFA (figura 2.20). Estas áreas se delimitan teniendo en cuenta su situación geográfica. A continuación se indican los departamentos franceses que engloba cada una de ellas.

- *Zona atlántica*: Charante-Maritime, Charente, Gironde, Landes y Pyrénées-Atlantiques (5 departamentos).
- *Zona interior*: Aisne, Marne, Indre-et-Loire, Loir-et-Cher, Cher, Indre, Allier, Loire, Ardèche, Drôme, Dordogne, Lot-et-Garonne, Lot, Tarn-et-Garonne, Tarn, Gers, Haute-Garonne, Hautes-Pyrénées y Ariège (19 departamentos).
- *Zona mediterránea*: Aude, Pyrénées-Orientales, Gard, Vaucluse y Bouches-du-Rhone (5 departamentos).

Figura 2.20. Mapa de situación de las tres zonas adheridas a la ANELFA: en gris, la zona atlántica; en negro la zona interior y en blanco la zona mediterránea (Fuente: ANELFA)

B. Topografía

La mayor parte del territorio presenta una orografía suave, con llanuras o terrenos ondulados. Como contraste, destacan los dos grandes macizos montañosos que sirven de frontera: los Pirineos con España y los Alpes con Italia y Suiza. Además, el Macizo Central se extiende parcialmente por las regiones de Languedoc-Rosellon, Rhône-Alpes, Auvergne, Midi-Pyrénées y Limousin.

C. Climatología

Francia se encuentra en la zona templada del planeta y presenta unas temperaturas medias anuales entre 9 y 16 °C. Debido a las diferentes masas de aire que la afectan, el clima es variado.

En la costa oeste, la proximidad del océano Atlántico suaviza las temperaturas en invierno, evita las heladas y refresca los veranos. En la costa sureste, la influencia del Mediterráneo se traduce en inviernos suaves y cortos y veranos calurosos propios del clima mediterráneo. Por el contrario, en el interior, la lejanía del mar provoca inviernos largos y temperaturas altas en verano, es decir, un clima típicamente continental. Además, la disposición de la orografía acentúa los contrastes de temperaturas. De hecho, los macizos montañosos impiden la influencia del Atlántico en las llanuras del este.

En verano, las temperaturas aumentan sensiblemente de norte a sur. Las regiones del noroeste gozan de un verano moderado, mientras que al sur y en la región mediterránea los veranos son muy cálidos. Por ejemplo, la temperatura media de julio en Brest es de 16.6 °C y en Marsella de 24.1 °C.

En las regiones orientales, el relieve en canales llamado *Surco del Ródano* canaliza los vientos en dirección norte-sur. En el valle del Ródano, sopla un viento seco y frío del noroeste denominado *mistral*.

Las precipitaciones tienen un carácter moderado, y en casi todas las regiones la precipitación media anual supera los 500 mm. La pluviosidad es abundante en la fachada atlántica y en las áreas montañosas. En cambio, es escasa en las llanuras del interior, en las regiones resguardadas por el relieve y en el área mediterránea. Por ejemplo, Marsella presenta una precipitación media de 555 mm anuales.

En las regiones continentales, la precipitación es eminentemente estival y en forma de chubascos tormentosos. En las regiones mediterráneas, las precipitaciones son más irregulares y violentas, al principio y final del invierno.

En general, el clima de Francia se encuentra bajo la influencia de masas de aire diferentes. En concreto, en invierno, el aire frío, continental y seco, es empujado por los vientos del este. Las depresiones atlánticas dulcifican el clima. En verano, los vientos del oeste limitan la entrada de masas de aire tropical.

D. Redes de granizómetros

Como se ha indicado anteriormente, en Francia se dispone de los datos de las tres redes de granizómetros de la ANELFA (figura 2.21). El número de granizómetros en cada red ha ido variando ligeramente en cada campaña experimental. Concretamente, el número total existente en el verano de 2006 fue de 1076, repartidos de la siguiente forma:

- *Zona atlántica*: 490 granizómetros, desde 1988.
- *Zona interior*: 419 granizómetros, desde 1987.
- *Zona mediterránea*: 167 granizómetros, desde 1989, sin datos de 1994.

A diferencia de las redes españolas y argentinas, en Francia los granizómetros no constituyen una red uniforme y geométrica. Están colocados en regiones agrícolas donde los cultivos son sensibles al granizo. La densidad de granizómetros por km² es muy heterogénea en las tres redes.

Figura 2.21. Mapa de posición de los granizómetros en las tres áreas adheridas a la ANELFA. (Fuente: ANELFA)

3. ARGENTINA

En Sudamérica, entre las latitudes 20 y 40° S, al este de los Andes, ocurren con elevada frecuencia eventos meteorológicos severos como granizo de gran tamaño, vientos fuertes y tornados (Velasco y Fristch, 1987; Brooks et al., 2003; Brooks y Anderson, 2004).

La provincia argentina de Mendoza es particularmente sensible a los riesgos meteorológicos. De hecho, las tormentas de granizo producen anualmente cuantiosos daños en su producción agrícola. Según la *Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas* del Gobierno de Mendoza (DACC), las pérdidas en la agricultura consecuencia del granizo son del 10 % de la producción anual. Además, de media, el 20 % del área agrícola recibe granizo anualmente. Gracias a un radar de la banda S con un alcance de 120 km, entre 1984 y 2004, se registró una media de 68 días de células de tormenta con reflectividades mayores de 55 dBZ (Sánchez et al., 2008).

A. Situación geográfica

Esta provincia se encuentra ubicada en la zona templada entre los 32° y 37° de latitud S y los 67° y 70° de longitud W, en el oeste de la República Argentina, limitando con Chile. En la figura 2.22, se pueden observar su situación dentro del país y los departamentos de los que consta. Así, al norte limita con San Juan, al este con San Luis, al sureste con la Pampa, al suroeste con Neuquén y al oeste con Chile.

Mendoza presenta una superficie de 150839 km². El 95 % de la población (en torno a 1450000 habitantes) está concentrada en los tres oasis agrícolas representados en la figura 2.22 (oasis norte o de San Martín, oasis centro o de Tunuyán y oasis sur o de San Rafael), que suponen el 2.5 % de la superficie total.

Figura 2.22. Mapa de situación de la provincia de Mendoza y sus departamentos. (Fuente: Sánchez et al., 2008)

B. Topografía

En la provincia de Mendoza se observa la dualidad montaña – llanuras. Al oeste se encuentran las altas cumbres y extensos valles, es decir, el típico paisaje andino. Por el contrario, al este se extiende una planicie árida, arenosa y casi sin vegetación, perteneciente a la Pampa occidental. Al sur existe una zona de transición hacia el ambiente patagónico (figura 2.23).

Figura 2.23. Mapa físico y político de la provincia de Mendoza. (Fuente: DACC)

La cordillera de los Andes discurre de norte a sur, llegando en algunas áreas a ensancharse hasta 180 km. Ocupa un tercio de la superficie mendocina. En realidad, la cordillera se puede dividir en tres partes: las dos cadenas de la cordillera y la precordillera. Esas dos cadenas se encuentran separadas por valles fluviales. De ellas, la del oeste (Cordillera del Límite o Principal) contiene el límite internacional entre Argentina y Chile, es continua y más baja. En la cadena del este (Cordillera Frontal) se encuentran El Aconcagua (pico más alto de América del Sur con 6959 metros de altura), El Mercedario, El Tupungato, el Juncal, el Catedral, etc. (todos con más de 6000 m). Los pasos más importantes son Uspallata, Planchón y Maipú.

C. Climatología

Debido a que la provincia de Mendoza se encuentra en el oeste árido de Argentina, se trata de un territorio continental, de clima árido o semiárido.

Presenta temperaturas muy elevadas en verano y muy bajas en invierno. Así, en enero (verano) la temperatura media diurna es de 30 °C y la nocturna, de 23 °C. En julio (invierno), la diurna es de 12 °C y la nocturna, de 0 °C.

Su precipitación media anual apenas supera los 250 mm y varía desde 98 mm en el noroeste de la provincia (Retamo), a 277 mm en el sur (San Rafael). Esta deficiencia hídrica se compensa

aprovechando el agua de los ríos que se nutren de las aguas del deshielo que nacen en la vertiente oriental de la cordillera de Los Andes, utilizando técnicas de irrigación artificial. De esta manera, se han formado los tres oasis agrícolas del llano.

La humedad del océano Pacífico está bloqueada por la gran altura y la dirección norte-sur de los cordones de la cordillera de los Andes. Por ello, la mayoría de las precipitaciones se producen por nubes convectivas que se alimentan de la humedad tropical y del océano Atlántico. Así, las precipitaciones son de régimen estival, torrenciales y en muchas ocasiones, acompañadas de granizo. De hecho, el granizo provoca importantes daños en la agricultura.

Figura 2.24. Esquema explicativo del viento Zonda. (Fuente: <http://www.tutiempo.net>)

Además, debido a esa barrera climática de los Andes sobre las masas de aire polar o tropical, se produce el *efecto Foehn*. Regionalmente se denomina *viento Zonda*, es seco y cálido, y sopla desde la cresta hacia las zonas más bajas (figura 2.24). La humedad oceánica del Pacífico se condensa en las laderas occidentales chilenas, mientras que en la parte sur, una mayor influencia anticiclónica del oeste y suroeste presiona sobre la cordillera hasta rebasarla. Los vientos descargan humedad en la Cordillera Principal, del lado argentino. Como consecuencia, existen importantes campos de nieve y glaciares. Más al este, como la Cordillera Frontal es más elevada, no llega humedad. Así, el océano Pacífico no puede actuar de moderador, explicándose el clima continental con altas temperaturas estivales y escasa nubosidad.

D. Redes de granizómetros

Existen tres redes de granizómetros ubicadas en cada uno de los tres oasis agrícolas (figura 2.25):

- Oasis noreste: 188 granizómetros.
- Oasis centro: 81 granizómetros.
- Oasis sur: 130 granizómetros.

Dichos granizómetros están dispuestos en una cuadrícula de 5 x 5 km de lado. En los lugares con mayor frecuencia de tormentas, la red está reforzada por otra cuadrícula interna de 2.5 x 2.5 km. Las tres redes comenzaron a estar operativas en el verano 2004/05.

Figura 2.25. Localización de los tres oasis agrícolas de la provincia de Mendoza y sus respectivas redes de granzómetros. (Fuente: DACC)

2.2.4. ESCALAS DE TAMAÑO DE GRANIZO

Existen diferentes escalas para clasificar el diámetro de las piedras de granizo. A continuación se muestran varias.

1. ESCALA DE LA ANELFA (*Association Nationale d'Etude et de Lutte contre les Fléaux Atmosphériques*)

Dessens et al. (2006) clasificaron las granizadas en función del *diámetro máximo* y del *número de impactos*. Además, propusieron una escala de intensidad de granizada con 6 clases, desde A0 hasta A5 (tabla 2.3). El número de la clase debe acompañarse de un signo + o -, según el suelo esté cubierto de granizo en más de la mitad de la superficie o en menos, respectivamente.

Tabla 2.3. Escala ANELFA de intensidad de granizadas. (Fuente: Dessens et al., 2006)

Clase	Diámetro máximo del granizo (cm)	Equivalencia del granizo más grande	Rango de energía (J m^{-2})	Daños típicos
A0	< 1	Guisante	0 – 30	Accidentes en las carreteras, flores de los árboles cortadas
A1	1 – 1.9	Uva, canica, cereza	30 – 100	Daños a viñas, frutales y tabaco
A2	2 – 2.9	Huevo de paloma	100 – 400	Daños serios a cereales, hortalizas, árboles
A3	3 – 3.9	Nuez, pelota de ping-pong	400 – 800	Daños completos a todos los cultivos, ventanas rotas y coches dañados
A4	4 – 4.9	Huevo de gallina, pelota de golf	> 800	Paisaje de invierno, animales muertos, personas heridas, fuselaje de aviones en tierra dañado
A5	≥ 5	Naranja, melocotón, manzana, pelota de tenis		Evento extremadamente peligroso, personas sin protección muertas

2. ESCALA DE TORRO (*TOR*nado and storm Research Organisation)

Webb et al. (1986) definieron 11 clases de intensidad de las tormentas con granizo, desde H0 hasta H11, incrementando la intensidad o el daño potencial relacionado con el tamaño del granizo, la textura, el número, la velocidad de caída, la velocidad de desplazamiento de la tormenta y la fuerza del viento. La tabla 2.4 indica los códigos de tamaño, el diámetro máximo y el tamaño comparado con objetos cotidianos. En una segunda tabla más completa (tabla 2.5), para cada clase de intensidad se especifica el diámetro típico del granizo, el valor de energía cinética y los daños típicos producidos en Gran Bretaña.

Tabla 2.4. Tamaño y diámetro del granizo en relación a la escala TORRO. (Fuente: Webb et al., 1986)

Código de tamaño	Diámetro máximo (mm)	Descripción
0	5-9	Guisante
1	10-15	Bola de alcanfor
2	16-20	Canica, uva
3	21-30	Nuez
4	31-40	Huevo de paloma
5	41-50	Pelota de golf
6	51-60	Huevo de gallina
7	61-75	Pelota de tenis
8	76-90	Naranja grande
9	91-100	Pomelo
10	>100	Melón

Tabla 2.5. Escala TORRO de intensidad de granizadas. (Fuente: Webb et al., 1986)

	Categoría de intensidad	Diámetro del granizo típico (mm)	Energía cinética probable (J m^{-2})	Daños típicos
H0	Granizo duro	5	0 – 20	Sin daños
H1	Potencialmente dañino	5-15	>20	Daños ligeros generales a plantas, cultivos
H2	Importante	10-20	>100	Daños importantes a frutales, cultivos, vegetación
H3	Severo	20-30	>300	Daños severos a frutales y cultivos, daños a estructuras de cristal y plástico,
H4	Severo	25-40	>500	Daños extendidos en cristales, daños en carrocerías de vehículos
H5	Destruyivo	30-50	>800	Daños masivos en cristales, daño en tejas, riesgo importante de lesiones
H6	Destruyivo	40-60		Fuselaje de aviones en tierra impactado, muros de ladrillo agujereados
H7	Destruyivo	50-75		Daños severos en tejados, riesgo de serias lesiones
H8	Destruyivo	60-90		Daño severo en fuselajes de aviones (Máxima intensidad alcanzada en las Islas Británicas)
H9	Súper tormentas de granizo	75-100		Extensos daños estructurales severos, riesgo de lesiones severas e incluso mortales a personas en campo abierto
H10	Súper tormentas de granizo	>100		Extensos daños estructurales severos, riesgo de heridas severas e incluso mortales a personas en campo abierto

2.3. DETECCIÓN DE GRANIZO Y RADAR METEOROLÓGICO

Dado que es difícil registrar con precisión todas las caídas de granizo en el suelo, se requieren técnicas para identificar células que contengan este hidrometeoro sólido. Los sistemas más aplicados para la observación de tormentas son los radares y los satélites meteorológicos.

Las imágenes de *satélites meteorológicos* proporcionan información del entorno en el que se desarrollan las tormentas severas y más recientemente con el *Meteosat de Segunda Generación* se han logrado grandes avances. Existen numerosos estudios para estimar los parámetros de la precipitación (por ej.: Grose et al., 2002) y alguno incluso puede llegar a detectar precipitaciones de granizo (Sánchez, 2003; EUMETSAT, 2006).

En cambio, los *radares meteorológicos* se perfilan como la mejor técnica para detectar células tormentosas que dan lugar a precipitaciones intensas. A él se refieren los siguientes apartados.

2.3.1. RADAR METEOROLÓGICO

El radar meteorológico se considera un sensor remoto ya que es capaz de proporcionar información de objetos alejados. El término *radar* es el acrónimo de las palabras inglesas *Radio Detection And Ranging*. Se trata de un sensor activo, ya que emite una onda electromagnética y

posteriormente recibe la energía reflejada o dispersada por el objeto. Dichos objetos se denominan *blancos* y la radiación dispersada se llama *eco*. La radiación electromagnética utilizada corresponde a la zona de microondas, con longitudes de onda de 1 mm a 1 m.

En realidad, el radar fue diseñado para detectar y seguir objetivos aéreos y navales por el ejército (Burguess y Ray, 1988). Al observar que la precipitación oscurecía esos blancos, se comenzó a desarrollar un radar para observaciones meteorológicas en la década de los 40, durante la Segunda Guerra Mundial. Más tarde, organismos civiles colaboraron en su mejora. Desde los años 70, se ha aumentado la utilización de radares Doppler tanto en investigación como en observación meteorológica. Respecto a la situación actual en España, existen algunos grupos científicos que emplean el radar meteorológico orientado a estudios hidrológicos o meteorológicos, ya sea para predicción operativa o para investigación científica (por ej.: Sánchez et al., 2001; Sánchez-Diezma, 2001; Bech et al., 2002; Berenguer et al., 2002).

Este sensor está compuesto por tres elementos fundamentales, reflejados en el esquema de la figura 2.26:

- *Transmisor*. Genera impulsos cortos de energía en la zona de radiofrecuencias del espectro electromagnético. En concreto, el *magnetron* es el que genera las microondas a una frecuencia entre 3 y 30 GHz. A continuación, el *modulador* mantiene las ondas cierto tiempo y el *temporizador o sincronizador* las emite en forma de pulso con la misma frecuencia de repetición.
- *Antena*. Las microondas pasan a través de la *guía de ondas* desde el transmisor hacia la antena. Ésta actúa de soporte físico que concentra los impulsos en un haz estrecho. Toda esa energía debería concentrarse en un solo lóbulo llamado *lóbulo principal*. Gracias a un *reflector parabólico*, lo enfoca en el espacio. El haz se propaga hacia fuera a la velocidad de la luz hasta que es interceptado por un objeto con propiedades diferentes al aire. Entonces se induce una corriente que dispersa parte de la energía. Parte de esa energía dispersada es devuelta hacia la antena. Por tanto, la antena actúa como emisor y receptor. Para evitar daños por el viento y otras inclemencias meteorológicas, la antena suele estar dentro de una cubierta esférica llamada *radomen*.
- *Receptor*. Un *interruptor automático* permite que la radiación pase del *transmisor* a la *antena* cuando se emite, y de la *antena* al *receptor* cuando se recibe la radiación. Capta la radiación retrodispersada por los blancos. Se caracteriza por su sensibilidad o capacidad para detectar señales débiles. La señal mínima detectable varía entre 10^{-13} y 10^{-14} W de potencia. Debido a que la señal recibida es muy pequeña, el siguiente paso es su amplificación. A través de un *oscilador local* y un *controlador de frecuencia*, se disminuye la frecuencia y se amplifica la señal recibida. A continuación se transforma para su posterior visualización en el *indicador*.

Figura 2.26. Esquema de los elementos que componen un radar meteorológico. (Fuente: adaptado de Battan, 1973)

También se pueden considerar como elementos del radar, el sistema de control (RDAS, *Radar Data Acquisition System*) y el sistema de visualización (TITAN, *Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting*), explicados posteriormente (apartado 2.3.5).

El objetivo del radar consiste en caracterizar los blancos alcanzados por la radiación, determinando la distancia y la naturaleza de los mismos, a través de la medida del tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de la señal. Por tanto, los radares meteorológicos se basan en la interacción de los pulsos de ondas electromagnéticas emitidos con los hidrometeoros u otras heterogeneidades atmosféricas.

Para comprender el funcionamiento del radar, se definen los *parámetros radar*, señalando en cada uno de ellos, el intervalo de valores más habituales:

- *Potencia instantánea en el impulso o potencia del máximo o pico (P_t)*. La *potencia de emisión* es la energía radiada por unidad de tiempo. Como pueden registrarse pequeñas oscilaciones en la tensión del magnetrón, se debe hablar de *potencia pico*.

$$10 < P_t < 5 \cdot 10^3 \text{ kW}$$

- *Radiofrecuencia (ν) y longitud de onda (λ)*. La *frecuencia* es el número de pulsos por unidad de tiempo, mientras que su inversa, la *longitud de onda* es la distancia que separa dos pulsos de onda que se encuentran en el mismo estado de vibración.

$$3 < \nu < 30 \text{ GHz} \quad \rightarrow \quad 1 > \lambda > 10 \text{ cm}$$

- *Frecuencia de repetición de impulsos (PRF o f_r)*. Indica el tiempo máximo permitido para que la onda emitida pueda volver al radar una vez que ha incidido en el blanco. Junto con la *velocidad de propagación*, condiciona el alcance máximo del radar.

$$200 < f_r < 2000 \text{ s}^{-1}$$

- *Duración o longitud del impulso (τ o c_t)*. Es el intervalo de tiempo en el que el radar actúa como emisor.

$$0.1 < \tau < 5 \mu\text{s}$$

- *Anchura del haz*. Depende de la longitud de onda y del tamaño y la forma de la antena. Representa la intensidad radiada en función de la distancia angular respecto al eje central del haz.

En general, los radares meteorológicos pueden ser (Battan, 1973):

- *Radar no coherente*. No tiene en cuenta la fase de onda de radar devuelta respecto a la fase de onda transmitida. Proporciona información sobre la posición y la reflectividad de un blanco.
- *Radar coherente o Doppler*. Además de obtener los datos del anterior, mide la velocidad de los blancos a lo largo del eje del haz del radar utilizando el *Principio Doppler*. Para ello, tiene en cuenta la velocidad del cambio en la diferencia de fase entre la señal saliente y la entrante.

Tabla 2.6. Tipos de radares meteorológicos según la frecuencia emitida. (Fuente: adaptado de Battan, 1973)

Banda	Frecuencia (MHz)	Longitud de onda (cm)	Propósito
K	30000	1.2	Detección de nubes
X	10000	3.2	Detección de tormentas
C	6000	5.6	Lluvia y granizo
S	3000	10.7	Lluvia y granizo
L	1500	23	Seguimiento

En función de la frecuencia de la radiación electromagnética emitida, se distinguen cuatro tipos de radares, resumidos en la tabla 2.6. Tanto los valores de frecuencia como los de longitud de onda son aproximados ya que cada radar presenta un valor exacto concreto. Cuanto menor sea la longitud de onda, es decir, mayor la frecuencia, la absorción de los blancos es mayor. Así, los radares de la *banda K* y

X se utilizan para precipitaciones débiles, los de la *banda C* para precipitaciones moderadamente intensas y los de la *banda S* y *L* para precipitaciones muy intensas. Los radares utilizados en el presente estudio son de la banda C en el área de Zaragoza (España) y de la banda S en el área del oasis sur de Mendoza (Argentina).

De forma simplificada, cuando una partícula de una nube recibe la radiación electromagnética, una parte de la energía es absorbida y otra parte se retrodispersa en dirección a la antena. La cantidad de energía retrodispersada depende de las propiedades dieléctricas del dispersor, es decir, de su índice de refracción, y de la relación entre el tamaño de la longitud de onda y el tamaño del dispersor. A medida que la energía se propaga a través del aire o la precipitación, se produce una pérdida en la longitud de onda. Esta atenuación es mayor para longitudes de onda cortas.

Una vez definidos los conceptos básicos y el funcionamiento general del radar, se puede comprender el fundamento físico que rige la detección de dispersores. El desarrollo matemático del mismo se puede consultar en Rogers y Yau (1989) o en Sauvageot (1982). La *potencia media* $\bar{P}_r$ procedente de un *radio* r se calcula a través de la llamada **ecuación del radar meteorológico** (ecuación 2.1):

$$\bar{P}_r = \frac{\pi^3 c}{1024 \ln 2} \left[\frac{P_t \tau G^2 \theta^2}{\lambda^2} \right] \left[|K|^2 \frac{Z}{r^2} \right] \quad (2.1)$$

donde c es la *velocidad de la luz*, P_t es la *potencia instantánea emitida*, τ es la *longitud del impulso* emitido, θ es la *anchura del haz*, λ es la *longitud de onda* y G es la *ganancia axial de la antena*, relacionada con la apertura de la antena A_e (ecuación 2.2).

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (2.2)$$

K es el *término de refracción*, que depende de la *temperatura*, la *longitud de onda* y la *composición de la esfera* y se calcula según la ecuación 2.3, a partir del *índice de refracción complejo de la esfera* (m), que a su vez, se halla a partir del *índice de refracción* (n) y del *coeficiente de absorción* (k) (ecuación 2.4). Con las longitudes de onda de los radares meteorológicos y el intervalo de temperaturas posible en meteorología, el término $|K|^2$ toma valores de 0.93 para el agua y 0.21 para el hielo. Por tanto, la *sección eficaz de retrodispersión* (σ) (ecuación 2.5) de una esfera de hielo es 2/9 de la de una esfera de agua del mismo tamaño, es decir, unos 6.5 dB menos.

$$K = \frac{(m^2 - 1)}{(m^2 + 2)} \quad (2.3)$$

$$m = n - i k \quad (2.4)$$

$$\sigma = 64 \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 r_0^6 \quad (2.5)$$

En el último término de la ecuación 2.1, Z se refiere al llamado *factor de reflectividad* ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$), definido en función del *diámetro del dispersor* D según la ecuación 2.6:

$$Z = \sum_v D^6 = \int N(D) D^6 dD \quad (2.6)$$

donde el sumatorio indica que la suma sólo se extiende a la unidad de volumen, y $N(D) dD$ es el *número de difusores por unidad de volumen* con diámetros comprendidos entre D y $D + dD$.

La *reflectividad efectiva* Z_e del radar medida en dBZ se calcula a través de la ecuación 2.7:

$$Z_e(\text{dBZ}) = 10 \log_{10} \left(\frac{Z(\text{mm}^6 \text{m}^{-3})}{1 \text{mm}^6 \text{m}^{-3}} \right) \quad (2.7)$$

Cabe destacar que en la ecuación del radar meteorológico (ecuación 2.1), el segundo término engloba los *parámetros propios del radar* mientras que el tercer término se refiere a las *características del blanco*.

Para relacionar la *potencia recibida* con el *factor de reflectividad* Z se utiliza la magnitud $10 \log \bar{P}_r$ denominada *potencia* y calculada a partir de la ecuación 2.8:

$$10 \log \bar{P}_r = 10 \log Z - 20 \log r + C \quad (2.8)$$

siendo C una constante relacionada con la sensibilidad, que depende de parámetros del radar y del carácter dieléctrico del blanco. Así, la potencia recibida se mide en decibels o decibelios y está relacionada con el *factor de reflectividad* en escala logarítmica (*reflectividad* en dBZ). Esta relación logarítmica es muy útil debido a la gran variación que presentan. En la siguiente tabla 2.7 se resumen las unidades en las que se miden estas magnitudes.

Tabla 2.7. Unidades en las que se miden las magnitudes más importantes del radar.

Magnitud	Unidades
$\bar{P}_r$	10^{-3} W
$10 \log \bar{P}_r$	dBm
Z	$\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$
$10 \log Z$	dBz

Por otro lado, también se puede hallar una **relación entre el factor de reflectividad y la intensidad de la precipitación**. Marshall y Palmer (1948) establecieron la distribución de gotas por tamaños según la ecuación 2.9, donde $N(D)dD$ representa el número de gotas por unidad de volumen, con diámetros entre D y $D + dD$. Obtuvieron que la pendiente de la distribución Λ (cm^{-1}) depende de la *intensidad de la precipitación* R (mm h^{-1}) (ecuación 2.10) mientras que el parámetro de *origen de ordenadas* N_0 (cm^{-4}) es un valor constante de 0.08.

$$N(D) = N_0 e^{-\Lambda D} \quad (2.9)$$

$$\Lambda(R) = 41R^{-0.21} \quad (2.10)$$

Para esta distribución de gotas, el *factor de reflectividad* se relaciona con la *intensidad de precipitación* según la ecuación 2.11:

$$Z = N_0 \frac{6!}{\Lambda^7} = N_0 \frac{6!}{(41)^7} R^{1.47} \quad (2.11)$$

En concreto, para la lluvia, Marshall y Palmer (1948) llegaron a la siguiente relación empírica (ecuación 2.12):

$$Z = 200 R^{1.6} \quad (2.12)$$

donde R es el *flujo de precipitación* expresado en mm h^{-1} y Z es la *reflectividad* en $\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$.

A través de esa fórmula se deducen los valores de intensidades de precipitación de lluvia. La tabla 2.8 muestra algunos valores de ejemplo.

Tabla 2.8. Valores de ejemplo de la reflectividad en función de la intensidad de precipitación.
(Fuente: Rogers y Yau, 1989)

R (mm h^{-1})	0.1	1	10	100
Z ($\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$)	5	200	7950	316000
dBZ	7	23	39	55

También se ha obtenido una relación aproximada para la nieve (Rogers y Yau, 1989):

$$Z = 2000 R^2 \quad (2.13)$$

En cuanto a las formas de visualización de los radares meteorológicos, se pueden consultar las siguientes:

- PPI (*Plan Position Indicator*). El haz del radar mide a un ángulo constante en un plano horizontal en un intervalo regular de tiempo.
- RHI (*Range Height Indicators*). El radar escanea en un plano vertical con un ángulo de azimut constante. Proporciona cortes verticales de las tormentas.
- Escaneo volumétrico. La antena se mueve varias veces en el modo PPI entre dos ángulos de azimut, cada vez con una elevación diferente.
- CAPPI (*Constant Altitude Plan Position Indicators*). Muestran la reflectividad en un nivel horizontal con resolución temporal.

Sin embargo, el radar meteorológico también presenta limitaciones debidas a la propagación de la energía electromagnética (sombras, ecos de tierra, sectores bloqueados, lóbulos secundarios, etc.) que se intentan corregir a través de diferentes metodologías (Sánchez-Diezma, 2001; Bech et al., 2003).

2.3.2. DETECCIÓN DE GRANIZO

A lo largo de los últimos 30 años, el radar meteorológico se ha aplicado en numerosos estudios para la detección y estimación de la precipitación como se constata a lo largo de este apartado. En realidad, los objetivos del radar meteorológico consisten en identificar la estructura dinámica de las células de granizo y evaluar las formas de propagación de las células de tormenta. Así, los radares proporcionan información cercana al suelo de las granizadas. En algunos de los estudios, se han establecido diversos algoritmos que relacionan el *factor de la reflectividad* medido por el radar y la *intensidad de la precipitación* registrada en el suelo (Battan, 1973; Atlas, 1990; Doviak y Zrnica, 1993).

Uno de los pioneros en la utilización del radar meteorológico fue Battan (1953). Éste analizó los datos del *Thunderstorm Project* para estudiar la localización de los ecos iniciales de las células convectivas y la secuencia de su desarrollo. Observó que los primeros ecos tienen un desarrollo de unos cientos de metros y que crecen muy rápidamente. Los techos de estas células se elevan, las bases tienden a caer y la reflectividad se incrementa rápidamente en toda la estructura vertical de la célula. Por un lado, el análisis de la intensidad de precipitación en estas células y la distribución vertical de la reflectividad en las mismas, y por otro, el estudio comparado de masas nubosas estratiformes, permitió el estudio de la distribución vertical de la reflectividad en estas células y de los cambios en la reflectividad asociados con el crecimiento de las gotas de lluvia.

Las ecuaciones que explican el crecimiento de una gota nubosa aislada fueron descritas por Rigby et al. (1954). Posteriormente se extendieron a un espectro completo de distribución de tamaños, esencial para calcular los cambios en el factor de reflectividad. La concentración de gotitas y su distribución de tamaños en una determinada célula son claves para interpretar la reflectividad detectada.

Wexler y Swingle (1947) presentaron la llamada *ecuación del radar meteorológico* (ecuación 2.1), que muestra cómo los parámetros del *sistema radar* afectan a la intensidad del eco recibido. Adicionalmente, Wexler (1947) publicó la primera expresión que relacionaba el *factor de reflectividad Z* y la *tasa de precipitación R*. Posteriormente, Marshall y Palmer (1948) desarrollaron una ecuación del radar meteorológico basada en la teoría de la retrodispersión y mediante estudios experimentales posteriores calcularon la relación Z-R (ecuación 2.12).

En cuanto a la diferenciación de lluvia y granizo, dado que la reflectividad aumenta exponencialmente con los diámetros grandes de los dispersores, las piedras de granizo grandes

producen ecos mayores que la lluvia en los PPIs y CAPPIs. También, Geotis (1963) encontró una relación entre el tamaño del granizo y la reflectividad.

Por tanto, las relaciones entre la *reflectividad* y la *tasa de precipitación* están influenciadas por la presencia de granizo en las células tormentosas. La elevada reflectividad del granizo provoca un aumento ficticio de la *tasa de precipitación*. Muchos autores han tratado este fenómeno, tanto desde el punto de vista experimental (Atlas et al., 1960) como desde el punto de vista teórico (Herman y Battan, 1961; Probert-Jones, 1962).

En cuanto a la detección de células con granizo a partir de datos de radares meteorológicos, existen diferentes técnicas, resumidas a continuación.

1. TÉCNICAS BASADAS EN LA REFLECTIVIDAD MÁXIMA Y SU PERSISTENCIA

Detectan reflectividades extremas en los PPIs y tienen en cuenta su persistencia a lo largo del tiempo. Se establecen ciertos umbrales de la reflectividad máxima de los PPIs a partir de los cuales se pueden producir precipitaciones de granizo. Por ejemplo, Knight et al. (1982), Mather y Treddenick (1976) o Waldvogel et al. (1987) establecieron que si una célula alcanza una reflectividad 45 dBZ durante al menos 5 minutos, dará lugar a precipitaciones de granizo. Por el contrario, Sand (1976) y Carte y Held (1978) encontraron precipitaciones de granizo en células con reflectividades inferiores a 45 dBZ. Por ello, en general, estos criterios basados exclusivamente en la reflectividad y su persistencia no son adecuados (Dye y Martner, 1978).

También se pueden establecer umbrales más altos basándose en reflectividades máximas. Waldvogel et al. (1979) fijaron el umbral en 55 dBZ, independientemente de su persistencia.

Cabe destacar el algoritmo de detección de granizo NEXRAD (Petrocchi, 1982; Kessinger y Brandes, 1995), que combina siete indicadores de granizo. Uno de los que más peso aporta es la presencia de un núcleo de granizo con reflectividades superiores a 50 dBZ.

2. TÉCNICAS BASADAS EN CRITERIOS ESTRUCTURALES

Lemon (1978) relacionó en primer lugar la caída de granizo con la estructura del eco detectado. Así, su clasificación distingue *tormentas multicelulares*, *unicelulares* y *supercelulares*. Entonces, se asigna un peso diferente según el grupo y se aplican los criterios de reflectividad máxima según el nivel considerado. Estos *criterios de Lemon* deben adaptarse a las condiciones meteorológicas regionales. Dada la gran dificultad de poseer una *verdad terreno* aplicable, esta técnica no se utiliza operativamente.

3. TÉCNICAS QUE INCLUYEN VARIABLES ATMOSFÉRICAS

Por ejemplo, Waldvogel et al. (1979) afirmaron que existe probabilidad de caída de granizo cuando en una célula se observa que $H_{45} - H_0 = 1.4$ km, siendo H_{45} la *altura a la que aparece en el RHI la reflectividad de 45 dBZ* y H_0 la *isocero*. A pesar de que muchos servicios meteorológicos han empleado este llamado *parámetro de Waldvogel*, fue establecido a partir de los datos de un radar de la banda X y no sería correcta la extrapolación directa de los resultados a otro tipo de radares.

Posteriormente, algunos autores trataron de adaptarlo. Por ejemplo, Holleman (2001) y Aran et al. (2007) hallaron una relación lineal entre la probabilidad de granizo *POH* (del inglés *Probability Of Hail*) y ese *parámetro de Waldvogel*.

4. TÉCNICAS BASADAS EN EL VIL

El VIL (*Vertically Integrated Liquid*, Greene y Clark, 1972) es un parámetro que trata de estimar del contenido potencial del agua líquida precipitable por unidad de superficie dentro de una célula convectiva (ecuación 2.15). Suele utilizarse para estimar la severidad de una tormenta y para discriminar células convectivas que pueden llevar asociado granizo severo. Se han realizado muchos trabajos acerca de este parámetro (por ej.: Edwards y Thompson, 1998; Billet et al., 1997).

Para evitar las limitaciones del VIL, Amburn y Wolf (1997) definieron una nueva variable denominada *densidad de VIL*. Demostraron su eficiencia como predictor de granizo severo entre el noreste de Oklahoma y el noroeste de Arkansas.

Ambos parámetros también se han utilizado para estimar de manera aproximada el tamaño de granizo esperado (Edwards y Thompson, 1998; Hart y Frantz, 1998).

5. TÉCNICAS QUE COMBINAN DIFERENTES VARIABLES RADAR

López y Sánchez (2008) desarrollaron dos técnicas que seleccionan diferentes *variables radar* para discriminar entre células con granizo y sin granizo. Una de ellas es aplicada para detectar granizo de forma operativa en los dos radares cuyos datos son utilizados en este estudio, por lo que se detalla en el capítulo de la metodología (apartado 3.2).

Cada una de las anteriores técnicas fue desarrollada para una determinada zona geográfica y no se debe extrapolar directamente a otras áreas. Holleman et al. (2000), afirmaron que los sistemas de detección presentan el comportamiento óptimo en umbrales más bajos que los descritos en la literatura. Esto puede deberse a las diferencias climáticas de las regiones estudiadas y por tanto, a las características de las tormentas. Por ello, para mejorar un método, se ha de verificar la calidad y concordancia de sus pronósticos con la *verdad terreno* observada.

En 1984, Finley (Murphy, 1996) evaluó la bondad de sus predicciones de tornados en el centro y este de Estados Unidos. Desde entonces, la verificación de las predicciones ha tenido numerosas aportaciones. Anteriormente, Pearson (1904) había introducido el término *Tabla de Contingencia* para describir la forma de organizar todas las posibles combinaciones de predicciones y observaciones implicadas en el estudio de una verificación, similar a los estudios desarrollados por Clayton (1889, 1891). Actualmente, se ha profundizado en el estudio de las predicciones y existen numerosos índices para medir su precisión.

Los radares, en definitiva, permiten observar la iniciación de las células tormentosas, el crecimiento y las transiciones de fase de la precipitación y, en cierta medida, estimar el tamaño y las concentraciones de las partículas precipitantes.

Tanto en Europa como en España, la mayoría de los radares meteorológicos utilizados son de la banda C ($\lambda = 5$ cm aprox.). Cuando las precipitaciones son líquidas y los tamaños de las gotas tienen diámetros pequeños (menores de 5.5 mm), se puede aplicar la *aproximación de Rayleigh* y los radares de esta banda son útiles. En estas condiciones la reflectividad es proporcional a la sexta potencia del tamaño de las partículas (ecuación 2.6) y, entonces, puede ser relacionada con la intensidad de precipitación. Así, cumpliendo estos criterios, se puede *estimar la tasa de precipitación* a partir de los valores del *factor de reflectividad*. Sin embargo, en el interior de las tormentas coexisten hidrometeoros en distintas fases y con tamaños muy diferentes entre sí.

Battan (1973) observó las diferencias entre los espectros de dispersión de las partículas de hielo, del *graupel* (término inglés para designar una estructura de agua congelada, poco compacta y una

densidad que varía entre 0.2 y 0.8 g m^{-3} , también traducido como *nieve granulada* o *granizo blando*) y de las gotas de agua. Además estableció el espectro de retrodispersión del hielo o del agua fuera de la región de Rayleigh según una relación no lineal muy compleja. Acuñó el término de *tamaño eléctrico* a (ecuación 2.14), que depende del *diámetro* D y la *longitud de onda* λ .

$$a = \pi \frac{D}{\lambda} \quad (2.14)$$

Srivastava y Jameson (1977) calcularon la reflectividad equivalente para una distribución monodispersa de una concentración de 1 g m^{-3} para granizo esférico cubierto de diferentes espesores de una lámina de agua, en concreto para radares con *longitudes de onda* de 10, 5.5 y 3 cm. Observaron que partir de 1 cm de diámetro, el espectro encontrado es complejo y depende en gran medida de la *longitud de onda* utilizada. Se puede deducir para radares de 5.5 cm de *longitud de onda*, que el *factor de reflectividad* obtenido para granizo de tamaño 1 cm es inferior que el obtenido por un granizo de 2 cm de diámetro, pero mayor que para un granizo de 3 cm.

Debido a todas estas dificultades, se asume que los radares de onda no polarizada no permiten efectuar medidas directas de la precipitación de granizo. En cambio, se sabe que las células convectivas con granizo presentan techos elevados y fuertes corrientes ascensionales, con gran contenido de agua. Estos factores están asociados a elevados factores de reflectividad. Por ello, aunque los radares meteorológicos no polarizados no puedan medir directamente el granizo, proporcionan información para caracterizar la estructura de las tormentas y las células de granizo. Esta información se conoce como *variables radar*. En el apartado 2.3.6 se definen las *variables radar* utilizadas en esta memoria de Tesis Doctoral.

En resumen, los objetivos del radar meteorológico son, por un lado, detectar células con granizo y, por otro, estimar algunos parámetros que caractericen esas precipitaciones de granizo a partir de las *variables radar*.

2.3.3. DIFERENCIAS ENTRE RADARES DE LA BANDA C Y LA BANDA S

Como se ha indicado anteriormente (tabla 2.6), los radares de la banda C se caracterizan por una longitud de onda cercana a 5 cm mientras que los de la banda S, por otra de 10 cm. Es decir, los radares de la banda C presentan una longitud de onda menor y por tanto, una frecuencia mayor que la banda S.

Para ambos tipos de radares se deben considerar ventajas e inconvenientes. Por un lado, los radares de la banda C, al tener una longitud de onda menor, detectan antes las regiones de las tormentas que contienen hidrometeoros de tamaños precipitables, mientras que los radares de la banda S tienen mayor potencia y menor atenuación.

Respecto a las diferencias en la dispersión y la atenuación, varios autores han investigado sobre ello (por ej.: Srivastava y Jameson, 1977). Recientemente, Féral et al. (2003) utilizaron la diferencia en la reflectividad radar entre la banda S (10.7 cm) y la banda C (5.3 cm) para la detección de granizo. Calcularon la *reflectividad* y el *coeficiente de atenuación* en función del diámetro de los dispersores para ambos tipos de radares y en diferentes situaciones:

- Concentración de 1 g m^{-3} de granizo esférico seco de tamaño uniforme. Se aprecia cómo la *reflectividad* (figura 2.27 a) es la misma para ambos radares hasta un diámetro de granizo de 1.5 cm. A partir de dicho diámetro la reflectividad de la banda C es menor y comienza a disminuir a partir de 1.8 cm, alcanzándose un mínimo de reflectividad a los 2.6 cm para después volver a aumentar. En cambio, para la banda S, la reflectividad continúa aumentando con el diámetro hasta los 3.5 cm, y a partir de ese punto disminuye. Respecto al *coeficiente de atenuación* (figura

2.27 b), para la banda C, aumenta muy rápidamente desde cero, alcanzando el máximo a un diámetro de 4 cm, mientras que para la banda S, aumenta más lentamente y llega a su valor máximo a los 6 cm de diámetro. Así, para todos los tamaños de granizo, la atenuación es mucho mayor en los radares de la banda C.

Figura 2.27. Representación de la *reflectividad* (a) y el *coeficiente de atenuación* (b) en función del diámetro del granizo comparando un radar de la banda C (línea discontinua) y un radar de la banda S (línea continua), para una concentración de 1 g m^{-3} de granizo esférico seco de tamaño uniforme. (Fuente: Féral et al., 2003)

- Mezcla del 50 % de lluvia con una intensidad de 100 mm h^{-1} y del 50 % de granizo (50 %, seco; 35 %, cubierto con una capa de agua de 0.01 cm de espesor; y 15 %, cubierto con una capa de agua de 0.05 cm de espesor). También hasta un diámetro de 1.5 cm, la *reflectividad* (figura 2.28 a) de ambos radares es similar, pero a partir de ese diámetro, en la banda C disminuye mientras que en la banda S continúa aumentando hasta 3.5 cm. En cuanto al *coeficiente de atenuación* (figura 2.28 b), la banda C comienza con un valor de 0.7 dB km^{-1} aumentando hasta alcanzar el máximo a los 3 cm para después disminuir progresivamente. En cambio, la banda S se comporta de forma similar al caso anterior, también llegando al máximo *coeficiente de atenuación* a los 6 cm de diámetro de granizo. Calculando la *diferencia de reflectividad* entre ambos tipos de radares se obtiene la gráfica de la figura 2.28 c. La mayor diferencia se observa para tamaños de entorno a 3.3 cm mientras que la mínima se aprecia a 1.2 cm.

Debido a estas diferencias, muchos autores afirman que los radares de la banda S son más adecuados para la detección de granizo, especialmente a partir de cierto tamaño. Sin embargo, los

radares de la banda C pueden emplearse, siempre extremando la cautela cuando el granizo es de gran tamaño.

Figura 2.28. Representación de la *reflectividad* (a), el *coeficiente de atenuación* (b) y la *diferencia de reflectividad* banda S - banda C en función del diámetro del granizo comparando un radar de la banda C (línea discontinua) y un radar de la banda S (línea continua), para una mezcla del 50 % de lluvia con una intensidad de 100 mm h^{-1} y del 50 % de granizo (50 % seco; 35 %, cubierto con una capa de agua de 0.01 cm de espesor; y 15 %, cubierto con una capa de agua de 0.05 cm de espesor). (Fuente: Féral et al., 2003)

2.3.4. RADARES UTILIZADOS EN EL ESTUDIO

En las tres áreas de estudio se realiza el seguimiento de las tormentas a través de sendos radares meteorológicos. Además, se obtienen las variables que caracterizan físicamente dichas tormentas. En concreto, en este estudio sólo se analizan las *variables radar* en relación con la *energía cinética* para la red de granizómetros española de Zaragoza y para la red argentina del oasis sur.

- Radar de Zaragoza. Se trata de un radar de la banda C, es decir de *longitud de onda* de unos 5 cm. Es propiedad de la Universidad de León y está situado en la Base Aérea Militar de Zaragoza. Su alcance es de 120 km, dentro del cual se encuentra en toda su total extensión la red de granizómetros de Zaragoza. Fuera de su alcance efectivo se encuentra la red de granizómetros de Lérida, por lo que sólo se usa para seguimiento cualitativo.
- Radares de Francia. Existe una red de radares meteorológicos que se distribuye a lo largo de toda la geografía francesa, pero sus datos no se utilizan en este estudio.
- Radares de Mendoza. El gobierno de Mendoza posee tres radares meteorológicos situados en los tres oasis agrícolas. Sin embargo, el utilizado para el presente estudio es el de la banda S situado en San Rafael, dentro del oasis sur.

2.3.4.1. Radar de Zaragoza (España)

Se trata de un radar meteorológico de la banda C *modelo WR100-2/77* de *Enterprise Electronics Corporation*. Las características técnicas más importantes se resumen en la tabla 2.9.

Tabla 2.9. Características del radar de la banda C utilizado en el área de estudio de Aragón.

Características de la antena	
Ganancia	40 dBZ mínimo
Anchura del haz	1.65° máximo (-3 dB)
Diámetro	2.4 m
Características del transmisor-receptor	
Frecuencia	5485-5600 MHz
Potencia pico de salida	250 kW
Ancho del pulso	2 μ s
Frecuencia de Repetición de Pulsos (PRF)	250 Hz
Rango Dinámico del receptor	78 dBZ mínimo
Tipo de amplificador IF del receptor	Logarítmico
Tipo de mezclador AFC	Coaxial equilibrado

Además, para elegir el emplazamiento de dicho radar, adecuado para observar los fenómenos tormentosos de esta área, se han tenido en cuenta:

- *Cobertura espacial*. El alcance nominal máximo del radar cubre un círculo teórico de 450 km de diámetro, por lo que el área de estudio debe encontrarse dentro de este rango.
- *Obstáculos próximos*. Se deben evitar edificios elevados u otros objetos próximos al radar para que no interfieran con el haz emitido por la antena.
- *Relieve*. Deben evitarse las cadenas montañosas ya que provocan apantallamientos, ocultando parte de las masas nubosas al radar. Es decir, podría provocar que sólo se detecten tormentas con desarrollo vertical considerable o que parte de los desarrollos verticales quede fuera del alcance del radar. De esta forma, se perderían los datos relativos a la fase de crecimiento de las tormentas y las precipitaciones en zonas apantalladas.

- *Factores logísticos.* Se necesitan elementos externos para la operación y el mantenimiento del radar. Por ejemplo, debe disponerse de corriente eléctrica de baja tensión, con una potencia de al menos 15 kW.

Figura 2.29. Instalación del radar meteorológico de Zaragoza.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, el radar meteorológico se ubicó en una torre metálica de 28 m de altura para evitar obstáculos cercanos (figura 2.29). La ubicación concreta del mismo se muestra en la tabla 2.10.

Tabla 2.10. Localización geográfica del radar meteorológico de Zaragoza.

Latitud	41.6629 N
Longitud	1.0584 W
Altitud	287 m

Figura 2.30. Alcance del radar meteorológico de Zaragoza. Los puntos azules representan los granizómetros de la red de Zaragoza, dentro del alcance efectivo, y los puntos rojos representan los granizómetros de la red de Lérida, fuera del alcance efectivo.

Para esta ubicación, se determinó un alcance efectivo de entorno a 140 km (figura 2.30) que, con un ángulo de elevación de antena superior a 2° no presenta apantallamientos por relieve (Castro, 1989). Con ello, se intenta minimizar el *efecto de la distancia* (Bader et al., 1995) en los datos obtenidos. Así, se sacrifica la extensión del área estudiada para aumentar la fiabilidad de la base de datos.

2.3.4.2. Radar de San Rafael (Argentina)

Es un radar meteorológico de doble longitud de onda (doble banda S y X), tipo *MRL-5 modelo 1985*. Sus características técnicas se muestran en la tabla 2.11. Comenzó a operar de forma analógica en febrero de 1986, hasta que en 1998 fue automatizado.

Tabla 2.11. Características del radar de la banda S utilizado en el área de estudio del oasis sur de Mendoza (San Rafael).

Características de la antena	
Ganancia	40 dBZ
Anchura del haz	1.5° máximo (-3 dB)
Diámetro	4.5 m
Características del transmisor-receptor	
Frecuencia	2996 MHz
Potencia pico de salida	500 kW
Ancho del pulso	2 μ s
Frecuencia de Repetición de Pulsos (PRF)	250 Hz
Rango Dinámico del receptor	70 dB
Tipo de amplificador IF del receptor	Sintonizado a la IF
Tipo de mezclador AFC	Diodos balanceados o modulador balanceado

La localización del radar se especifica en la tabla 2.12. Dicho radar se encuentra en una torre de 8 metros de altura (figura 2.31) en el distrito de La Llave del departamento de San Rafael, a unos 35 km al este de la ciudad de San Rafael (sur de la provincia de Mendoza).

Figura 2.31. Instalación del radar meteorológico de San Rafael. (Fuente: DACC)

Tabla 2.12. Localización geográfica del radar meteorológico de San Rafael.

Latitud	34.6481 S
Longitud	1.0167 W
Altitud	550 m

2.3.5. SISTEMAS DE ADQUISICIÓN Y PROCESADO DE DATOS

En ambos radares meteorológicos, los procesos de control de la antena y de almacenamiento y posterior procesamiento de los datos se realizan a través de los sistemas de *hardware* y *software* concretos que se describen a continuación.

1. RDAS (*Radar Data Acquisition System*)

Se trata del sistema que controla el radar y realiza un primer procesamiento de los datos. Fue desarrollado para el *South Africa Weather Bureau* por *Electronic Systems Development*. Dicho sistema presenta un *software* determinado y consta de dos tarjetas electrónicas: SPC (*Signal Processor Card*) y RDAS (*Radar Data Acquisition System*).

Las funciones realizadas por el sistema RDAS son:

- Control automático de la antena, en modo *volume scan*.
- Procesado de los datos adquiridos por el radar, es decir, digitalización.
- Almacenamiento de los datos en un soporte externo.
- Primera visualización de los datos obtenidos.
- Envío de los datos al siguiente elemento del sistema radar vía LAN.

Previamente al comienzo de cada una de las campañas experimentales, se realiza la calibración del radar y del RDAS para poder garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos.

La calibración del *transmisor* se realiza comprobando la *potencia de emisión pico*. También se evalúan las pérdidas de potencia causadas por la *guía de ondas* y el *radomen*, que permanecen constantes en el tiempo.

La calibración del RDAS (que actúa como receptor) consiste en determinar la relación existente entre el número de unidades RDAS medidas (*counts*) y la reflectividad para todo el espectro a través de un sistema generador de señales. Se realiza desde la mínima señal detectable hasta el máximo valor posible en función de la potencia pico. Los parámetros utilizados en el proceso de calibración se muestran en la tabla 2.13 para el caso de Zaragoza y tabla 2.14 para el caso de San Rafael.

Tabla 2.13. Relaciones y parámetros utilizados en el proceso de calibración del radar de Zaragoza.

Pérdida de la guía de ondas <i>one way</i>	0.6 dB
Pérdida del <i>radomen two way</i>	0.5 dB
Atenuación del cable de test	8.0 dB
Atenuación <i>coupler</i>	30.0 dB

Tabla 2.14. Relaciones y parámetros utilizados en el proceso de calibración del radar de San Rafael.

Pérdida de la guía de ondas <i>one way</i>	1.0 dB
Pérdida del <i>radomen two way</i>	0.5 dB
Atenuación del cable de test	4.5 dB
Atenuación <i>coupler</i>	11.5 dB

Las *curvas de calibración* de los radares utilizados pueden observarse en las figuras 2.32 y 2.33. Se aprecia que desde 15 hasta 70 dBZ la relación es prácticamente lineal. Dentro de ese intervalo, el proceso de recepción de los datos radar se realiza de manera correcta. En cambio, la mayor parte de los radares de la banda C tienen la parte lineal más corta, comenzando en 20 dBZ. Esta diferencia de 20 a 15 dBZ permite mejorar la sensibilidad del radar, lo cual es importante en regiones donde los sistemas nubosos se encuentran en una fase inicial.

Esta calibración se realiza mensualmente y se ha mantenido constante a lo largo de todas las campañas experimentales de toma de datos.

Además se lleva a cabo una calibración espacial introduciendo en el RDAS las coordenadas exactas del sistema radar y una calibración temporal revisada a diario. Gracias a estas dos calibraciones, se consigue detectar tormentas con granizo sobre una determinada zona de estudio en *tiempo real* y de forma fiable.

Figura 2.32. *Curva de calibración* para el radar de la banda C de Zaragoza (azimut: 22.5° y elevación: 52.2°). (Fuente: López, 2003)

Figura 2.33. *Curva de calibración* para el radar de la banda S de San Rafael (azimut: 251.4° y elevación: 29.5°). (Fuente: DACC)

2. TITAN (*Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting*)

Este sistema fue desarrollado por Dixon en 1990, dentro del *Research Applications Program* (RAP) del *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) en Boulder (Colorado, EE.UU.).

El *software* TITAN procesa los datos sobre los ficheros MDV ya corregidos. Realiza la identificación de células mediante el programa *storm_ident*. Dixon y Wiener (1993) hicieron uso del método del *centroide de masa* (Witt y Jonson, 1993), aplicado para identificar las *células TITAN*, consideradas entidades tridimensionales.

Además, TITAN permite realizar el estudio de la trayectoria de cada tormenta a través del programa llamado *storm_track*, que se ejecuta de manera simultánea al programa *storm_ident*. Dicho programa *storm_track* asocia a cada célula identificada con esa misma celda en el barrido anterior si ya existe. Se va creando un registro de la evolución de cada células a lo largo del tiempo, es decir, la trayectoria o el ciclo de vida de cada tormenta. Este seguimiento temporal de las *células TITAN* se realiza a través de una optimización combinatoria basada en cierto grado en una aproximación que emplea la correlación cruzada (Tuttle y Foote, 1990).

Figura 2.35. Esquema simplificado del funcionamiento del sistema radar con todos sus elementos. Los programas están representados por elipses y los ficheros de datos por rectángulos. (Fuente: López, 2003)

También existen algoritmos geométricos adicionales (Dixon y Wiener, 1993) para detectar la unión de dos células tormentosas o la división de una célula determinada, habitual en días de elevada actividad convectiva.

TITAN proporciona también una predicción a muy corto plazo de las características de una célula determinada a través de una ponderación lineal proveniente de la historia de la tormenta a partir de su posición y tamaño (Mecklenburg et al., 2000).

A parte de todo ello, existen programas para visualizar los datos básicos de cada célula, como su posición geográfica o el *número de track* que la identifica. También se pueden obtener una serie de variables derivadas (definidas en el siguiente apartado) gracias a la aplicación de diferentes algoritmos.

Desde el punto de vista operativo, se deben tomar decisiones previas respecto a los umbrales de ciertas variables para definir las *células TITAN*. En los dos casos de estudio, se ha fijado 30 dBZ como umbral mínimo de *reflectividad* y 10 km^3 como umbral de *volumen*. De esta manera se filtran los ecos pequeños.

2.3.6. VARIABLES DE RADAR OBTENIDAS

El sistema TITAN descrito anteriormente permite almacenar datos de una superficie de 400 por 400 km de lado y un alcance vertical de unos 18 km (figura 2.36). Éste es el llamado *dominio TITAN*. La unidad mínima de información tiene un tamaño de pixel 1 km en el plano horizontal y en el vertical.

Figura 2.36. Esquema del dominio de TITAN utilizado en el presente estudio. (Fuente: DACC)

Como se ha explicado anteriormente, TITAN permite identificar *células* convectivas a partir de las variables detectadas por un radar. Esto es esencial para la vigilancia y predicción a muy corto plazo. Para saber de qué tipo de célula se trata y cuáles son los fenómenos asociados, se deben conocer las características y la estructura vertical de las células. Además, el programa dispone de tres ventanas para visualizar las *variables radar* en los barridos pasados y una predicción de las mismas para los próximos minutos a través de ciertos algoritmos.

Todas las variables radar disponibles a través de TITAN se resumen en la tabla 2.15. La primera notación es la que utiliza el programa en inglés, seguido del término completo en inglés. También se indica el término en castellano, las unidades en que se miden y una breve explicación de cada variable.

Además de esa tabla, a continuación se detallan los parámetros más importantes que se pueden extraer de TITAN y el término correspondiente utilizado por TITAN y en los cálculos de apartados posteriores.

Tabla 2.15. Variables radar extraídas de TITAN.

Abreviatura de TITAN	Término en inglés	Término en castellano	Unidades	Explicación de la variable
Complex num	Complex number	Número complejo		Nomenclatura de la célula
Simple num	Simple number	Número simple		Nomenclatura de la célula
Year	Year	Año		Fecha
Month	Month	Mes		Fecha
Day	Day	Día		Fecha
Hour	Hour	Hora		Fecha
Min	Minutes	Minutos		Fecha
Sec	Seconds	Segundos		Fecha
dBZ threshold	Reflectivity threshold	Umbral de reflectividad	dBZ	Umbral mínimo para detectar células
Remaining duration	Remaining duration	Duración	h	Duración de la célula
Total num of tracks	Total number of tracks	Número total de escaneos		Duración de la célula en número de barridos
Vol. centroid x	Volume centroid x	Coordenada x del centroide en volumen	km	Distancia x desde el radar hasta el centroide volumétrico
Vol. centroid y	Volume centroid y	Coordenada y del centroide en volumen	km	Distancia y desde el radar hasta el centroide volumétrico
Refl. centroid x	Reflectivity centroid x	Coordenada x del centroide en reflectividad	km	Distancia x desde el radar hasta el centroide ponderado en reflectividad
Refl. centroid y	Reflectivity of centroid y	Coordenada y del centroide en reflectividad	km	Distancia y desde el radar hasta el centroide de reflectividad
Ht of refl. centroid	Height of reflectivity centroid	Altura del centroide en reflectividad	km	Altura del centroide de reflectividad
Ht of centroid	Height of centroide	Altura del centroide	km	Altura del centroide
Max reflectivity	Maximum reflectivity	Reflectividad máxima	dBZ	Reflectividad máxima de la célula
Mean reflectivity	Mean reflectivity	Reflectividad media	dBZ	Reflectividad media de la célula
Top	Top	Techo	km	Parte más alta de la nube
Base	Base	Base	km	Parte más baja de la nube
Ht of max reflectivity	Height of maximum reflectivity	Altura de la máxima reflectividad	km	Altura de la máxima reflectividad
Volume	Volume	Volumen	km ³	Volumen de la tormenta
Mass	Mass	Masa	kt	Masa de la tormenta
Mean area	Mean area	Área media	km ²	Área media de la tormenta
Precip flux	Precipitation flux	Flujo de precipitación	m ³ s ⁻¹	Flujo de precipitación
Precip area	Precipitation area	Área de precipitación	km ²	Área de precipitación
VIL	Vertically Integrated Liquid	Agua líquida integrada verticalmente	kg m ⁻²	Agua líquida integrada verticalmente en cierto instante
Tilt angle	Tilt angle	Ángulo de inclinación	°	Ángulo de inclinación de la nube
Tilt orientation	Tilt orientation	Orientación de la inclinación	° respecto al norte	Orientación de la inclinación de la nube
Speed	Speed	Velocidad	km h ⁻¹	Velocidad
Dirn	Dirn	Dirección de desplazamiento	° respecto al norte	Dirección de desplazamiento de la tormenta
Dtop/Dt	Top rate	Tasa de cambio del techo	km h ⁻¹	Variación temporal del techo
Dvolume/Dt	Volume rate	Tasa de cambio del volumen	km ⁻³ h ⁻¹	Variación temporal del volumen
Dprecip_flux/Dt	Precipitation flux rate	Tasa de cambio del flujo de precipitación	m ³ s ⁻²	Variación temporal del flujo de precipitación
Dmass/Dt	Mass rate	Tasa de cambio de la masa	kt h ⁻¹	Variación temporal de la masa
DdBz_max/Dt	Maximum reflectivity rate	Tasa de cambio de la reflectividad máxima	dBZ h ⁻¹	Variación temporal de la reflectividad máxima

1. FACTOR DE REFLECTIVIDAD (Z)

Se puede visualizar el campo de reflectividades a diferentes alturas y está expresado en dBZ. A nivel operativo, es más importante la visión *integrada* de los valores del *factor de reflectividad* en toda el área. Así, para todo el *dominio TITAN* y sobre cada píxel en superficie, se localiza la máxima reflectividad en la vertical, independientemente de la altura (figura 2.37), mostrando el valor en el campo de *Rview* llamado *Composite*.

Además, para cada célula concreta, se dispone de:

- *Reflectividad máxima (Max reflectivity)*. Se trata de la máxima reflectividad encontrada dentro de la *célula TITAN*, indicando el grado máximo de intensidad alcanzado por la tormenta. Está relacionada con la precipitación y la concentración de partículas sólidas y líquidas de tamaño precipitable. Fue utilizada por muchos autores (por ej.: Carte y Held, 1978; Dye y Martner, 1978) como criterio que durante años permitió clasificar a las tormentas en productoras de precipitaciones de granizo o no.
- *Reflectividad media (Mean reflectivity)*. Es el valor medio del factor de reflectividad estimado dentro de la *célula TITAN* concreta.

Figura 2.37. Esquema del cálculo del campo *Composite* de TITAN. (Fuente: DACC)

2. VIL (VIL y cumVIL)

El VIL (*Vertically Integrated Liquid Water*) se puede definir como una función que transforma los datos de reflectividad de un radar meteorológico en estimaciones del contenido equivalente de agua líquida. Se basa en estudios teóricos de la distribución por tamaños de las gotas y en estudios empíricos del factor de reflectividad y el contenido de agua líquida. Sólo tiene en cuenta las gotas suficientemente grandes para ser detectadas por el radar concreto. Se mide en unidades de masa por unidad de área (kg m^{-2}) y se calcula integrando verticalmente la ecuación 2.15:

$$VIL = 3.44 \times 10^{-6} \sum_{Base}^{Techo} Z^{4/7} \Delta h \quad (2.15)$$

donde Δh es el intervalo de altura entre capas adyacentes en la vertical y Z es el valor de la reflectividad en $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$. Por tanto, es una integración estrictamente vertical (Greene y Clark, 1970), por lo que también se le denomina *VIL-grid*.

El parámetro no distingue entre la reflectividad aportada por el agua líquida y la aportada por las partículas de hielo o *graupe*. Así que en realidad es una *integración vertical de la masa de las partículas con tamaños precipitables*.

Dicho valor de VIL se calcula para todo el *dominio TITAN* y se representa en otro campo del *Rview*.

En las tormentas, sobre todo en las que presentan elevado desarrollo vertical, es frecuente el ladeo (inclinación de la tormenta respecto a la vertical), influenciado por la cizalladura del viento, la

intensidad del viento en los niveles medios y altos, etc. Además, la velocidad de desplazamiento de las tormentas en el área de estudio suele ser alta, superando los 50 km h^{-1} . Es por ello que la estimación del VIL puede estar subestimada. Se recomienda aplicar la estimación llamada *VIL-celular*. Para calcularla, se toma el máximo valor de reflectividad en cada altura de la integración vertical evaluada, aunque esos valores máximos no estén alineados sobre un píxel concreto en superficie. Estos valores de *VIL celular* están disponibles como anotación en el display del *Rview* para cada célula.

3. VARIABLES RELATIVAS AL CENTROIDE

El *centroide* es el centro de masas de la célula convectiva o el centro de reflectividades de la misma (según se indique *centroide* o *centroide de reflectividad*, respectivamente). Se calcula su posición, es decir, la distancia al radar, y su altura.

4. TECHO DE LA TORMENTA (Top)

Se define como la altura del borde superior de la tormenta, expresada en kilómetros. TITAN estima la altura a la que se encuentra el mayor eco identificado por el radar que contiene un valor de reflectividad previamente establecido (en el presente estudio, de 30 dBZ). Está relacionado con las características de la corriente ascensional del interior de la tormenta.

5. BASE DE LA CÉLULA TITAN (Base)

Se deben distinguir dos conceptos. Por un lado, la base detectada por el radar consiste en la altura más baja que el radar puede de muestrear. Está limitada por el menor ángulo de elevación de la antena. Por otro lado, la variable *base de la célula TITAN* se define como la altura mínima medida en kilómetros en la que se ha detectado un valor de reflectividad que supere el umbral prefijado. TITAN asume que la base de las tormentas es similar para todas las células detectadas. Cuando se detectan tormentas lejos del radar, puede darse el efecto de curvatura del haz u otro apantallamiento. Comparando ambos conceptos de base se consigue detectar este efecto no deseable.

6. ALTURA DE LA MÁXIMA REFLECTIVIDAD (Ht of max reflectivity)

Para un píxel concreto de la superficie, es la altura vertical en la que el radar detecta la máxima reflectividad, es decir, la altura del PPI (Indicador Plano-Posición) donde se encuentra la reflectividad máxima. Se expresa en kilómetros. Discrimina zonas con intensos procesos de precipitación.

7. VOLUMEN DE LA CÉLULA TITAN (Volume)

Es el volumen medido en km^3 que ocupa la *célula TITAN* según el umbral mínimo de reflectividad fijado. Se puede ver una evolución histórica del mismo.

8. MASA DE LA CÉLULA TITAN (Mass)

Es la masa de precipitación de la célula expresada en kilotoneladas. Muchos autores (por ejemplo: Atlas, 1954; Douglas et al., 1957) intentaron relacionarla con el *factor de reflectividad Z* ($\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$) que estima el contenido de agua dentro de una tormenta. En concreto, Dixon y Winner (1993) propusieron la siguiente expresión (ecuación 2.16):

$$Z = 20300 M^{1.67} \quad (2.16)$$

siendo M (g m^{-3}) una estimación de la *masa de agua* por unidad de volumen en la tormenta, referido exclusivamente a las partículas precipitables. En realidad corresponde a la masa total de precipitación,

es decir, gotas de agua precipitable y hielo. TITAN determina la *masa precipitable* calculando M para todo el volumen de la célula previamente definida.

9. ÁREA MEDIA (Mean area)

Es el área de la proyección de la *célula TITAN* sobre el plano horizontal en su valor medio para el tiempo de integración prefijado (usualmente entre 3 y 4 minutos). Se mide en km^2 . Su forma se aproxima a una elipse ya que los resultados obtenidos son mejores con dicha forma.

10. FLUJO DE PRECIPITACIÓN (Precip flux)

Existen diferentes relaciones empíricas para calcular el flujo de precipitación (Blanchard, 1953; Jones, 1956). En concreto, para este estudio, TITAN aplica la relación de Marshall y Palmer (1948) (ecuación 2.12, del apartado 2.3.1.). En realidad, el *flujo de precipitación* se puede estimar bien como la precipitación que está cayendo sobre la base de la célula, o bien utilizando toda la composición vertical, obteniendo mejores resultados que utilizando solamente los niveles más bajos de la célula.

TITAN calcula la aproximación del *flujo total de precipitación* al integrar este flujo de precipitación en toda el área de la célula. Se mide en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

También se puede obtener la *precipitación total acumulada* para un intervalo temporal definido. Los más utilizados son la masa total precipitada sobre un determinado píxel en la última hora y en las últimas 24 horas.

11. ÁREA PRECIPITADA (Precip area)

Consiste en el área proyectada sobre la horizontal que se ha sido afectada por precipitación, medida en km^2 .

12. ÁNGULO DE INCLINACIÓN (Tilt angle)

Representa el ángulo de inclinación expresado en grados, que presenta la tormenta con respecto a la vertical. En tormentas con poca inclinación, los puntos de máxima reflectividad suelen coincidir en la vertical sobre un cierto número de píxeles próximos. En cambio, en tormentas con fuerte inclinación las zonas de máxima reflectividad no coinciden en la vertical, y a veces están muy alejadas. Cuando ocurre esto, los parámetros derivados como el VIL presentan sesgos importantes.

13. ORIENTACIÓN DE LA INCLINACIÓN (Tilt orientation)

Consiste en la orientación del ladeo de la tormenta en grados con respecto al norte. En niveles medios y altos suele coincidir con el flujo general de la atmósfera.

14. VELOCIDAD (Speed)

TITAN estima la velocidad de desplazamiento de cada célula individual medida en km h^{-1} . Está relacionada con el viento en altura (Houze et al., 1993; Dessens, 1998; Ducrocq et al., 1998). En concreto, para el área de estudio de Aragón, Castro (1989) determinó que dicha velocidad de avance está muy influenciada por el valor de la intensidad del viento en el nivel de 650 hPa.

15. DIRECCIÓN DE DESPLAZAMIENTO (Dirn)

Proporciona la dirección en grados respecto al norte, hacia la cual se desliza cada célula.

16. TASA DE CAMBIO DE LA ALTURA DEL TECHO DE LA TORMENTA (D_{top}/Dt)

Señala la tendencia del *techo de la tormenta* para un intervalo de integración concreto. Se mide en km h^{-1} . En fase de crecimiento de la tormenta, la tasa es elevada y positiva mientras que en fase de madurez el valor es bajo y finalmente en la fase de disipación es negativa. Depende indirectamente del tiempo de duración de la célula, debido a que tormentas de corta duración no suelen presentar una fase de madurez acusada.

17. TASA DE CAMBIO DEL VOLUMEN (D_{volume}/Dt)

Indica la tasa de variación del *volumen* en unidades de $\text{km}^3 \text{h}^{-1}$.

18. TASA DE CAMBIO DEL FLUJO DE PRECIPITACIÓN (D_{precip_flux}/Dt)

Mide la variación del *flujo de precipitación* en $\text{m}^{-3} \text{s}^{-2}$. Por tanto, permite conocer la variación temporal de la intensidad de precipitación de una célula.

19. TASA DE CAMBIO DE LA MASA (D_{mass}/Dt)

Consiste en la variación de la *masa* de la célula en kilotoneladas por hora. Su distribución vertical indica la etapa de desarrollo en la que se encuentra la célula: si la tormenta está en fase de crecimiento, la masa se encuentra en niveles altos, mientras que si ha entrado en su fase de disipación, la mayoría de la masa precipitable está cerca de la superficie.

20. TASA DE CAMBIO DE LA MÁXIMA REFLECTIVIDAD (D_{dBz_max}/Dt)

Muestra la variación de la reflectividad a lo largo del tiempo, expresada en unidades de dBZ h^{-1} . Gracias a ella se puede determinar la fase de la tormenta y la intensidad de las zonas de crecimiento.

2.4. BIBLIOGRAFÍA

- Amburn,, S. and Wolf, P., 1997. VIL density as a Hail Indicator. *Wea. Forecasting*, **12**, 473 – 478.
- Aran, M., Sairouni, A., Bech, J., Toda, J., Rigo, T., Cunillera J. and Moré, J., 2007. Pilot project for intensive surveillance of hail events in Terres de Ponent (Lleida). *Atmos. Res.*, **83**, 315 – 335.
- Atlas, D., 1954. The estimation of cloud parameters by radar. *J. Meteor.*, **11**, 309 – 17.
- Atlas, D., Harper, W.G., Ludlam, F.H. and. Macklin, W.C., 1960. Radar scatter by large hail. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **86**, 468 – 482.
- Atlas, D., 1990. *Radar in meteorology*. Amer. Meteor. Soc., 806 pp.
- Bader, M.J., Forbes, G.S., Grant, J.R., Lilley, R.B.E. and Waters, A.J., 1995. *Images in weather forecasting*. Cambridge University Press, Cambridge, 499 pp.
- Battan, L.J., 1953. Observations of the formation and spread of precipitation in cumulus clouds. *J. Meteor.*, **10**, 311 – 324.
- Battan, L.J., 1973. *Radar observations of the atmosphere*. University of Chicago Press, 323 pp.
- Bech, J., Codina, B., Lorente, J. And Bebbington, 2002. Monthly and daily variations of radar anomalous propagation conditions: How “normal” is normal propagation. *Proceedings of ERAD, 1-4 Copernicus GmbH*, 2002, 35 – 39.

- Bech, J., Codina, B., Lorente, J. and Bebbington, D., 2003. The sensibility of single polarization weather radar beam blockage correction to variability in the vertical refractivity gradient. *J. Atmos. and Ocean. Tech.*, **20**, 845 – 855.
- Berenguer, M., Lee, G.W., Sempere-Torres, D. and Zawadzki, I., 2002. A variational method for attenuation correction of radar signal. *Proceedings of ERAD, 1-4 Copernicus GmbH*, 2002, 11 -16.
- Blanchard, D.C. 1953. Raindrop size distribution in Hawaiian rains. *J. Meteor.*, **10**, 457 – 73.
- Billet, J., DeLisi, M. and Smith, B.G., 1997. Use of regression techniques to predict hail size and the probability of large hail. *Wea. Forecasting*, **12**, 154 – 164.
- Brooks, H.E., Lee, J.W. and Graven, J.P., 2003. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. *Atmos. Res.*, **67 – 68**, 73 – 94.
- Brooks, H.E. and Anderson, A.R., 2004. Climatological aspects of convective parameters from the NCAR/NCEP reanalysis. *Preprints, 22nd Conf. Severe Local Storms. Am. Meteorol. Soc.* EEUU, Hyannis.
- Browning, K.A., 1977. The structure and mechanisms of hailstorms. In: *Am. Meteorol. Soc. Hail: a review on hail science and hail supression*. Meteorol. Monogr., **16**, 38, Boston, 1 – 43.
- Burguess, D. and Ray, P.S., 1988. *Principles of Radar. Mesoscale meteorology and Forecasting*. Am. Meteorol. Soc, 85 – 117.
- Capel, J.J, 1981. *Los climas de España*. Colección Ciencias Geográficas. Oikos-tau. Barcelona.
- Carte, A.E. and Held, G., 1978. Variability of hailstorms on the South African Plateau. *J. Appl. Meteorol.*, **17** (3), 365 – 373.
- Castro, A., 1989. Análisis de las tormentas del Valle Medio del Ebro mediante la utilización de radar meteorológico de la banda C. *Tesis Doctoral*, Universidad de Valladolid. 300 pp.
- Changnon Jr., S.A., 1969. *Hail evaluation techniques*. Part 1, Final Rpt. NSF GA-482, Illinois State Water Survey, Urbana, 88 pp.
- Changnon, S.A, 1971a. Note on hailstone size distributions. *J. Appl. Meteor.*, **10**, 168 – 180.
- Changnon, S.A., 1971b. Hailfall characteristics related to crop damage. *J. Appl. Meteor.*, **10**, 270 – 274.
- Changnon, S.A., 1973. Hail sensing and small-scale variability of windblown hail. *J. Wea. Mod.*, **5**, 30 – 42.
- Changnon, S.A., 1977. The scales of hail. *J. Appl. Meteor.*, **16**, 626 – 648.
- Charlton, R.B., Kachman, B.M. and Wojtiw, L., 1995. Urban hailstorms: A view from Alberta. *Natural Hazards*, **12**, 29 – 75.
- Clayton, H. H., 1889. Verification of weather forecast. *Amer. Meteor. J.*, **6**, 211 – 219.
- Clayton, H. H., 1891. Verification of weather forecast. *Amer. Meteor. J.*, **8**, 369 – 375.
- Dennis, A.S., Smith, P.L. Jr., Peterson, G.A.P. and McNeil, R.D., 1971. Hailstone size distributions and equivalent radar reflectivity factors computed from hailstone momentum records. *J. Appl. Meteor.*, **10**, 79 – 85.
- Dessens, J., 1986. Hail in south-western France: I. Hailfall characteristics and hailstorm environment. *J. Clim. Appl. Meteor.* **25**, 35 – 47.
- Dessens, J., 1998. A physical evaluation of a hail suppression project with silver iodide ground burners in southwestern France. *J. Appl. Meteor.*, **37**, 1588 – 1599.
- Dessens, J., Berthet, C. and Sánchez, J.L., 2006. A point hailfall classification based on hailpad measurements: The ANELFA scale. *Atmos. Res.*, **83**, 132 – 139.
- Dixon, M. and Wiener, G., 1993. TITAN: Thunderstorm, Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting –A radar based Metodology. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **10**, 6, 785 – 797.
- Donaldson, R.J., 1990. Foundations of severe storm detection by radar. In *Radar in Meteorology*. AMS, Boston, 806 pp.

- Douglas, R.H., Gunn, K.L.S. and Marshall, J.S., 1957. Pattern in the vertical of snow generation. *J. Meteor.*, **14**, 95 – 114.
- Douglas, R.H., 1963. *Recent hail research: A review*. Meteor. Monogr., **5**, No. 27, 157 – 167.
- Doviak, R.J. and. Zrníc, D.S., 1993. *Doppler Radar and Weather Observations*. 2ª ed. Academic Press, 562 pp.
- Ducrocq, V., Tzanos, D. and Sényi, S., 1998. Diagnostic tools using a mesoscale NWP model for the early warning of convection. *Meteorol. Appl.*, **5**, 329 – 349.
- Dye, J.E. and Martner, B.E., 1978. The relationship between radar reflectivity factor and hail at the ground for Northeast Colorado thunderstorms. *J. Appl. Meteor.*, **17**, 1335 – 1341.
- Edwards, R.E. and Thompson, R.L., 1998. Nationwide comparisons of hail size with Wsr-88d Vertically Integrated Liquid Water and derived thermodynamic sounding data. *Wea. and Forecasting*, **13**, 277 – 285.
- EUMETSAT, 2006. "MSG Interpretation Guide" <http://www.eumetsat.int>
- Federer B. and Waldvogel, A., 1975. Hail and raindrop size distributions from a Swiss multicell storm. *J. Appl. Meteor.*, **14**, 91 – 97.
- Féral, L., Sauvageot, H. and Soula, S., 2003. Hail detection using S- and C-band radar reflectivity difference. *J. Atmos. and Oceanic Tech.*, **20**, 233 – 248.
- Font, I., 1983. *Climatología de España y Portugal*. INM y Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones., Madrid, 296 pp.
- Fraile, R., 1991. Análisis climatológico y caracterización de las tormentas de granizo en las provincias de León y Zamora. *Tesis Doctoral*, Universidad de Valladolid, 184 pp.
- Fraile R., Castro, A. and Sánchez, J.L., 1992. Analysis of hailstone size distributions from a hailpad network. *Atmos. Res.*, **28**, 310 – 326.
- Fraile, R. Sánchez, J.L., de la Madrid, J.L., Castro, A. and Marcos, J.L., 1999. Some results from the hailpad network in León (Spain): noteworthy correlations among hailfall parameters. *Theor. Appl. Climatol.*, **64**, 105 – 117.
- Fraile, R., Castro, A., López, L., Sánchez, J.L. and Palencia, C., 2003. The influence of melting on hailstone size distribution. *Atmos. Res.*, **67 – 68**, 203 – 213.
- García de Pedraza, L., 1964. *La predicción del tiempo en el Valle del Ebro*. Serv. Meteor. Nac. Publ. A-38, INM, Madrid.
- Geotis, S.G., 1963. Some radar measurements of hailstorms. *J. Appl. Meteorol.*, **2**, 270 – 75.
- Gertzman, H.S., and Atlas, D., 1977. Sampling errors in the measurement of rain and hail parameters. *J. Geophys. Res.*, **82**, 4955 – 4966.
- Giaiotti, D., Giancesini, E. and Stel, F., 2001. Heuristic considerations pertaining to hailstone size distributions in the plain of Friuli-Venezia Giulia. *Atmos. Res.*, **57**, 269 – 288.
- Giaiotti, D. and Stel, F., 2006. The effects of environmental water vapour on hailstone size distributions. *Atmos. Res.*, **82**, 455 – 462.
- Greene, D.R. and Clark, R.A., 1972. Vertically integrated liquid-A new analysis tool. *Mon. Wea. Rev.*, **100**, 548 – 552.
- Grose, A.M., Smith, E.A., Chung, H., Ou, M., Sohn, B., and Turk, 2002. Possibilities and limitations for quantitative precipitation forecast using nowcasting methods with infrared geosynchronous satellite imagery. *Jour. Appl. Met.*, **41**, 763 – 785.
- Hart, P.A. y K. Frantz, 1998. A Comparison of VIL gensity and Wet-Bulb-Zero Height associated with large hail over North and Central Georgia. SR- Technical Attachment 98 – 30.
- Herman, B.M. and Battan, L.J., 1961. Calculations of Mie-scattering from melting ice spheres. *J. Meteor.*, **11**, 58 – 67.

- Holleman, I., Wessels, H.R.A., Onvlee, J.R.A. and Barlag, S.J.M., 2000. Development of a hail detection product. *Phys. Chem. Earth (B)*, **25**, 1293 – 1297.
- Holleman, I., 2001. Hail detection using single-polarization radar, Scientific report WR-2001-01, Royal Netherlands.
- Houze, R.A., Schmid, W., Fovell, R.G. and Schiesser, H.H., 1993. Hailstorms in Switzerland: left movers, right movers, and false hooks. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 3345 – 3370.
- Jones, D.M.A., 1956. *Rainfall drop-size distribution and radar reflectivity*. Res. Rept. 6. Urbana: Meteor. Lab., Illinois State Water Survey.
- Kessinger, C.J. and Brandes, E.A., 1995. A comparison of hail detection algorithms. Final report to the FAA, 52 pp.
- Knight, C.A., Smith, P. and Wade, C., 1982. *Storm types and some radar reflectivity characteristics. Hailstorms of the Central High Plains*. Vol I: The National Hail Research Experiment, I.
- Lemon, L.R., 1978. On the use of storm structure for hail identification. *Preprints, 18th Conf. on Radar Meteorology, Atlanta, GA, Amer. Meteor. Soc.*, 203 – 206.
- Long, A.B., Matson, R.J. and Crow, E.L., 1980. The hailpad: Material, data reduction and calibration. *J. Appl. Meteor.*, **19**, 1300 – 1313.
- López, L., 2003. Convección atmosférica severa: pronóstico e identificación de tormentas con granizo. *Tesis Doctoral*, Universidad de León, 207 pp.
- López, L. and Sánchez, J.L., 2009. Discriminant methods for radar detection of hail. *Atmos. Res.*, **93**, 358 – 368.
- Lozowski, E.P., Erb, R., Wojtiw, L., Wong, M., Strong, G.S., Matson, R., Long, A., Vento, D., Admirat, P.L., 1978. The hail sensor intercomparison experiment. *Atmosphere-Ocean*, **16**, 94 – 106.
- Marshall, J.S. and Palmer, W., 1948. The distribution of rain-drops with size. *J. Meteor.*, **5**, 165 – 166.
- Mather, G.K. and Treddenick, D., 1976. An observed relationship between the height of the 45 dBZ contours in storm profiles and surface hail reports. *J. Appl. Meteorol.*, **15** (12), 1336 – 1340.
- Mecklenburg, S., Jurczyk, A., Szturc, J. and Oródka, K., 2000. Quantitative precipitation forecasts (QPF) based on radar data for hydrological models. *European Co-operation in the field of Scientific and Technical Research 717*.
- Mezeiz, J.F. and Admirat, P., 1978. The measurement of hail at ground level. *Atmosphere-Ocean*, **16**, 61 – 68.
- Mezeiz, J.F. and Doras, N., 1981. Various kinetic energy characteristics of hailpatterns in the Grossversuch IV experiment. *Amer. Meteor. Soc.*, **20**, 377 – 385.
- Morgan, G.M.Jr. and Towery, N.G., 1975. Small-scale variability of hail and its significance for hail prevention experiments. *J. Appl. Meteor.*, **14**, 763 – 770.
- Murphy, A.H., 1996. General decompositions of MSE-based skill scores: measures of some basic aspects of forecasts quality. *Month. Wea. Review*, **124**, 2352 – 2369.
- Nicholas, T.R., 1977. A review of surface hail measurement of the sizes, shapes and kinematics of falling hailstones. *AMS Meteorol. Monogr.*, **38**, 257 – 277.
- Pearson, K., 1904. On the theory of contingency and its relation to association and normal correlation, in *Draper's Co. Res. Mem. Biometric Ser. 1.*, Cambridge, U.K., Cambridge Univ. Press. Reprint (1948) in Karl Pearson's Early Papers.
- Peña, J.L., Cuadrat, J.M. and Sánchez, M., 2002. *El clima en la provincia de Teruel*. Instituto de Estudios Turolenses. Teruel, 91 pp.
- Peña, J.L., 2003. Atlas de geografía de Aragón en Internet.
- Petrocchi, P.J., 1982. Automatic detection of hail by radar. AFGL-TR-82-0277. Environmental Research Paper 796, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, MA, 33 pp.
- Probert-Jones, J.R., 1962. The radar equation in meteorology. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **88**, 485 – 495.

- Reynolds, D.W., 1980. Observations of damaging hailstorms from geosynchronous satellite digital data. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 337 – 48.
- Rigby, E.C., Marshall, J.S. and Hitschfeld, W., 1954. The development of the size distribution of raindrops during their fall. *J. Meteor.*, **11**, 362 – 372.
- Rogers, R.R. and Yau, M.K., 1989. *A short course in cloud physics*. 3d ed. Elsevier, 290 pp.
- Rosenfeld, D., Woodley, W.L., Krauss, T.W. and Makitov, V., 2006. Aircraft microphysical documentation from cloud base to anvils of hailstorms feeder clouds in Argentina. *J. Appl. Meteorol. and Clim.*, **45**, 1261 – 1281.
- Sánchez, J.L., Castro, A., Fraile, R., Madrid, J.L. de la, 1991. Some characteristics of severe storms on León and Zamora (Spain). *Proc. Second International Meeting on Agriculture and Weather Modification*, Zamora (Spain), University of León, pp. 1 – 10.
- Sánchez, J.L., Marcos, J.L. and García, E., 2001. Construction and assessment of a logistic regression model applied to short term forecast of thunderstorms in León (Spain). *Atmos. Res.*, **56**, 57 – 71.
- Sánchez, J.L., Fernández, M.V., Fernández, J.T., Tudurí, E. and Ramis, C., 2003. Analysis of mesoscale convective systems with hail precipitation. *Atmos. Res.*, **67 – 68**, 573 – 588.
- Sánchez, J.L., López, L., Bustos, C., Marcos, J.L. and García-Ortega, E., 2008. Short-term forecast of thunderstorms in Argentina. *Atmos. Res.*, **88**, 36 – 45.
- Sánchez-Diezma, R., 2001. Optimización de la medida de lluvia por radar meteorológico para su aplicación hidrológica. *Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona*, 313 ppp.
- Sand, W.R., 1976. Observations in hail-storms using the T-28 aircraft system. *J. Appl. Meteorol.*, **15** (6): 641 – 650.
- Sauvageot, H., 1982. *Radar météorologie. Télédétection active de l'Atmosphère*. Edition Eyroles, Paris, France, 296 pp.
- Schleusener, R.A., and Jennings, P.C., 1960. An energy method for relative estimates of hail intensity. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **41**, 372 – 376.
- Smith, P. and Waldvogel, A., 1989. On determinations of maximum hailstone sizes from hailpad observations. *J. Appl. Meteor.*, **28**, 71 – 76.
- Smith, P., 2004: The hail problem. *Workshop on Severe Convective Storms*. León (Spain) 8th November 2004.
- Srivastava, R.C. and Jameson, A.R., 1977. *Radar detection of hail. A review of hail science and hail suppression*. Meteorol Monogr. **16**, No 38, 269 – 277.
- Strong, G.S. and Lozowski, E.P., 1977. An Alberta study to objectively measure hailfall intensity. *Atmosphere*, **15**, 33 – 53.
- Towery, N.G. and Changnon Jr., S.A., 1974. A review of surface hail sensors. *J. Wea. Mod.*, **6**, 304 – 317.
- Tuttle, J.D. and Foote, G.B., 1990. Determination of boundary layer airflow from a single Doppler Radar. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **7**, 218 – 232.
- Vento, D., 1978. L'angle de chute au sol de la grêle. *Atmosphere-Ocean*, **16**, 81 – 85.
- Vento, D. And Morgan, G., 1980. A study of the direction of wind accompanying hail in Colorado, Illinois, Italy and Switzerland, and of wind-caused variations of hailfall on an ultra-fine scale hailpad network containing obstacles to windflow. Preprints, *Third WMO Sci. Conf. On Weather Modification*, Clermont-Ferrand, WMO, 615 – 621.
- Vento, D., Malossini, A. and Vergnani, R., 1983. Reti strumentali di rilievo delle caratteristiche fisiche delle grandinate. La rete di rilevamento in Emilia Romagna. *Base Meteorológica S. Pietro Capofiume, Nota Técnica nº 3*, Bologna, 31 pp.
- Velasco, I. and Fristch, J.M., 1987. Mesoscale convective complexes in the Americas. *J. Geophys. Res.* **92**, 9561 – 9613.
- Vinet, F., 2001. Climatology of hail. *Atmos. Res.*, **56**, 309 – 323.

- Waldvogel, A., Schmid, W. and Federer, B., 1978. The kinetic energy of hailfalls. Part I: Hailstone spectra. *J. Appl. Meteor.*, **17**, 515 – 520.
- Waldvogel, A., Federer, B., Schmid, W. and Mezeiz, J.F., 1978. The kinetic energy of hailfalls. Part II: Radar and hailpads. *J. Appl. Meteor.*, **17**, 1680 – 1693.
- Waldvogel, A., Klein, L., Musil, D.J. and Smitch, P.L., 1987. Characteristics of radar identified big drop zones in Swiss hailstorms. *J. Clim. Appl. Meteorol.* **26**, 861 – 877.
- Waldvogel, A., Federer, B. and Grimm, P., 1979. Criteria for the detection of hail cells. *J. Appl. Meteorol.* **18**, 1521 – 1525.
- Waldvogel, A., Klein, L., Musil, D.J. and Smitch, P.L., 1987. Characteristics of radar identified big drop zones in Swiss hailstorms. *J. Clim. Appl. Meteorol.* **26**, 861 – 877.
- Webb, J.D.C., Elsom, D.M., and Meaden, G.T., 1986. The TORRO Hailstorm intensity scale. *J. Meteorology*, **11**, 337 – 339.
- Wexler, R., 1947. Radar detection of a frontal storm 18 June 1946. *J. Meteor.*, **4**, 38 – 44.
- Wexler, R. and Swingle, D.M., 1947. Radar storm detection. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **28**, 159 – 167.
- Witt, A. and Jonson, J.T., 1993. An enhanced storm-cell identification and tracking algorithm. *Preprints 26th Conf. on Radar Meteorology*. AMS, Norman, Oklahoma.
- Wyatt, A. and Witt, A., 1997. The effect of population density on ground-truth verification of reports used to score a hail detection algorithm. *Preprints, 28th Conf. on Radar Meteorology*, Austin, TX, *Amer. Meteor.*

3

BASES DE DATOS Y METODOLOGÍA

3.1. INTRODUCCIÓN

A continuación, se describe la metodología seguida para la obtención de los resultados, desde la organización de la campaña experimental hasta la creación de las bases de datos preparadas para los análisis estadísticos.

La participación del Grupo de Física de la Atmósfera de la Universidad de León (GFA) en cada una de las bases de datos de las distintas zonas de estudio es diferente:

- Granizómetros de Zaragoza. El GFA lleva a cabo las tres etapas completas en las que se divide la metodología, es decir, desde el trabajo de campo y la medida de los granizómetros, hasta el análisis estadístico.
- Granizómetros de Lérida. La labor del GFA comienza con la preparación y procesado de los granizómetros, para extraer los parámetros de los granizómetros y tratarlos.
- Granizómetros de Francia y Argentina. Los granizómetros se miden en sus respectivos puntos de origen y los datos numéricos brutos llegan al GFA para su depuración y tratamiento.

3.2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL DE TOMA DE DATOS

La realización de los trabajos de investigación que han dado lugar a esta Memoria de Tesis Doctoral, se basa en las campañas experimentales que han tenido lugar en el Valle Medio del Ebro durante el desarrollo de los Proyectos PAIRAGRA (2001 a 2003), MONEGRO (2004 a 2006) y SEVERUS (2007 a 2009), todos ellos financiados por el Plan Nacional de I+D+i.

En cada uno de estos proyectos se siguen rutinas diarias similares que básicamente consisten en:

- Establecimiento del riesgo de tormentas con granizo. Se analizan las situaciones meteorológicas haciendo uso de los modelos MM5 (en este caso la salida del GFA), MASS (del *Servei Meteorològic de Catalunya*) y HIRLAN (de AEMET, *Agencia Estatal de Meteorología*).
- Observación meteorológica de las áreas de estudio a través de las imágenes del satélite MSG (*Meteosat of Second Generation*) o/y del radar meteorológico del GFA en Zaragoza (figura 3.1). En el caso del radar, se procede al almacenamiento de todos los datos haciendo uso de TITAN.

Cuando precipita granizo sobre una red de granizómetros, es muy importante proceder al cambio de las placas impactadas de la manera más rápida posible. Para ello es importante disponer de un sistema de observación meteorológica confiable que diferencie, en tiempo real, entre tormentas con y sin granizo.

Tanto en el radar instalado en el Valle Medio del Ebro como en el del oasis sur de Mendoza está implementada una aplicación desarrollada por López y Sánchez (2009) que permite visualizar directamente en pantalla la probabilidad de granizo de cada célula tormentosa concreta (figura 3.2). Esta herramienta discriminante fue construida a través del *método de regresión logística por pasos* y el *método de análisis discriminante múltiple por pasos*. Fue establecida, inicialmente, para la zona de estudio del Valle Medio del Ebro y, más tarde, puesta a punto para Mendoza. En ambos casos la fiabilidad del algoritmo es elevada pues son escasos los casos perdidos y de falsas alarmas como se puede constatar en la tabla 3.1.

A través de esta metodología, cuando los algoritmos identifican una tormenta que da lugar a precipitaciones de granizo, inicialmente, se realizan llamadas telefónicas a las localidades afectadas para

comprobarlo y conocer el tamaño del mismo. Si se observa que afecta al área en la que están desplegados los granizómetros, se inspeccionan las zonas en donde se sitúa la tormenta y las más próximas para verificar y retirar, en su caso, las placas impactadas y colocar otras nuevas.

Figura 3.1. Campo del *factor de reflectividad* (dBZ) en TITAN.
(Tormentas del 19 de julio de 2006 en Zaragoza sobre la red de granizómetros, puntos blancos).

Tabla 3.1. Valores de *probabilidad de detección* (POD, *Probability of Detection*) y *tasa de falsas alarmas* (FAR, *False Alarm Ratio*) para los modelos creados con el *análisis discriminante* y la *regresión logística* (López y Sánchez, 2009).

	Análisis discriminante		Análisis de regresión logística	
	Muestra principal	Muestra de validación	Muestra principal	Muestra de validación
FAR	0.082	0.124	0.097	0.151
POD	0.923	0.868	0.946	0.849

Figura 3.2. Campo de la *probabilidad logística de granizo* (%) en TITAN.
(Tormentas del 19 de julio de 2006 en Zaragoza sobre la red de granizómetros, puntos blancos).

Por tanto, el trabajo de campo consiste en la revisión de los granizómetros posiblemente afectados y recogida de los mismos cuando han sido impactados por granizo. Además de esta revisión, se ha de realizar una revisión periódica de los granizómetros para retirar las placas que se hayan deteriorado por las inclemencias meteorológicas, la fauna o el vandalismo.

En la figura 3.3 se muestra la base donde está colocada una placa de granizómetro. La figura 3.4 presenta una placa tras su recogida en el campo, es decir, sin “revelar”. Una vez recogidas las placas, comienza el trabajo de laboratorio.

Figura 3.3. Granizómetro de la red de Zaragoza.

Figura 3.4. Placa impactada antes de tratar.

3.3. MEDIDA DE GRANIZÓMETROS

Como se ha señalado en el capítulo 2 de esta Memoria, para la medida de los granizómetros se aplica un procedimiento semiautomático que contabiliza el número de impactos y mide su diámetro y forma. Éste se explica a continuación.

3.3.1. CALIBRACIÓN, LIMPIEZA Y REVELADO DEL GRANIZÓMETRO

En primer lugar, se realiza la operación de *calibrado* en la franja de la placa no impactada, reservada para ello. Sobre esa zona se lanzan esferas de acero de diferentes diámetros a diferentes alturas calculadas previamente. Se asume que el tamaño de las huellas es función de la energía cinética del impacto (Lozowski y Strong, 1978). Así, las esferas llegan a la placa con la misma energía cinética con que lo haría una piedra esférica de granizo del mismo tamaño (Vento, 1978).

Concretamente, se utilizan seis esferas con tamaños comprendidos entre los 5 y los 20 mm ya que es el rango más frecuente de tamaños en la zona de estudio. La esfera de menor diámetro (5 mm) se hace impactar tres veces para reducir el error de los tamaños más pequeños al realizar el ajuste lineal. Así finalmente se obtienen ocho impactos de calibración. En el caso de registrarse granizos de gran tamaño, se utilizan unas esferas de calibración adicionales de entre 25 y 30 mm de diámetro.

Este proceso de calibración pretende disminuir la incertidumbre relacionada con el tamaño de las piedras más pequeñas (Lozowski y Strong, 1978; Vento, 1978) y los errores de la propia muestra (Changnon, 1973; Gertzman y Atlas, 1977; Vento, 1978; Vento y Morgan, 1980; Fraile et al., 1992)

A continuación se lavan las placas para eliminar las impurezas. Cuando la superficie está seca, se impregna de tinta negra aplicada con un rodillo. De esta forma, las huellas dejadas por el granizo permanecen de color blanco, mientras que el resto de la superficie se tiñe de color negro de la forma más homogénea posible.

3.3.2. SISTEMA DE MEDIDA SEMIAUTOMÁTICO

El equipo necesario en esta etapa consiste en un escáner de alta resolución (en nuestro caso tiene una resolución óptica de 600 ppp x 2400 ppp) y un ordenador provisto del software adecuado (figura 3.5). El primer paso para realizar la medida de los impactos en los granizómetros consiste en la digitalización de la placa mediante su escaneado (figuras 3.6 y 3.7 a).

Figura 3.5. Equipo necesario para la medida de los granizómetros.

Posteriormente, se aplica un programa de tratamiento de imágenes y reconocimiento de formas geométricas llamado *Image-Pro® Plus*. Este software realiza una serie de pasos previos para realzar las diferencias entre los impactos del granizo que se deben medir (en color blanco) y el fondo de la imagen (negro). Primero lleva a cabo una ecualización de la imagen para aumentar el contraste entre los valores más claros y los más oscuros. Posteriormente, un filtrado espacial (sobre diferentes tamaños de píxel) separa algunos objetos conectados, elimina pequeñas gotitas de pintura negra sobre los impactos blancos y suaviza ligeramente los contornos. Por último, un reajuste de los umbrales entre el blanco de los impactos y el negro de fondo aumenta la diferencia existente entre ellos (figura 3.7 b).

Figura 3.6. Escaneado de la placa.

Para finalizar, el programa lleva a cabo un reconocimiento automático de patrones con forma de elipse y así identifica y mide varios parámetros de las huellas. En esta parte, es imprescindible que una persona supervise y compruebe el proceso de identificación (figura 3.8) para poder corregir ciertos casos: solapamiento de las huellas, impactos no generados por el granizo, unión de partes de un mismo impacto, etc. El resultado final de la medida se puede observar en la figura 3.7 c).

Figura 3.7. Pasos sucesivos en el tratamiento y medida de una placa impactada el 27 de junio de 2006 en la red de Zaragoza: a) placa entintada y escaneada sin tratar; b) placa filtrada por el *Image-Pro® Plus*; c) placa medida por el *Image-Pro® Plus*.

El procedimiento anterior se realiza tanto en los impactos de granizo como en los de calibración. Utilizando los impactos de calibración se calcula una recta de regresión que relaciona los diámetros de los impactos dejados por las esferas de calibración con los diámetros reales de dichas esferas. Así, se realiza una estimación precisa de los tamaños alcanzados por las piedras de granizo en el granizómetro medido. Entonces, los datos numéricos se exportan a *Excel*, obteniéndose el *número de impactos* por unidad de superficie, el *diámetro* de los impactos, la *masa de hielo* por unidad de superficie y la *energía cinética* por unidad de superficie.

Figura 3.8. Medida de los impactos de granizo en cada placa de forma semiautomática con el programa *Image-Pro® Plus* supervisado por una persona.

Conviene señalar que todos los granizómetros utilizados en este estudio fueron medidos con el mismo método semiautomático, lo que permite aumentar la fiabilidad.

3.3.3. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS OBTENIDOS

Diversos autores (por ej.: Vento, 1978; Lozowski y Strong, 1978; Fraile et al., 1992; Palencia et al., 2007) han estudiado el cálculo de las variables relativas a las piedras de granizo a partir de los impactos dejados por las mismas sobre la superficie del granizómetro. Para cada granizómetro, los datos obtenidos del programa de reconocimiento de formas permiten establecer el *número de impactos* N registrados y las *dimensiones del impacto* (eje mayor D_{imp} y eje menor d_{imp}), así como la forma de cada uno de ellos. A partir de estos parámetros, a través de la recta de calibración hallada gracias a los impactos de calibración (con *pendiente* k y *ordenada en el origen* m) se obtiene el *diámetro* D_i de la piedra de granizo correspondiente a ese impacto (ecuación 3.1). Teniendo en cuenta la *velocidad de caída del granizo* v (Changnon, 1969; Mason, 1971; Vento, 1976; ecuación 3.2) calculada a partir de las *densidades del hielo y del aire* ($\rho_h = 0.9 \text{ g cm}^{-3}$; $\rho_a = 1.1 \cdot 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$), del valor de la *gravedad* ($g = 981.0 \text{ cm s}^{-2}$) y el *coeficiente de arrastre* ($C_d = 0.6$), se halla la *masa de hielo* M_i (ecuación 3.3), y la *energía cinética* E_{ci} (ecuación 3.4) que corresponde a cada una de las marcas dejadas por cada piedra de granizo. Solamente se tienen en cuenta los impactos con diámetro mayor de 5 mm, umbral mínimo para considerar una partícula de hielo como granizo.

$$D_i = d_{imp} (k + m) \quad (3.1)$$

$$v = \sqrt{\frac{1}{3} \frac{\rho_h g D_i}{\rho_a C_d}} \quad (3.2)$$

$$M_i = \rho_h \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_i}{2}\right)^3 \quad (3.3)$$

$$E_{ci} = \frac{1}{2} M_i v^2 \quad (3.4)$$

Una vez conocidas esas características de cada impacto individual, se hallan las variables totales para una placa, es decir, se suma el *número de impactos*, la *masa de hielo* y la *energía cinética* de todos los impactos y se establece el *diámetro máximo*, para obtener las variables correspondientes a cada granizómetro concreto.

Tabla 3.2. Datos principales obtenidos a través de la medida de los granizómetros.

Variable	Símbolo	Unidades
Número de impactos por unidad de superficie	N	Nº imp. m ⁻²
Diámetro de cada impacto	D _i	mm
Masa total de hielo precipitada por unidad de superficie	M	kg m ⁻²
Energía cinética total por unidad de superficie	Ec	J m ⁻²
Diámetro máximo de la placa	D _{máx}	mm

Sin embargo, esos datos relativos a cada granizómetro no son representativos. Así que en el siguiente paso, se hallan las variables por unidad de superficie, utilizando un factor de conversión según las dimensiones de la placa (tabla 2.2 del capítulo 2). Los datos más importantes, que se utilizan en los posteriores análisis estadísticos, se listan en la tabla 3.2.

3.4. BASES DE DATOS DE GRANIZÓMETROS

Los impactos de granizo se clasifican en función de su tamaño. Así, se conoce el número de impactos por unidad de superficie cuyo tamaño está englobado en una clase de diámetro. El tamaño de estas clases es importante como se discute posteriormente (Sánchez et al., 2009).

En el caso de las redes de granizómetros españolas y argentinas, el tamaño de la clase es de 1 mm, (es decir, las clases fueron de 5-6, 6-7, 7-8, 8-9 mm y así sucesivamente) intentando de este modo realizar el análisis lo más detalladamente posible. En cambio, en las redes francesas, el tamaño de la clase es heterogéneo: de 2 mm hasta un diámetro de 17 mm (es decir, 5-7, 7-9, 9-11, 11-13, 13-15, 15-17 mm), de 4 mm hasta un diámetro de 45 mm (es decir, 17-21, 21-25, 25-29, 29-33, 33-37, 37-41, 41-45 mm) y una última clase que engloba todas las piedras de granizo con un diámetro mayor de 45 mm. Se conserva esta antigua clasificación utilizada cuando las mediciones se realizaban manualmente, para mantener una serie uniforme de datos durante diecinueve años en las redes francesas.

La detección de impactos de granizo pequeños es difícil. Una piedra de granizo de 5 mm de diámetro tiene una masa de 0.06 g, por lo que deja una marca muy débil al golpear el material sensible. Además, las piedras mayores pueden ocultar las marcas de esas más pequeñas. Por ello, se suelen encontrar menos impactos en la clase de 5 a 6 mm que en la siguiente de 6 a 7 mm. Morgan (1990) propuso la multiplicación del número de impactos en cada clase por un factor para corregir este error. Sin embargo, debido a la adecuada elección del material y a las depuradas técnicas de calibración y medida, en nuestro caso no es necesario aplicar dicha corrección ya que el número de impactos en la primera clase es mayor que en la segunda, lo que es consistente con los procesos de crecimiento del granizo.

Todos estos datos se pueden tratar para cada granizómetro individual, o agrupar por granizadas, o por días, o por cualquier periodo de tiempo que se considere adecuado. No obstante, para poder efectuar el tratamiento, es preciso aplicar *análisis de homogeneidad* que aseguren que las muestras pertenecen a la misma población y se pueden acumular. Los resultados satisfactorios de esos análisis se muestran en el capítulo 5.

En concreto, las diferentes *variables acumuladas* tanto diaria como anualmente se hallan:

- Para el *número de impactos*, la *masa* y la *energía*, se calcula el sumatorio de los valores de todos los granizómetros afectados cada día (acumulado diario) o cada campaña experimental (acumulado anual).
- Para el *diámetro máximo*, se elige el valor máximo de todos los granizómetros impactados durante ese día como representativo del *diámetro máximo diario* o durante esa campaña experimental para el *diámetro máximo anual*.

En el capítulo 4 de esta Memoria se estudian las características de las tormentas que afectan a las áreas de estudio del Valle Medio del Ebro y de Mendoza. En el caso de la red de Zaragoza, solamente se incluyen en este análisis los granizómetros de las tres campañas en las que la red permaneció estable (de 2005 a 2007) para evitar errores ya que en 2003 y 2004 se estaba procediendo a la instalación. También se utilizan los valores de las diferentes variables medidas en los granizómetros y su localización para hallar su distribución espacial para esos años con la red completa en ambas áreas de estudio. Tratando los granizómetros de forma individual, se calcularon los estadísticos descriptivos de las variables para conocer la intensidad de las granizadas en cada red. Para este análisis, en Zaragoza se abarcan los cinco años de los que se dispone de datos (de 2003 a 2007). En este capítulo hay que tener en cuenta la representatividad espacial de cada uno de los granizómetros. Como éstos están colocados en los vértices de una red de 5 km de lado, se asume que la superficie equivalente de cada uno de ellos es de 25 km².

Tabla 3.3. Variables de radiosondeos utilizadas en el capítulo 4.

Símbolo	Variable	Unidad	Definición o cálculo matemático
$Td_{superficie}$	Temperatura de rocío superficie	°C	Temperatura a la que comienza la condensación en superficie
Td_{850}	Temperatura de rocío 850 mb	°C	Temperatura a la que comienza la condensación a 850 mb
F_{850}	Velocidad del viento a 850 mb	kn	Velocidad del viento a 850 mb
F_{500}	Velocidad del viento a 500 mb	kn	Velocidad del viento a 500 mb
F_{200}	Velocidad del viento a 200 mb	kn	Velocidad del viento a 200 mb
LFC	Nivel de libre convección	m	Altura a la que la parcela de aire que asciende de forma adiabática seca hasta saturación (en el LCL) y de forma adiabática húmeda después, alcanza una temperatura mayor que la del ambiente
LI	Índice de elevación	°C	$LI = T_{500} - T_{parcela_{500}}$ (Galway, 1956)
SI	Índice de Showalter	°C	$SI = T_{500} - T_{parcela_{500}}$ usando una parcela elevada desde 850 hPa (Showalter, 1953)
TI	Índice de Thompson	-	$TI = KI - LI$
JI	Índice de Jefferson	°C	$JI = 1.6 WBP T_{850} - T_{500} - 0.5 T_{Depresión_{100}} - 8$ (Jefferson, 1963)
KI	Índice K	°C	$KI = T_{850} - T_{500} - Td_{850} - Td_{700} - T_{700}$ (George, 1960)
TT	Total de Totales	°C	$TT = T_{850} + Td_{850} - 2 T_{500}$ (Miller, 1975)
SWEAT	Índice SWEAT	-	$SWEAT = 12 Td_{850} + 20 (TT - 49) + 2 F_{850} + F_{500} + 125 (S + 2)$ (Miller, 1975)
CAPE	Energía Convectiva Potencial Disponible	J kg ⁻¹	$CAPE = \int_{LFC}^{EL} g \left(\frac{T_{v_{parcela}} - T_{v_{ambiente}}}{T_{v_{ambiente}}} \right) dz$ (Moncrieff and Miller, 1976)
Helicidad	Helicidad	m ² s ⁻²	Mitad del producto escalar entre la velocidad y la vorticidad
EHI	Índice de Energía-Helicidad	-	$EHI = \frac{(+s - r H_{2km} * CAPE)}{160000}$
VGP	Parámetro de Generación de Vorticidad	m s ⁻²	$VGP = SRH \sqrt{CAPE}$
CAP	Fuerza CAP	°C	Máxima diferencia de temperaturas entre el perfil ambiental y el de la parcela entre el nivel de la parcela que asciende y el LFC
BRN	Número de Bulk Richardson	-	$BRN = \frac{CAPE}{0.5 (BRN_{shr})^2}$
BRN-shr	Cizalladura del Número de Bulk Richardson	m ² s ⁻²	Magnitud del vector diferencia entre el viento medio entre 0 y 6 km y el viento medio entre 0 y 500 m
WBZ	Altura del cero del termómetro húmedo	m	Altura en la que el perfil del termómetro húmedo pasa de temperatura positiva a negativa
HAIL	Índice HAIL	in	Índice que estima el tamaño del granizo a partir pruebas en el túnel del viento y la estimación de la velocidad ascensional en tormentas (Fawbush y Miller, 1953)
WINDEX	Índice W	kn	Índice que estima el potencial de microburst (McCann, 1994)
T ² Gust	T ² Gust	kn	Máxima probabilidad de una ráfaga derivada del Método T2 (AWS/TR 200, 1972)
KO	Índice KO	k	$KO = \frac{(\theta_{e_{500}} + \theta_{e_{700}})}{2} - \frac{(\theta_{e_{850}} + \theta_{e_{1000}})}{2}$
BOYDEN	Índice BOYDEN	-	$BOYDEN = T_{700} + \frac{Espesor_{1000-700mb}}{10} - 200$ (Boyden, 1963)
SI	Índice S	°C	$SI = TT - (T_{700} - Td_{700}) - K$
Tropopausa	Altura de la tropopausa	m	Límite entre la troposfera y la estratosfera
H ₀ , H ₋₅ , H ₋₁₀	Altura de la isocero, -5 y -10 °C	m	Altitud a la que se encuentra la temperatura de 0 °C, -5 °C y -10 °C
CCL	Altura del Nivel de Condensación Convectivo	m	Altura a la que una parcela de aire calentada suficientemente desde abajo, ascendería adiabáticamente hasta que la condensación comienza.
LCL	Altura del Nivel de Condensación Forzado	m	Altura a la que una parcela de aire se satura cuando asciende por la adiabática seca.
Tc	Temperatura convectiva	°C	Temperatura que debe alcanzar la superficie para que ocurra la convección
SRH03, SRH02, SHR01	Helicidad relativa de la tormenta a 3 km, 2 km y 1 km	m ² s ⁻²	Helicidad relativa medida a esas altitudes

Por último, se usan los datos del granizómetro que presenta la *energía cinética* máxima del día (el máximo valor encontrado en un granizómetro en un día) para correlacionarlos con parámetros de radiosondeos. La notación de esas variables de radiosondeos y su definición o cálculo se exponen en la tabla 3.3 y han sido tomados de la guía de usuario y manual técnico del RAOB (RAwisonde OBservation).

Para el capítulo 5, en la primera parte, relativa a las distribuciones de tamaño del granizo en el suelo, se utilizan únicamente las clasificaciones de los impactos por tamaño, es decir, el número de impactos en cada una de las clases de diámetro. En los casos de las redes de España y Argentina el tamaño de los intervalos es de 1 mm. En concreto en la red de Zaragoza se analizan los datos de cuatro campañas (de 2003 a 2006); en la de Lérida, de siete campañas (de 2000 a 2006); y en las redes argentinas, de dos campañas (de 2004/05 a 2005/06). En cambio, en las redes de Francia, el tamaño de los intervalos es diferente, como se ha explicado, para conservar la larga serie de datos disponible de más de dieciséis campañas. En todas ellas, el umbral mínimo para considerar los impactos como granizo es de 5 mm. En la segunda parte de este capítulo, relativa a las distribuciones de energía cinética, se analiza la energía cinética acumulada durante todo un día, es decir la suma de los valores de energía cinética medidos en todos los granizómetros impactados en un mismo día de granizo. Se realiza para las redes españolas y argentinas para todas las campañas disponibles.

Respecto a los capítulos 6 y 7, la variable principal utilizada es la *energía cinética* medida en cada granizómetro ya que se pretende calcular una relación empírica entre ésta y las *variables radar*. Se emplean los valores de energía individuales de granizómetros previamente seleccionados según unos criterios muy restrictivos como se explica en el siguiente apartado, para los que se dispone de datos fiables de los radares meteorológicos de Zaragoza y San Rafael (Mendoza).

En resumen, la base de datos está organizada en primer lugar por granizómetros. Estos granizómetros se agrupan por días y posteriormente, por campañas experimentales, es decir, por años. A su vez, para cada red de granizómetros, se suman todos los años para obtener un total acumulado de las diferentes variables.

3.5. BASES DE DATOS DE RADAR

Las segundas bases de datos construidas son las de datos de radar, en concreto para las campañas 2006 y 2007 del radar de la banda C de Zaragoza y para las campañas 2005/06 y 2006/07 del radar de la banda S de San Rafael.

En primer lugar, los datos extraídos de TITAN se exportan a un formato adecuado. En concreto, se obtienen las *variables radar* (Dixon and Wiener, 1993) que se listan en la tabla 2.15 del capítulo anterior en el apartado 2.2.5.

A continuación, se ordenan los escaneos del radar (un barrido cada 4 minutos aproximadamente) seleccionando cronológicamente las *células TITAN*, realizando un seguimiento de todas las tormentas importantes ocurridas dentro del alcance efectivo del radar. Además se anotan todas las posibles incidencias como apantallamientos, solapamientos, cortes de suministro eléctrico, etc. También se considera la *verdad terreno* disponible, es decir, se señalan los barridos en los que se ha confirmado la caída de granizo ya sea por vía telefónica o a través de granizómetros impactados. De esta forma, la base de datos agrupa los barridos en dos tipos: aquellos en los que se ha confirmado la caída de granizo y aquellos en los que no se posee información (*granizo* y *no granizo*).

Seguidamente, nos centramos solamente en las tormentas que han afectado a los granizómetros. Así se ordenan los barridos por granizómetros impactados, reconstruyendo la trayectoria de la tormenta desde su aparición hasta su disipación. Además de las *variables radar* extraídas automáticamente por TITAN correspondientes a cada célula, se anotan otras variables puntuales

relativas a la localización concreta del granizómetro como la *reflectividad puntual*, el *VIL*, el *VIL acumulado* desde el comienzo de la tormenta hasta el final de la misma. Al mismo tiempo, se añaden las variables medidas en cada granizómetro (*número de impactos*, *masa de hielo*, *energía cinética* y *diámetro máximo*, todas por unidad de superficie).

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se analiza la trayectoria de cada una de las tormentas que afecta a cada granizómetro, y sólo se seleccionan aquellas que cumplan estrictamente los siguientes criterios:

- Granizómetros dentro del alcance efectivo del radar, es decir, no más lejos de 140 km ni más cerca de 10 km (estarían dentro del *cono ciego*).
- Granizómetros afectados por granizo proveniente de una sola célula, es decir, sin solapamientos de tormentas.
- Trayectorias de las tormentas completas, sin que falte ningún barrido a causa de algún problema como cortes de suministro eléctrico.
- Ausencia de apantallamientos causados por la presencia de otra célula entre el radar y la célula responsable de los impactos en el granizómetro (figura 3.9 izquierda), o causados por la presencia de una tormenta sobre el radar. Ambas debilitan la señal recibida.
- Ausencia de interferencias de diferente tipo que puedan potenciar o disminuir la señal (figura 3.9 derecha).

Figura 3.9. Ejemplos de restricciones no cumplidas en el radar de Zaragoza: célula apantallada por otra célula entre ella misma y el radar (izquierda) e interferencia generalizada (derecha).

Debido a todas estas restricciones, el número de granizómetros disponibles para los análisis estadísticos y por tanto para crear un modelo de estimación de energía es muy bajo respecto al número total de granizómetros medidos y analizados (tabla 3.4).

Tabla 3.4. Número de granizómetros válidos en las bases de datos de radar para cada red de granizómetros.

	Campañas	Granizómetros medidos	Granizómetros seleccionados
Zaragoza	2006, 2007	235	119
Oasis sur de Mendoza	2005/06, 2006/07	399	100

Además, debido a las grandes dimensiones de las tormentas que se registran en el oasis sur de Mendoza, en esta área de estudio sólo se seleccionan aquellos granizómetros que se encuentran en la parte central de la célula (figura 3.10). Con este filtro más restrictivo, se asegura que la señal no está debilitada.

Figura 3.10. Ejemplo de selección de granizómetros situados en la parte central de la trayectoria de granizo de una tormenta en el oasis sur de Mendoza: campo de *reflectividad* (izquierda) y campo de *probabilidad de granizo acumulada* (derecha), ambas en la pantalla de visualización de TITAN.

Tabla 3.5. *Variables de granizómetros y variables radar consideradas para la creación del modelo de estimación de la energía cinética.*

Variable	Abreviaturas en los cálculos posteriores	Unidades
Número de impactos	N imp.	m ⁻²
Masa de hielo	M	kg m ⁻²
Energía cinética	Ec	J m ⁻²
Diámetro máximo	Dmax	mm
Reflectividad puntual sobre el granizómetro	Zh	mm ⁶ m ⁻³
VIL	VIL	kg m ⁻²
VIL acumulado	cumVIL	kg m ⁻²
Altura del centroide ponderado en reflectividad	Ht. of reflectivity centroid	km
Altura del centroide	Ht. of centroid	km
Reflectividad máxima	Max reflectivity	dBZ
Reflectividad media	Mean reflectivity	dBZ
Techo	Top	km
Altura de la máxima reflectividad	Ht. of max reflectivity	km
Volumen	Volume	km ³
Masa	Mass	kt
Área media	Mean area	km ²
Flujo de precipitación	Precip flux	m ³ s ⁻¹
Área de precipitación	Precip area	km ²
Ángulo de inclinación	Tilt angle	°
Velocidad	Speed	km h ⁻¹
Tasa de cambio del techo	Dtop/Dt	km h ⁻¹
Tasa de cambio del volumen	Dvolume/Dt	km ³ h ⁻¹
Tasa de cambio del flujo de precipitación	Dprecip_flux/Dt	m ³ s ⁻²
Tasa de cambio de la masa	Dmass/Dt	kt h ⁻¹
Tasa de cambio de la reflectividad puntual máxima	DdBz_max/Dt	dBZ h ⁻¹

Debido a que a través de la instrumentación con la que se cuenta en este estudio no es posible conocer con exactitud el tiempo concreto en el que está granizando sobre un granizómetro determinado, en el apartado 6.2 del capítulo 6 se realizan diferentes aproximaciones. No obstante, los resultados no son muy satisfactorios.

Por ello, en la mayoría de los cálculos, se asume que la granizada es puntual sobre el granizómetro, es decir, no se tiene en cuenta la variable *tiempo*. En concreto se elige la imagen de radar instantánea en la que el valor de la *reflectividad puntual* es máximo, asumiendo que el granizo precipita sobre el granizómetro en el momento en que la *reflectividad* sobre ese punto concreto es máxima. Por tanto, se pretende relacionar el valor de *energía cinética* por unidad de superficie medida en el granizómetro con las *variables radar* del barrido en que la *reflectividad puntual* es máxima.

Dado que algunas de esas *variables radar* que proporciona TITAN son espaciales o temporales, no tiene sentido utilizar todas ellas. Por lo tanto, se realiza una primera selección de las variables que puedan relacionarse con las *variables de granizómetros*. En la tabla 3.5 se muestran dichas *variables radar seleccionadas* y las *variables de granizómetros*, que se emplean en los capítulos posteriores.

3.6. BIBLIOGRAFÍA

- AWS/TR 200, 1972. Notes on analysis and severe-stormforecasting procedures of the Military Weather Warning Center (Miller, R.C.), revised USAF.
- Boyden, C.J., 1963. A simple instability index for use as a synoptic parameter. *Meteorol. Mag.*, **92**, 198 – 210.
- Changnon, S.A., 1969. Hail evaluations techniques. *Illinois State Water Survey Rep.* CP-103, 97 pp.
- Changnon, S.A., 1973. Hail sensing and small-scale variability of windblown hail. *J. Wea. Mod.*, **5**, 30 – 42.
- Dixon, M. and Wiener, G., 1993. TITAN: Thunderstorm, Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting –A radar based Metodology. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **10**, 6, 785 – 797.
- Fawbush E.J. and Miller R.C., 1953. A method of forecasting hailstone size at the earth's surface. *Bull. Amer. Met. Soc.*, **34**, 235 – 244.
- Fraile R., Castro, A. and Sánchez, J.L., 1992. Analysis of hailstone size distributions from a hailpad network. *Atmos. Res.* **28**, 310 – 326.
- Galway, J.G., 1956. The lifted index as a predictor of latent inestability. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **37**, 528 – 529.
- George, J.J., 1960. Weather Forecasting for Aeronautics. *Academic Press*, pp. 407 – 415.
- Gertzman, H.S., and Atlas, D., 1977. Sampling errors in the measurement of rain and hail parameters. *J. Geophys. Res.*, **82**, 4955 – 4966.
- Jefferson, G., 1963. A modified inestability index. *Meteorol. Mag.*, **92**, 92 – 96.
- López, L., 2003. Convección atmosférica severa: pronóstico e identificación de tormentas con granizo. *Tesis Doctoral*, Universidad de León, 207 pp.
- López, L. and Sánchez, J.L., 2009. Discriminant methods for radar detection of hail. *Atmos. Res.*, **93**, 358 – 368.
- Lozowski, E.P. and Strong, G.S., 1978. On the calibration of hailpads. *J. Appl. Meteor.*, **17**, 521 – 528.
- Mason, B.J., 1971. *The Physics of Clouds, Second edition*. Clarendon Press, Oxford, 671 pp.
- McCann, D.W., 1994. WINDEX, a new index for forecasting microburst potential. *Wea. Forecast.* **9**, 532 – 541.
- Miller, R.C., 1975. Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the military weather warning center, *Technical Report N° 200*, AWS, USAF.

- Moncrieff, M.W., Green, J.S.A., 1972. The propagation and transfer properties of steady convective overturning in shear. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **98**, 336 – 352.
- Morgan, G., 1990. La grandine. E.R.S:A., Gorizia, 147 pp.
- Palencia, C., Berthet, C., Massot, M., Castro, A., Dessens, J. and Fraile, R., 2007. On the individual calibration of hailpads. *Atmos. Res.*, **83**, 493 – 504.
- RAOB. The complete RAwinsonde Observation Program. User guide & Technical Manual, 64 pp.
- Sánchez, J.L., Gil-Robles, B., Dessens, J., Martín, E., López, L., Marcos, J.L., Berthet, C., Fernández, J.T. and García-Ortega, E., 2009. Characterization of hailstone size spectra in hailpad networks in France, Spain and Argentina. *Atmos. Res.*, **93**, 641 – 654.
- Showalter, A.K., 1953. A stability index for thunderstorm forecasting. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **34**, 250 – 252.
- Vento, D., 1976. The hailpad calibration for Italian hail damage documentation. *J. Appl. Meteorol.*, **15**, 1018 – 1022.
- Vento, D., 1978. L'angle de chute au sol de la grêle. *Atmosphere-Ocean*, **16**, 81 – 85.
- Vento, D. And Morgan, G., 1980. A study of the direction of wind accompanying hail in Colorado, Illinois, Italy and Switzerland, and of wind-caused variations of hailfall on an ultra-fine scale hailpad network containing obstacles to windflow. Preprints, *Third WMO Sci. Conf. On Weather Modification*, Clermont-Ferrand, WMO, 615 – 621.

4

CARACTERIZACIÓN DE LAS TORMENTAS CON GRANIZO EN LAS ÁREAS DE ESTUDIO

4.1. INTRODUCCIÓN

Una vez descritas las áreas experimentales, los sistemas de medida y la metodología aplicada en el presente trabajo de Tesis Doctoral, en este capítulo se presenta una aproximación de las tormentas que generan granizo en dos de las áreas de estudio en las que se profundiza sobre el estudio de la *energía cinética* y su relación con *variables radar*: Aragón (España) y el oasis sur de Mendoza (Argentina). El objetivo principal de este capítulo es intentar resolver preguntas tales como cuándo, dónde, cuánto y cómo se producen las precipitaciones de granizo en estas dos áreas.

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS TORMENTAS DE ARAGÓN

4.2.1. DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LAS GRANIZADAS

4.2.1.1. Hora de formación de las primeras células convectivas

A partir de datos adquiridos a través del radar meteorológico de la banda C situado en Zaragoza, López (2003) obtuvo la distribución temporal de las tormentas de Aragón (figuras 4.1 y 4.2). La hora local en verano se corresponde con dos horas más que la solar (UTC + 2 horas).

Figura 4.1. Frecuencia de la hora de aparición de los primeros ecos en los días de actividad convectiva en Aragón.

Se puede apreciar que el periodo de actividad convectiva en Aragón comienza a las 1000 UTC, mientras que el periodo en el que se forman más primeros ecos es de 1400 a 1600 UTC, es decir entre las 16 y las 18 horas, hora local. Este intervalo de aparición coincide con el periodo de temperatura máxima en superficie, siendo típico de tormentas convectivas desarrolladas en climas continentales (Knight et al., 1982). Una vez que han actuado los mecanismos de formación, las células generadas se extienden durante un periodo de varias horas, pudiendo continuar su actividad incluso hasta las 0000 UTC. Sin embargo, entre las 2000 UTC y las 0200 UTC la formación de nuevas células es muy infrecuente.

El intervalo horario en el que están presentes más tormentas y de mayor intensidad es entre las 1600 y las 1800 UTC ya que se necesita un tiempo para que se inicie la convección, se organice y finalmente las células alcancen su periodo de madurez. En promedio, las tormentas alcanzan el factor de reflectividad de 45 dBZ a las 1630 UTC, por lo que se puede afirmar que en ese intervalo se concentra la mayor actividad convectiva.

Figura 4.2. Frecuencia horaria del número de células existente en los días de actividad convectiva en Aragón.

La actividad nocturna, entre las 0000 y las 0800 UTC, es casi nula, tanto en formación de nuevas células como en número de células presentes, y en el caso de existir alguna, suelen ser débiles.

Por tanto, la actividad tormentosa en esta zona es debida a los procesos de convección. No obstante, la aparición de alguna célula nocturna puede ser atribuida a la entrada de masas de aire frío que desestabilizan la atmósfera.

4.2.1.2. Duración de las tormentas

Foote y Mohr (1979) consideraron el *tiempo de vida* de una tormenta como el intervalo de tiempo en el que la masa nubosa tiene una reflectividad de, al menos, 45 dBZ.

En cambio, López (2003) calculó el *T30*, es decir, el periodo de tiempo en que la tormenta supera los 30 dBZ de *factor de reflectividad* (tabla 4.1). Al aplicar este criterio, obtuvo una duración media de las tormentas sin granizo de casi 29 minutos mientras que las tormentas con granizo alcanzaban 43 minutos. Éste es un resultado consistente con los mecanismos que conducen a que una tormenta sea capaz de generar piedras de granizo ya que, obviamente, precisan mayor desarrollo vertical e intensidad que las que solo producen agua líquida.

Tabla 4.1. Duración media de las tormentas en el Valle del Ebro.

	Duración media (min)	Desv. Est. (min)
Tormenta sin granizo	28.7	12.3
Tormenta con granizo	43.0	7.8

4.2.1.3. Distribuciones diarias y mensuales de los granizómetros impactados

Las distribuciones diarias y mensuales del número de granizómetros impactados se presentan a modo de histogramas de frecuencias tanto diarios como mensuales. Éstos proporcionan una aproximación de la frecuencia en la que la red de granizómetros de Zaragoza está afectada por precipitaciones de granizo. En todos ellos se representa el número de granizómetros con impactos de granizo ya sea por día o por mes durante el periodo de la campaña experimental, desde el 15 de mayo hasta el 15 de septiembre, ambos incluidos.

Así, se hallan los histogramas diarios para las tres campañas experimentales en las que el número de granizómetros se mantiene constante, es decir, 2005, 2006 y 2007 (figuras 4.3 a 4.5) y para el acumulado de las mismas (figura 4.6) y los histogramas mensuales sólo para el acumulado (figuras 4.7 y 4.8). También se dispone de los datos de las dos primeras campañas experimentales de la red de granizómetros de Zaragoza, 2003 y 2004 como se muestra en la tabla 4.2. Sin embargo, no se tienen en cuenta para los análisis temporales y espaciales del capítulo 4 ya que la red de granizómetros estaba siendo instalada y se pretende introducir datos homogéneos, evitando errores como ya se ha comentado anteriormente.

Tabla 4.2. Número de granizómetros impactados mensualmente durante las cinco campañas experimentales de la red de granizómetros de Zaragoza (*en 2003 y 2004 se estaba efectuando la instalación de la red).

	Nº de granizómetros						
	2003*	2004*	2005	2006	2007	Total 2003-2007*	Total 2005-2007
Mayo (15)	0	1	0	11	16	28	27
Junio	0	3	51	99	28	181	178
Julio	0	7	0	53	2	62	55
Agosto	2	10	37	2	5	56	44
Septiembre (15)	13	19	1	7	0	40	8
Total	15	40	89	172	51	367	312

Dado que los granizómetros están dispuestos en los vértices de una cuadrícula de 5 km de lado, se asume que cada uno es representativo de un área de 25 km² como se ha señalado previamente.

Comparando estos histogramas se puede observar la gran variabilidad interanual que caracteriza a las superficies afectadas. De las tres campañas estivales analizadas, la que presenta mayor actividad de caída de granizo dentro del área de granizómetros de Zaragoza, es el verano de 2006, con un total de 172 placas afectadas. Dentro de él, el mes con mayor frecuencia es junio, con 99 placas impactadas. De forma acumulada, la distribución mensual también muestra que el mes con más riesgo de caída de granizo en la red de granizómetros es junio.

Durante esos tres años, el día con el mayor número de granizómetros impactados resulta ser el 27 de septiembre de 2005 (no representado en las figuras anteriores, ya que está fuera de los meses oficiales de la campaña experimental) en el que se recogieron 34 granizómetros impactados, es decir, fueron afectados el equivalente a 850 km². También destacan el 28 de junio de 2005 y el 19 de julio de 2006, con 30 placas impactadas en cada caso, equivalentes a 750 km². Es decir, en un solo día resultó afectado un tercio de los granizómetros de la red.

Figura 4.3. Número de granizómetros afectados cada día de la campaña 2005 en la red de Zaragoza.

Figura 4.4. Número de granizómetros afectados cada día de la campaña 2006 en la red de Zaragoza.

Figura 4.5. Número de granizómetros afectados cada día de la campaña 2007 en la red de Zaragoza.

Figura 4.6. Número de granizómetros afectados cada día para el acumulado de las tres campañas experimentales (de 2005 a 2007) en la red de Zaragoza.

Figura 4.7. Número de granizómetros afectados cada mes durante las tres campañas experimentales (de 2005 a 2007) en la red de Zaragoza.

Figura 4.8. Número de granizómetros afectados cada mes para el acumulado de las tres campañas experimentales (de 2005 a 2007) en la red de Zaragoza.

Además de esos casos extremos, resulta también interesante saber cuál es el número más habitual de granizómetros afectados cada día y por tanto, conocer la superficie equivalente diaria afectada por granizo (figura 4.9).

Figura 4.9. Frecuencia diaria de superficie equivalente afectada por granizo durante las tres campañas experimentales (de 2005 a 2007) en la red de Zaragoza.

Analizando las tres campañas en las que nos centramos (con un total de 44 días de granizo en los granizómetros), se observa que en casi un tercio de los días se recogen entre 1 y 3 placas (entre 25 y 75 km²), y que la mitad de los días no llega a 6 (150 km²). A partir de 8 granizómetros es poco frecuente y sólo alrededor del 10 % de los días presentan una precipitación que afecta más de 500 km².

4.2.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS GRANIZADAS

4.2.2.1. Áreas de formación de las tormentas

La formación de células aisladas está relacionada con las características geográficas y topográficas del área de estudio en cuestión. De hecho, dentro de cada zona, existen *nidos de formación de tormentas* donde la probabilidad de formación de tormentas es mayor (Dávila et al., 1975-1986; Aparicio y García Pertierra, 1987; Castro y Sánchez, 1990).

Para el área de estudio de Aragón, Castro y Sánchez (1990) analizaron las características topográficas y orográficas. Dividieron la zona en tres subzonas geográficamente homogéneas, con características climáticas muy similares y equiparables a las de la cuenca media del Ebro, excepto en la parte más sureste de la cuenca, influenciada por el mar Mediterráneo (Font, 1983; Biel y García de Pedraza, 1964). Estas tres subzonas son:

- *Pirineos*. Presenta una cota media de 800 metros sobre el nivel del mar. Comprende la parte del área enclavada en el Sistema Pirenaico, que supone un 21.34 % del área total estudiada.
- *Valle*. Se extiende a ambos lados del cauce del Ebro, representando el 33.54 % de la superficie total. Su altitud media es inferior a los 800 metros.
- *Ibérica*. Su altitud media supera los 800 metros y comprende el 45.12 % del total.

Los procesos de convección estival tienen lugar preferentemente en situaciones meteorológicas de *baja* y de *vaguada*. Sin embargo, dichas situaciones a escala sinóptica no explican por sí mismas la razón de que en el Valle Medio del Ebro se forman más primeros ecos en la zona *Ibérica* que las otras dos áreas como obtuvieron Castro (1989), Castro y Sánchez (1990) y más recientemente López (2003) (tabla 4.3). Por tanto, es probable que los mecanismos de disparo, posiblemente la componente mecánica, actúen en dichas zonas de una forma más eficiente que en otras.

Tabla 4.3. Porcentaje de primeras tormentas registradas en las distintas subzonas propuestas.

Subzonas	Porcentaje (%)
<i>Valle</i>	25.0
<i>Ibérica</i>	60.7
<i>Pirineos</i>	14.3

Sin embargo, en los estudios de Castro y Sánchez (1990), los factores geográficos y topográficos sólo explican el 43.22 % de la varianza. También Rosinski (1979) relaciona la formación de tormentas con la cantidad de aerosoles presentes en la atmósfera.

4.2.2.2. Áreas de riesgo de granizo

Como muestra el apartado 4.2.1.3 y han comprobado muchos autores (por ej.; Smith y Waldvogel, 1989), las precipitaciones de granizo suelen afectar a territorios de extensión reducida, dificultando su detección. Para paliar esta dificultad, se acude a diferentes fuentes previamente explicadas (apartado 2.2):

- *Observadores*. Tienen la limitación de proporcionar datos de las localidades en donde se encuentran. Sin embargo, aportan una primera aproximación del tamaño promedio de las piedras de granizo y de la intensidad de la granizada.
- *Redes de granizómetros*. Aumentan la resolución espacial aunque en la práctica es difícil cubrir territorios de una gran extensión por las dificultades que entraña el acceso a los mismos y otras cuestiones logísticas. Los datos obtenidos permiten establecer espectros de tamaños, energías, etc.
- *Radares meteorológicos*. Se trata un método indirecto cuya gran ventaja es la vigilancia de una amplia zona. Además, se pueden construir modelos que permiten establecer el área afectada por granizo en términos de probabilidad. Se trata de algoritmos matemáticos que deben ser puestos a punto para cada área, de acuerdo con los parámetros del radar empleado (ver el capítulo 3)

Para nuestro estudio, se emplean las tres fuentes de información: *informadores*, *granizómetros* y *modelo de probabilidad de granizo a partir de las imágenes de radar meteorológico*. En concreto, en este apartado se presentan los resultados de aplicar dos de estos métodos. Para ello, durante tres campañas experimentales de toma de datos realizadas en el Valle Medio del Ebro (desde 2005 hasta 2007), se llevó a cabo un estudio riguroso de los municipios afectados por el granizo en Aragón. Se dispone de dos bases de datos:

- *Verdad terreno conocida a través de observadores*. Indica los municipios aragoneses en los que se confirma la caída de granizo por vía telefónica, es decir, a través de informadores que, eventualmente, han observado la caída de granizo. El procedimiento aplicado consiste en realizar llamadas telefónicas al azar a números de teléfono de municipios en los que está precipitando granizo según el radar.

Figura 4.10. Mapas de municipios de Aragón afectados cada año por el granizo según la *verdad terreno* y el *modelo de probabilidad de granizo* para los años 2005, 2006 y 2007.

Figura 4.11. Mapas de municipios de Aragón afectados por el granizo según la *verdad terreno* y el *modelo de probabilidad de granizo* para el acumulado de los años 2005, 2006 y 2007.

- *Modelo de detección de células con precipitaciones de granizo.* En este caso, el estudio engloba todos los municipios en los que el modelo de probabilidad logística de granizo implementado en TITAN (creado y validado en el área de estudio por López y Sánchez, 2009, explicado previamente en el capítulo 3 de metodología) señala una probabilidad mayor del 90 %. Sirve de base para realizar las llamadas telefónicas confirmatorias.

Estas dos bases de datos se representan en los correspondientes mapas acumulados. Así se muestran los mapas para cada campaña experimental de forma individual (figura 4.10) y los mapas acumulados de las tres campañas (figura 4.11). Para facilitar la comparación entre ellos se aplica la misma escala de número de municipios afectados en todos los mapas.

Observando los mapas anuales (figura 4.10), se hacen patentes las grandes diferencias interanuales, siendo 2006 el verano con mayor número de municipios afectados por granizo tanto confirmado telefónicamente (*verdad terreno*) como según el *modelo*, especialmente en la parte este-noreste de Aragón. Por el contrario, la campaña de 2007 es en la que menor número de municipios se registra granizo. Esto coincide con el máximo y el mínimo número de granizómetros impactados en la red (tabla 4.2).

Por otro lado, existen grandes diferencias entre los mapas de la *verdad terreno* y los mapas del *modelo*. Esto puede ser atribuido, inicialmente, a que a veces no es posible confirmar la caída de granizo en un lugar concreto debido a que no se encuentra ninguna localidad próxima al lugar de la granizada y por tanto, no se puede contactar con ningún observador. Se trata de un problema común en las zonas rurales de Aragón, que sufren una despoblación progresiva. Las figuras 4.12 y 4.13 ilustran este problema, mostrando la distribución de los núcleos de población y de la densidad de población.

Figura 4.12. Distribución de los núcleos de población en Aragón. (López, 2003)

En otras ocasiones, no es posible efectuar las llamadas telefónicas para establecer la *verdad terreno*, cuando las tormentas surgen en horas avanzadas de la noche o cuando la línea telefónica falla debido a la propia tormenta.

Por tanto, la información aportada por un radar meteorológico resulta ser más adecuada para conocer con más exactitud dónde precipita el granizo y por tanto, trazar los mapas de riesgo del mismo, ya que utilizando solamente los datos de los informadores, se perdería mucha información.

Figura 4.13. Distribución de los núcleos de la densidad de población en 1998 en Aragón. (López, 2003)

A través de los mapas acumulados para las tres campañas (figura 4.11) se pueden intuir las áreas más afectadas por el granizo en Aragón. El mayor número de granizadas acumuladas se encuentra en la parte central de Aragón, en las proximidades del cauce del río Ebro, siendo además, la zona más habitada como se constata en las figuras anteriores. Esta distribución es coherente con la zona de mayor formación de tormentas (tabla 4.3), con la duración media y con la dirección predominante de desplazamiento de las mismas influenciada por el viento en 500 hPa. Es decir, preferentemente, las tormentas se forman en el *Sistema Ibérico* y se desplazan hacia el NE, produciendo granizo una media hora más tarde en la zona de *Valle* indicada.

4.2.3. INTENSIDAD DE LAS GRANIZADAS EN LA RED DE GRANIZÓMETROS

4.2.3.1. Distribución espacial de las variables medidas en los granizómetros

En el caso concreto de la zona de estudio de Zaragoza, las dificultades planteadas anteriormente a la hora de detectar el granizo en el suelo se ven solventadas parcialmente por la red de granizómetros, cuya distribución, lo más homogénea posible (en una cuadrícula de 5 x 5 km de lado), permite que la información perdida entre dos granizómetros sea menor que la perdida a través el método de los informadores de las localidades.

Como ya se ha indicado anteriormente, además de la información sobre la presencia o no de granizo, los granizómetros proporcionan otros datos numéricos muy valiosos relativos a los impactos de granizo medidos en ellos.

Para todos los días con precipitación de granizo sobre la red de granizómetros se representan espacialmente las variables más importantes medidas en los granizómetros (*número de impactos, masa de hielo precipitada, energía cinética y diámetro máximo*). Sólo se muestran los mapas acumulados para las tres campañas experimentales en las que la red estaba completamente instalada (2005 a 2007) (figuras 4.14 a 4.16) y para el acumulado de esas tres campañas (figura 4.17). No se tienen en cuenta las campañas 2003 y 2004, para que los datos sean homogéneos ya que el número de granizómetros instalados estaba incrementando en ellas.

Figura 4.14. Distribución espacial del número placas impactadas y de las variables medidas en los granizómetros de la red de Zaragoza durante la campaña de 2005.

Figura 4.15. Distribución espacial del número placas impactadas y de las variables medidas en los granizómetros de la red de Zaragoza durante la campaña de 2006.

Figura 4.16. Distribución espacial del número placas impactadas y de las variables medidas en los granizómetros de la red de Zaragoza durante la campaña de 2007.

Figura 4.17. Distribución espacial acumulada del número placas impactadas y de las variables medidas en los granizómetros de la red de Zaragoza durante las campañas de 2005, 2006 y 2007.

Las variables acumuladas tanto anualmente (empleadas en este subapartado) como diariamente (utilizadas en el siguiente subapartado) se calculan como se explica en el apartado 3.4 del capítulo referente a la metodología.

Para construir los siguientes mapas a través el programa *Surfer 8.01*, se opta por el método de rejilla geoestadístico llamado *Kriging*. Es uno de los métodos más empleados ya que es adecuado para generar mapas a partir de datos irregularmente espaciados, expresando las tendencias que sugieren dichos datos (Isaaks y Srivastava, 1989; Journel, 1989). Además, incorpora anisotropía y tendencias subyacentes (Cressie, 1990, 1991).

Tanto para cada una de las tres campañas individuales como para el acumulado de las mismas, se observa cómo la distribución de los granizómetros más afectados varía espacialmente. Además, los máximos de cada variable de granizómetro no coinciden entre sí, es decir, por ejemplo, durante las tres campañas experimentales, el granizómetro que registra el máximo *número de impactos* es el granizómetro E9 afectado el 21 de junio de 2005 (con 9222 impactos m^{-2} , 2.913 kg m^{-2} de hielo, 244.43 J m^{-2} , y un diámetro máximo de 17.33 mm) mientras que el que recibe la máxima *energía cinética* es el L7 impactado el 17 de agosto de 2005 (con 2046 impactos m^{-2} , 4.007 kg m^{-2} de hielo, 819.97 J m^{-2} , y un diámetro máximo de 38.88 mm).

Respecto a la distribución espacial, en términos generales, en 2005, la parte más afectada es la mitad oriental; en 2006, la mitad sur; y en 2007, no se aprecia una tendencia clara. De forma acumulada, las variables están más distribuidas por toda la red, aunque se observa mayor incidencia en las zonas montañosas del área.

Merece la pena observar más detenidamente los mapas de las variables acumuladas durante esos tres veranos. La forma de identificar los granizómetros se puede consultar en el apartado 2.2.3.3 y en concreto en la figura 2.16. El máximo número de placas impactadas se corresponde con el granizómetro denominado E9 (con 9 placas impactadas a lo largo de las tres campañas), en el municipio de Morata de Jiloca, en la comarca de Comunidad de Calatayud, al W de la red. En cuanto al máximo *número de impactos* acumulados registrados, se observa en el granizómetro G14 (15991 impactos por metro cuadrado), en el municipio de Santed en la comarca de Campo de Daroca, al sur de la red, mientras que las mayores *masa* y *energía cinética* acumuladas se observan en el L7 (6.892 kg m^{-2} y 1217.91 J m^{-2} , respectivamente), situado en el municipio de Cariñena, en la comarca de Campo de Cariñena, donde cayeron menor número de impactos que en el G14, pero de mayor tamaño y por tanto, con mayor masa y energía. Por último, el mayor *diámetro máximo* registrado durante los tres veranos (39.43 mm) cayó sobre el granizómetro J8, ubicado en el municipio de Aguarón, también en Campo de Cariñena, en la zona central de la red.

Como conclusión, el hecho de poseer datos objetivos de una red de granizómetros aumenta el nivel de detalle de la información obtenida y la resolución espacial, pero siempre en un área más limitada que en el caso de los informadores y el radar.

4.2.3.2. Valores característicos medidos en los granizómetros

Para llegar a una aproximación de la intensidad con la que graniza en el área de granizómetros de Zaragoza se calculan los valores máximo, mínimo, medio y desviación estándar de las variables de granizómetros para los datos individuales de los 413 granizómetros impactados durante las cinco campañas experimentales (tabla 4.4). Además, se calculan las variables equivalentes del *número de impactos*, *masa* y *energía* para la superficie representada por cada granizómetro (25 km^2) y se suma para cada día. Respecto al *diámetro máximo*, se elige como representativo diario, el valor máximo de cada día. Así se obtienen los valores característicos de los datos organizados en los 58 días de granizo

de esas cinco campañas (tabla 4.5), proporcionando una aproximación sobre la intensidad de cada granizada en términos absolutos, no por unidad de superficie.

Tabla 4.4. Valores característicos por granizómetro de las variables medidas en los 413 granizómetros impactados durante las cinco campañas experimentales (de 2003 a 2007) de Zaragoza.

	Nº impactos (imp m ⁻²)	Masa (g m ⁻²)	Energía cinética (J m ⁻²)	Diámetro máximo (mm)
Máximo	9222	4007.05	819.97	43.4
Mínimo	9	0.02	0.03	5.4
Media	938	380.99	44.11	13.5
Desv. Est.	1417	705.62	102.04	6.3

Tabla 4.5. Valores característicos por día de las variables medidas en los 58 días con granizómetros impactados durante las cinco campañas experimentales (de 2003 a 2007) de Zaragoza.

	Nº impactos (imp)	Masa (kg)	Energía cinética (kJ)	Diámetro máximo (mm)
Máximo	$1.07 \cdot 10^{12}$	$5.56 \cdot 10^8$	$6.61 \cdot 10^7$	43.4
Mínimo	$2.31 \cdot 10^8$	$3.38 \cdot 10^4$	$1.81 \cdot 10^3$	6.8
Media	$1.67 \cdot 10^{11}$	$6.78 \cdot 10^7$	$7.85 \cdot 10^6$	17.5
Desv. Est.	$2.42 \cdot 10^{11}$	$1.21 \cdot 10^8$	$1.60 \cdot 10^7$	8.5

El *número de impactos* por unidad de superficie máximo que precipita sobre un granizómetro es de 9222 impactos m⁻², con una media de 938 por granizómetro. En cambio, en un solo día, llegan a registrarse $1.07 \cdot 10^{12}$ impactos como máximo acumulado sobre la superficie representativa de los granizómetros afectados durante ese día.

Respecto a la *masa de hielo* precipitada por unidad de superficie, se llega a registrar una caída de poco más de 4 kg m⁻² sobre un granizómetro, siendo la media de casi 381 g m⁻². Estos datos pueden tener su aplicación en estudios de ingeniería relativos a la carga máxima que puede soportar una infraestructura. La masa de hielo media precipitada por día fue de $6.73 \cdot 10^4$ toneladas, llegando a alcanzar un máximo de $5.56 \cdot 10^5$ toneladas. Asumiendo que una tormenta habitual tiene unas dimensiones de 20 x 10 x 10 km, es decir, un volumen de 2000 km³, y que el contenido de agua líquida habitual dentro de una tormenta es de 2 g m⁻³ (García-Ortega et al., 2006), el agua líquida contenida en ese volumen sería de $4 \cdot 10^{12}$ g, es decir $4 \cdot 10^6$ toneladas. De ellas, sólo precipitan una media de unas $7 \cdot 10^4$ toneladas en forma de hielo, es decir, apenas un 1 ó 2 % del contenido de agua líquida de una tormenta.

En cuanto a la *energía cinética* por unidad de superficie, un granizómetro recibe de media 44.1 J m⁻², variando desde un mínimo de 0.03 hasta un máximo de casi 820 J m⁻². Acumulando los datos por días, se registra un mínimo acumulado de energía cinética de $1.81 \cdot 10^3$ kJ y un máximo de $6.61 \cdot 10^7$ kJ, siendo la media de $7.81 \cdot 10^6$ kJ.

Por último, el valor máximo de *diámetro máximo* de granizo encontrado en una placa es de 43.4 mm, siendo la media por granizómetro de 13.5 mm y la media por día de 17.5 mm.

Todos éstos son datos habituales, correspondiendo los mínimos con días donde sólo fue impactado un granizómetro y los máximos con situaciones importantes de varios granizómetros afectados. Sin embargo, se han registrado fuera de la red eventos extremos en los que las variables medidas serían mayores, pero no se dispone de granizómetros que lo confirmen numéricamente.

Así, por ejemplo, dos de los eventos extremos más importantes registrados por el radar meteorológico del GFA, pero sin datos de granizómetros, se produjeron el 16 de agosto de 2003 en

Alcañiz (Teruel) y el 19 de julio de 2006 en Maluenda (Zaragoza) En las siguientes fotografías (figura 4.18 y figura 4.19) se pueden observar los tamaños del granizo caído y las consecuencias de los mismos.

Figura 4.18. Granizo y daños causados por el mismo el 16 de agosto de 2003 en Alcañiz (Teruel).

Figura 4.19. Granizo y daños causados por el mismo el 19 de julio de 2006 en Maluenda (Zaragoza).

4.2.3.3. Histogramas de frecuencias de las variables medidas en los granizómetros

Los datos numéricos de la tabla 4.4 tienen significado por sí mismos, pero también es importante saber si esos valores son los más habituales, o por el contrario, son casos extremos. Es decir, se debe conocer cuáles son las frecuencias de aparición de esos valores.

A continuación se muestran las figuras en las que se representan las frecuencias de los valores de las variables de granizómetros registrados en cada placa (figuras 4.20 a 4.24) y acumulados por días (figuras 4.25 a 4.29) durante las campañas de 2003 a 2007. Previamente, se ha explicado cómo se hallan los valores acumulados por días. Lógicamente, en ambos tipos de histogramas se aprecia cómo los valores más pequeños de *número de impactos*, *masa de hielo precipitada* y *energía cinética* por unidad de superficie son más frecuentes que los más grandes. En cambio, respecto al *diámetro máximo* registrado en los granizómetros, los valores más frecuentes son un poco mayores que el mínimo.

Figura 4.20. Histograma de frecuencias de N , *número de impactos* por unidad de superficie (impac m^{-2}) registrados en los 413 granizómetros de la red de Zaragoza durante las campañas 2003 a 2007.

Figura 4.21. Histograma de frecuencias de M , masa de hielo precipitada por unidad de superficie (g m^{-2}) registrada en los 413 granizómetros de la red de Zaragoza durante las campañas 2003 a 2007.

Figura 4.22. Histograma de frecuencias de E_c , energía cinética por unidad de superficie (J m^{-2}) registrada en los 413 granizómetros de la red de Zaragoza durante las campañas 2003 a 2007.

Figura 4.23. Histograma de frecuencias de D_{max} , diámetro máximo (mm) registrado en los 413 granizómetros de la red de Zaragoza durante las campañas 2003 a 2007.

Figura 4.24. Porcentaje acumulado de D_{max} , diámetro máximo (mm) registrado en los 413 granizómetros de la red de Zaragoza durante las campañas 2003 a 2007.

Figura 4.25. Histograma de frecuencias de N , número de impactos total acumulado diariamente (impactos) en 58 días en la red de Zaragoza durante las campañas 2003 a 2007.

Figura 4.26. Histograma de frecuencias de M , masa de hielo precipitada total acumulada diariamente (toneladas) en 58 días en la red de Zaragoza durante las campañas 2003 a 2007.

Figura 4.27. Histograma de frecuencias de E_c , *energía cinética* acumulada diariamente (kJ) en 58 días en la red de Zaragoza durante las campañas 2003 a 2007.

Figura 4.28. Histograma de frecuencias de D_{max} , *diámetro máximo* diario (mm) en 58 días en la red de Zaragoza durante las campañas 2003 a 2007.

Figura 4.29. Porcentaje acumulado de *Dmax*, diámetro máximo diario (mm) en 58 días en la red de Zaragoza durante las campañas 2003 a 2007.

En resumen, respecto al *número de impactos*, los granizómetros más frecuentes presentan hasta 400 impactos m^{-2} , mientras que el acumulado diario más habitual es del orden de 10^{11} impactos. La *masa de hielo* más frecuente medida en los granizómetros llega hasta unos 300 g m^{-2} por granizómetro y 50000 toneladas acumuladas por día. La *energía cinética* más repetida en los granizómetros es de hasta 30 J m^{-2} y 10000 kJ diarios. Así, para estas tres variables, las modas se encuentran en las clases menores, siendo los valores máximos y medios mostrados en la tabla 4.4, mayores que los más habituales. En cuanto al *diámetro máximo* registrado en cada placa, el valor más frecuente, es decir, la moda, se encuentra entre 10 y 12 mm, mientras que el máximo diario varía entre 13 y 16 mm. A diferencia de las anteriores variables, la moda del *diámetro máximo* no se observa en las clases más pequeñas. Además, representando el porcentaje acumulado de la frecuencia del *diámetro máximo* de cada placa o de cada día, se aprecia que el 85 % de las placas presentan un *diámetro máximo* menor de 20 mm y el 75 %, menor de 15 mm, mientras que el 78 % de los días tienen un *diámetro máximo* menor de 20 mm y el 55 % menor de 15 mm. Por tanto, estos resultados relativos al diámetro muestran que para estos tamaños de granizo habituales en la zona de estudio española, es adecuado el uso de radares de la banda C, en los que la reflectividad comienza a disminuir con granizo mayor de 18 mm como muestra la figura 2.28 a del capítulo 2.

4.2.3.4. Condiciones atmosféricas en situación de tormenta

En meteorología, para estudiar las condiciones preconvectivas, se suele acudir al análisis de los datos proporcionados por *radiosondeos*. Huntrieser et al. (1997) consideraron que un radiosondeo es representativo de un área de 250 km x 100 km. En cuanto a la representatividad temporal, Reuter y Atkary (1995) afirmaron que ésta es de unas 12 horas. En ambos casos, estos criterios se cumplen si la masa de aire se mantiene, es decir, cuando hay cambios bruscos de masa de aire, no se puede asegurar la representatividad de los radiosondeos.

Sánchez et al. (2009) construyeron un *modelo logístico* de predicción granizo a partir de datos de radiosondeos de 116 días para el Valle del Ebro. Encontraron que las variables incluidas en el mismo fueron el *índice TT*, el *viento a 850 hPa* y a *500 hPa*, la *altura del CCL*, el *WBZ*, el *punto de rocío a 850 hPa* y *T² Gust*. Estas variables reflejan las dos condiciones necesarias para el inicio y desarrollo de la convección (Johns and Doswell, 1992; Doswell et al., 1996), es decir, la *inestabilidad atmosférica* y la *humedad* en niveles bajos. La tercera condición referida al mecanismo de disparo no se puede evaluar directamente a través de este tipo de datos. De hecho, Haklander y Van Delden (2003) y Sánchez et al. (2008) afirmaron que se necesita incluir velocidades verticales a diferentes niveles de la atmósfera y convergencia de flujo de humedad en niveles bajos para detectar los mecanismos de disparo. Con este modelo estadístico creado por Sánchez et al. (2009) para el Valle del Ebro se consigue una FAR de tan solo 0.187 y una POD de 0.867.

Tabla 4.6. Parámetros de los radiosondeos obtenidos en los 38 días disponibles con granizómetros afectados en la red de granizómetros de Zaragoza desde 2003 a 2007.

Abreviatura	Variable	Unidades	Media	Desv. Est.
Td _{superficie}	Temperatura de rocío superficie	°C	14.2	2.4
Td ₈₅₀	Temperatura de rocío 850 mb	°C	5.6	2.5
F ₈₅₀	Velocidad del viento a 850 mb	kn	12.1	6.8
F ₅₀₀	Velocidad del viento a 500 mb	kn	23.7	12.9
F ₂₀₀	Velocidad del viento a 200 mb	kn	36.3	21.6
LFC	Nivel de libre convección	m	704.2	61.9
LI	Índice de elevación	°C	-1.3	2.9
SI	Índice de Showalter	°C	1.5	1.9
TI	Índice de Thompson	-	28.2	7.5
JI	Índice de Jefferson	°C	27.1	3.3
KI	Índice K	°C	26.9	6.1
TT	Total de Totales	°C	46.4	2.9
SWEAT	Índice SWEAT	-	132.5	59.1
CAPE	Energía Convectiva Potencial Disponible	J kg ⁻¹	810.9	511.5
Helicidad	Helicidad	m ² s ⁻²	108.0	100.8
EHI	Índice de Energía-Helicidad	-	0.3	0.3
VGP	Parámetro de Generación de Vorticidad	m s ⁻²	0.2	0.1
CAP	Fuerza CAP	°C	3.5	2.0
BRN	Número de Bulk Richardson	-	92.8	220.4
BRN-shr	Cizalladura del Número de Bulk Richardson	m ² s ⁻²	6.5	3.3
WBZ	Altura del cero del termómetro húmedo	m	10303.2	993.2
HAIL	Índice HAIL	in	0.2	0.2
WI	Índice W	kn	45.9	13.0
T ² Gust	T ² Gust	kn	40.7	8.0
KO	Índice KO	-	-339.7	3.0
BOYDEN	Índice BOYDEN	-	97.8	1.1
SI	Índice S	°C	38.9	6.3
Tropopausa	Altura de la tropopausa	m	11945.9	1179.0
H ₀	Altura de la isocero	m	3624.0	309.8
CCL	Altura del CCL	m	2660.3	546.2
LCL	Altura del LCL	m	1519.7	501.2
Tc	Temperatura convectiva	°C	33.3	3.6
SRH03	SRH03	m ² s ⁻²	120.6	121.6
SRH02	SRH02	m ² s ⁻²	87.5	80.6
SRH01	SRH01	m ² s ⁻²	43.5	67.1

En esta parte de la Memoria de Tesis Doctoral, se estudian las condiciones preconvectivas de 38 días entre 2003 y 2007 (en el año 2005 no se dispone de datos de radiosondeos) en los que se recogieron granizómetros impactados en la red de Zaragoza. Los parámetros de radiosondeos utilizados, su notación y unidades, se describen en la tabla 3.3 del capítulo 3 referente a la metodología.

En la tabla 4.6 se presentan los valores medios de las variables atmosféricas obtenidas a partir de los radiosondeos de las 1200 UTC del aeropuerto de Zaragoza (41.63 N 0.88 W 241 msnm). Esta estación se encuentra a unos 60 km al NE de la red de granizómetros, por lo que se garantiza una buena representatividad temporal y espacial de los datos meteorológicos.

Tabla 4.7. Correlaciones bivariadas entre las variables de radiosondeo y las variables del granizómetro con *energía cinética* máxima cada día.

	N imp (m⁻²)	M (g m⁻²)	Ec (J m⁻²)	Dmax (mm)	Dm (mm)
Td _{superficie}	-0.146	-0.163	-0.146	-0.049	-0.073
Td ₈₅₀	0.324(*)	0.415(**)	0.377(*)	0.414(**)	0.273
F ₈₅₀	-0.004	0.053	0.073	0.060	-0.053
F ₅₀₀	-0.079	0.215	0.303	0.277	0.329(*)
F ₂₀₀	-0.172	-0.085	0.013	-0.022	0.118
LFC	-0.035	-0.159	-0.178	-0.173	-0.124
LI	-0.026	0.070	0.120	-0.066	-0.037
SI	-0.426(**)	-0.385(*)	-0.274	-0.408(*)	-0.247
TI	0.090	0.032	0.004	0.123	0.114
JI	0.213	0.212	0.182	0.214	0.205
KI	0.104	0.072	0.058	0.112	0.112
TT	0.411(*)	0.297	0.163	0.298	0.216
SWEAT	0.121	0.217	0.220	0.254	0.167
CAPE	0.044	0.065	0.053	0.204	0.279
Helicidad	0.018	0.140	0.197	0.233	0.057
EHI	-0.023	0.168	0.284	0.415(*)	0.339
VGP	0.008	0.293	0.424(*)	0.574(**)	0.499(**)
CAP	-0.206	-0.199	-0.177	-0.136	-0.172
BRN	0.104	-0.027	-0.083	-0.096	-0.051
BRN-shr	-0.138	0.068	0.153	0.145	0.140
WBZ	-0.041	-0.129	-0.121	0.012	-0.060
HAIL	0.396(*)	0.592(**)	0.592(**)	0.355(*)	0.241
WI	-0.021	-0.032	-0.029	0.142	0.065
T ² Gust	0.186	0.046	-0.035	0.120	0.017
KO	-0.161	-0.268	-0.245	-0.180	-0.154
BOYDEN	-0.259	-0.303	-0.262	-0.097	-0.148
SI	0.157	0.109	0.077	0.121	0.153
Tropopausa	-0.126	-0.088	-0.068	-0.104	-0.147
H ₀	0.108	0.051	0.000	0.138	-0.059
CCL	0.013	-0.149	-0.225	-0.137	-0.178
LCL	0.089	0.040	0.010	0.132	0.037
Tc	0.050	-0.094	-0.171	-0.049	-0.180
SRH03	-0.061	0.040	0.102	0.089	-0.080
SRH02	-0.071	0.023	0.076	0.115	-0.036
SRH01	-0.058	-0.041	-0.028	-0.009	-0.132

**. La correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral).

*. La correlación es significativa al nivel 0.05 (bilateral).

Además, se pretende estudiar la relación entre esas condiciones atmosféricas conocidas a través de los radiosondeos y las variables del granizo medidas en los granizómetros. Se calculan las correlaciones bivariadas entre todas las variables disponibles del radiosondeo y las variables más representativas de los granizómetros, mostradas en la tabla 4.7. En ella, los valores señalados con dos asteriscos indican correlación significativa al 0.01, mientras que los señalados con un asterisco indican correlación significativa al 0.05. Específicamente, se eligen las variables del granizómetro por unidad de superficie que presente la mayor *energía cinética* para cada día concreto (es decir, *número de impactos, masa, energía, diámetro máximo y diámetro medio* del granizómetro con *energía cinética máxima*).

Los resultados muestran que la *energía cinética máxima* encontrada en un granizómetro está correlacionada con la *temperatura de rocío a 850 mb*, con el *parámetro generador de vorticidad VGP* y con el *índice HAIL*. El *diámetro máximo*, además de con las dos últimas variables, está correlacionado con la *velocidad del viento a 500 mb*, con el *índice de Showalter* y con el *índice de energía-helicidad EHI*. Esto es coherente con los resultados encontrados por Sánchez et al. (2009), que construyeron una ecuación logística para integrar los modelos de predicción de tormentas a partir de variables de radiosondeos para cuatro áreas distintas. Hallaron que el *índice de Showalter* y la *temperatura de rocío a 850 mb* son las variables que mejor caracterizan las situaciones preconvectivas.

En el futuro, cuando se incremente el tamaño de la muestra, será posible encontrar una expresión matemática que permita estimar la *energía cinética máxima esperable* para un día a partir de los datos de una estación de radiosondeos cercana.

4.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS TORMENTAS DE MENDOZA

4.3.1. DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LAS GRANIZADAS

4.3.1.1. Hora de formación de las primeras células convectivas

Se realiza un estudio temporal de las tormentas detectadas por el radar de la banda S situado en San Rafael, en el oasis sur de Mendoza para 25 campañas experimentales, comenzando en el verano de 1983/84 hasta el pasado 2007/08. La distribución horaria de la aparición de los primeros ecos se aprecia en la figura 4.30. La hora local en verano se corresponde con dos horas menos de la solar (UTC – 2 horas). Se puede afirmar que las primeras tormentas comienzan a aparecer a partir de las 1100 UTC (9 horas local), y todavía con más frecuencia, a partir de las 1500 UTC, llegando al máximo de aparición de primeros ecos en el intervalo de 1700 a 1900 UTC, es decir, entre las 15 y las 17 horas, hora local. Por tanto, esta amplia distribución apunta a que la aparición de tormentas no tiene un único origen puramente convectivo (sin cambio de masa de aire), sino que están provocadas por la entrada de frentes fríos provenientes del Pacífico, que arrastran aire frío del sur y provocan convección, en muchos casos, severa.

Además, se representa la frecuencia de cada intervalo horario con actividad convectiva registrada en el radar (figura 4.31) para las últimas campañas experimentales. Al compararla con la figura 4.30, se observa una gran similitud ya que la mayor actividad se centra entre las 1900 y las 0200 UTC. La actividad durante la mañana es escasa y va aumentando a lo largo del día hasta la caída de la noche, cuando comienza a disminuir.

Figura 4.30. Frecuencia de la hora de aparición de los primeros ecos en los días de actividad convectiva en el oasis sur de Mendoza desde 1983/84 hasta 2007/08 (Fuente: DACC).

Figura 4.31. Frecuencia horaria de la actividad convectiva en el oasis sur de Mendoza (Fuente: DACC).

4.3.1.2. Duración media de la actividad convectiva

Con los datos disponibles de las tres últimas campañas (de 2005/06 a 2007/08), se realiza un estudio de la *duración de la actividad convectiva* de cada día, considerando el tiempo desde que aparece la primera célula hasta que desaparece la última de cada día. Así, en la figura 4.32 se muestra la duración de la actividad convectiva cada día. Las duraciones más frecuentes son de 9 a 12 horas, seguido por la duración de 12 a 15 horas, es decir la actividad convectiva dura en torno a medio día. Cabe destacar que existe un porcentaje no despreciable de situaciones en las que la actividad dura más de un día seguido.

Figura 4.32. Frecuencia de la *duración de la actividad convectiva* en el oasis sur de Mendoza (Fuente: DACC).

4.3.1.3. Distribuciones diarias y mensuales de los granizómetros impactados

Para las cuatro campañas experimentales en las que se dispone de datos de la red de granizómetros del oasis sur de Mendoza (de 2004/05 a 2007/08), se representa el número de granizómetros impactados cada día (figuras 4.33 a 4.37) y cada mes (tabla 4.8 y figuras 4.38 a 4.39) del periodo de toma de datos, desde octubre a marzo, ambos incluidos.

Tabla 4.8. Número de granizómetros impactados mensualmente durante las cuatro campañas experimentales de la red de granizómetros del oasis sur de Mendoza.

	Nº de granizómetros				
	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	Total 2004/05-2007/08
Octubre	8	0	10	0	18
Noviembre	38	66	23	46	173
Diciembre	126	36	95	5	262
Enero	43	19	57	26	145
Febrero	47	38	37	1	123
Marzo	12	3	14	0	29
Total	274	162	236	78	750

Efectivamente, al observar los histogramas se aprecia gran variabilidad interanual. Se puede afirmar que la parte central de la campaña es la más activa, es decir, los meses de diciembre, enero y febrero. El verano con más actividad de caída de granizo es el de 2004/05, en el que se recogieron 274 placas impactadas, mientras que en 2007/08 se recogieron un total de 78 granizómetros, siendo el verano menos activo.

Figura 4.33. Número de granizómetros afectados cada día de la campaña 2004/05 en el oasis sur.

Figura 4.34. Número de granizómetros afectados cada día de la campaña 2005/06 en el oasis sur.

Figura 4.35. Número de granizómetros afectados cada día de la campaña 2006/07 en el oasis sur.

Figura 4.36. Número de granizómetros afectados cada día de la campaña 2007/08 en el oasis sur.

Figura 4.37. Número de granizómetros afectados cada día para el acumulado de las cuatro campañas experimentales (2004/05 a 2007/08) en el oasis sur.

En cuanto a la distribución mensual, globalmente el mes con más actividad de caída de granizo sobre las placas es diciembre, seguido de noviembre, aunque también varía según la campaña experimental.

Figura 4.38. Número de granizómetros afectados cada mes durante las cuatro campañas experimentales (de 2004/05 a 2007/08) en el oasis sur.

Figura 4.39. Número de granizómetros afectados cada mes para el acumulado de las cuatro campañas experimentales (de 2004/05 a 2007/08) en el oasis sur.

De igual manera que en el área de estudio de Zaragoza, los granizómetros están dispuestos en una red de 5 x 5 km, por lo que cada placa tiene un área representativa de 25 km². Lo más habitual es que cada día sean impactados de 1 a 4 granizómetros (la moda es de 2 granizómetros al día), es decir, de 25 a 100 km² equivalentes (figura 4.40). Destacan tres días en los que se recogieron 31 (23 de

diciembre de 2004), 29 (2 de enero de 2005) y 28 (26 de enero de 2007) granizómetros. En otras palabras, la mayor superficie equivalente afectada por granizo en la red del oasis sur fue de 775 km².

Figura 4.40. Frecuencia diaria de superficie equivalente afectada por granizo durante las cuatro campañas experimentales (de 2004/05 a 2007/08) en el oasis sur.

4.3.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS GRANIZADAS

4.3.2.1. Áreas de formación de las tormentas

De acuerdo con la *Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas del Gobierno de Mendoza* (DACC), las regiones en las que los mecanismos de disparo de las tormentas actúan con mayor eficiencia se encuentran en muchos casos cercanas a la precordillera o a otros accidentes orográficos. Una amplia base de datos permite determinar estas zonas. Además un reciente estudio (García-Ortega et al., 2009) ha señalado la importancia que tiene la cordillera andina en la modificación de los flujos de aire y su relación con la formación de tormentas que afectan a Mendoza

En la figura 4.41 se representan las tres regiones consideradas *nidos de formación de tormentas* que afectan con mayor frecuencia la zona sur de Mendoza y las direcciones habituales que suelen tomar dichas tormentas una vez formadas. Así, las tres regiones que se distinguen son:

- *Región IV.* Se trata de la llamada Pampa del Juncalito y se encuentra a unos 40 km al W del oasis sur. Es la de mayor actividad convectiva. De hecho, constituye el nido de formación de tormentas más activo en toda Mendoza, generando gran cantidad de células. Muchas de ellas evolucionan a supercélulas y generan granizo dentro del área cultivada del oasis sur, provocando cuantiosos daños en la agricultura. Además, muchas siguen una trayectoria NE y llegan varias horas después al oasis norte de Mendoza. Como ejemplo ilustrativo, según los estudios de la DACC, durante la campaña experimental de 2006/07, una de las más tormentosas de los últimos años, de los 108 días totales de tormenta en la zona sur de Mendoza, hubo 45 días en los que las células se generaron en la Pampa del Juncalito. Además, de los 40 días de tormentas severas en áreas cultivadas, en el 53 % de estos días, las tormentas se originaron en dicha región. Y finalmente, de los 17 días con daños significativos (> 50 %) en los cultivos de la zona sur, en el 77 % de los días, las tormentas surgieron en esta zona.

- *Región III.* Está ubicada al S del Valle de Uco, al NW del oasis sur. En ella se generan un gran número de tormentas, pero las que se desplazan hacia el oasis sur, no suelen generar daños importantes en los cultivos aunque den lugar a granizo. En cambio, las que se desplazan hacia el NE, generalmente son muy severas y llegan hasta el oasis norte de Mendoza.
- *Región V.* Se sitúa en los alrededores del Cerro Nevado, al S del oasis sur. Presenta la menor frecuencia de aparición de tormentas de las tres zonas descritas. Sin embargo, suelen provocar la precipitación de granizo importante en General Alvear y se han detectado numerosos casos de aparición de supercélulas.

Las tres zonas presentan relieve acusado, por lo que se trata de zonas de formación orográfica de tormentas. Se sitúan considerablemente alejadas de la red de granizómetros y la zona de interés. Así, cuando las tormentas llegan a ella, se encuentran en fase de madurez.

Figura 4.41. Zonas de formación de las tormentas en el oasis sur de Mendoza y trayectorias habituales. (Fuente DACC)

4.3.2.2. Áreas de riesgo de granizo

En la zona de estudio de Aragón se trazan las áreas de riesgo de granizo gracias a los datos aportados durante tres años por los informadores telefónicos. En el caso de Mendoza, la mayor parte del territorio es desértico y está despoblado con lo que es inviable aplicar esa metodología. Sin embargo, los llamados *oasis cultivados* son zonas con acceso a agua para regadío, concentrándose en ellos las tierras de cultivo. Desde hace años y debido a la enorme frecuencia con la que se producen precipitaciones de granizo, tasadores del gobierno vienen recopilando una información pormenorizada y fiable acerca de los daños producidos. Así, actualmente se dispone de una base confiable de 10 años (1997/98 a 2007/08) para los tres oasis, habiendo sido aprobada por las compañías de seguros para efectuar los análisis de riesgos correspondientes.

Empleando el programa informático *GRASS (Geographic Resources Analysis Support System)*, se realizan los mapas de daño máximo en los cultivos y los mapas de frecuencia de daños. En las siguientes figuras se muestran los respectivos mapas para el oasis sur de Mendoza.

Figura 4.42. Mapa de porcentaje de daño máximo en el oasis sur de Mendoza durante 10 años (Fuente: DACC).

Figura 4.43. Mapa de frecuencia de daños en el oasis sur de Mendoza durante 10 años (Fuente: DACC).

Observando el primer mapa (figura 4.42), se aprecian altos porcentajes de daño máximo a lo largo de esos 10 años estudiados en el oasis sur. De hecho, existen muchas parcelas en las que el daño máximo ha sido superior al 90 % en alguna ocasión. Están especialmente afectadas la zona NW y la zona central del oasis.

A través de la figura 4.43 se comprueba que existen muy pocas zonas del oasis cultivado que no hayan sido afectadas por granizo durante el periodo de los 10 años estudiados. De nuevo, destaca la zona NW, en la que existe constancia de parcelas que han recibido 13 y 14 granizadas con daños durante ese periodo. La mitad SE se ve menos castigada por el granizo y la frecuencia máxima alcanzada es de 8 granizadas.

4.3.3. INTENSIDAD DE LAS GRANIZADAS EN LA RED DE GRANIZÓMETROS

4.3.3.1. Distribución espacial de las variables medidas en los granizómetros

Al igual que en la red de granizómetros de Zaragoza, las placas están colocadas en los vértices de una cuadrícula de 5 x 5 km de lado, evitando así perder mucha información entre granizómetros.

También se representan las variables medidas en los granizómetros en sendos mapas para las cuatro campañas experimentales (2004/05 a 2007/08) (figuras 4.44 a 4.47) y para el acumulado de estas cuatro (figuras 4.48). En este caso, los mapas se realizan con el programa *GRASS (Geographic Resources Analysis Support System)*.

Comparando los mapas de las cuatro campañas individuales se aprecian las diferencias interanuales en cuanto a la intensidad y la localización de las granizadas. Los veranos con mayor actividad de caída de granizo son 2005/06 y 2006/07, mientras que en la última campaña de 2007/08 se registra mucho menos granizo que en las tres precedentes.

Observando los mapas acumulados para las cuatro campañas (figura 4.48), se puede afirmar que las zonas con más riesgo de granizo son los extremos NW y SE de la red, siendo menos afectada la parte central de la misma. Estos mapas concuerdan con los mapas de daños presentados en el subapartado anterior (figuras 4.42 y 4.43).

Como datos extremos, el valor máximo del *número de impactos* acumulados durante los cuatro veranos, llega a la clase de hasta 22000 impactos m^{-2} , en lugares puntuales de la parte NW; la *masa* acumulada alcanza cerca de 15 kg m^{-2} en el extremo más septentrional y hasta 6 kg en la parte meridional; la *energía cinética* acumulada más elevada coincide espacialmente con la masa, llegando hasta 3500 J m^{-2} en lugares puntuales; y el *diámetro máximo* registrado durante estos cuatro veranos fue de hasta 5.2 cm en la parte WNW de la red.

En promedio, la mayoría de los granizómetros reciben menos de 2500 impactos m^{-2} , llegando de forma puntual a 5500 en la parte N; la *masa* media precipitada en casi toda la red es inferior a 1 kg m^{-2} , siendo de hasta 2 en los extremos W y E de la red y puntualmente de hasta 4 kg m^{-2} en la parte más al N; y la *energía cinética* media más habitual es menor de 300 J m^{-2} , quedando algunas zonas con energías menores de 10 y habiendo un máximo muy puntual de 800 a 1000 J m^{-2} .

Figura 4.44. Distribución espacial de las variables medidas en los granizómetros de la red del oasis sur de Mendoza durante la campaña de 2004/05.

Figura 4.45. Distribución espacial de las variables medidas en los granizómetros de la red del oasis sur de Mendoza durante la campaña de 2005/06.

Figura 4.46. Distribución espacial de las variables medidas en los granizómetros de la red del oasis sur de Mendoza durante la campaña de 2006/07.

Figura 4.47. Distribución espacial de las variables medidas en los granizómetros de la red del oasis sur de Mendoza durante la campaña de 2007/08.

Figura 4.48. Distribución espacial del acumulado de las variables medidas en los granizómetros de la red del oasis sur de Mendoza durante las cuatro campañas.

4.3.3.2. Valores característicos medidos en los granizómetros

Al igual que para la red de granizómetros de Zaragoza, en la red del oasis sur de Mendoza se calculan los valores extremos, la media y la desviación estándar de las variables medidas en los granizómetros (tabla 4.9, por granizómetro y tabla 4.10, por día).

Tabla 4.9. Valores característicos por granizómetro de las variables medidas en los 750 granizómetros impactados durante las cuatro campañas experimentales (de 2004/05 a 2007/08) del oasis sur.

	Nº impactos (imp m ⁻²)	Masa (g m ⁻²)	Energía cinética (J m ⁻²)	Diámetro máximo (mm)
Máximo	9924	8712.596	2588.32	49.5
Mínimo	10	0.694	0.03	5.4
Media	872	516.362	79.89	16.5
Desv. Est.	1150	1044.747	231.10	7.7

Tabla 4.10. Valores característicos por día de las variables medidas en los 96 días con granizómetros impactados durante las cuatro campañas experimentales (de 2004/05 a 2007/08) del oasis sur.

	Nº impactos (imp)	Masa (kg)	Energía cinética (kJ)	Diámetro máximo (mm)
Máximo	$1.61 \cdot 10^{12}$	$1.04 \cdot 10^9$	$1.55 \cdot 10^7$	49.5
Mínimo	$1.19 \cdot 10^9$	$1.50 \cdot 10^5$	$1.79 \cdot 10^5$	7.1
Media	$1.70 \cdot 10^{11}$	$1.01 \cdot 10^8$	$3.25 \cdot 10^6$	22.0
Desv. Est.	$2.43 \cdot 10^{11}$	$1.85 \cdot 10^8$	$3.46 \cdot 10^6$	10.5

En primer lugar, el *número de impactos* por unidad de superficie máximo que se registra sobre un granizómetro es de 9924 impactos m⁻² y el acumulado de todos los granizómetros de un solo día alcanza los $1.61 \cdot 10^{12}$ impactos. La media por granizómetro es de 872 impactos m⁻² mientras que la media diaria llega a $1.70 \cdot 10^{11}$ impactos sobre la superficie representativa de todos los granizómetros afectados durante ese día.

La *masa de hielo* precipitada por unidad de superficie alcanza un máximo de 8.7 kg m⁻² sobre un granizómetro, con una media de 516 g m⁻². La masa media diaria es de unos $1.01 \cdot 10^6$ toneladas, llegando a alcanzar un máximo de $1.04 \cdot 10^6$ toneladas. Se aprecian grandes diferencias entre los máximos y los mínimos y grandes desviaciones típicas.

Respecto a la *energía cinética* por unidad de superficie, un granizómetro recibe de media 79.89 J m⁻², registrándose desde un mínimo de 0.03 J m⁻² hasta un máximo de 2588 J m⁻². El mínimo acumulado diario es de $1.79 \cdot 10^5$ y el máximo de $1.55 \cdot 10^7$ kJ, con una media de $3.25 \cdot 10^6$ kJ.

Para finalizar, el valor máximo de *diámetro máximo* de granizo encontrado en una placa es de prácticamente 5 cm, siendo la media por granizómetro de 1.65 cm y la media por día de casi 2 cm.

En comparación con los valores hallados en la red de granizómetros de Zaragoza, esta red argentina presenta valores mayores para todas las variables.

4.3.3.3. Histogramas de frecuencias de las variables medidas en los granizómetros

Con el fin de conocer si esos valores numéricos están dentro de los rangos habituales, se representan las frecuencias de las variables medidas en los granizómetros (*número de impactos*, *masa*

de hielo precipitada, energía cinética, todas ellas por unidad de superficie y diámetro máximo) del oasis sur de Mendoza por granizómetro (figuras 4.49 a 4.53) y acumulado por día (figuras 4.54 a 4.58) (previamente explicado cómo se hallan los valores diarios en el apartado 4.2.3.2) durante las cuatro campañas experimentales disponibles, del verano de 2004/05 al de 2007/08. Para el *número de impactos*, la *masa de hielo precipitada* y la *energía cinética*, por unidad de superficie, la clase más frecuente (la moda de cada variable) es la más pequeña, mientras que la clase de *diámetro máximo* más frecuente no es la primera, sino los diámetros un poco mayores.

Resumiendo, la moda del *número de impactos* registrado en los granizómetros se encuentra en el intervalo de hasta 330 impactos m^{-2} por granizómetro y de 10^{11} impactos acumulados al día. En cuanto a la *masa de hielo*, la moda llega hasta unos 290 g m^{-2} por granizómetro y en el acumulado diario hasta casi 67000 toneladas. Cerca del 80 % de los granizómetros, presentan una *energía cinética* menor de 80 J m^{-2} , mientras que en el acumulado diario, el 30 % de los días presentan menos de 10^6 kJ. Todos estos valores son mayores que los observados en los datos de la red de Zaragoza. Sin embargo, al igual que en esa red, para estas tres variables, las modas (valores más frecuentemente observados) se encuentran en las clases menores. Respecto al *diámetro máximo* registrado en cada placa, el valor más frecuente es de entre 12 y 15 mm, mientras que el máximo diario varía entre 15 y 18 mm, también valores mayores que en Zaragoza y no siendo las clases más pequeñas. También se representa el porcentaje acumulado de la frecuencia del *diámetro máximo* de cada placa y de cada día. En ellos se aprecia que el 75 % de las placas presenta un *diámetro máximo* de hasta 20 mm y el 50 %, menor de 15 mm, mientras que el 55 % de los días tienen un *diámetro máximo* menor de 20 mm y el 30 % menor de 15 mm, siendo más habituales los tamaños mayores. Así, un radar de la banda C podría presentar mucha atenuación con lo que parece más adecuado el uso de un radar de la banda S.

Figura 4.49. Histograma de frecuencias de N , número de impactos por unidad de superficie (impac m^{-2}) registrados en los 750 granizómetros del oasis sur durante las campañas 2004/05 a 2007/08.

Figura 4.50. Histograma de frecuencias de M , masa de hielo precipitada por unidad de superficie (g m^{-2}) registrada en los 750 granizómetros del oasis sur durante las campañas 2004/05 a 2007/08.

Figura 4.51. Histograma de frecuencias de E_c , energía cinética por unidad de superficie (J m^{-2}) registrada en los 750 granizómetros del oasis sur durante las campañas 2004/05 a 2007/08.

Figura 4.52. Histograma de frecuencias de D_{max} , diámetro máximo (mm) registrado en los 750 granizómetros del oasis sur durante las campañas 2004/05 a 2007/08.

Figura 4.53. Porcentaje acumulado de D_{max} , diámetro máximo (mm) registrado en los 750 granizómetros del oasis sur durante las campañas 2004/05 a 2007/08.

Figura 4.54. Histograma de frecuencias de N , número de impactos total acumulado diariamente (impactos) en 96 días en el oasis sur durante las campañas 2004/05 a 2007/08.

Figura 4.55. Histograma de frecuencias de M , masa de hielo precipitada total acumulada diariamente (toneladas) en 96 días en el oasis sur durante las campañas 2004/05 a 2007/08.

Figura 4.56. Histograma de frecuencias de E_c , *energía cinética acumulada diariamente* (kJ) en 96 días en el oasis sur durante las campañas 2004/05 a 2007/08.

Figura 4.57. Histograma de frecuencias de D_{max} , *diámetro máximo diario* (mm) en 96 días en el oasis sur durante las campañas 2004/05 a 2007/08.

Figura 4.58. Histograma de frecuencias de *Dmax*, diámetro máximo diario (mm) en 96 días en el oasis sur durante las campañas 2004/05 a 2007/08.

4.3.3.4. Condiciones atmosféricas en situación de tormenta

Rosenfeld et al. (2006) estudiaron la estructura dinámica y microfísica de las tormentas en Mendoza durante enero y febrero de 2000 utilizando observaciones de avión, radar, satélite y radiosondeo. Encontraron las bases de las nubes a 6-14 °C, con unas corrientes ascensionales de 4-7 m s⁻¹. Ya que las corrientes ascensionales aumentan con la altura, estos autores registraron velocidades de 25 m s⁻¹ a alturas mayores de 7 km y de 40 m s⁻¹ a más de 8 km. También midieron flotabilidades térmicas de 5-8 °C en las torres convectivas a alturas de 8-10 km. La cizalladura vertical del viento era débil por debajo de 6 km, pero aumentaba fuertemente por encima de ese nivel ya que los vientos del oeste sobrepasan la barrera de los Andes. Las nubes tenían poco activados los mecanismos de crecimiento por coalescencia y no contenían partículas precipitables de más de 100 µm a temperaturas mayores de -15 °C. Se encontró gran cantidad de agua líquida con gotas de tamaño no precipitable en las regiones filamentosas de las nubes (por tanto, con glaciación) con fuertes corrientes ascensionales por encima del nivel de congelación homogéneo alcanzando 4 g m⁻³ a -38 °C. La presencia de *graupel* mayor de 1 mm era muy patente en los techos de las torres de nuevo crecimiento, donde las temperaturas suelen ser inferiores a -27 °C, lo que concuerda con las alturas del primer eco detectado por el radar a unos 8 km.

Sánchez et al. (2008) también estudiaron los parámetros meteorológicos de los días clasificados de tormenta y de no tormenta para esta zona de Mendoza. Los resultados encontrados (tabla 4.11) pusieron de manifiesto que los valores de *presión*, *temperatura convectiva*, *altitud del CCL*, *isotermas de -5 °C y -10 °C*, *índice LI* e *índice SI* son menores para los días con tormenta que para los días sin ella. En cambio, los días con tormenta tienen valores mayores de *temperatura*, *temperatura de punto de rocío*, *CCL*, *temperatura del CCL*, *isoterma de 0 °C*, *distancia entre 1000 y 500 hPa*, *altura WBZ*, *punto de rocío a 850 mb*, *índice Boyden*, *CAPE*, *índice JI*, *índice K*, *TT* y *temperatura mínima*.

Tabla 4.11. Número de casos y valores medios y desviación estándar de las variables de radiosondeos utilizadas para comparar días de tormenta y de no tormenta por Sánchez et al. (2008).

Variable	Tormenta			No tormenta		
	N	Media	Desv. Est.	N	Media	Desv. Est.
P (hPa)	274	914.2	8.9	200	915.6	6.9
T _{superficie} (°C)	274	24.7	4.3	200	21.9	4.6
Td _{superficie} (°C)	274	10.1	4.9	200	5.6	5.2
T _c (°C)	274	30.5	5.8	200	32.8	7.7
CCL (hPa)	274	664.1	78.7	200	604.1	91.9
CCL (°C)	274	3.4	6.0	200	-2.3	6.5
CCL (ft AGL)	274	8.991.2	3.127.1	200	11.554.3	3.911.8
H ₀ (ft.AGL)	274	10.913.5	1.734.2	200	10.571.4	2.389.9
H ₋₅ (ft.AGL)	274	13.385.6	1.521.9	200	13.634.9	3.700.3
H ₋₁₀ (ft.AGL)	274	15.635.4	1.569.3	200	15.991.5	3.592.7
1.000-500 (m)	274	5.716.2	64.5	200	5.684.3	71.5
WBZ (ft AGL)	274	8.296.1	1.454.7	200	7.201.2	1.846.0
Td ₈₅₀ (°C)	274	6.8	4.7	200	2.3	5.3
BOYDEN	274	97.0	2.1	200	95.1	3.3
CAPE	274	528.3	671.4	200	80.8	273.7
JI	274	26.3	4.9	200	20.1	6.4
KI	274	25.1	9.2	200	14.5	11.9
LI	274	-0.8	3.4	200	4.5	4.2
SI	274	1.2	3.3	200	6.2	4.0
TT	274	47.4	5.2	200	39.4	6.7
T mín (°C)	274	11.9	3.4	200	9.2	4.2

Además, Sánchez et al. (2009), a partir de datos de radiosondeos y de estaciones meteorológicas automáticas para 474 días, construyeron dos *modelos discriminantes lineales* para:

- Tormenta. Distingue entre días de *tormenta* y *no tormenta*. Tras el análisis para determinar las mejores variables predictivas, se incluyeron en la ecuación la *temperatura mínima*, el *índice de Showalter* y el *punto de rocío a 850 hPa*. Los índices de precisión de dicha ecuación son muy satisfactorios ya que su FAR es de 0.260 mientras que la POD alcanza 0.832.
- Granizo. Discrimina entre días de *granizo* y de *no granizo*. Las variables predictivas seleccionadas fueron la *temperatura mínima*, la *presión en superficie*, el *CAPE* y el *índice K*. En este caso, el FAR es de 0.400 y la POD llega hasta 0.670.

Las variables de estos dos modelos representan los ingredientes necesarios para la convección según Johns and Doswell, 1992 o Doswell et al. (1996), es decir, la *inestabilidad atmosférica* y la *humedad* en capas bajas. El tercer ingrediente para la convección es el *mecanismo de disparo*, que no se puede evaluar únicamente a través de datos de radiosondeos, como se ha apuntado anteriormente.

Debido a que el radiosondeo de Mendoza se realiza a más de 200 km de distancia de la red de granizómetros del oasis sur, su representatividad espacial es dudosa. Por ello no se considera oportuno realizar un estudio similar al efectuado para los datos de la red de Zaragoza (apartado 4.2.3.4)

4.4. COMPARACIÓN ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS TORMENTAS EN ARAGÓN Y EN MENDOZA

Una vez estudiadas las características generales de las tormentas en las dos áreas de estudio de forma independiente, se realiza una comparación entre ambas a modo de conclusiones.

1. DISTRIBUCIÓN TEMPORAL

En Aragón, la mayoría de las tormentas se concentran por la tarde, ya que la actividad tormentosa se genera mayoritariamente por convección. También alguna tormenta se produce por la noche (menos del 20 %), como consecuencia de la entrada de frentes. Sin embargo, en Mendoza la distribución de las células tormentosas es más amplia a lo largo del día, apuntando a un origen orográfico y frontal.

En cuanto a la duración, no se dispone de datos comparables. Por un lado, las células convectivas de Aragón de forma aislada duran de media entre 30 y 40 minutos. Por otro, en Mendoza, la duración de la actividad convectiva más frecuente es de 9 a 12 horas, pudiendo haber episodios que duren más de un día.

La campaña experimental de toma de datos se sitúa en los meses estivales. En la red de granizómetros de Zaragoza (hemisferio norte), el mes que presenta mayor número de granizómetros impactados es junio, mientras que en la red del oasis sur de Mendoza (hemisferio sur), la mayor actividad se registra en diciembre. Es decir, en ambos, la mayor frecuencia diaria y mensual de granizómetros impactados se encuentra poco antes de la mitad del verano.

2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

En Aragón se distinguen tres zonas distintas de formación de tormentas, siendo el Sistema Ibérico el más activo (se forman en él más de la mitad de los primeros ecos). Teniendo en cuenta la trayectoria habitual hacia el NE y la duración media de en torno a media hora, esto es coherente con que la zona de mayor riesgo de granizo sea el valle del Ebro. Centrándonos en las tormentas que afectan a la zona de granizómetros, las áreas de formación se localizan cerca o dentro del área de granizómetros, por lo que realizan un recorrido corto desde que se forman hasta la descarga de granizo.

En el caso de Mendoza, las regiones de formación más eficaces se ubican cerca de la precordillera, con fuerte complejidad orográfica. La distancia entre estas zonas y el oasis cultivado donde se registra el granizo es mayor que en el caso anterior, teniendo más tiempo para llegar a la fase de maduración. Dentro del oasis cultivado, las áreas con mayor riesgo de granizo son el extremo NW y el extremo SE.

3. INTENSIDAD

Las variables medidas en los granizómetros indican la intensidad de la granizada en cada una de las redes. En cuanto a las variables por unidad de superficie, el *número de impactos* por unidad de superficie es similar en ambas redes; la *masa de hielo precipitada* y la *energía cinética*, ambas por unidad de superficie, son el doble en la red del oasis sur de Mendoza que en Zaragoza; y el *diámetro máximo* registrado en un granizómetro es de 4.3 cm en Zaragoza y 4.9 cm en Mendoza. Respecto a las variables absolutas precipitadas en una superficie equivalente a la representativa de los granizómetros impactados durante un día, el *número de impactos* en ambas redes tiene el mismo orden de magnitud; la *masa de hielo precipitada* es mayor en la red de Mendoza; y la *energía cinética* máxima y media son del mismo orden de magnitud mientras que la mínima es mayor en Mendoza.

En ambas redes, los histogramas de frecuencias de esas variables muestran que los valores moda se encuentran en los valores de los intervalos más bajos, salvo en el caso de los *diámetros máximos*, donde se aprecian valores entorno a 10-12 mm en Zaragoza y 12-15 mm en Mendoza.

4. CONDICIONES METEOROLÓGICAS

Para el inicio y desarrollo de la convección se tienen que dar tres condiciones necesarias: *inestabilidad atmosférica*, *humedad en capas bajas* y un *mecanismo de disparo*. Las dos primeras se evalúan a través de las variables de los radiosondeos mientras que el mecanismo de disparo se determina con modelos mesoscalares.

Se construyen modelos de regresión a partir de datos de radiosondeos para predecir tormentas o granizo en cada zona geográfica concreta. De hecho, Sánchez et al. (2009) desarrollaron sendos modelos matemáticos para varias zonas de estudio, entre ellas las dos áreas que en las que se centra el presente estudio (Valle del Ebro y Mendoza) consiguiendo índices de precisión muy satisfactorios. Obtuvieron diferentes variables incluidas en el modelo de cada área, pero en ambas, esas variables representan de alguna forma la inestabilidad y la humedad necesarias. Estos autores también hallaron un *modelo logístico* global para todas sus áreas de estudio (Valle del Ebro, Mendoza, León y Francia) que únicamente incluyó el *índice de Showalter* y la *temperatura de punto de rocío a 850 hPa*, es decir, inestabilidad y humedad respectivamente.

4.5. BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio, F. and García Pertierra, M., 1987. Estudio de nubes tormentosas con la utilización de radar. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), Madrid.
- Biel, L. and García de Pedraza, L., 1982. El clima de Zaragoza y ensayo climatológico para el Valle del Ebro. Servicio Meteorológico Nacional, Serie A, nº 36.
- Castro, A., 1989. Análisis de las tormentas del Valle Medio del Ebro mediante la utilización de radar meteorológico de la banda C. *Tesis Doctoral*, Universidad de Valladolid, 300 pp.
- Castro, A., Sánchez, J.L., Sánchez, M.L., Madrid, J.L. and Fraile, R., 1990. Comparación entre los índices de crecimiento de las tormentas de Albacete y Aragón. *Bol. San. Veg. Plagas*, **16**, 625 – 633.
- Chagnon, S.A., 1970. Hailstreaks. *J. Atmos. Sci.*, **27**, 109 – 205.
- Cressie, N.A.C., 1990. The origins of kriging. *Mathematical Geology*, **22**, 239 – 252.
- Cressie, N.A.C., 1991. *Statistics for spatial data*. John Wiley and Sons, Inc., New York, 900 pp.
- Dávila, M., Aparicio, F. and García de Pedraza, L., 1975-1986. *Estudios realizados con radar OMERA sobre nubes en la Campaña Antigranizo en Levante*. Ministerio de Agricultura, Servicio de Plagas, Madrid.
- Doswell, C.A., Brooks, H.E. and Maddox, R.A., 1996. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology. *Wea. Forecast.*, **11**, 560 – 581.
- Fankhauser J.C. and Mohr, C.J., 1977. Some correlations between various sounding parameters and hailstorm characteristics in northeast Colorado. *Proc. 10th Conf. Severe Storms. Omaha, Nebr. Am. Meteorol. Soc.*, pp. 218 – 225.
- Font, I., 1983. *Atlas Climático de España*. INM y Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones.
- Foote, G.B. and Mohr, C.G., 1979. Results of a randomized hail suppression experiment in northeast Colorado: part VI. Post hoc stratification by storm intensity and type. *J. Appl. Meteorol.* **18**, 1589 – 1600.
- García de Pedraza, L., 1964. *La Predicción del Tiempo en el Valle del Ebro*. Serv. Meteorol. Nac. Publ. A-38, INM, Madrid.

- García-Ortega, E., López, L., Sánchez, J.L. and Marcos, J.L., 2006. Microphysical analysis at the cloud edge of a sever hailstorm. *Atmos. Res.*, **82**, 337 – 349.
- García-Ortega, E., López, L. and Sánchez, J.L., 2009. Diagnosis and sensitivity study of two severe storm events in the Southeastern Andes. *Atmos. Res.*, **93**, 161 - 178.
- Haklander, A.J. and Van Delden, A., 2003. Thunderstorms predictors and their forecast skill for the Netherlands. *Atmos. Res.*, **67 – 68**, 273 – 299.
- Huntrieser, H., Schiesser, H.H., Schmid, W. and Waldvogel, A., 1997. Comparison of traditional and newly developed thunderstorm indices for Switzerland. *Weather Forecast*, **12**, 108 – 125.
- Isaaks, E.H. and Srivastava, R.M., 1989. *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press, New York, 561 pp.
- Johns, R.H. and Doswell III, C.A., 1992. Severe local storms forecasting. *Weather Forecast*, **7**, 588 – 612.
- Journel, A.G., 1989. *Fundamental of geostatistics in five lessons*. American Geophysical Union, Washington D.C.
- Knight, C.A., Smith, P. and Wade, C., 1982. *Storm types and some radar reflectivity characteristics. Hailstorms of the Central High Plains. Vol I: The National Hail Research Experiment*, I. Colo. Assoc. Univ. Press, Boulder, pp. 81 – 93.
- López, L., 2003. Convección atmosférica severa: pronóstico e identificación de tormentas con granizo. *Tesis Doctoral*, Universidad de León, 207 pp.
- López, L. and Sánchez, J.L., 2009. Discriminant methods for radar detection of hail. *Atmos. Res.*, **93**, 358 – 368.
- Reuter, G.W. and Aktary, N., 1995. Convective and symmetric instabilities and their effects on precipitation: seasonal variations in Central Alberta during 1990 and 1991. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 153 – 162.
- Rosenfeld, D., Woodley, W.L., Krauss, T.W. and Makitov, V., 2006. Aircraft microphysical documentation from cloud base to anvils of hailstorms feeder clouds in Argentina. *J. Appl. Meteor. and Clim.*, **45**, 1262 – 1281.
- Rosinski, J., 1979. The role of natural and man-made ice-forming nuclei in the atmosphere. *Advances in Colloid and Interface Science*, **10**, 315 – 367.
- Sánchez, J.L., López, L., Bustos, C., Marcos, J.L. and García-Ortega, 2008. Short-term forecast of thunderstorms in Argentina. *Atmos. Res.*, **88**, 36 – 45.
- Sánchez, J.L., Marcos, J.L., Dessens, J., López, L., Bustos, C. and García-Ortega, E., 2009. Assessing sounding-derived parameters as storms predictors in different latitudes. *Atmos. Res.*, **93**, 446 – 456.
- Schultz, P., 1989. Relationships of several stability indices to convective weather events in northeast Colorado. *Weather Forecast*, **4**, 73 – 80.
- Smith, P.L. and Waldvogel, A., 1989. On determinations of maximum hailstone sizes from hailpad observations. *J. Appl. Meteorol.* **28**, 71 – 76.

5

DISTRIBUCIONES DE TAMAÑO Y DE ENERGÍA DEL GRANIZO EN EL SUELO

5.1. INTRODUCCIÓN

Para caracterizar cualquier variable en la naturaleza o en cualquier campo, se recurre habitualmente al cálculo de su distribución de probabilidad. Es por ello, que antes de entrar de lleno en el establecimiento de relaciones entre las variables medidas en los granizómetros y las variables proporcionadas por un radar meteorológico, se estudia la distribución de algunas de ellas.

Así, en la primera parte del capítulo, se analizan las distribuciones a las que se ajustan los *diámetros* de los impactos de granizo medidos en los granizómetros en las tres áreas experimentales descritas en el capítulo 2, es decir, en las ocho redes de granizómetros disponibles. Se trata de los denominados *espectros de tamaño del granizo* y la distribución a la que se ajustan según la bibliografía y los resultados obtenidos es una *distribución exponencial*.

En la segunda parte del mismo, se estudian las distribuciones de la *energía cinética* del granizo medida en los granizómetros. En concreto, se establece la distribución de la *energía total diaria* de cinco redes de granizómetros (las dos españolas y las tres argentinas). El llamado *espectro de energía diaria* se ajusta a una *distribución log-normal* de acuerdo a la bibliografía y a los resultados alcanzados en este trabajo.

5.2. DISTRIBUCIONES DEL TAMAÑO DEL GRANIZO. RESUMEN

Las *distribuciones de tamaño* del granizo son una parte importante de la medida del granizo en el marco de los proyectos de investigación que tienen por objeto la convección severa. Por ello, también lo es en este caso. Además, no solamente se deben conocer los parámetros característicos de las áreas de estudio de nuestro trabajo, sino que es importante establecer las comparaciones correspondientes.

En este apartado del capítulo se presenta un resumen de los resultados encontrados en el análisis de las *distribuciones de tamaño* de los impactos de granizo registrados en los granizómetros de las ocho redes descritas en el capítulo 2. Dichos resultados están publicados en *Atmospheric Research* (Sánchez et al., 2009) y se adjuntan como anexo en esta Memoria de Tesis Doctoral.

Inicialmente, se asume que el *espectro de tamaños* del granizo se ajusta a una *distribución exponencial*. Así, se calculan los parámetros de las distribuciones para los datos de granizómetros obtenidos en las dos redes españolas, las tres redes francesas y las tres redes argentinas. Conviene aclarar que en todas ellas se utilizaron los mismos materiales y metodología, es decir, el mismo tipo de placa, calibración y proceso de medida semiautomática.

Para ello, en primer lugar, se comprueba la homogeneidad de los datos de las diferentes campañas para cada una de las ocho redes a través de los test de *Mann-Whitney* y de *Kruskal-Wallis*. También se realiza un estudio previo para conocer cómo afectan sobre las distribuciones, el tamaño de los intervalos y el umbral de diámetro elegidos. Así, se observa que variando el umbral mínimo, cambia el valor obtenido de la pendiente de la distribución exponencial. Sin embargo, modificando el tamaño de la clase, el valor de dicha pendiente permanece prácticamente constante. Por tanto, la elección del umbral es crítica, mientras que, el tamaño de intervalo no influye tanto en la distribución.

A continuación se linealiza la distribución exponencial tomando logaritmos y se aplica el *método de los mínimos cuadrados* para calcular los parámetros de *ordenada en el origen* y *pendiente*. A partir de la inversa de esta última se halla el *diámetro medio característico* de la distribución. Todas las distribuciones calculadas son estadísticamente significativas. Los resultados muestran que los parámetros característicos de los ajustes son diferentes para cada área. Así, comparando los resultados

se observa que las redes francesas presentan valores de *pendiente* mayores que las españolas y éstas a su vez, mayores que las argentinas, variando entre un mínimo de 2.19 cm^{-1} en el oasis centro de Mendoza hasta un máximo de 3.47 cm^{-1} en la zona mediterránea de Francia. Por tanto, los *diámetros medios* menores se encuentran en Francia, en torno a 8 mm, y los mayores en Argentina, superando los 9 mm, mientras que en España, son intermedios. En concreto, el valor mínimo encontrado es de 7.9 mm en la zona mediterránea francesa, mientras que el máximo es de 9.6 mm en el oasis centro de Mendoza. Estas diferencias podrían explicarse debido a la proporción de *supercélulas* frente al número total de células con granizo en cada una de las áreas.

Al analizar gráficamente las distribuciones exponenciales linealizadas, se aprecian dos posibles partes en la distribución. Por ello, se aplica una técnica simple de *regresión por partes* para encontrar un diámetro de granizo que separe esas distribuciones diferentes. Ese diámetro umbral se denomina *breakpoint* o *punto de ruptura* y se encuentra en cuatro de las cinco redes analizadas en España y Argentina, siendo estadísticamente significativos. En el oasis sur de Mendoza no se consiguen resultados satisfactorios. Los *breakpoints* encontrados varían entre 2 cm en el oasis centro y 3.7 cm en el oasis noreste. También se calculan las distribuciones antes y después de ese punto. Solamente en dos de las redes, el ajuste exponencial es estadísticamente significativo antes y después del *breakpoint*.

El hecho de que el *espectro de tamaños* sea bimodal, apunta a un diferente comportamiento de las piedras de granizo pequeñas y grandes. De hecho, se observa que el 60 % de las piedras mayores de 2 cm analizadas son elípticas. Por ello, los resultados apuntan a que puede ser factible que ese punto de ruptura marque la diferencia entre dos procesos de crecimiento del granizo diferente. En el primer término, los granizos pequeños crecen por los procesos convencionales recolectando agua subfundida (ya sea por el *proceso húmedo* o por el *proceso seco*) hasta alcanzar cierto tamaño. En la segunda parte, el proceso es distinto, pudiéndose alcanzar esos diámetros grandes debido a la amalgama o unión de varios granizos pequeños, adheridos gracias a la presencia de agua subfundida.

La rareza del granizo grande no permite disponer del tamaño de muestra adecuado y por ello todavía es pronto para confirmar dichas interpretaciones físicas. La progresiva incorporación de datos permitirá avanzar en el conocimiento de los mecanismos de formación del granizo.

5.3. DISTRIBUCIONES DE LA ENERGÍA CINÉTICA DEL GRANIZO

Desde hace décadas, se asume que la energía de las piedras de granizo calculada en el suelo a través de granizómetros, se ajusta a una *distribución log-normal truncada*. Así, Schickedanz y Changnon (1970) ajustaron los valores de energía registrados para diferentes granizadas individuales a dicha función. Por otro lado, Mezeix y Doras (1981) hallaron con éxito los parámetros de las distribuciones normales de los valores de los logaritmos de la *energía anual*.

En esta parte del estudio, el objetivo consiste en calcular los parámetros de las distribuciones a las que se ajustan las *energías totales diarias* de los granizómetros de las redes españolas y argentinas. Se acepta la simplificación de Mezeix y Doras (1981), por lo que se trata de ajustar los *logaritmos de las energías diarias* a una *distribución normal*. Posteriormente, se aplica el *test de Kolmogorov-Smirnov*, con el objetivo de conocer la bondad de dicho ajuste.

5.3.1. BASE DE DATOS Y METODOLOGÍA

Para este análisis de la *energía total diaria* medida en el suelo a través de los granizómetros, se emplean los datos de cinco redes de granizómetros, las dos españolas y las tres argentinas, durante todas las campañas experimentales disponibles.

El número de días de granizo, es decir aquellos en que uno o varios granizómetros han sido impactados, para los diferentes años y cada una de las zonas de estudio (Zaragoza, Lérida y Mendoza), se resume en las tablas 5.1 a 5.5.

Tabla 5.1. Número de días de granizo que afecta a granizómetros y número de granizómetros impactados en cada campaña en la red de granizómetros de Zaragoza.

Campaña	Nº de días de granizo en la red	Nº de granizómetros impactados
2003	3	15
2004	11	40
2005	11	131
2006	21	173
2007	12	63
Total	58	422

Tabla 5.2. Número de días de granizo que afecta a granizómetros y número de granizómetros impactados en cada campaña en la red de granizómetros de Lérida.

Campaña	Nº de días de granizo en la red	Nº de granizómetros impactados
2000	13	53
2001	12	86
2002	10	142
2003	5	31
2004	14	75
2005	11	112
2006	13	95
2007	16	211
Total	94	805

Tabla 5.3. Número de días de granizo que afecta a granizómetros y número de granizómetros impactados en cada campaña en la red de granizómetros del oasis noreste de Mendoza.

Campaña	Nº de días de granizo en la red	Nº de granizómetros impactados
2004-05	16	93
2005-06	18	160
2006-07	18	107
Total	52	360

Tabla 5.4. Número de días de granizo que afecta a granizómetros y número de granizómetros impactados en cada campaña en la red de granizómetros del oasis centro de Mendoza.

Campaña	Nº de días de granizo en la red	Nº de granizómetros impactados
2004-05	18	105
2005-06	16	49
2006-07	23	68
Total	57	222

Tabla 5.5. Número de días de granizo que afecta a granizómetros y número de granizómetros impactados en cada campaña en la red de granizómetros del oasis sur de Mendoza.

Campaña	Nº de días de granizo en la red	Nº de granizómetros impactados
2004-05	30	275
2005-06	22	162
2006-07	31	221
Total	83	658

En primer lugar, para obtener el valor de la *energía cinética acumulada diaria* (*Ediaria*), se suma la *energía cinética* medida en cada granizómetro para cada día. Posteriormente, se calcula el logaritmo decimal de los mismos (*logEdiaria*), para finalmente, hallar los parámetros del ajuste a una *distribución normal*.

La *distribución normal* es la distribución de probabilidad para variables continuas más importante (Peña, 2001). Su función de densidad se expresa como:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} (x - \mu)^2\right) \quad (5.1)$$

donde μ representa la media, la mediana y la moda de la distribución a la vez, y σ se corresponde con la desviación típica, por lo que se dice que la variable es $N(\mu, \sigma)$. Esta distribución, está justificada por el *teorema central del límite*. Cuando la variable normal toma valores de $\mu = 0$ y $\sigma = 1$, se denomina *normal estándar* $N(0,1)$ y su función está tabulada. Para calcular probabilidades en el caso general, se transforma la variable aleatoria normal x en la variable normal estándar z a través de:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (5.2)$$

Por otro lado, se denomina *distribución lognormal* a la distribución de una variable cuyo logaritmo se distribuye normalmente (Peña, 2001). Así, si $x = \log y$ es normal $N(\mu, \sigma)$, la densidad de y se enuncia como:

$$g(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log y - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \frac{1}{y} \quad y > 0 \quad (5.3)$$

La transformación logarítmica es monótona, los percentiles de x son los de y , y los demás parámetros se calculan a partir de la normal (ej.: la mediana de y es 10^μ , siendo μ la media de x). De esta manera, se justifica la simplificación propuesta por Mezeix y Doras (1981).

Finalmente, para comprobar la normalidad de los datos de una muestra, se viene utilizando comúnmente el *test de Kolmogorov-Smirnov* modificado (Hair et al., 1999).

5.3.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 5.1 se muestran las distribuciones normales del *logaritmo de la energía cinética acumulada diaria* para el total de las cinco campañas experimentales de Zaragoza, las ocho campañas de Lérida, y las tres campañas de las redes argentinas (noreste, centro y sur), respectivamente (de izquierda a derecha y de arriba abajo). Estas figuras se obtienen con el programa *Statística 6.0* en su módulo de *gráficos de dispersión*.

En dichas figuras, aparece además el valor del estadístico d de Kolmogorov-Smirnov. Este valor, se compara con el valor crítico d_c para cada muestra. En todas ellas, el valor de d es menor que d_c . El valor de p del test Chi-cuadrado, utilizado para contrastar estas diferencias, es no significativo, por lo que se acepta la hipótesis nula de que la distribución es normal (Peña, 2001).

Tabla 5.6. Intervalos de *logEdiaria* y de *Ediaria* más frecuentes para las distribuciones normales.

Red	Intervalo de <i>logEdiaria</i>	Intervalo de <i>Ediaria</i> (J m ⁻²)
Zaragoza	2.0 – 2.5	100.0 – 316.2
Lérida	0.0 – 0.5	1.0 – 3.2
Oasis Noreste	1.5 – 2.0	31.6 – 100.0
Oasis Centro	1.0 – 1.5	10.0 – 31.6
Oasis Sur	1.5 – 2.0	31.6 – 100.0

En la tabla 5.6 se muestran los valores más frecuentes de cada histograma y los intervalos más frecuentes de la *energía cinética acumulada diaria* de la distribución calculados a partir de los primeros. Cabe destacar que el intervalo de *energía cinética acumulada diaria* más elevado corresponde con la red de Zaragoza, mientras que el más bajo se encuentra en la red de Lérida.

Tabla 5.7. Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para contrastar la normalidad del *logaritmo de energía diaria acumulada* en las cinco redes de granizómetros.

		Zaragoza	Lérida	Oasis noreste	Oasis centro	Oasis sur
N		58	94	54	57	84
Parámetros normales	<i>logEdiaria</i> media	1.679	1.071	2.085	1.507	1.875
	Desviación típica	0.990	1.225	0.840	0.869	1.067
Z de Kolmogorov-Smirnov		0.440	0.708	0.751	0.589	0.574
Sig. asintót. (bilateral)		0.990	0.698	0.625	0.879	0.897

Utilizando el paquete estadístico *SPSS 15.0 (Statistical Package for Social Sciences)*, se realiza el test de Kolmogorov-Smirnov como contraste de normalidad para las frecuencias de los *logaritmos de energía diaria acumulada* y se obtienen los datos reflejados en la tabla 5.7. Todas las distribuciones son estadísticamente significativas ya que el valor de Z es menor que el valor crítico de 1.96 (al nivel de significación α del 5 %) y de 2.58 (al 1 %) y el valor de la significación asintótica también es mayor que 0.05 y 0.01, al 5 y 1 % respectivamente.

Finalmente, los parámetros de la distribución normal se muestran en la tabla 5.8. La media más alta se observa en los granizómetros del oasis noreste de Mendoza, seguida por el oasis sur, mientras que la menor se encuentra en la red de Lérida. En todos ellos se aprecian desviaciones típicas elevadas.

Tabla 5.8. Parámetros de la distribución normal de la *energía cinética diaria acumulada* en las cinco redes de granizómetros.

	Zaragoza	Lérida	Oasis noreste	Oasis centro	Oasis sur
<i>Ediaria</i> media (J m^{-2})	47.73	11.78	121.62	32.11	75.07
Desviación típica (J m^{-2})	9.76	16.78	6.92	7.39	11.67

Como se puede observar en dicha tabla 5.8, los valores medios de *energía cinética acumulada diaria* son muy diferentes entre sí. Esto puede ser atribuido a que el valor de *energía cinética acumulada diaria* es un parámetro característico de cada zona y fruto de su climatología. Así, en las dos áreas de estudio españolas, separadas por una distancia de aproximadamente 120 kilómetros, los valores resultantes son bien diferentes (47.73 frente a 11.78 J m^{-2}). La red de granizómetros de Zaragoza se encuentra en una zona con mucha complejidad orográfica y donde el Sistema Ibérico ejerce influencia sobre la formación de tormentas, mientras que la red de granizómetros de Lérida está situada en un área más plana.

Por otro lado, el oasis noreste de Mendoza presenta el valor medio más alto, siendo casi 3 veces el de Zaragoza y 11, el de Lérida. El oasis centro se sitúa relativamente cerca de la precordillera andina, y guarda cierta similitud con la red de Zaragoza. Los valores medios de *energía cinética diaria acumulada* son similares. Por último, el oasis sur presenta unas características intermedias entre los dos oasis argentinos.

Conforme vaya aumentando el tamaño de la base de datos, probablemente se podrán ir extrayendo más conclusiones a cerca de estos valores.

Figura 5.1. Distribuciones normales del *logaritmo de la energía diaria acumulada* en las redes de granizómetros de Zaragoza, Lérida, oasis noreste, centro y sur de Mendoza para el acumulado de las campañas experimentales disponibles.

5.4. BIBLIOGRAFÍA

- Hair, F.J. Jr., Anderson, R.E., Tatham, R.L. and Black, W.C., 1999. *Análisis multivariante*. Prentice Hall, Madrid, 799 pp.
- Mezeix, J.F. and Doras, N., 1981. Various kinetic energy characteristics of hailpatterns in the Grossversuch IV experiment. *Amer. Meteor. Soc.*, **20**, 377 – 385.
- Peña, D., 2001. *Fundamentos de Estadística*. Alianza Editorial, Madrid, 683 pp.
- Sánchez, J.L., Gil-Robles, B., Dessens, J., Martín, E., López, L., Marcos, J.L., Berthet, C., Fernández, J.T. and García-Ortega, E., 2009. Characterization of hailstone size spectra in hailpad networks in France, Spain and Argentina. *Atmos. Res.*, **93**, 641 – 654.
- Schickedanz, P.T. and Changnon, Jr., S.A., 1970. The design and evaluation of hail suppression experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **98** (3), 242 – 252.

6

RELACIÓN ENTRE LA ENERGÍA Y EL TAMAÑO DEL GRANIZO EN EL SUELO Y LAS VARIABLES RADAR

6.1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años se han desarrollado numerosos estudios que tratan de pronosticar la presencia de granizo en las células tormentosas a través de los datos proporcionados por radares meteorológicos (Greene y Clark, 1972; Lemon, 1978; Waldvogel et al., 1979; Billet et al., 1997; López y Sánchez, 2009). Sin embargo, en muchas ocasiones, y para determinados objetivos, predecir la presencia o ausencia de granizo es una información insuficiente. Así, las compañías aseguradoras, los gobiernos locales, las agencias de protección civil están interesados además, en conocer los daños causados por este tipo de precipitaciones.

Entonces, surge la cuestión de cómo predecir el daño provocado por una tormenta de granizo. Usualmente, los parámetros utilizados para pronosticar el daño son el *diámetro máximo* de las piedras de granizo registradas y la *energía cinética* por metro cuadrado.

Así, Fraile et al., (2003) señalaron que el *diámetro máximo* calculado es representativo de daños en cristales, tejados, coches, etc. Por otro lado, Changnon (1971) indicó que el nivel de pérdida en diferentes tipos de cultivos puede ser bien estimado a través de la *energía cinética total* de una granizada o también, a través del *número de piedras de granizo con diámetro superior a 0.64 cm*. Schiesser (1990) también estudió esta última relación. Más recientemente, se ha aplicado con éxito la *energía cinética* para estimar los daños en automóviles (Hohl et al., 2002a) o en edificios (Hohl et al., 2002b).

De hecho, la *energía cinética* del granizo es el parámetro más empleado para medir la intensidad de las granizadas, debido fundamentalmente a que se trata de un indicador sintético, que integra el *número de piedras* de granizo por metro cuadrado, su *diámetro* y su *velocidad de caída* (proporcional a la raíz cuadrada del *diámetro*).

Por tanto, a la hora de pronosticar los daños causados por una determinada tormenta con granizo, ya que no se pueden estimar directamente, se recurre a parámetros relacionados con el mismo, como son la *energía cinética* o el *tamaño máximo* registrado. Así, los objetivos del presente capítulo son:

- Evaluar hasta qué punto las variaciones de la *energía cinética* precipitada en el suelo por una tormenta de granizo, pueden ser pronosticadas mediante el uso exclusivo de los valores de *reflectividad*, derivados de un radar meteorológico.
- Estudiar las relaciones existentes entre las diferentes *variables radar* y la *energía* del granizo, con el fin de conocer cuales son los factores que determinan la cantidad de energía precipitada por una tormenta, y hasta qué porcentaje pueden ser explicadas las variaciones de la misma.
- Analizar las relaciones de las *variables radar* con el máximo *tamaño* del granizo registrado en el suelo, de manera paralela a la energía.

Justamente, en la primera parte de este capítulo se estudia la relación entre la *energía cinética* medida en cada granizómetro y la *reflectividad puntual máxima* registrada sobre el mismo, en el área de estudio de Zaragoza y en el oasis sur de Mendoza.

En la segunda parte del capítulo, se exponen las relaciones encontradas entre la *energía cinética* medida en los granizómetros y las *variables radar* y también entre el *diámetro máximo* de cada granizómetro y esas *variables radar*, para las áreas de estudio de Zaragoza y del oasis sur de Mendoza.

Las relaciones deducidas en este apartado permiten interpretar, desde el punto de vista meteorológico, los resultados obtenidos en el capítulo 7, referente a la predicción de la energía de granizo en el suelo.

6.2. RELACIONES ENTRE LA ENERGÍA CINÉTICA DEL GRANIZO EN EL SUELO Y LA REFLECTIVIDAD

En el capítulo 2 del presente trabajo de Tesis Doctoral, se describen algunas de las técnicas publicadas cuyo objetivo reside en detectar precipitaciones de granizo en el suelo, mediante el uso de *variables radar*. Actualmente, esta línea de investigación sigue aportando resultados y generando publicaciones (por ej.: López y Sánchez, 2009). Sin embargo, resulta mucho más complicado, no solo señalar la probabilidad de precipitaciones de granizo, sino cuantificar en tiempo real (*nowcasting*) la intensidad de las mismas. Para describir esta intensidad son necesarios determinando parámetros. Así, Makitov (2007) señaló que las características básicas para la parametrización de la intensidad de las granizadas son:

- El *flujo de energía cinética*, $\dot{E}$ ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Estima la intensidad instantánea de las granizadas y depende sólo de características microfísicas como el diámetro de las piedras de granizo y su concentración. Se calcula a partir de la *reflectividad radar* (dBZ) en una o dos longitudes de onda.
- La *energía cinética total por unidad de área*, E (J m^{-2}). Además de depender de las características microfísicas, también está condicionada por la duración de la granizada, el tamaño del núcleo de granizo y la velocidad de la tormenta. Por ello, se encuentra más ligada al daño registrado en los cultivos. Se mide a través de una red de granizómetros en el suelo.

A continuación, se realiza una breve descripción de las relaciones encontradas entre estos parámetros y los valores de reflectividad obtenidos a partir de datos de radar por diferentes autores. Posteriormente, el objetivo de este apartado consiste en evaluar si estas relaciones, halladas para otras zonas de estudio, proporcionan resultados satisfactorios a la hora de desarrollar modelos de estimación de la *energía cinética* a corto plazo en las redes de las áreas de estudio.

6.2.1. RELACIONES ENTRE EL FLUJO DE ENERGÍA CINÉTICA, LA ENERGÍA CINÉTICA TOTAL Y LA REFLECTIVIDAD: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En primer lugar, Waldvogel et al. (1978a y 1978b) propusieron una serie de relaciones para la determinación cuantitativa de la energía cinética de las granizadas a partir de datos de radar, comparando los datos proporcionados por un radar de la banda S con los datos de una red de granizómetros. Los autores utilizaron lo que se podría denominar “espectrómetro-granizómetro” (Federer y Waldvogel, 1975 y 1978). Dos de estos dispositivos fueron instalados sobre sendos vehículos que se desplazaban al centro de las tormentas. El tiempo de muestreo fue de 27 segundos, tras los cuales, las piedras de granizo eran fotografiadas y retiradas en los siguientes 3 segundos. Así se hallaron los *espectros de tamaños* del granizo, tomados en los contornos de reflectividad más fuertes de la tormenta.

Posteriormente, Waldvogel et al. (1978a y 1978b) combinaron las ecuaciones que definen la *reflectividad* y la *energía cinética* (ecuaciones 6.1 y 6.2) y la ley de la velocidad de caída (Douglas, 1964), para obtener la **relación Z- $\dot{E}$ teórica** (ecuación 6.3):

$$Z = \int_0^\infty N(D) D^6 dD = \frac{N_0 6!}{\Lambda^7} \quad (6.1)$$

$$\dot{E} = \frac{\pi \rho v_0^3 (4.5)!}{12 \times 10^6} \frac{N_0}{\Lambda^{5.5}} \quad (6.2)$$

$$\dot{E} = 7.79 \times 10^{-8} \rho v_0^3 N_0^{0.214} Z^{0.786} \quad (6.3)$$

donde N_0 ($\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$) representa los interceptados; Λ (mm^{-1}), la pendiente; u_0 (m s^{-1}), la *velocidad de caída* de las piedras según la ecuación $v = u_0 D^{\frac{1}{2}}$; ρ (0.9 g cm^{-3}), la *densidad del hielo*; Z ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$), el *factor de reflectividad* y $\dot{E}$ ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$), el *flujo de energía cinética*.

Tomando el valor de u_0 de Mason (1971) como $4.41 \text{ m s}^{-1} \text{mm}^{-0.5}$ y N_0 de Federer y Waldvogel (1975) como $12 \text{ m}^{-3} \text{mm}^{-1}$, obtuvieron la **relación $\dot{E}$ - Z semiempírica**:

$$\dot{E} = 1.023 \times 10^{-5} Z^{0.786} \quad (6.4)$$

Teniendo en cuenta el valor de N_0 calculado por Waldvogel (1974), obtuvieron una segunda **relación $\dot{E}$ - Z semiempírica**:

$$\dot{E} = 4.65 \times 10^{-6} Z^{0.8455} \quad (6.5)$$

Por otro lado, Waldvogel et al. (1978a y 1978b) calcularon $\dot{E}$ y Z a partir de los espectros de tamaño medidos en los granizómetros utilizando las ecuaciones 6.6 y 6.7.

$$\dot{E} = \frac{\pi \rho u_0^2}{F t 12 \times 10^6} \sum_{i=1}^p n_i D_i^4 \quad (6.6)$$

$$Z = \frac{1}{F t u_0} \sum_{i=1}^p n_i D_i^{5.5} \quad (6.7)$$

siendo n_i el *número de piedras* con diámetro en el intervalo $D_i \pm \Delta D_i$, p la *clase de diámetro mayor*, y recogidos durante un *tiempo t* en el *área de muestreo F* . Es decir, estos valores son resultado de una combinación *verdad terreno-radar "ideal"* (mismo volumen de muestreo, sin saturación) y de una granizada "ideal" (con velocidad de caída constante).

Una vez calculados dichos valores, realizaron una regresión lineal entre los logaritmos de ambos (figura 6.1), obteniendo coeficientes de correlación muy elevados para cada una de las relaciones empíricas de cada granizada (obteniendo las **relaciones Z - $\dot{E}$ empíricas individuales**), por encima de 0.9.

Figura 6.1. Relaciones Z - $\dot{E}$ reales para los espectros con $\dot{E} > 0.1 \text{ J m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Waldvogel et al., 1978a)

Gracias a la gran similitud entre las relaciones empíricas halladas, los autores propusieron una **relación Z - $\dot{E}$ empírica general** simplificada (ecuación 6.8), a la vez que calcularon la relación para la *masa (M)* y la *intensidad de la precipitación (R)* (ecuaciones 6.9 y 6.10 respectivamente).

$$\dot{E} = 5 \times 10^{-6} Z^{0.840} \quad (6.8)$$

$$M = 2.32 \times 10^{-5} Z^{0.706} \quad (6.9)$$

$$R = 6.53 \times 10^{-4} Z^{0.747} \quad (6.10)$$

Para comprobar la validez de las relaciones, calcularon el valor del *flujo de energía* según cada una de las ecuaciones y lo compararon con el *flujo de energía* medido en los granizómetros. Obviamente, los mejores resultados los proporcionan las relaciones individuales para cada granizada.

Además, se compararon con las relaciones Z-É semiempíricas y concluyeron que la aproximación exponencial resultó ser más apropiada que la monodispersa.

Con posterioridad, Waldvogel et al. (1978b) compararon cuantitativamente los datos de radar de la banda S con los datos de granizómetros. Dichos granizómetros consistían en una placa de un material sensible a los impactos de ciertas dimensiones (Sarrat et al., 1977; Federer et al., 1978), es decir, un mecanismo similar al utilizado en el presente trabajo. A la hora de calcular los parámetros de la granizada a partir de esos granizómetros se plantean los problemas de exactitud y representatividad de los puntos medidos (Changnon, 1964; Scheleusener et al., 1965; Long et al., 1980; Waldvogel y Schmid, 1982).

Calcularon la *energía cinética* E (J m^{-2}) a partir del *número de piedras* n_i (m^{-2}) en el *intervalo de diámetro* ΔD_i con *diámetro medio* D_i (mm) según la ecuación 6.11. Para este cálculo sólo se consideró la componente vertical de la velocidad de caída de las piedras, es decir no se tiene en cuenta la influencia del viento.

$$E = 4.58 \times 10^{-6} \sum_{i=1}^p n_i D_i^4 \quad (6.11)$$

Comprobaron que muchos de los granizómetros presentaban valores de energía muy pequeños, mientras que muy pocos tenían valores altos. Así, unos pocos granizómetros son responsables de la mitad de la energía cinética de las granizadas. Al representar la distribución de frecuencias de la energía $X(E)$ ($\text{m}^2 \text{J}^{-1}$) de los granizómetros de forma individual, se obtiene una *distribución exponencial* o bien una distribución exponencial truncada por los límites superior e inferior. En cambio, como se comprueba en el apartado anterior, la *energía diaria total* medida en los granizómetros se ajusta a una *distribución log-normal*.

Finalmente, Waldvogel et al. (1978b) compararon los valores de reflectividad leídos en tiempo real en los PPI, con los obtenidos a partir de las distribuciones de tamaño de los espectrómetros de granizo. Los valores de reflectividad radar y los del espectrómetro de granizo se ajustaban razonablemente bien. Por ello, concluyeron que los valores de reflectividad hallados a partir de los espectrómetros concuerdan con los del radar.

Del mismo modo, Smith et al. (1975) encontraron una ecuación (6.12) que relaciona la *reflectividad de radar* (Z_e) con la *reflectividad calculada a partir de la distribución de tamaños de un espectrómetro* (Z), suponiendo N_0 constante, lo cual no es cierto.

$$Z_e = Z^{0.95} \quad (6.12)$$

También Ulbrich (1977) planteó una relación para esferas de hielo cubiertas por una fina película de agua, donde N_0 ($\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$) son los *interceptados* y D_0 (mm) es el *diámetro medio* en ese volumen:

$$Z_e = 0.254 N_0 D_0^{5.82} \quad (6.13)$$

Waldvogel et al. (1978b), teniendo en cuenta la expresión de Rayleigh, la *relación Z- $\dot{E}$ teórica* (6.3) y la ecuación de regresión entre N_0 y $\dot{E}$ de Waldvogel et al. (1978a), encontraron una ley N_0 -Z, que combinada con la ecuación 6.13, genera la nueva relación (6.14):

$$Z_e = 1.68 Z^{0.88} \quad (6.14)$$

Los autores compararon numéricamente las ecuaciones 6.12 y 6.14 y concluyeron que la energía cinética debe ser multiplicada por 2 y por 3 respectivamente si la *reflectividad radar* se introduce en la ecuación 6.8.

Además, Waldvogel et al. (1978b), correlacionaron los valores de energía medidos en los granizómetros E (J m^{-2}) con la energía calculada a partir de la reflectividad radar según la ecuación 6.13, $E(Z)$ (J m^{-2}), punto a punto y utilizando la media de cuatro granizómetros vecinos. Los mejores resultados se obtuvieron fijando el umbral mínimo de reflectividad en 61 dBZ y utilizando las medias de los cuatro granizómetros (en las cuales, la influencia del viento es menor). Los mismos autores intentaron mejorar las relaciones estableciendo una transición gradual entre la lluvia y el granizo respecto a la reflectividad. En realidad, la conclusión más importante de estos trabajos es que no es necesario conocer el comportamiento exacto referente a la dispersión de las piedras de granizo (dispersión de Mie o de Rayleigh) para aplicar las *relaciones Z- $\dot{E}$ simples*.

Por otro lado, Iniuchin y Makitov (1987) presentaron una ecuación que relaciona el *flujo de energía* y la *velocidad de corriente ascendente y descendente* de aire para una zona de la granizada. Comprobaron que cuando la velocidad de corriente descendente es comparable a la velocidad del granizo, el *flujo de energía cinética* puede ser varias veces mayor que en aire en calma, aunque esa situación no es habitual. Posteriormente Iniuchin et al. (1989), estudiaron esa expresión en relación al mecanismo de fusión del granizo.

En lo referente a la *energía cinética total* de un área particular, ésta se obtiene integrando el *flujo de energía $\dot{E}$* respecto al periodo de tiempo medido por el radar. Así, Schmid et al. (1992) compararon la *energía cinética total* medida en los granizómetros y aquella calculada a partir de la reflectividad radar para una tormenta en Suiza. Hallaron un coeficiente de correlación cruzado de 0.66 entre las muestras de datos. Concluyeron además, que en las comparaciones punto a punto, las corrientes descendentes pueden desplazar la caída del granizo, disminuyendo la correlación.

También es posible integrar el *flujo de energía $\dot{E}$* respecto al área de granizada. Entonces, se encuentra que el ajuste es mejor para tormentas grandes que para las medianas y pequeñas (Waldvogel et al., 1978b; Waldvogel y Schmid, 1983; Schmid et al., 1992) siempre que el radar escanee por debajo de la isoterma de 0 °C y dentro de un radio de hasta 40 km de distancia respecto a la posición del radar.

Finalmente, se han realizado pocos estudios que traten de correlacionar la *energía cinética* derivada de radar o de granizómetros y la cantidad de daños por granizo en el suelo. Katz y García (1981) estudiaron la relación entre los parámetros medidos en los granizómetros y el daño producido en cultivos de trigo en diferentes fases de maduración en Colorado y Nebraska. Concluyeron que los predictores de las pérdidas por granizo en cultivos eran la *energía cinética derivada de los granizómetros*, el *momento*, la *masa de granizo* y el *número de piedras* con tamaño mayor de 12.7 mm, siendo el primero el mejor predictor. Posteriormente, se han realizado otros estudios en cultivos, relacionando la *energía cinética* derivada de radar con el daño al cereal, Wojtiw y Ewing (1983 y 1986) en Canadá y Schiesser (1990) en Suiza, éste último, planteando curvas logísticas.

Por último, trabajos actuales relacionan la *energía cinética* del granizo con daños en coches (Hohl et al., 2002a) o en edificios (Hohl et al., 2002b).

6.2.2. RELACIONES ENTRE LA ENERGÍA Y LA REFLECTIVIDAD EN LA RED DE GRANIZÓMETROS DE ZARAGOZA

Como se ha señalado previamente, el objetivo de esta parte del estudio consiste en calcular empíricamente una relación entre la *energía cinética total medida en cada granizómetro* E_c (J m^{-2}) de la red de granizómetros de Zaragoza y la reflectividad medida a través del radar meteorológico de la banda C que cubre el área de estudio.

6.2.2.1. Base de datos y metodología

Se selecciona como zona de estudio la red de granizómetros de Zaragoza, junto con los datos del radar de la banda C disponibles para los mismos. En concreto, se dispone de 119 casos, seleccionados durante las campañas 2006 y 2007. Como se explica en el capítulo 3 referente a la metodología, se toma el valor de la *reflectividad puntual máxima* sobre el granizómetro impactado, denominándose *reflectividad puntual* Z_h ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$).

Con el objetivo de calcular una relación empírica, similar a las descritas en el apartado anterior, se aplica una *regresión lineal simple* entre las dos variables. Ésta es la técnica de dependencia más versátil y utilizada para establecer un modelo que explique el comportamiento de una *variable endógena* o *dependiente*, utilizando la información proporcionada a través de los valores registrados por un conjunto de *variables explicativas* o *independientes* (Cuadras, 1991; Hair et al., 1999; Pérez, 2001). Así, el objetivo es por un lado, predecir y, por otro, explicar el llamado *valor teórico de la regresión*, es decir, aquella combinación lineal de las variables independientes que mejor predice la variable dependiente.

Una vez definido el diseño de la investigación y comprobados los supuestos de *linealidad*, *homocedasticidad*, *independencia* y *normalidad del término de error* (Hair et al., 1999), se estima y valora el modelo de regresión lineal.

6.2.2.2. Resultados y discusión

1. RELACIONES ENTRE LA ENERGÍA CINÉTICA TOTAL Y LA REFLECTIVIDAD

En primer lugar se plantea una regresión lineal simple entre la *energía cinética medida en el granizómetro* E_c (h) (J m^{-2}) y la *reflectividad puntual sobre dicho granizómetro* Z_h ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$) para los 119 granizómetros seleccionados (figura 6.2 a). La representación de los valores observados frente a los predichos a través de esta ecuación, es decir, la *energía cinética medida en el granizómetro* E_c (h) frente a la *energía cinética calculada a partir de la reflectividad* E_c (Z) se observa en la figura 6.2 c. Se alcanza un coeficiente de correlación de 0.43.

Seguidamente, se halla una expresión potencial, análoga a la utilizada por los autores previamente citados para relacionar E_c (h) y Z_h (figuras 6.2 b y d). El coeficiente de correlación alcanzado es de 0.48, siendo el porcentaje de varianza explicada del 23 %.

Posteriormente se aplican cinco umbrales de E_c (h) para seleccionar los granizómetros: E_c (h) > 1, 2, 3, 4 y 5 J m^{-2} . A medida que se aumenta la cantidad de *energía cinética* requerida, disminuye el número de granizómetros seleccionados. Los ajustes lineales obtenidos son similares a los anteriores. La tabla 6.1 resume sus parámetros numéricos y la tabla 6.2 resume los coeficientes de correlación existentes entre E_c (h) y E_c (Z) calculada con las fórmulas propuestas. En todos los casos, los resultados son estadísticamente significativos, alcanzando un mayor coeficiente de correlación para el caso de la

Figura 6.2. Resultados de las regresiones entre $Ec(h)$ ($J m^{-2}$) y Zh ($mm^6 m^{-3}$), para los 119 datos con $Ec(h) > 0 J m^{-2}$. Zaragoza 2006-07:
a) y b) regresiones lineal y potencial respectivamente, c) y d) correlaciones lineales entre $Ec(h)$ ($J m^{-2}$) y $Ec(Z)$ ($J m^{-2}$) (ver explicación en el texto).

Tabla 6.1. Características de cada ajuste propuesto para relacionar la *energía cinética medida en el granizómetro* $E_c(h)$ (J m^{-2}) y la *reflectividad puntual sobre dicho granizómetro* Z_h ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$), tomando diferentes umbrales. Zaragoza 2006-07.

UMBRAL	$E_c(h) > 0 \text{ J m}^{-2}$	$E_c(h) > 1 \text{ J m}^{-2}$	$E_c(h) > 2 \text{ J m}^{-2}$	$E_c(h) > 3 \text{ J m}^{-2}$	$E_c(h) > 4 \text{ J m}^{-2}$	$E_c(h) > 5 \text{ J m}^{-2}$
Nº casos	119	92	73	59	54	50
Lineal	$y = -5.434 + 0.002 x$	$y = -4.366 + 0.002 x$	$y = 0.498 + 0.002 x$	$y = 5.435 + 0.002 x$	$y = 3.782 + 0.002 x$	$y = 3.730 + 0.002 x$
R	0.429	0.458	0.448	0.452	0.491	0.514
Potencial	$y = 1.02 \cdot 10^{-7} x^{1.842}$	$y = 2.27 \cdot 10^{-6} x^{1.584}$	$y = 1.05 \cdot 10^{-5} x^{1.452}$	$y = 1.11 \cdot 10^{-4} x^{1.256}$	$y = 1.53 \cdot 10^{-4} x^{1.233}$	$y = 2.82 \cdot 10^{-4} x^{1.185}$
% σ^2	22.9	24.3	22.0	21.1	25.0	27.2
R	0.478	0.493	0.469	0.459	0.450	0.521
Grados de libertad	118	91	72	58	53	49
Significación de R ($\alpha=0.01$)	0.235	0.266	0.298	0.331	0.345	0.358

Tabla 6.2. Coeficientes de correlación entre la *energía cinética medida en el granizómetro* $E_c(h)$ (J m^{-2}) y la *energía cinética calculada a partir de la reflectividad* $E_c(Z)$ a través de cada una de las relaciones lineales y potenciales, tomando diferentes umbrales. Zaragoza 2006-07.

UMBRAL	$E_c(h) > 0 \text{ J m}^{-2}$	$E_c(h) > 1 \text{ J m}^{-2}$	$E_c(h) > 2 \text{ J m}^{-2}$	$E_c(h) > 3 \text{ J m}^{-2}$	$E_c(h) > 4 \text{ J m}^{-2}$	$E_c(h) > 5 \text{ J m}^{-2}$
Nº casos	119	92	73	59	54	50
R entre $E_c(h)$ y $E_c(Z)$ lineal	0.429	0.458	0.448	0.452	0.491	0.514
R entre $E_c(h)$ y $E_c(Z)$ potencial	0.519	0.507	0.487	0.474	0.512	0.530
Grados de libertad	118	91	72	58	53	49
Significación de R ($\alpha=0.01$)	0.235	0.266	0.298	0.331	0.345	0.358

Tabla 6.3. Características de cada ajuste propuesto para relacionar la *energía cinética medida en el granizómetro* $E_c(h)$ (J m^{-2}) y el *flujo de energía cinética medido en el granizómetro* $\dot{E}(h)$, $\dot{E}_{90}(h)$ y $\dot{E}_{40}(h)$ ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$) con la *reflectividad puntual sobre dicho granizómetro* Zh ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$), asumiendo diferentes tiempos. Zaragoza 2006-07.

Variable relacionada con Zh	$E_c(h) - Zh$	$\dot{E}(h) - Zh$	$\dot{E}_{90}(h) - Zh$	$\dot{E}_{40}(h) - Zh$
Nº casos	119	119	72	86
Lineal	$y = -5.434 + 0.002 x$	$y = 0.002 + 4.868 \cdot 10^{-7} x$	$y = 0.422 + 3.992 \cdot 10^{-7} x$	$y = 0.032 + 4.321 \cdot 10^{-7} x$
R	0.429	0.381	0.079	0.105
Potencial	$y = 1.02 \cdot 10^{-7} x^{1.842}$	$y = 8.38 \cdot 10^{-8} x^{1.168}$	$y = 0.016 x^{0.122}$	$y = 0.004 x^{0.232}$
% σ^2	22.9	14.4	0.1	0.4
R	0.478	0.380	0.031	0.060
Grados de libertad	118	118	71	85
Significación de R ($\alpha=0.01$)	0.235	0.235	0.298	0.275

Tabla 6.4. Coeficientes de correlación entre la *energía cinética medida en el granizómetro* $E_c(h)$ (J m^{-2}) y la *energía cinética calculada a partir de la reflectividad* $E_c(Z)$ a través de cada una de las relaciones lineales y potenciales, asumiendo diferentes tiempos. Zaragoza 2006-07.

Variable relacionada con Zh	$E_c(h) - Zh$	$\dot{E}(h) - Zh$	$\dot{E}_{90}(h) - Zh$	$\dot{E}_{40}(h) - Zh$
Nº casos	119	119	72	86
R entre $E(h)$ y $E(Z)$ lineal	0.429	0.381	0.079	0.105
R entre $E(h)$ y $E(Z)$ potencial	0.519	0.394	0.031	0.060
Grados de libertad	118	118	71	85
Significación de R ($\alpha=0.01$)	0.235	0.235	0.298	0.275

relación potencial tomando el umbral de 5 J m^{-2} . Sin embargo, la gran limitación de los resultados es el bajo porcentaje de varianza alcanzada en todos los casos, nunca superando el 27 %.

2. RELACIONES ENTRE EL FLUJO DE ENERGÍA CINÉTICA Y LA REFLECTIVIDAD

A continuación, se trata de incluir la variable de tiempo en la relación entre $E_c(h)$ y Z_h . Para ello, se tienen en cuenta diferentes tiempos de integración, obtenidos a través de las imágenes de radar:

- Tiempo total en el que la tormenta se encuentra sobre el granizómetro: t (s).
- Tiempo en el que la probabilidad de granizo según el modelo logístico de López y Sánchez (2009) es mayor del 90 %: t_{90} (s).
- Tiempo en el que la *reflectividad puntual sobre el granizómetro* supera los 40 dBZ: t_{40} (s).

A partir de estos tres tiempos se calculan tres *flujos de energía medidos en el granizómetro*: $\dot{E}(h)$, $\dot{E}_{90}(h)$ y $\dot{E}_{40}(h)$ respectivamente, todos ellos expresados en $\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Posteriormente, se intenta relacionar la *reflectividad puntual sobre el granizómetro* Z_h con cada uno de ellos a través de sendas ecuaciones lineales y potenciales para los 119 granizómetros analizados, sin tomar umbrales de *energía cinética*. Las tablas 6.3 y 6.4 resumen las características de dichas ecuaciones.

Se observa que la mejor relación entre los *flujos de energía* y la *reflectividad puntual* se alcanza en el caso de tomar como tiempo de integración, el tiempo total en que la tormenta está sobre el granizómetro, es decir, con $\dot{E}(h)$. Los coeficientes de correlación son peores que en el caso de la *energía cinética absoluta* $E_c(h)$ y el porcentaje de varianza explicada es muy bajo. Estos resultados permiten concluir que es necesario realizar un análisis más complejo.

6.2.3. RELACIONES ENTRE LA ENERGÍA Y LA REFLECTIVIDAD EN LA RED DE GRANIZÓMETROS DEL OASIS SUR DE MENDOZA

6.2.3.1. Base de datos y metodología

En el caso de la zona de estudio del oasis sur de Mendoza, se analizan los 100 casos seleccionados de las campañas 2005/06 y 2006/07 en los que se dispone además de los datos de granizómetros, los datos del radar de la banda S situado en el área. Al igual que en el apartado anterior, los datos de radar utilizados en este caso son los valores de *reflectividad puntual* Z_h ($\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$).

De igual modo que para Zaragoza, tras definir el diseño de la investigación y comprobar los supuestos, se aplica una *regresión lineal simple* entre la *energía cinética* o el *flujo de energía cinética* y la *reflectividad puntual*.

6.2.3.2. Resultados y discusión

1. RELACIONES ENTRE LA ENERGÍA CINÉTICA TOTAL Y LA REFLECTIVIDAD

Inicialmente se realiza una *regresión lineal simple* entre la *energía cinética medida en el granizómetro* $E_c(h)$ (J m^{-2}) y la *reflectividad puntual sobre dicho granizómetro* Z_h ($\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$) para los 100 granizómetros seleccionados (figura 6.3 a y c), alcanzando un coeficiente de correlación de 0.66.

Figura 6.3. Resultados de las regresiones entre $Ec(h)$ ($J m^{-2}$) y Zh ($mm^6 m^{-3}$), para los 100 datos con $Ec(h) > 0 J m^{-2}$. Oasis sur 2005/06-2006/07:
a) y b) regresiones lineal y potencial respectivamente, c) y d) correlaciones lineales entre $Ec(h)$ ($J m^{-2}$) y $Ec(Z)$ ($J m^{-2}$) (ver explicación en el texto).

Tabla 6.5. Características de cada ajuste propuesto para relacionar la *energía cinética medida en el granizómetro* $Ec(h)$ ($J m^{-2}$) y la *reflectividad puntual sobre dicho granizómetro* Zh ($mm^6 m^{-3}$), tomando diferentes umbrales. Oasis sur 2005/06-2006/07.

UMBRAL	$Ec(h) > 0 J m^{-2}$	$Ec(h) > 1 J m^{-2}$	$Ec(h) > 2 J m^{-2}$	$Ec(h) > 3 J m^{-2}$	$Ec(h) > 4 J m^{-2}$	$Ec(h) > 5 J m^{-2}$
Nº casos	100	92	85	83	78	75
Lineal	$y = -187.438 + 4.08 \cdot 10^{-4} x$	$y = -190.576 + 4.10 \cdot 10^{-4} x$	$y = -190.922 + 4.12 \cdot 10^{-4} x$	$y = -196.044 + 4.15 \cdot 10^{-4} x$	$y = -209.211 + 4.32 \cdot 10^{-4} x$	$y = -217.055 + 4.36 \cdot 10^{-4} x$
R	0.657	0.647	0.639	0.636	0.644	0.638
Potencial	$y = 1.39 \cdot 10^{-5} x^{1.212}$	$y = 1.29 \cdot 10^{-5} x^{1.212}$	$y = 3.29 \cdot 10^{-5} x^{1.152}$	$y = 2.47 \cdot 10^{-5} x^{1.173}$	$y = 4.97 \cdot 10^{-5} x^{1.126}$	$y = 2.83 \cdot 10^{-5} x^{1.164}$
% σ^2	42.3	40.9	39.3	39.3	39.3	39.2
R	0.650	0.640	0.627	0.627	0.627	0.626
Grados de libertad	99	91	84	82	77	74
Significación de R ($\alpha=0.01$)	0.255	0.266	0.275	0.280	0.287	0.293

Tabla 6.6. Coeficientes de correlación entre la *energía cinética medida en el granizómetro* $Ec(h)$ ($J m^{-2}$) y la *energía cinética calculada a partir de la reflectividad* $Ec(Z)$ a través de cada una de las relaciones lineales y potenciales, tomando diferentes umbrales. Oasis sur 2005/06-2006/07.

UMBRAL	$Ec(h) > 0 J m^{-2}$	$Ec(h) > 1 J m^{-2}$	$Ec(h) > 2 J m^{-2}$	$Ec(h) > 3 J m^{-2}$	$Ec(h) > 4 J m^{-2}$	$Ec(h) > 5 J m^{-2}$
Nº casos	100	92	85	83	78	75
R entre $Ec(h)$ y $Ec(Z)$ lineal	0.657	0.647	0.639	0.636	0.644	0.638
R entre $Ec(h)$ y $Ec(Z)$ potencial	0.674	0.665	0.652	0.650	0.654	0.651
Grados de libertad	99	91	84	82	77	74
Significación de R ($\alpha=0.01$)	0.255	0.266	0.275	0.280	0.287	0.293

A continuación se aplica una expresión potencial para relacionar las mismas variables (figuras 6.3 b y d), obteniéndose un coeficiente de correlación de 0.65, con un porcentaje de varianza explicada del 42.3 %, valores mayores que en los análisis de Zaragoza.

Además, se aplican cinco umbrales de $E_c(h)$ para seleccionar los granizómetros: $E_c(h) > 1, 2, 3, 4$ y 5 J m^{-2} , disminuyendo el número de datos con los umbrales mayores. Los ajustes lineales y potenciales obtenidos son similares a los anteriores y están resumidos en las tablas 6.5 y 6.6. Todos los resultados son estadísticamente significativos, observándose el mayor coeficiente de correlación para el caso de la relación potencial tomando todos los datos. No obstante, el porcentaje de varianza acumulada no supera el 43 %.

2. RELACIONES ENTRE EL FLUJO DE ENERGÍA CINÉTICA Y LA REFLECTIVIDAD

Por otro lado, también se trata de incluir la variable tiempo en la relación entre $E_c(h)$ y Zh . Se considera el tiempo total que transcurre la tormenta sobre el granizómetro. A partir de él se halla el *flujo de energía medido en el granizómetro* ($\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) $\dot{E}(h)$. Así, se establece un ajuste lineal y un ajuste potencial entre éste y la *reflectividad puntual sobre el granizómetro* Zh , sin tomar umbrales de *energía cinética*. Las tablas 6.7 y 6.8 resumen las características de dicha ecuación y se compara con la ecuación obtenida con la *energía cinética* sin tener en cuenta el tiempo.

Tabla 6.7. Características de cada ajuste propuesto para relacionar la *energía cinética medida en el granizómetro* $E_c(h)$ (J m^{-2}) y el *flujo de energía cinética medido en el granizómetro* $\dot{E}(h)$ ($\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) con la *reflectividad puntual sobre dicho granizómetro* Zh ($\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$). Oasis sur 2005/06-2006/07.

Variable relacionada con Zh	$E_c(h) - Zh$	$\dot{E}(h) - Zh$
Nº casos	100	100
Lineal	$y = -187.438 + 4.08 \cdot 10^{-4} x$	$y = -0.0627 + 2.64 \cdot 10^{-7} x$
R	0.657	0.568
Potencial	$y = 1.39 \cdot 10^{-5} x^{1.212}$	$y = 1.49 \cdot 10^{-8} x^{1.028}$
% σ^2	42.3	31.5
R	0.650	0.561
Grados de libertad	99	99
Significación de R ($\alpha=0.01$)	0.255	0.255

Tabla 6.8. Coeficientes de correlación entre el *flujo de energía cinética medido en el granizómetro* $\dot{E}(h)$ (J m^{-2}) y la *energía cinética calculada a partir de la reflectividad* $E_c(Z)$ a través de cada una de las relaciones lineales y potenciales, asumiendo diferentes tiempos. Oasis sur 2005/06-2006/07.

Variable relacionada con Zh	$E_c(h) - Zh$	$\dot{E}(h) - Zh$
Nº casos	100	100
R entre $\dot{E}(h)$ y $E_c(Z)$ lineal	0.657	0.568
R entre $\dot{E}(h)$ y $E_c(Z)$ potencial	0.674	0.569
Grados de libertad	99	99
Significación de R ($\alpha=0.01$)	0.255	0.255

Se aprecia que al introducir el tiempo, tanto el coeficiente de correlación como el porcentaje de varianza explicada disminuyen ligeramente, hasta valores de 0.57 y 31.5 %, respectivamente.

Se observa que aunque los resultados mejoran respecto al radar de la banda C, continúa la necesidad de profundizar el análisis.

6.3. RELACIONES ENTRE LA ENERGÍA Y EL TAMAÑO DEL GRANIZO EN EL SUELO Y LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS TORMENTAS EVALUADAS A TRAVÉS DE LAS VARIABLES RADAR

En el apartado anterior del presente capítulo, se observa que predecir valores de *energía cinética total* en el suelo a partir de los valores de la *reflectividad* del radar, no proporciona unos resultados satisfactorios, especialmente en lo que a varianza explicada se refiere. Por tanto, en este punto se plantea realizar un análisis detallado de las relaciones existentes entre los valores de *energía* del granizo (y también de *tamaño*) en el suelo y diferentes *variables radar*. El objetivo consiste en conocer, si sería posible alcanzar porcentajes superiores de varianza explicada, a través de la inclusión de nuevas *variables radar*, ya descritas en el apartado 2.3.6 del presente trabajo de Tesis Doctoral.

Obviamente, en este análisis se utilizan exclusivamente los granizómetros para los que se cuenta con datos de radar. Tanto la metodología como los criterios seguidos para elaborar la base de datos utilizada, están descritos en el capítulo 3 relativo a la metodología. En primer lugar, se analizan las relaciones existentes entre las *variables radar seleccionadas* y diferentes parámetros obtenidos a partir de los granizómetros (*energía* y *tamaño*) para la red de Zaragoza. Posteriormente, se realizan los mismos cálculos para la red de granizómetros y el radar de la banda S del oasis sur de Mendoza.

Como se observa a lo largo de este apartado, las relaciones encontradas permiten profundizar en las características de las tormentas que dan lugar a granizo de diferentes energías o tamaños en el suelo. Finalmente, también se aprecian las diferencias encontradas entre las dos zonas de estudio, debidas por un lado, a las particularidades climáticas de las zonas, y por otro, al distinto comportamiento de los dos tipos de radares.

6.3.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS TORMENTAS CON PRECIPITACIONES DE GRANIZO EN LA RED DE GRANIZÓMETROS DE ZARAGOZA

6.3.1.1. Base de datos y metodología

La base de datos empleada en esta parte del estudio es la misma que la del apartado 6.2.2, es decir, los 119 granizómetros de la red de Zaragoza con sus correspondientes datos del radar de la banda C, seleccionados durante las campañas 2006 y 2007, según se describe en el apartado 3 de metodología. En este caso, no sólo se utilizan los valores de *reflectividad puntual* sobre el granizómetro, sino que se incluyen también las *variables radar seleccionadas* cuya notación se muestra en la tabla 3.5 del capítulo 3 referente a la metodología.

A continuación se describen los diferentes análisis estadísticos realizados para establecer las relaciones existentes entre las propias *variables radar* y entre éstas y las *variables medidas en los granizómetros*.

Tabla 6.9. Estadísticos descriptivos de las variables de granizómetros y de las variables radar. Zaragoza 2006-07.

	N	Rango	Mín	Máx	Suma	$\bar{X}$	Me	Mo	σ^2	σ	Asimetría	Curtosis
N (m ⁻²)	119	8444	9	8454	115444	970	250	204	2950291	1718	3	8
M (kg m ⁻²)	119	3493.224	0.023	3493.248	35087.650	294.854	53.415	-	453762.855	673.619	3.410	11.427
Ec (J m ⁻²)	119	468.72	0.07	468.79	3279.15	27.56	2.89	-	5886.44	76.72	4.25	18.92
Dmax (mm)	119	33.11	5.40	38.51	1354.24	11.38	10.44	-	19.52	4.42	2.71	12.25
Zh (mm ⁶ m ⁻³)	119	156711.04	1778.28	158489.32	2688169.90	22589.66	14125.38	14125.38	508908717.22	22559.01	2.68	11.03
VIL (kg m ⁻²)	119	23.2	2.7	25.9	1333.6	11.2	9.9	7.5	24.3	4.9	0.8	-0.1
cumVIL (kg m ⁻²)	119	228.7	6.5	235.2	8187.6	68.8	57.1	17.6	2522.2	50.2	1.5	2.3
Ht of refl. centroid (km)	119	4.7953	3.2494	8.0447	599.4943	5.0378	4.9464	6.1803	0.8173	0.9040	0.3915	0.4624
Ht of centroid (km)	119	3.8355	3.6133	7.4488	625.1784	5.2536	5.1642	5.8919	0.6211	0.7881	0.4257	0.1503
Max reflectivity (dBZ)	119	14.50	37.50	52.00	5464.30	45.92	46.00	45.00	9.17	3.03	-0.36	-0.15
Mean reflectivity (dBZ)	119	7.75	33.29	41.03	4434.32	37.26	37.25	36.99	2.81	1.68	-0.06	-0.24
Top (km)	119	9.750	8.125	17.875	1416.875	11.907	11.875	11.125	3.179	1.783	0.585	0.914
Ht of max reflectivity (km)	119	9.000	1.000	10.000	563.750	4.737	4.750	4.750	2.717	1.648	0.173	0.268
Volume (km ³)	119	6979.496	160.734	7140.230	190554.621	1601.299	1110.800	1304.860	2411250.462	1552.820	1.955	3.503
Mass (kt)	119	2994.825	44.925	3039.750	80144.674	673.485	444.669	509.217	432827.055	657.896	1.784	2.797
Mean area (km ²)	119	538.587	21.431	560.018	15773.168	132.548	105.231	108.738	12366.080	111.203	1.879	3.568
Precip flux (m ³ s ⁻¹)	119	2274.833	56.527	2331.360	72786.804	611.654	418.134	440.782	320074.378	565.751	1.577	1.695
Precip area (km ²)	119	475.312	0.000	475.312	12755.814	107.192	70.875	0.000	14260.845	119.419	1.794	2.542
Tilt angle (°)	119	72.353	1.301	73.654	2779.465	23.357	18.701	9.884	268.033	16.372	1.214	1.375
Speed (km h ⁻¹)	119	47.19	4.15	51.34	3205.84	26.94	27.24	9.85	105.03	10.25	0.05	-0.59
Dtop/Dt (km h ⁻¹)	119	28.429	-8.535	19.894	340.488	2.861	2.636	7.056	34.216	5.849	0.332	-0.041
Dvolume/Dt (km ³ h ⁻¹)	119	12955.400	-2506.100	10449.300	213706.411	1795.852	1417.200	2979.220	5929144.325	2434.983	0.884	1.408
Dprecip_flux/Dt (m ³ s ⁻²)	119	6548.470	-2036.130	4512.340	95851.257	805.473	550.089	1122.480	1236748.479	1112.092	0.967	1.477
Dmass/Dt (kt h ⁻¹)	119	6476.800	-1097.030	5379.770	94178.203	791.413	511.513	1162.630	1347005.254	1160.606	1.330	2.607
DdBz_max/Dt (dBZ h ⁻¹)	119	80.237	-24.696	55.541	1421.472	11.945	8.683	29.599	251.002	15.843	0.567	0.017

6.3.1.2. Estadísticos descriptivos

El primer paso, en todo estudio en el que se realicen análisis estadísticos, consiste en calcular las medidas de posición, dispersión y forma, es decir, realizar la estadística descriptiva con el objetivo de evaluar preliminarmente los datos (Pérez, 2001). Así, la tabla 6.9 muestra los resultados de los estadísticos descriptivos más comunes que caracterizan tanto las *variables obtenidas a partir de los granizómetros* como las *variables radar* estimadas sobre los mismos.

Por tanto, los estadísticos calculados permiten conocer las características de las tormentas que dan lugar a granizo a través de los valores de las *variables radar* correspondientes al momento puntual en el que cada célula estaba precipitando granizo sobre cada uno de los 119 granizómetros considerados en el estudio.

Respecto a las variables medidas en los 119 granizómetros seleccionados, se contabilizan un total de 115444 impactos, con una media de 970 impactos m^{-2} por granizómetro. Su *diámetro máximo* presenta un rango de tamaños desde 5.40 hasta 38.51 mm, siendo 11.38 mm su valor medio. La *masa* de hielo precipitada varía desde un mínimo de 0.023 g m^{-2} hasta un máximo de casi 3.5 kg m^{-2} sobre un único granizómetro, con una media de 294.854 g m^{-2} . La *energía cinética* media registrada en los granizómetros es de 27.56 J m^{-2} y alcanza un máximo de 468.79 J m^{-2} en un solo granizómetro, aunque la mediana de 2.89 J m^{-2} denota que existen más granizómetros con valores pequeños. Al igual que para la masa, las desviaciones típicas alcanzadas son elevadas.

En cuanto a las *variables radar*, cabe destacar que para las tormentas que afectaron a los granizómetros objeto de estudio, la *reflectividad puntual* presenta un valor medio de 41.8 dBZ, alcanzando un máximo de 52 dBZ, mientras que la moda sólo llega a 41.50 dBZ. El *VIL acumulado* para la totalidad del intervalo temporal en que una tormenta está sobre un granizómetro, es de 68.8 kg m^{-2} de media y alcanza el valor máximo de 235.2 kg m^{-2} . En relación a la estructura vertical, el *techo* de la tormenta registra una media de 12 km, variando entre unos 8 km y casi 18 km. La *altura del centroide* aparece de media en 5.3 km y la *altura de la máxima reflectividad* a 4.7 km. Respecto a las dimensiones de las tormentas, el *volumen* medio es de 1600 km^3 y la *masa* de 670 kt, presentando ambas variables grandes variaciones respecto a estos valores.

1. CLASIFICACIÓN DE LAS TORMENTAS EN FUNCIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA PRECIPITADA: TORMENTAS DE ALTA ENERGÍA VS. TORMENTAS DE BAJA ENERGÍA

Por otro lado, y con el objetivo de conocer de forma pormenorizada las variaciones de los diferentes parámetros en función de la intensidad de la tormenta, se divide la muestra en dos grupos, en función de la *energía cinética* registrada en los distintos granizómetros impactados. Se selecciona como valor umbral una *energía cinética* de 20 J m^{-2} ya que según la escala TORRO de intensidad de las granizadas (tabla 2.5), por debajo de este valor, el granizo no produce daños, mientras que por encima del mismo, comienzan a aparecer daños en las plantas. Por tanto, se divide la muestra de granizómetros en dos grupos según presenten una *energía cinética* menor de 20 J m^{-2} (96 casos) denominadas *tormentas de baja energía* o bien, una energía mayor de 20 J m^{-2} (23 casos), denominadas, *tormentas de alta energía*. En la tabla 6.10 se pueden consultar los estadísticos descriptivos más importantes de las *variables de granizómetros* y de las *variables radar seleccionadas* para estas clases.

En primer lugar, se realiza una *prueba T para la igualdad de medias* (Pérez, 2001) para cada una de las variables con el fin de conocer si los casos incluidos en las *tormentas de alta energía* presentan diferencias estadísticamente significativas con respecto los casos de *tormentas de baja energía*. En la tabla 6.11 se muestra si la diferencia de medias entre ambos grupos para cada variable es significativa o no al nivel de 0.1.

Tabla 6.10. Resumen de los estadísticos descriptivos de las variables medidas en los granizómetros y de las variables radar para cada una de las clases de *energía cinética* con umbral en 20 J m^{-2} . Zaragoza 2006-07.

	$E < 20 \text{ J m}^{-2}$				$E > 20 \text{ J m}^{-2}$			
	Min	Max	$\bar{X}$	σ^2	Min	Max	$\bar{X}$	σ^2
N imp. (m^{-2})	9	1750	320	330	657	8454	3686	2408
M (g m^{-2})	0.023	267.895	59.617	65.006	323.469	3493.248	1276.713	1079.924
Ec (J m^{-2})	0.07	18.63	4.08	4.79	22.59	468.79	125.56	137.94
Dmax (mm)	5.40	15.85	9.99	2.27	10.10	38.51	17.18	6.23
Zh ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$)	1778	89125	19589	17661	4467	158489	35112	34343
VIL (kg m^{-2})	2.7	23.1	10.7	4.6	4.2	25.9	13.3	5.8
cumVIL (kg m^{-2})	6.5	231.2	61.0	44.2	14.2	235.2	101.3	60.9
Ht of refl. centroid (km)	3.249	8.045	4.947	0.896	3.774	7.016	5.416	0.855
Ht of centroid (km)	3.613	7.449	5.180	0.790	4.420	7.091	5.560	0.719
Max reflectivity (dBZ)	37.5	51.0	45.7	3.0	40.0	52.0	46.9	3.1
Mean reflectivity (dBZ)	33.3	40.3	37.1	1.6	33.6	41.0	38.0	1.9
Top (km)	8.125	17.875	11.742	1.801	10.375	14.875	12.592	1.558
Ht of max reflectivity (km)	1.000	10.000	4.555	1.640	2.500	7.750	5.500	1.483
Volume (km^3)	160.73	7140.23	1542.72	1575.90	579.23	6798.09	1845.81	1459.99
Mass (kt)	44.92	3039.75	637.36	674.44	193.71	2313.63	824.25	572.60
Mean area (km^2)	21.43	560.02	129.15	113.82	52.01	503.56	146.72	100.64
Precip flux ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	56.53	2331.36	584.65	580.62	160.46	2108.62	724.37	494.54
Precip area (km^2)	0.00	475.31	103.26	121.48	0.00	443.25	123.60	111.44
Tilt angle ($^\circ$)	1.30	73.65	22.75	16.38	7.16	72.02	25.88	16.45
Speed (km h^{-1})	4.15	51.34	27.13	9.88	6.50	45.08	26.16	11.87
Dtop/Dt (km h^{-1})	-8.54	19.89	2.57	5.97	-5.56	15.98	4.08	5.24
Dvolume/Dt ($\text{km}^3 \text{h}^{-1}$)	-2506.10	10449.30	1690.20	2488.54	-2113.31	5777.95	2236.83	2192.74
Dprecip_flux/Dt ($\text{m}^3 \text{s}^{-2}$)	-2036.13	4512.34	727.26	1126.66	-103.25	3084.75	1131.93	1006.98
Dmass/Dt (kt h^{-1})	-1097.03	5379.77	718.58	1147.72	-1020.13	3628.25	1095.42	1190.34
DdBz_max/Dt (dBZ h^{-1})	-24.70	55.54	11.06	16.12	-5.51	40.78	15.62	14.36

Tabla 6.11. Resultados de la prueba *T* para la igualdad de medias para las variables medidas en los granizómetros y las variables de radar para las dos clases de *energía cinética* con umbral en 20 J m^{-2} . Zaragoza 2006-07.

Variables	Diferencia de medias significativa	Variables	Diferencia de medias significativa
N imp. (m^{-2})	SÍ	Volume (km^3)	NO
M (g m^{-2})	SÍ	Mass (kt)	NO
Ec (J m^{-2})	SÍ	Mean area (km^2)	NO
Dmax (mm)	SÍ	Precip flux ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	NO
Zh ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$)	SÍ	Precip area (km^2)	NO
VIL (kg m^{-2})	SÍ	Tilt angle ($^\circ$)	NO
cumVIL (kg m^{-2})	SÍ	Speed (km h^{-1})	NO
Ht of refl. centroid (km)	SÍ	Dtop/Dt (km h^{-1})	NO
Ht of centroid (km)	SÍ	Dvolume/Dt ($\text{km}^3 \text{h}^{-1}$)	NO
Max reflectivity (dBZ)	SÍ	Dprecip_flux/Dt ($\text{m}^3 \text{s}^{-2}$)	NO
Mean reflectivity (dBZ)	SÍ	Dmass/Dt (kt h^{-1})	NO
Top (km)	SÍ	DdBz_max/Dt (dBZ h^{-1})	NO
Ht of max reflectivity (km)	SÍ		

En la mayoría de los casos, las variables muestran una media mayor para las *tormentas de alta energía* que para las de *baja energía*. Es decir, se necesita mayor intensidad en prácticamente todas las variables para que se produzcan precipitaciones de *alta energía*. En concreto, esas diferencias son estadísticamente significativas para las cuatro variables medidas en los granizómetros, las diferentes *reflectividades*, el *VIL puntual y acumulado*, las *alturas de los centroides*, la *altura de la máxima reflectividad* y el *techo* de la tormenta. En cambio, las diferencias entre las medias no son significativas para las demás variables.

Por el contrario, la única variable cuya media es mayor para las *tormentas de baja energía* que para las de *alta energía*, es la *velocidad* de desplazamiento, aunque la diferencia entre ambas no es estadísticamente significativa.

2. CLASIFICACIÓN DE LAS TORMENTAS EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO MÁXIMO PRECIPITADO: TORMENTAS CON GRANIZO DE DIÁMETRO GRANDE VS. TORMENTAS CON GRANIZO DE DIÁMETRO PEQUEÑO

Por otro lado, se plantea una nueva clasificación de los granizómetros en función del *diámetro máximo*. El umbral de diámetro elegido es de 15 mm, debido a que la escala TORRO de intensidad de las granizadas (tabla 2.5) señala que por encima de él, los daños son importantes.

Tabla 6.12. Resumen de los estadísticos descriptivos de las variables medidas en los granizómetros y de las variables radar para cada una de las clases de *diámetro máximo* con umbral en 15 mm. Zaragoza 2006-07.

	Dmax < 15 mm				Dmax > 15 mm			
	Min	Max	$\bar{X}$	σ^2	Min	Max	$\bar{X}$	σ^2
N imp. (m ⁻²)	9	7111	523	936	657	8454	3850	2557
M (g m ⁻²)	0.023	1144.824	100.820	175.573	211.762	3493.248	1543.947	1159.939
Ec (J m ⁻²)	0.07	69.74	6.86	11.94	18.08	468.79	160.81	148.26
Dmax (mm)	5.40	14.89	10.11	2.22	15.07	38.51	19.58	5.88
Zh (mm ⁶ m ⁻³)	1778	89125	20261	18413	4467	158489	37578	36210
VIL (kg m ⁻²)	2.7	23.1	11.0	4.6	4.2	25.9	12.4	6.3
cumVIL (kg m ⁻²)	6.5	231.2	64.8	45.9	14.2	235.2	94.5	65.4
Ht of refl. centroid (km)	3.249	8.045	5.001	0.897	3.774	7.016	5.274	0.883
Ht of centroid (km)	3.613	7.449	5.237	0.795	4.420	7.091	5.362	0.703
Max reflectivity (dBZ)	37.5	51.0	45.8	2.9	40.0	52.0	46.4	3.5
Mean reflectivity (dBZ)	33.3	40.8	37.2	1.6	33.6	41.0	37.8	2.1
Top (km)	8.125	17.875	11.875	1.789	10.375	14.875	12.109	1.671
Ht of max reflectivity (km)	1.000	10.000	4.626	1.643	3.250	7.750	5.453	1.439
Volume (km ³)	160.73	7140.23	1620.77	1607.29	369.98	3948.75	1475.96	1065.05
Mass (kt)	44.92	3039.75	671.59	674.16	128.36	1694.10	685.66	515.89
Mean area (km ²)	21.43	560.02	134.34	115.78	37.95	277.11	121.02	68.88
Precip flux (m ³ s ⁻¹)	56.53	2331.36	612.40	580.76	128.75	1480.01	606.85	435.07
Precip area (km ²)	0.00	475.31	107.63	121.81	0.00	316.69	104.38	98.18
Tilt angle (°)	1.30	73.65	23.43	16.81	7.81	45.91	22.90	12.58
Speed (km h ⁻¹)	4.15	51.34	27.02	10.11	9.85	45.08	26.43	10.76
Dtop/Dt (km h ⁻¹)	-8.54	19.89	2.83	5.78	-5.56	15.98	3.07	6.08
Dvolume/Dt (km ³ h ⁻¹)	-2506.10	10449.30	1793.50	2441.37	-2113.31	5777.95	1811.02	2314.73
Dprecip_flux/Dt (m ³ s ⁻²)	-2036.13	4512.34	777.43	1121.50	-331.27	3084.75	986.02	993.26
Dmass/Dt (kt h ⁻¹)	-1097.03	5379.77	768.94	1141.54	-1020.13	3628.25	936.09	1233.35
DdBz_max/Dt (dBZ h ⁻¹)	-24.70	55.54	11.64	15.77	-12.79	40.78	13.88	15.68

Tabla 6.13. Resultados de la prueba *T* para la igualdad de medias para las variables medidas en los granizómetros y las variables de radar para las dos clases de *diámetro máximo* con umbral en 15 mm. Zaragoza 2006-07.

Variables	Diferencia de medias significativa	Variables	Diferencia de medias significativa
N imp. (m^{-2})	SÍ	Volume (km^3)	NO
M (g m^{-2})	SÍ	Mass (kt)	NO
Ec (J m^{-2})	SÍ	Mean area (km^2)	NO
Dmax (mm)	SÍ	Precip flux ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	NO
Zh ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$)	SÍ	Precip area (km^2)	NO
VIL (kg m^{-2})	NO	Tilt angle ($^\circ$)	NO
cumVIL (kg m^{-2})	SÍ	Speed (km h^{-1})	NO
Ht of refl. centroid (km)	NO	Dtop/Dt (km h^{-1})	NO
Ht of centroid (km)	NO	Dvolume/Dt ($\text{km}^3 \text{h}^{-1}$)	NO
Max reflectivity (dBZ)	NO	Dprecip_flux/Dt ($\text{m}^3 \text{s}^{-2}$)	NO
Mean reflectivity (dBZ)	NO	Dmass/Dt (kt h^{-1})	NO
Top (km)	NO	DdBz_max/Dt (dBZ h^{-1})	NO
Ht of max reflectivity (km)	SÍ		

De esta forma, se divide la muestra de 119 granizómetros en dos grupos: *granizo de diámetro pequeño*, cuyo *diámetro máximo* es menor de 15 mm (103 casos), y *granizo de diámetro grande*, mayor de 15 mm (16 casos). En la tabla 6.12, se pueden consultar los estadísticos descriptivos más importantes de las *variables de granizómetros* y de las *variables radar seleccionadas* para una de las clases.

De igual forma que para los grupos en función de la energía, se realiza una *prueba T para la igualdad de medias* (Pérez, 2001) para cada una de las variables, cuyos resultados se resumen en la tabla 6.13 (significación al 0.1).

También en este caso, la mayoría de las variables tienen una media mayor para las *tormentas con granizo de diámetro grande* que para las de *diámetro pequeño*. Sin embargo, las diferencias entre las medias de los dos grupos solamente son estadísticamente significativas para las variables medidas en los granizómetros, la *reflectividad puntual*, el *VIL acumulado* y la *altura de la máxima reflectividad*. Así se podría afirmar que las *tormentas de diámetro grande* presentan valores de estas variables mayores que las de *diámetro pequeño*. No obstante, en el resto, las medias no son estadísticamente diferentes.

En contraposición, el *área media*, el *flujo de precipitación*, el *área de precipitación*, el *ángulo de inclinación* y la *velocidad* de desplazamiento presentan medias ligeramente superiores para el grupo de tormentas con *granizo de diámetro pequeño*, respecto al de *diámetro grande*, aunque esas diferencias no son estadísticamente significativas.

El menor número de diferencias significativas apunta a que el *diámetro máximo* del granizo medido en los granizómetros parece discriminar peor que la *energía cinética* entre grupos con valores más altos y más bajos.

6.3.1.3. Correlaciones

La *correlación* se define como el grado de dependencia mutua entre dos variables (Pérez, 2001). Por tanto, el *coeficiente de correlación* mide la intensidad con la que dos variables están relacionadas. De manera particular, para variables cuantitativas simétricas como es nuestro caso, se emplea el *coeficiente de correlación de Pearson*. Es necesario puntualizar que se trata de una medida de asociación lineal, por

lo que dos variables pueden estar perfectamente relacionadas, pero si la relación no es lineal, este coeficiente no será adecuado.

En este apartado se calculan las correlaciones entre las distintas variables para conocer cuáles están relacionadas entre sí dos a dos. El objetivo es conocer con qué *variables radar* y en qué grado se relacionan las variables medidas en el granizómetro, en concreto la *energía* (tabla 6.14) y el *diámetro máximo* (tabla 6.15). Los coeficientes de correlación significativos al nivel 0.05 se marcan con un asterisco, y los significativos al 0.01, con dos asteriscos.

Tabla 6.14. Correlaciones bivariadas entre la *energía cinética* del granizómetro y las *variables radar*. Zaragoza 2006-07.

		Ec (J m ⁻²)			Ec (J m ⁻²)
Zh (mm ⁶ m ⁻³)	Correlación de Pearson	0.429(**)	Mean area (km ²)	Correlación de Pearson	0.042
	Sig. (bilateral)	0.000		Sig. (bilateral)	0.650
	N	119		N	119
VIL (kg m ⁻²)	Correlación de Pearson	0.215(*)	Precip flux (m ³ s ⁻¹)	Correlación de Pearson	0.079
	Sig. (bilateral)	0.019		Sig. (bilateral)	0.391
	N	119		N	119
cumVIL (kg m ⁻²)	Correlación de Pearson	0.385(**)	Precip area (km ²)	Correlación de Pearson	0.038
	Sig. (bilateral)	0.000		Sig. (bilateral)	0.681
	N	119		N	119
Ht of refl. centroid (km)	Correlación de Pearson	0.249(**)	Tilt angle (°)	Correlación de Pearson	-0.007
	Sig. (bilateral)	0.006		Sig. (bilateral)	0.937
	N	119		N	119
Ht of centroid (km)	Correlación de Pearson	0.187(*)	Speed (km h ⁻¹)	Correlación de Pearson	-0.020
	Sig. (bilateral)	0.042		Sig. (bilateral)	0.832
	N	119		N	119
Max reflectivity (dBZ)	Correlación de Pearson	0.163	Dtop/Dt (km h ⁻¹)	Correlación de Pearson	0.124
	Sig. (bilateral)	0.077		Sig. (bilateral)	0.178
	N	119		N	119
Mean reflectivity (dBZ)	Correlación de Pearson	0.179	Dvolume/Dt (km ³ h ⁻¹)	Correlación de Pearson	0.100
	Sig. (bilateral)	0.052		Sig. (bilateral)	0.281
	N	119		N	119
Top (km)	Correlación de Pearson	0.197(*)	Dprecip_flux/Dt (m ³ s ⁻²)	Correlación de Pearson	0.111
	Sig. (bilateral)	0.032		Sig. (bilateral)	0.230
	N	119		N	119
Ht of max reflectivity (km)	Correlación de Pearson	0.254(**)	Dmass/Dt (kt h ⁻¹)	Correlación de Pearson	0.129
	Sig. (bilateral)	0.005		Sig. (bilateral)	0.161
	N	119		N	119
Volume (km ³)	Correlación de Pearson	0.064	DdBz_max/Dt (dBZ h ⁻¹)	Correlación de Pearson	0.100
	Sig. (bilateral)	0.492		Sig. (bilateral)	0.279
	N	119		N	119
Mass (kt)	Correlación de Pearson	0.099	**. La correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral).		
	Sig. (bilateral)	0.286	*. La correlación es significativa al nivel 0.05 (bilateral).		
	N	119			

En la tabla 6.14 se puede observar que la *energía cinética* registrada en el suelo presenta una correlación significativa al nivel 0.01 con la *reflectividad puntual* (mm⁶ mm⁻³), con el *VIL acumulado* durante toda la tormenta (kg m⁻²), con la *altura del centroide ponderado en reflectividad* (km) y con la *altura de la máxima reflectividad* (km). También muestra una correlación significativa al nivel 0.05 con el *VIL instantáneo* (kg m⁻²), con la *altura del centroide* (km) y con el *techo* (km). Es destacable que no

presente correlación con las *reflectividades máxima y media de la célula* (dBZ), lo que puede explicarse debido a que el granizómetro no siempre se encuentra bajo el lugar donde la reflectividad de la célula es máxima. Este resultado, confirma que la inclusión de valores puntuales sobre el granizómetro como el *VIL puntual* o la *reflectividad puntual* sobre el granizómetro es una decisión acertada. Tampoco se correlaciona con ninguna de las variables relacionadas con el tamaño de la tormenta.

Tabla 6.15. Correlaciones bivariadas entre el *diámetro máximo* del granizómetro y las *variables radar*. Zaragoza 2006-07.

		Dmax (mm)			Dmax (mm)
Zh (mm ⁶ m ⁻³)	Correlación de Pearson	0.349(**)	Mean area (km ²)	Correlación de Pearson	-0.020
	Sig. (bilateral)	0.000		Sig. (bilateral)	0.829
	N	119		N	119
VIL (kg m ⁻²)	Correlación de Pearson	0.161	Precip flux (m ³ s ⁻¹)	Correlación de Pearson	0.027
	Sig. (bilateral)	0.081		Sig. (bilateral)	0.773
	N	119		N	119
cumVIL (kg m ⁻²)	Correlación de Pearson	0.244(**)	Precip area (km ²)	Correlación de Pearson	-0.005
	Sig. (bilateral)	0.007		Sig. (bilateral)	0.960
	N	119		N	119
Ht of refl. centroid (km)	Correlación de Pearson	0.139	Tilt angle (°)	Correlación de Pearson	-0.011
	Sig. (bilateral)	0.133		Sig. (bilateral)	0.903
	N	119		N	119
Ht of centroid (km)	Correlación de Pearson	0.093	Speed (km h ⁻¹)	Correlación de Pearson	0.023
	Sig. (bilateral)	0.315		Sig. (bilateral)	0.807
	N	119		N	119
Max reflectivity (dBZ)	Correlación de Pearson	0.135	Dtop/Dt (km h ⁻¹)	Correlación de Pearson	0.075
	Sig. (bilateral)	0.142		Sig. (bilateral)	0.418
	N	119		N	119
Mean reflectivity (dBZ)	Correlación de Pearson	0.175	Dvolume/Dt (km ³ h ⁻¹)	Correlación de Pearson	0.051
	Sig. (bilateral)	0.057		Sig. (bilateral)	0.581
	N	119		N	119
Top (km)	Correlación de Pearson	0.113	Dprecip_flux/Dt (m ³ s ⁻²)	Correlación de Pearson	0.086
	Sig. (bilateral)	0.222		Sig. (bilateral)	0.353
	N	119		N	119
Ht of max reflectivity (km)	Correlación de Pearson	0.187(*)	Dmass/Dt (kt h ⁻¹)	Correlación de Pearson	0.081
	Sig. (bilateral)	0.042		Sig. (bilateral)	0.382
	N	119		N	119
Volume (km ³)	Correlación de Pearson	0.002	DdBz_max/Dt (dBZ h ⁻¹)	Correlación de Pearson	0.089
	Sig. (bilateral)	0.986		Sig. (bilateral)	0.334
	N	119		N	119
Mass (kt)	Correlación de Pearson	0.036	** . La correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral). * . La correlación es significante al nivel 0.05 (bilateral).		
	Sig. (bilateral)	0.700			
	N	119			

En cuanto a la tabla 6.15, los resultados apuntan a que el *diámetro máximo* del granizo registrado en los granizómetros está correlacionado significativamente al nivel 0.01 con la *reflectividad puntual* (mm⁶ mm⁻³), y con el *VIL acumulado* durante toda la tormenta (kg m⁻²), y al nivel 0.05 con la *altura de la máxima reflectividad* (km). A diferencia de la energía, no se correlaciona con el *VIL* instantáneo o con las *alturas de los centroides*. Es decir, en este caso, disminuye el número de variables correlacionadas con el tamaño máximo, y además, las correlaciones alcanzadas no son tan elevadas.

Estos resultados indican que establecer hipótesis sobre las características de las tormentas (evaluadas a través de *variables radar*) que dan lugar a diferentes tamaños de granizo en el suelo, ha de ser, en principio, una tarea más complicada que discretizar estas características para diferentes intervalos de energía.

Finalmente, se debe recordar que cuando la relación entre dos variables no es lineal, el coeficiente de correlación de Pearson no es un estadístico adecuado para evaluar la misma, por lo que las variables podrían presentar otro tipo de relación no lineal.

6.3.1.4. Análisis cluster

El *análisis cluster* es un método estadístico multivariante de clasificación automática de datos (Pérez, 2001). Engloba un conjunto de algoritmos que buscan grupos similares de variables y que se van agrupando en conglomerados con alto grado de homogeneidad interna, dentro del conglomerado, y alto grado de heterogeneidad externa, entre conglomerados (Hair et al., 1999).

Como un paso previo al análisis, se tipifican o normalizan los datos (restando la media y dividiendo por la desviación típica) con el objetivo de que todas las variables se midan en las mismas unidades y conseguir así, una distribución con media 0 y desviación típica 1.

A continuación, se muestran los *dendrogramas* obtenidos a través del paquete estadístico SPSS 15.0 en su módulo de *clasificar*, utilizando la *vinculación inter-grupos* con la *distancia euclídea al cuadrado* para las *variables radar* (figura 6.4) y para estas mismas variables incluyendo la *energía cinética* medida en los granizómetros (figura 6.5). Es decir, se aplica un método *aglomerativo, jerárquico y politético* según la clasificación de Cuadras (1991). En concreto, se elige la *vinculación inter-grupos*, ya que considera todas las posibles parejas de variables que se pueden formar siempre que éstas no pertenezcan al mismo conglomerado (Fovell y Fovell, 1993) y además, es adecuada para formar pocos conglomerados muy grandes o muchos conglomerados muy pequeños (Wilks, 1995). Este método también se conoce como UPGMA (*Unweighted Pair Group Method using Arithmetic Averages*), de Sokal y Michener (1958).

Matemáticamente, la fórmula general que describe los tipos de enlaces de los métodos jerárquicos aglomerativos es la llamada *fórmula de Lance y Williams para la distancia entre grupos* (Pérez, 2001):

$$D_{k(i,j)} = \alpha_i D_{ki} + \alpha_j D_{kj} + \beta D_{ij} + \gamma |D_{ki} - D_{kj}| \quad (6.15)$$

donde D_{ij} es la distancia entre los grupos i y j , y α , β y γ son los parámetros del modelo.

Analizando el dendrograma (figura 6.4) podemos observar varios grupos diferenciados. Por un lado, se agrupan el *volumen* (km^3), el *área media* (km^2), la *masa* (kt), el *flujo de precipitación* ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) y el *área de precipitación* (km^2), es decir, las variables relacionadas con las **dimensiones de la tormenta**. Muy próximo a éstas, aparece el *ángulo de inclinación* ($^\circ$).

Todas ellas en conjunto se relacionan con la *tasa de cambio del volumen* ($\text{km}^3 \text{h}^{-1}$), la *tasa de cambio de la masa* (kt h^{-1}) y la *tasa de cambio del flujo de precipitación* ($\text{m}^3 \text{s}^{-2}$), es decir, la **dinámica temporal de la tormenta**.

Este conglomerado se encuentra próximo al tercer grupo de variables formado por la *máxima reflectividad de la célula* (dBZ), la *reflectividad media de la célula* (dBZ), el *VIL* (kg m^{-2}), el *VIL acumulado* (kg m^{-2}) y la *reflectividad puntual sobre el granizómetro* ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$), es decir, las variables relacionadas con el número de hidrometeoros y el tamaño de los mismos, y por tanto, con la **cantidad de agua disponible**.

Finalmente, la *altura del centroide de reflectividad* (km), la *altura del centroide* (km), el *techo* (km) y la *altura de la máxima reflectividad* (km) forman el conglomerado relacionado con la **estructura vertical de la tormenta**, y que se encuentra próximo al grupo anterior.

Las variables *tasa de cambio del techo* (km h^{-1}), *tasa de cambio de la reflectividad máxima* (dBZ h^{-1}) y *velocidad de desplazamiento* (km h^{-1}) son las que presentan mayor heterogeneidad externa con respecto a los cuatro grupos de variables descritos.

Figura 6.4. Dendrograma obtenido a través del *análisis cluster* de las *variables radar seleccionadas*. Zaragoza 2006-07.

Si a las *variables radar seleccionadas* se les añade la *energía cinética medida en el granizómetro* (J m^{-2}), la estructura del dendrograma no varía (figura 6.5). Dicha energía, se incluye en el nivel de unión entre el conglomerado que incluye la *tasa de cambio del techo y de la reflectividad máxima* y la unión de los cuatro grupos de variables señaladas anteriormente. Al añadir el *diámetro máximo* del granizómetro al análisis en vez de la energía, se obtiene un dendrograma muy similar.

Se puede concluir por tanto, que el *análisis cluster* permite realizar una primera clasificación de las *variables radar* en cuatro grupos, que aportan información sobre diferentes aspectos de las tormentas que generan precipitaciones de granizo: **dimensiones, dinámica temporal, cantidad de agua disponible y estructura vertical**. No obstante, éste no resulta ser un método adecuado para proporcionar datos sobre qué grupo o grupos pueden tener mayor peso a la hora de explicar los umbrales de *energía cinética* generada en una determinada tormenta.

Figura 6.5. Dendrograma obtenido a través del análisis cluster de las variables radar seleccionadas y la energía cinética medida en cada granizómetro. Zaragoza 2006-07.

6.3.1.5. Análisis de componentes principales

El *análisis factorial* es una aproximación estadística utilizada para analizar interrelaciones entre un gran número de variables y explicarlas en función de sus dimensiones subyacentes comunes (Hair et al., 1999). Incluye el *análisis de componentes principales* y el *análisis factorial común*. En ambos, a partir de p variables observadas ($X_1, X_2, \dots, X_p$) se encuentran $k < p$ factores no directamente observables ($F_1, F_2, \dots, F_k$), que cumplen el *principio de interpretabilidad* (explican las variables perdiendo el mínimo de información y siendo fácilmente interpretables), el *principio de parsimonia* (son el menor número posible) y además son independientes entre sí.

Para este tipo de análisis se pueden obviar los supuestos de normalidad, homocasticidad y linealidad. De hecho, es deseable que haya cierto grado de *multicolinealidad* para poder identificar series de variables interrelacionadas (Pérez, 2001).

A diferencia del *análisis factorial común* en el que cada factor se refiere a la varianza explicada o *comunalidad*, el *análisis de componentes principales (ACP)* considera la *varianza total* y estima los factores que contienen proporciones bajas de *varianza única* y en algunos casos, de *varianza de error*. Las *comunalidades* designan las estimaciones de la *varianza común* entre las variables (Hair et al., 1999).

En una muestra de tamaño n con p variables $X_1, X_2, \dots, X_p$ tipificadas e inicialmente correlacionadas, las diferentes componentes principales del ACP, se expresarían como:

$$Z_{hi} = u_{h1} X_{1i} + u_{h2} X_{2i} + \dots + u_{hp} X_{pi} \quad h = 1 \dots p \quad i = 1 \dots n \quad (6.16)$$

Es decir, la *componente principal h-ésima* se define como $Z_h = X u_h$ donde u_h se denomina *eje factorial h-ésimo* y es el vector propio de V asociado a su h -ésimo mayor valor propio.

Dado que en la mayoría de los casos es difícil encontrar una interpretación adecuada de los factores extraídos, se aplican los procedimientos de *rotación de factores*. Éstos generan factores más interpretables, haciendo que cada variable original tenga una correlación próxima a 1 con uno de los factores y correlaciones próximas a 0 con el resto, sin modificar la comunalidad de cada variable. Los tipos básicos de rotación de factores (Hair et al., 1999) son la *ortogonal* y la *oblicua*. El método más utilizado pertenece al primer tipo y es el llamado *Varimax*. Obtiene los ejes rotados al maximizar la suma de varianzas de las cargas factoriales al cuadrado dentro de cada factor. En nuestro caso, se utiliza el método de rotación *Normalización Varimax con Kaiser* (Thurstone, 1935; Hair et al., 1999).

Se realiza el ACP mediante el programa *SPSS 15.0* en su módulo de *reducción de datos*. Con el objetivo de facilitar el análisis de resultados, se presenta una tabla con la varianza total explicada para cada componente rotado. En esta última, se debe elegir uno de los criterios existentes para asociar cada variable a un determinado componente. Así, Leiker (1988) fijó el umbral de 0.5, es decir, las variables con saturaciones cuyo valor absoluto sea ≥ 0.5 en cierta componente, quedan asociadas a la misma. Por su parte, Statheropoulos et al. (1998) afirmaron que ese valor umbral debe ser el 50 % del máximo valor encontrado. En nuestro estudio, optamos por el primer criterio. En el supuesto de que una variable presente saturaciones que cumplan el mismo para varias componentes, se elige aquella que muestre un mayor valor absoluto.

En nuestro caso, y con el objetivo de evaluar qué parámetros pueden explicar de manera más satisfactoria la variabilidad encontrada en las *variables radar*, se plantea el ACP para todos los datos sin realizar grupos. No obstante, sospechando un diferente comportamiento de las variables en función de las dimensiones del granizo registrado y de la energía del granizo asociado a la tormenta, también se clasifican los 119 granizómetros en dos grupos según su *energía* y en dos grupos según su *diámetro máximo* como se concreta en el apartado 6.3.1.2. Así, se repiten los ACP para las clases establecidas de estas dos variables.

Por otro lado, ya que el *análisis cluster* no proporciona información sobre qué *variables radar* se encontrarían más próximas a la *energía cinética*, se realiza un ACP incluyendo este parámetro junto con las mismas y también añadiendo el *diámetro máximo*.

1. ACP SOBRE TODOS LOS GRANIZÓMETROS

A. Variables radar seleccionadas

El ACP extrae 4 componentes para agrupar las 21 *variables radar seleccionadas*. Observando la tabla 6.16, donde se muestran los autovalores y el porcentaje de varianza para cada componente extraída, se concluye que con éstas, se alcanza un 80.01 % de varianza total explicada.

A partir de la matriz de componentes rotados (tabla 6.17), y con el criterio anteriormente expuesto, se asignan las variables a las diferentes componentes principales. Así, en la primera componente, que explica el 45.63 % de la varianza total, se incluyen el *volumen*, la *masa*, el *área media*, el *flujo de precipitación*, el *área de precipitación* y el *ángulo de inclinación*, todas ellas, con saturaciones muy altas, próximas a la unidad. Esta componente engloba las variables relacionadas con las **dimensiones físicas de la tormenta** y el *ángulo de inclinación*, coincidiendo con uno de los conglomerados formados en el *análisis cluster*.

La segunda componente eleva la varianza total acumulada hasta un 61.60 %, incluyendo la *tasa de cambio del techo*, la *tasa de cambio del volumen*, la *tasa de cambio del flujo de precipitación*, la *tasa de cambio de la masa*, y la *tasa de cambio de la reflectividad máxima*. Es decir, la segunda componente agrupa la **dinámica temporal de la tormenta**. A través de estas variables, es posible conocer la fase de desarrollo en la que se encuentra la tormenta.

La tercera componente extraída permite alcanzar un 73.33 % de varianza acumulada y engloba la *altura del centroide de reflectividad*, la *altura del centroide*, el *techo* y la *altura de la máxima reflectividad*, todas ellas variables relacionadas con la **estructura vertical de la tormenta**.

La cuarta y última componente consigue un 80.01 % de varianza total acumulada. Están asociadas a ella, la *reflectividad puntual sobre el granizómetro*, el *VIL instantáneo*, el *VIL acumulado durante toda la tormenta*, la *reflectividad máxima de la célula* y la *reflectividad media de la célula*. Este grupo de variables se refiere al número y tamaño de gotitas existentes en la tormenta, es decir, de manera indirecta, a la **cantidad de agua disponible**.

La única variable que no se asigna a ninguna componente principal es la *velocidad de desplazamiento*.

Tabla 6.16. Varianza total explicada para las *variables radar seleccionadas*. Zaragoza 2006-07.

Componente	Autovalores iniciales	% de la varianza	% acumulado
1	9.582	45.631	45.631
2	3.355	15.976	61.607
3	2.461	11.719	73.326
4	1.419	6.758	80.084

Tabla 6.17. Matriz de componentes rotados para las *variables radar seleccionadas*. Zaragoza 2006-07.

	Componente			
	1	2	3	4
Zh ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$)	0.028	-0.001	0.004	0.792
VIL (kg m^{-2})	0.456	0.367	0.292	0.705
cumVIL (kg m^{-2})	0.368	-0.022	0.346	0.614
Ht of refl. centroid (km)	0.041	0.255	0.941	0.031
Ht of centroid (km)	0.023	0.296	0.887	0.081
Max reflectivity (dBZ)	0.389	0.286	0.002	0.810
Mean reflectivity (dBZ)	0.082	0.357	-0.036	0.840
Top (km)	0.400	0.323	0.751	0.219
Ht of max reflectivity (km)	0.125	0.064	0.754	-0.003
Volume (km^3)	0.895	0.140	0.370	0.058
Mass (kt)	0.854	0.268	0.363	0.178
Mean area (km^2)	0.923	0.093	0.286	0.046
Precip flux ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	0.910	0.223	0.216	0.223
Precip area (km^2)	0.889	-0.007	-0.071	0.242
Tilt angle ($^\circ$)	0.787	0.056	-0.021	0.198
Speed (km h^{-1})	0.322	-0.014	-0.027	0.062
Dtop/Dt (km h^{-1})	-0.163	0.738	0.265	0.195
Dvolume/Dt ($\text{km}^3 \text{h}^{-1}$)	0.429	0.799	0.320	0.059
Dprecip_flux/Dt ($\text{m}^3 \text{s}^{-2}$)	0.361	0.836	0.145	0.192
Dmass/Dt (kt h^{-1})	0.411	0.805	0.312	0.138
DdBz_max/Dt (dBZ h^{-1})	-0.448	0.678	0.097	0.203

Así, el *análisis de componentes principales* permite constatar que la deducción de los cuatro grupos de variables realizada a partir del *análisis cluster* es acertada.

B. Variables radar seleccionadas y variables derivadas de granizómetros (energía cinética y diámetro máximo)

Al incluir la *energía cinética* medida en cada granizómetro junto con las *variables radar seleccionadas* para el ACP, se extrae el mismo número de componentes principales. En todas ellas y para cada una, la varianza total explicada disminuye ligeramente (entre un 2 y un 3 %).

Esas cuatro componentes están formadas por las mismas variables que en el análisis anterior. La *energía cinética* se incluye en la última componente junto con las variables relativas a la **cantidad de agua disponible**, aunque su saturación es notablemente baja.

Cuando a las 21 *variables radar seleccionadas* se les añade el valor del *diámetro máximo* medido en los granizómetros, el resultado es similar al obtenido al añadir la energía, quedando asignado este parámetro de nuevo a la cuarta componente.

Tabla 6.18. Resumen de los resultados obtenidos en el ACP de los 119 granizómetros sin intervalos. Zaragoza 2006-07.

Variables radar seleccionadas

COMPONENTE	1	2	3	4
% cum σ^2	45.631	61.607	73.326	80.084
VARIABLES	Volume Mass Mean area Precip flux Precip area Tilt angle	Dtop/Dt Dvolume/Dt Dprecip_flux/Dt Dmass/Dt DdBz_max/Dt	Ht of refl. centroide Ht of centroid Top Ht of max reflectivity	Zh VIL cumVIL Max reflectivity Mean reflectivity

Variables radar seleccionadas + Ec

COMPONENTE	1	2	3	4
% cum σ^2	43.756	59.156	70.442	77.958
VARIABLES	Volume Mass Mean area Precip flux Precip area Tilt angle	Dtop/Dt Dvolume/Dt Dprecip_flux/Dt Dmass/Dt DdBz_max/Dt	Ht of refl. centroide Ht of centroid Top Ht of max reflectivity	Zh VIL cumVIL Max reflectivity Mean reflectivity Ec

Variables radar seleccionadas + Dmax

COMPONENTE	1	2	3	4
% cum σ^2	43.630	58.973	70.309	77.413
VARIABLES	Volume Mass Mean area Precip flux Precip area Tilt angle	Dtop/Dt Dvolume/Dt Dprecip_flux/Dt Dmass/Dt DdBz_max/Dt	Ht of refl. centroide Ht of centroid Top Ht of max reflectivity	Zh VIL cumVIL Max reflectivity Mean reflectivity Dmax

Para estos dos últimos ACPs no se presentan las tablas de varianza y componentes rotados ya que son muy similares a los resultados obtenidos con las *variables radar* (tablas 6.16 y 6.17). En cambio, para facilitar la comparación entre las distintas opciones estudiadas, se presenta una tabla resumen de los resultados alcanzados para los 119 granizómetros sin establecer intervalos al realizar los correspondientes ACP (tabla 6.18).

2. INTERVALOS DE ENERGÍA CINÉTICA

A. $E_c < 20 \text{ J m}^{-2}$

Como ya se ha señalado, la muestra total de 119 granizómetros cuenta con 96 casos en los que la *energía cinética* es menor de 20 J m^{-2} . En esta clase, las 22 variables se agrupan en cuatro componentes principales que explican el 75.56 % de la varianza total acumulada (tablas 6.19 y 6.20).

Tabla 6.19. Varianza total explicada para las *variables radar seleccionadas + Energía cinética* para el intervalo de energía de $E_c < 20 \text{ J m}^{-2}$. Zaragoza 2006-07.

Componente	Autovalores iniciales	% de la varianza	% acumulado
1	9.444	42.928	42.928
2	3.230	14.682	57.610
3	2.561	11.642	69.252
4	1.388	6.310	75.561

Tabla 6.20. Matriz de componentes rotados para las *variables radar seleccionadas + Energía cinética* para el intervalo de energía de $E_c < 20 \text{ J m}^{-2}$. Zaragoza 2006-07.

	Componente			
	1	2	3	4
Zh ($\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$)	-0.056	-0.203	0.069	0.688
VIL (kg m^{-2})	0.501	0.372	0.308	0.659
cumVIL (kg m^{-2})	0.396	0.321	-0.114	0.546
Ht of refl. centroid (km)	0.062	0.943	0.247	-0.024
Ht of centroid (km)	0.056	0.922	0.216	0.064
Max reflectivity (dBZ)	0.390	0.060	0.236	0.824
Mean reflectivity (dBZ)	0.108	0.065	0.292	0.852
Top (km)	0.407	0.788	0.249	0.171
Ht of max reflectivity (km)	0.125	0.665	0.132	-0.103
Volume (km^3)	0.895	0.370	0.099	0.049
Mass (kt)	0.866	0.382	0.196	0.150
Mean area (km^2)	0.924	0.276	0.047	0.048
Precip flux ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	0.922	0.218	0.164	0.215
Precip area (km^2)	0.886	-0.105	-0.046	0.234
Tilt angle ($^\circ$)	0.769	-0.022	0.056	0.165
Speed (km h^{-1})	0.268	0.000	-0.025	-0.168
Dtop/Dt (km h^{-1})	-0.135	0.266	0.751	0.125
Dvolume/Dt ($\text{km}^3 \text{ h}^{-1}$)	0.495	0.357	0.736	0.041
Dprecip_flux/Dt ($\text{m}^3 \text{ s}^{-2}$)	0.461	0.192	0.763	0.172
Dmass/Dt (kt h^{-1})	0.498	0.364	0.727	0.093
DdBz_max/Dt (dBZ h^{-1})	-0.390	0.086	0.733	0.207
E_c (J m^{-2})	-0.246	-0.052	-0.185	0.276

La primera componente extraída consta de las variables relacionadas con las **dimensiones de la tormenta** y el *ángulo de inclinación* de la misma y explica un 42.93 % de la varianza total.

La segunda componente aumenta la varianza explicada hasta un 57.6 % acumulado, estando compuesta por las variables relativas a la **estructura vertical de la tormenta**.

La tercera componente engloba la **dinámica temporal** y es responsable de aumentar la varianza total explicada hasta un 69.25 % acumulado.

Por último, la cuarta componente agrupa las variables relacionadas con la **cantidad de agua**, alcanzando un 75.56 % de varianza acumulada total.

En esta clase de *tormentas de baja energía*, la *energía cinética* y la *velocidad de desplazamiento* de la tormenta no alcanzan saturaciones mayores de 0.5 en ninguna de las componentes por lo que no se pueden asociar a ninguna de ellas.

B. $E_c > 20 \text{ J m}^{-2}$

Esta clase de *alta energía*, mayor de 20 J m^{-2} , cuenta con 23 granizómetros de los 119 totales. El ACP extrae cuatro componentes principales que explican casi el 87 % de la varianza total (tablas 6.21 y 6.22).

Tabla 6.21. Varianza total explicada para las *variables radar seleccionadas + Energía cinética* para el intervalo de energía de $E_c > 20 \text{ J m}^{-2}$. Zaragoza 2006-07.

Componente	Autovalores iniciales	% de la varianza	% acumulado
1	10.047	45.667	45.667
2	4.341	19.732	65.399
3	3.165	14.387	79.786
4	1.572	7.146	86.932

Tabla 6.22. Matriz de componentes rotados para las *variables radar seleccionadas + Energía cinética* para el intervalo de energía de $E_c > 20 \text{ J m}^{-2}$. Zaragoza 2006-07.

	Componente			
	1	2	3	4
Zh ($\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$)	0.318	0.204	0.124	0.819
VIL (kg m^{-2})	0.482	0.523	-0.024	0.642
cumVIL (kg m^{-2})	0.445	0.191	0.309	0.650
Ht of refl. centroid (km)	0.055	0.204	0.933	0.081
Ht of centroid (km)	-0.042	0.481	0.775	-0.014
Max reflectivity (dBZ)	0.509	0.439	-0.223	0.657
Mean reflectivity (dBZ)	0.096	0.580	-0.426	0.623
Top (km)	0.527	0.452	0.620	0.228
Ht of max reflectivity (km)	0.251	-0.067	0.855	0.084
Volume (km^3)	0.930	0.029	0.325	0.066
Mass (kt)	0.892	0.276	0.249	0.238
Mean area (km^2)	0.941	-0.005	0.279	0.029
Precip flux ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	0.935	0.191	0.164	0.231
Precip area (km^2)	0.944	0.026	-0.022	0.160
Tilt angle ($^\circ$)	0.901	-0.028	-0.191	0.149
Speed (km h^{-1})	0.572	0.204	-0.176	0.363
Dtop/Dt (km h^{-1})	-0.036	0.881	0.243	0.219
Dvolume/Dt ($\text{km}^3 \text{ h}^{-1}$)	0.315	0.840	0.247	0.082
Dprecip_flux/Dt ($\text{m}^3 \text{ s}^{-2}$)	0.098	0.931	-0.038	0.191
Dmass/Dt (kt h^{-1})	0.244	0.904	0.160	0.161
DdBz_max/Dt (dBZ h^{-1})	-0.506	0.669	0.114	0.017
E_c (J m^{-2})	-0.162	-0.074	0.483	0.685

La primera componente agrupa las variables relativas a las **dimensiones de la tormenta**, el *ángulo de inclinación*, y a diferencia de la clase de *baja energía*, también incluye la *velocidad de desplazamiento*. Es responsable del 45.67 % de la varianza total. Así, puede afirmarse que para que una

tormenta produzca granizo con *alta energía*, la consideración de la *velocidad de desplazamiento* es necesaria, a diferencia de las de *baja energía*.

La segunda componente de esta clase, coincide con la tercera componente de la clase de *baja energía*, es decir, la **dinámica temporal** y explica el 65.40 % de la varianza acumulada. Parece por tanto, que en el caso de la *alta energía*, tiene más importancia la dinámica temporal de la tormenta que en las de *baja energía* (presenta una varianza parcial de 19.73 % frente al 11.64 % para *baja energía*).

La tercera componente que explica casi el 80 % de la varianza acumulada, se refiere a las variables de la **estructura vertical de la tormenta**.

En último lugar, se llega al 86.93 % de la varianza total acumulada, con la cuarta componente, que engloba las variables relacionadas con la **cantidad de agua disponible**, junto con la *energía cinética*, a diferencia del grupo anterior en el que la energía no se incluye en ningún grupo.

También para esta clasificación de la energía se proporciona una tabla a modo de resumen (tabla 6.23) que facilita la comparación.

Tabla 6.23. Resumen de los resultados obtenidos en el ACP tomando dos intervalos de *energía cinética* (variables radar seleccionadas + Ec). Zaragoza 2006-07.

<i>E < 20 J m⁻²: 96 casos</i>				
COMPONENTE	1	2	3	4
% cum σ^2	42.928	57.610	69.252	75.561
VARIABLES	Volume Mass Mean area Precip flux Precip area Tilt angle	Ht of refl. centroide Ht of centroid Top Ht of max reflectivity	Dtop/Dt Dvolume/Dt Dprecip_flux/Dt Dmass/Dt DdBz_max/Dt	Zh VIL cumVIL Max reflectivity Mean reflectivity
<i>E > 20 J m⁻²: 23 casos</i>				
COMPONENTE	1	2	3	4
% cum σ^2	45.667	65.399	79.786	86.932
VARIABLES	Volume Mass Mean area Precip flux Precip area Tilt angle Speed	Dtop/Dt Dvolume/Dt Dprecip_flux/Dt Dmass/Dt DdBz_max/Dt	Ht of refl. centroide Ht of centroid Top Ht of max reflectivity	Zh VIL cumVIL Max reflectivity Mean reflectivity Ec

3. INTERVALOS DE DIÁMETRO MÁXIMO

A. *D_{máx}* < 15 mm

Para los 103 granizómetros cuyo *diámetro máximo* es inferior a 15 mm, las 22 variables se agrupan en cuatro componentes principales, que explican el 75.84 % de la varianza total acumulada.

Como ocurre para la clase de *baja energía*, la primera componente engloba las variables relacionadas con las **dimensiones de la tormenta** y el *ángulo de inclinación*, siendo responsable del 42.31 % de la varianza total.

La segunda componente está formada por las variables relativas a la **estructura vertical de la tormenta**, aumentando hasta un 57.71 % la varianza acumulada.

La tercera componente explica hasta el 69.23 % de la varianza total acumulada y cuenta con la **dinámica temporal**.

La cuarta componente incluye las variables relacionadas con la **cantidad de agua**.

La *velocidad de desplazamiento* no alcanza el umbral de saturaciones y no se puede asociar a ninguna componente, al igual que la *energía cinética*. Es decir, para *diámetros máximos* pequeños, la *energía cinética* no se relaciona con ninguna componente principal de las *variables radar*.

B. $D_{\text{máx}} > 15 \text{ mm}$

Como se ha dicho anteriormente, existen 16 granizómetros de la muestra en los que se registra un *diámetro máximo* superior a 15 mm. En esta clase también se extraen cuatro componentes principales y la varianza total acumulada aumenta en un 15 % respecto a la clase de diámetros pequeños, alcanzando el 90.70 % de varianza.

A la primera componente también se encuentran asociadas las variables relativas a las **dimensiones**, explicando más de la mitad de la varianza total (57.60 %).

La segunda componente se corresponde con la tercera componente del *granizo de diámetro pequeño*, es decir, con la **dinámica temporal**, y responde a un 72.56 % de la varianza acumulada.

Tabla 6.24. Resumen de los resultados obtenidos en el ACP tomando dos intervalos de *diámetro máximo* (*variables radar seleccionadas + Ec*). Zaragoza 2006-07.

Dmax < 15 mm: 103 casos

COMPONENTE	1	2	3	4
% cum σ^2	42.308	57.707	69.229	75.844
VARIABLES	Volume Mass Mean area Precip flux Precip area Tilt angle	Ht of refl. centroide Ht of centroid Top Ht of max reflectivity	Dtop/Dt Dvolume/Dt Dprecip_flux/Dt Dmass/Dt DdBz_max/Dt	Zh VIL cumVIL Max reflectivity Mean reflectivity

Dmax > 15 mm: 16 casos

COMPONENTE	1	2	3	4
% cum σ^2	57.597	72.564	84.518	90.696
VARIABLES	Volume Mass Mean area Precip flux Precip area Tilt angle	Dtop/Dt Dvolume/Dt Dprecip_flux/Dt Dmass/Dt DdBz_max/Dt	Ht of refl. centroide Ht of centroid Top Ht of max reflectivity Ec	Zh VIL cumVIL Max reflectivity Mean reflectivity Speed

La tercera componente incluye las variables relativas a la **estructura vertical** de la tormenta y la *energía cinética*, con un valor de saturación relativamente alto. Con ellas se alcanza un 84.52 % de la varianza total acumulada. Así, para el *granizo de diámetro grande*, la *energía cinética* está relacionada con la **estructura vertical**.

Por último, la cuarta componente engloba las variables relacionadas con la **cantidad de agua** y la **velocidad** de la tormenta (no contemplada al analizar el *granizo de diámetro pequeño*).

Dado que los resultados encontrados para las dos clases de *diámetro máximo* son muy similares a los obtenidos para las dos clases de *energía cinética*, no se presentan las tablas de varianza total explicada y de componentes rotados. Sin embargo, al igual que en los subapartados anteriores, para facilitar la comparación, se presenta una tabla resumen de los resultados obtenidos para los 119 granizómetros (tabla 6.24).

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Analizando los resultados para cada uno de los ACPs, se observa que las *tormentas de alta energía y/o con granizo de diámetro grande* presentan unos resultados comunes, al igual que las *tormentas de baja energía* respecto a las de *granizo con diámetro pequeño*. Todas ellas cuentan con cuatro componentes. Para todos los análisis y todas las clases, la primera componente, que explica hasta un 50 % de varianza se refiere a las **dimensiones espaciales** de la tormenta. Las otras tres componentes se refieren a la **dinámica temporal**, a la **estructura vertical** y a la **cantidad de agua**.

Por otro lado, en las *tormentas de alta energía*, la *energía cinética* aparece ligada a la cuarta componente, junto con la *reflectividad* o el *VIL*, es decir, con la **cantidad de agua**, mientras que en el caso de las del *granizo de diámetro grande*, la *energía* está relacionada con la **estructura vertical**. En cambio, para las *tormentas de baja energía y con granizo de diámetro pequeño*, no se puede asociar claramente la *energía cinética* a ninguna de las componentes en las que se organizan las *variables radar*.

6.3.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS TORMENTAS CON PRECIPITACIONES DE GRANIZO EN LA RED DE GRANIZÓMETROS DEL OASIS SUR DE MENDOZA

6.3.2.1. Base de datos y metodología

Los datos de los que se hace uso para el desarrollo de los siguientes análisis estadísticos son 100 casos de la red de granizómetros del oasis sur de Mendoza, de las campañas 2005/06 y 2006/07, elegidos como se indica en el capítulo 3 referente a la metodología. De ellos se dispone de las *variables medidas en los granizómetros* y las *variables radar* proporcionadas por el radar de la banda S situado en San Rafael, dentro del área de estudio. La notación de estas variables se puede consultar en la tabla 3.5 del capítulo 3.

6.3.2.2. Estadísticos descriptivos

En primer lugar, y al igual que para la red de granizómetros de Zaragoza, se calculan los estadísticos descriptivos de la muestra de datos analizados (tabla 6.25).

En los 100 granizómetros seleccionados en el oasis sur de Mendoza, se registra un total de 144886 impactos m^{-2} , con una media de 1449 impactos m^{-2} , cuyo *diámetro máximo* está comprendido entre 6.27 y 49.46 mm, siendo la media de 20.16 mm. La *masa de hielo* media es de 1.31 kg m^{-2} , y el máximo en un granizómetro, de 8.71 kg m^{-2} . La correspondiente *energía cinética* presenta un valor medio de 239.42 J m^{-2} , registrándose un valor máximo de 2588 J m^{-2} , ambas variables, con valores altos de desviación típica. Como se puede observar, todas las *variables de granizómetros* de esta muestra del oasis sur de Mendoza presentan valores mayores que los de la muestra de la red de granizómetros de Zaragoza.

Tabla 6.25. Estadísticos descriptivos de las *variables de granizómetros* y de las *variables radar*. Oasis sur 2005/06-2006/07.

	N	Rango	Mín	Máx	Suma	$\bar{X}$	Me	Mo	σ^2	σ	Asimetría	Curtosis
N (m ⁻²)	100	9886	38	9924	144886	1449	810	57	2817416	1679	2	7
M (kg m ⁻²)	100	8709.056	3.541	8712.596	130850.976	1308.510	434.414	-	3331883.256	1825.345	2.006	4.458
Ec (J m ⁻²)	100	2588.15	0.16	2588.32	23942.18	239.42	47.04	-	205664.77	453.50	3.24	12.14
Dmax (mm)	100	43.20	6.27	49.46	2016.09	20.16	17.64	-	111.45	10.56	0.89	0.08
Zh (mm ⁶ m ⁻³)	100	3036385.1	125892.54	3162277.66	104611222	1046112.	794328.23	1258925.4	533200733352	730205.95	1.03	0.55
VIL (kg m ⁻²)	100	99.8	10.5	110.3	4057.6	40.6	38.6	23.4	504.0	22.5	0.7	0.0
cumVIL (kg m ⁻²)	100	469.1	21.0	490.1	15470.5	154.7	109.5	-	13176.8	114.8	1.0	0.2
Ht of refl. centroid (km)	100	4.1048	2.4420	6.5469	471.6749	4.7167	4.7725	5.0539	0.7357	0.8578	-0.2229	-0.3737
Ht of centroid (km)	100	3.2321	3.4626	6.6947	516.1850	5.1619	5.2909	5.3000	0.5500	0.7416	-0.1148	-0.6757
Max reflectivity (dBZ)	100	15.00	52.50	67.50	6119.50	61.20	61.50	61.50	10.47	3.24	-0.56	-0.08
Mean reflectivity (dBZ)	100	5.62	43.19	48.81	4686.45	46.86	47.19	47.63	1.63	1.28	-0.82	0.23
Top (km)	100	7.000	8.500	15.500	1238.000	12.380	12.500	14.500	3.076	1.754	-0.168	-0.960
Ht of max reflectivity (km)	100	8.000	1.000	9.000	378.000	3.780	3.500	3.000	3.345	1.829	0.818	0.401
Volume (km ³)	100	8474.000	359.000	8833.000	307879.000	3078.790	2726.500	3944.000	3956751.764	1989.159	0.771	0.182
Mass (kt)	100	15021.953	464.347	15486.300	473949.007	4739.490	4210.415	6438.650	12894092.917	3590.835	1.094	1.083
Mean area (km ²)	100	595.029	35.900	630.929	24993.647	249.936	209.438	292.429	20791.742	144.193	0.567	-0.474
Precip flux (m ³ s ⁻¹)	100	23126.030	608.370	23734.400	772084.180	7720.842	6388.595	10237.000	34407519.483	5865.792	0.960	0.289
Precip area (km ²)	100	698.000	0.000	698.000	25454.000	254.540	222.000	223.000	28841.140	169.827	0.513	-0.592
Tilt angle (°)	100	57.802	11.364	69.166	4141.384	41.414	43.280	46.594	169.435	13.017	-0.231	-0.413
Speed (km h ⁻¹)	100	50.01	18.94	68.95	4358.36	43.58	42.62	38.04	166.16	12.89	0.12	-1.10
Dtop/Dt (km h ⁻¹)	100	22.119	-8.599	13.521	88.533	0.885	0.896	-1.011	18.225	4.269	0.044	-0.070
Dvolume/Dt (km ³ h ⁻¹)	100	13933.990	-2567.090	11366.900	184376.790	1843.768	1006.360	917.418	7649804.062	2765.828	1.608	2.519
Dprecip_flux/Dt (m ³ s ⁻²)	100	38716.900	-10330.60	28386.300	458598.568	4585.986	3821.715	-7635.190	63764023.699	7985.238	1.028	1.441
Dmass/Dt (kt h ⁻¹)	100	20648.060	-3201.560	17446.500	292586.884	2925.869	1382.720	1442.830	20916870.106	4573.496	1.916	3.303
DdBz_max/Dt (dBZ h ⁻¹)	100	50.751	-26.090	24.661	208.074	2.081	1.451	-11.539	109.902	10.483	-0.220	0.343

Respecto a las *variables radar*, cabe destacar que para las tormentas que afectaron a los granizómetros seleccionados, la *reflectividad puntual* observada varía entre 51 y 65 dBZ, teniendo una moda de 61 dBZ y una media de 59 dBZ, valores lógicamente muchos más altos que en el radar de la banda C de Zaragoza, ya que en Mendoza se trabaja con un radar de la banda S. El *VIL acumulado* para todo el tiempo en que una tormenta precipitó sobre un granizómetro es de 154.7 kg m^{-2} de media y alcanza el máximo de $15470.5 \text{ kg m}^{-2}$, dando idea de la gran cantidad de agua que contienen las tormentas y su gran duración, mucho mayores que en la red de Zaragoza. En relación con la estructura vertical, el *techo* medio de la tormenta detectado es de 12.4 km, con un rango entre 8.5 y 15.5 km. La *altura del centroide* se detecta a 5.2 km de media y la *altura de la máxima reflectividad* a 3.8 km. En cuanto al tamaño de las tormentas, el *volumen* medio es 3079 km^3 y la *masa* media de 4739 kt, presentando ambas variables intervalos de variación muy elevados. El *ángulo de inclinación* medio es de 41.41° y llega a un máximo de 69.17° .

1. CLASIFICACIÓN DE LAS TORMENTAS EN FUNCIÓN DE LA ENERGÍA PRECIPITADA: TORMENTAS DE ALTA ENERGÍA VS. TORMENTAS DE BAJA ENERGÍA

Al igual que en los datos de Zaragoza, se establecen dos clases de *energía cinética*. Obviamente, se utiliza el mismo umbral de 20 J m^{-2} para distinguir entre granizo que no provoca daños y el que los genera, según la escala TORRO de intensidad de las granizadas (tabla 2.5).

Tabla 6.26. Resumen de los estadísticos descriptivos de las variables medidas en los granizómetros y de las variables radar para cada una de las clases de *energía cinética* con umbral en 20 J m^{-2} . Oasis sur 2005/06-2006/07.

	E < 20 J m ⁻²				E > 20 J m ⁻²			
	Min	Max	$\bar{X}$	σ^2	Min	Max	$\bar{X}$	σ^2
N imp. (m ⁻²)	38	3019	383	587	171	9924	2221	1789
M (g m ⁻²)	3.541	260.688	70.269	67.805	203.445	8712.596	2205.167	1958.518
Ec (J m ⁻²)	0.16	19.82	5.16	4.79	21.49	2588.32	409.06	536.16
Dmax (mm)	6.27	18.40	11.49	3.35	11.38	49.46	26.44	9.49
Zh (mm ⁶ m ⁻³)	125893	2511886	616005	540571	251189	3162278	1357569	693453
VIL (kg m ⁻²)	10.5	67.7	24.7	13.5	16.8	110.3	52.1	20.6
cumVIL (kg m ⁻²)	21.0	353.3	81.7	69.7	51.9	490.1	207.6	112.3
Ht of refl. centroid (km)	2.442	5.869	4.141	0.677	2.783	6.547	5.133	0.726
Ht of centroid (km)	3.463	6.029	4.636	0.555	3.883	6.695	5.542	0.619
Max reflectivity (dBZ)	52.5	66.5	59.5	3.2	53.0	67.5	62.4	2.7
Mean reflectivity (dBZ)	43.2	48.0	46.2	1.2	43.3	48.8	47.3	1.2
Top (km)	8.500	14.500	11.119	1.324	9.500	15.500	13.293	1.436
Ht of max reflectivity (km)	1.000	9.000	3.643	1.805	1.000	9.000	3.879	1.855
Volume (km ³)	359.00	5374.00	1982.83	1492.95	800.00	8833.00	3872.41	1934.71
Mass (kt)	464.35	8130.01	2729.39	2263.93	929.91	15486.30	6195.08	3684.45
Mean area (km ²)	35.90	444.25	181.89	121.58	62.54	630.93	299.21	139.99
Precip flux (m ³ s ⁻¹)	608.37	17202.70	4689.28	3953.27	1384.34	23734.40	9916.11	6069.87
Precip area (km ²)	0.00	544.00	171.38	138.78	12.00	698.00	314.76	165.69
Tilt angle (°)	11.80	69.17	40.36	14.41	11.36	63.87	42.18	11.98
Speed (km h ⁻¹)	22.12	68.95	42.20	13.21	18.94	63.45	44.59	12.67
Dtop/Dt (km h ⁻¹)	-8.60	6.94	0.17	3.85	-7.46	13.52	1.40	4.51
Dvolume/Dt (km ³ h ⁻¹)	-1601.19	11366.90	1048.03	2093.66	-2567.09	9951.04	2419.99	3054.36
Dprecip_flux/Dt (m ³ s ⁻²)	-10330.60	20553.70	2998.55	5595.53	-10330.60	28386.30	5735.51	9220.92
Dmass/Dt (kt h ⁻¹)	-2274.04	8753.17	1274.50	2147.35	-3201.56	17446.50	4121.69	5435.81
DdBz_max/Dt (dBZ h ⁻¹)	-26.09	24.66	1.65	12.60	-16.29	24.66	2.39	8.74

Tabla 6.27. Resultados de la *prueba T para la igualdad de medias* para las variables medidas en los granizómetros y las variables de radar para las dos clases de *energía cinética* con umbral en 20 J m^{-2} . Oasis sur 2005/06-2006/07.

Variables	Diferencia de medias significativa	Variables	Diferencia de medias significativa
N imp. (m^{-2})	SÍ	Volume (km^3)	SÍ
M (g m^{-2})	SÍ	Mass (kt)	SÍ
Ec (J m^{-2})	SÍ	Mean area (km^2)	SÍ
Dmax (mm)	SÍ	Precip flux ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	SÍ
Zh ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$)	SÍ	Precip area (km^2)	SÍ
VIL (kg m^{-2})	SÍ	Tilt angle (°)	NO
cumVIL (kg m^{-2})	SÍ	Speed (km h^{-1})	NO
Ht of refl. centroid (km)	SÍ	Dtop/Dt (km h^{-1})	NO
Ht of centroid (km)	SÍ	Dvolume/Dt ($\text{km}^3 \text{h}^{-1}$)	SÍ
Max reflectivity (dBZ)	SÍ	Dprecip_flux/Dt ($\text{m}^3 \text{s}^{-2}$)	SÍ
Mean reflectivity (dBZ)	SÍ	Dmass/Dt (kt h^{-1})	SÍ
Top (km)	SÍ	DdBz_max/Dt (dBZ h^{-1})	NO
Ht of max reflectivity (km)	NO		

Así, se divide la muestra en dos grupos, encontrando 42 granizómetros con *energía cinética* menor de 20 J m^{-2} , es decir, *tormentas de baja energía*, y 58 casos con energía mayor de 20 J m^{-2} , *tormentas de alta energía*. Los estadísticos descriptivos más importantes de las *variables de granizómetros* y de las *variables radar seleccionadas* para cada una de las clases propuestas se pueden consultar en la tabla 6.26.

Además, se realiza una *prueba T para la igualdad de medias* (Pérez, 2001) para cada una de las variables, tanto medidas en los granizómetros, como *variables radar*, con el fin de conocer si existen diferencias significativas entre las medias de dichas variables de los casos de *tormentas de alta energía* y los casos de *tormentas de baja energía*. En la tabla 6.27 se resume si esa diferencia para cada variable es significativa o no al nivel de 0.1.

Se observa que todas las variables analizadas presentan valores medios mayores para las *tormentas de alta energía* respecto a las de *baja energía*. De ellas, la *prueba T* indica que todas las diferencias son estadísticamente significativas excepto en el caso de la *altura de la máxima reflectividad*, el *ángulo de inclinación*, la *velocidad de desplazamiento*, la *tasa de cambio del techo* y la *tasa de cambio de la reflectividad*. Así, se puede afirmar que todas las *variables medidas en los granizómetros* presentan medias mayores para las *tormentas de alta energía* que para las de *baja energía*, y además, también se puede afirmar que se necesitan valores medios mayores de las *variables radar* para alcanzar el grupo de las *tormentas de alta energía*.

2. CLASIFICACIÓN DE LAS TORMENTAS EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO MÁXIMO PRECIPITADO: TORMENTAS CON GRANIZO DE DIÁMETRO GRANDE VS. TORMENTAS CON GRANIZO DE DIÁMETRO PEQUEÑO

Al igual que en Zaragoza, el criterio para seleccionar dicho umbral se basa en la escala TORRO de intensidad de las granizadas (tabla 2.5). Así, la muestra se divide en dos grupos: *granizo de diámetro pequeño*, presentando un *diámetro máximo* menor de 15 mm (36 casos), y *granizo de diámetro grande*, con diámetros mayores de 15 mm (64 casos). Los estadísticos descriptivos aparecen en la tabla 6.28. Un resumen de los resultados de la *prueba T para la igualdad de medias* realizado se muestra en la tabla 6.29.

Tabla 6.28. Resumen de los estadísticos descriptivos de las variables medidas en los granizómetros y de las variables radar para cada una de las clases de *diámetro máximo* con umbral en 15 mm. Oasis sur 2005/06-2006/07.

	Dmax < 15 mm				Dmax > 15 mm			
	Min	Max	$\bar{X}$	σ^2	Min	Max	$\bar{X}$	σ^2
N imp. (m ⁻²)	38	9924	899	1843	76	7762	1758	1507
M (g m ⁻²)	3.541	1346.189	131.035	250.258	36.442	8712.596	1970.839	1990.759
Ec (J m ⁻²)	0.16	77.25	7.89	14.49	3.92	2588.32	369.66	524.60
Dmax (mm)	6.27	14.13	10.29	2.32	15.03	49.46	25.71	9.23
Zh (mm ⁶ m ⁻³)	125893	2511886	568612	421620	199526	3162278	1314706	731814
VIL (kg m ⁻²)	10.5	67.7	25.6	15.0	11.5	110.3	49.0	21.6
cumVIL (kg m ⁻²)	21.0	353.3	93.2	79.8	36.8	490.1	189.3	117.4
Ht of refl. centroid (km)	2.442	5.869	4.150	0.641	2.783	6.547	5.036	0.801
Ht of centroid (km)	3.463	5.826	4.657	0.536	3.481	6.695	5.446	0.691
Max reflectivity (dBZ)	52.5	66.5	59.6	3.2	53.0	67.5	62.1	3.0
Mean reflectivity (dBZ)	44.0	48.3	46.4	1.2	43.2	48.8	47.2	1.2
Top (km)	8.500	13.500	11.000	1.183	8.500	15.500	13.156	1.535
Ht of max reflectivity (km)	1.000	7.000	3.361	1.355	1.000	9.000	4.016	2.020
Volume (km ³)	359.00	5374.00	2168.92	1555.98	655.00	8833.00	3590.59	2033.11
Mass (kt)	464.35	8130.01	3069.62	2484.52	624.37	15486.30	5678.79	3787.23
Mean area (km ²)	35.90	444.25	203.03	133.40	59.55	630.93	276.32	144.30
Precip flux (m ³ s ⁻¹)	608.37	17202.70	5247.71	4211.37	1384.34	23734.40	9111.98	6225.33
Precip area (km ²)	0.00	481.00	186.94	148.22	12.00	698.00	292.56	170.40
Tilt angle (°)	18.26	69.17	41.57	12.98	11.36	63.87	41.32	13.14
Speed (km h ⁻¹)	22.12	66.39	41.31	13.17	18.94	68.95	44.86	12.65
Dtop/Dt (km h ⁻¹)	-8.60	6.94	0.61	4.16	-7.46	13.52	1.04	4.35
Dvolume/Dt (km ³ h ⁻¹)	-1456.51	11366.90	1070.53	2177.05	-2567.09	9951.04	2278.72	2975.60
Dprecip_flux/Dt (m ³ s ⁻²)	-6649.85	20553.70	3567.69	5436.81	-10330.60	28386.30	5158.77	9102.37
Dmass/Dt (kt h ⁻¹)	-1822.79	8753.17	1308.03	2254.60	-3201.56	17446.50	3835.91	5263.88
DdBz_max/Dt (dBZ h ⁻¹)	-26.09	24.66	2.64	12.12	-18.44	24.66	1.77	9.53

Tabla 6.29. Resultados de la prueba *T* para la igualdad de medias para las variables medidas en los granizómetros y las variables de radar para las dos clases de *diámetro máximo* con umbral en 15 mm. Oasis sur 2005/06-2006/07.

Variables	Diferencia de medias significativa	Variables	Diferencia de medias significativa
N imp. (m ⁻²)	SÍ	Volume (km ³)	SÍ
M (g m ⁻²)	SÍ	Mass (kt)	SÍ
Ec (J m ⁻²)	SÍ	Mean area (km ²)	SÍ
Dmax (mm)	SÍ	Precip flux (m ³ s ⁻¹)	SÍ
Zh (mm ⁶ m ⁻³)	SÍ	Precip area (km ²)	SÍ
VIL (kg m ⁻²)	SÍ	Tilt angle (°)	NO
cumVIL (kg m ⁻²)	SÍ	Speed (km h ⁻¹)	NO
Ht of refl. centroid (km)	SÍ	Dtop/Dt (km h ⁻¹)	NO
Ht of centroid (km)	SÍ	Dvolume/Dt (km ³ h ⁻¹)	SÍ
Max reflectivity (dBZ)	SÍ	Dprecip_flux/Dt (m ³ s ⁻²)	NO
Mean reflectivity (dBZ)	SÍ	Dmass/Dt (kt h ⁻¹)	SÍ
Top (km)	SÍ	DdBz_max/Dt (dBZ h ⁻¹)	NO
Ht of max reflectivity (km)	SÍ		

De igual modo que en los análisis para la energía, la mayoría de las variables analizadas tienen medias superiores en los casos del intervalo de *granizo de diámetro grande* respecto a los de *diámetro pequeño*. Las diferencias entre las medias son estadísticamente significativas para todas las variables salvo para la *velocidad* de desplazamiento, la *tasa de cambio del techo* y la *del flujo de precipitación*.

Por otro lado, el *ángulo de inclinación* y la *tasa de cambio de la máxima reflectividad* exhiben valores medios ligeramente mayores para el *granizo de diámetro pequeño*, aunque las diferencias no son estadísticamente significativas.

6.3.2.3. Correlaciones

Tabla 6.30. Correlaciones bivariadas entre la *energía cinética* del granizómetro y las *variables radar*.
Oasis sur 2005/06-2006/07.

		Ec (J m ⁻²)			Ec (J m ⁻²)
Zh (mm ⁶ m ⁻³)	Correlación de Pearson	0.657(**)	Mean area (km ²)	Correlación de Pearson	0.307(**)
	Sig. (bilateral)	0.000		Sig. (bilateral)	0.002
	N	100		N	100
VIL (kg m ⁻²)	Correlación de Pearson	0.578(**)	Precip flux (m ³ s ⁻¹)	Correlación de Pearson	0.386(**)
	Sig. (bilateral)	0.000		Sig. (bilateral)	0.000
	N	100		N	100
cumVIL (kg m ⁻²)	Correlación de Pearson	0.613(**)	Precip area (km ²)	Correlación de Pearson	0.312(**)
	Sig. (bilateral)	0.000		Sig. (bilateral)	0.002
	N	100		N	100
Ht of refl. centroid (km)	Correlación de Pearson	0.108	Tilt angle (°)	Correlación de Pearson	0.094
	Sig. (bilateral)	0.286		Sig. (bilateral)	0.354
	N	100		N	100
Ht of centroid (km)	Correlación de Pearson	0.386(**)	Speed (km h ⁻¹)	Correlación de Pearson	-0.103
	Sig. (bilateral)	0.000		Sig. (bilateral)	0.310
	N	100		N	100
Max reflectivity (dBZ)	Correlación de Pearson	0.420(**)	Dtop/Dt (km h ⁻¹)	Correlación de Pearson	0.069
	Sig. (bilateral)	0.000		Sig. (bilateral)	0.497
	N	100		N	100
Mean reflectivity (dBZ)	Correlación de Pearson	0.307(**)	Dvolume/Dt (km ³ h ⁻¹)	Correlación de Pearson	0.115
	Sig. (bilateral)	0.002		Sig. (bilateral)	0.255
	N	100		N	100
Top (km)	Correlación de Pearson	0.372(**)	Dprecip_flux/Dt (m ³ s ⁻²)	Correlación de Pearson	0.317(**)
	Sig. (bilateral)	0.000		Sig. (bilateral)	0.001
	N	100		N	100
Ht of max reflectivity (km)	Correlación de Pearson	0.068	Dmass/Dt (kt h ⁻¹)	Correlación de Pearson	0.143
	Sig. (bilateral)	0.498		Sig. (bilateral)	0.156
	N	100		N	100
Volume (km ³)	Correlación de Pearson	0.344(**)	DdBz_max/Dt (dBZ h ⁻¹)	Correlación de Pearson	0.060
	Sig. (bilateral)	0.000		Sig. (bilateral)	0.554
	N	100		N	100
Mass (kt)	Correlación de Pearson	0.338(**)	** . La correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral). * . La correlación es significante al nivel 0.05 (bilateral).		
	Sig. (bilateral)	0.001			
	N	100			

Se determina el *coeficiente de correlación de Pearson* para conocer la posible existencia de relaciones lineales entre las *variables radar* y la *energía cinética* y el *diámetro máximo* medidos en cada granizómetro. Los coeficientes de correlación significativos al nivel 0.05 se señalan con un asterisco, y los significativos al 0.01, con dos asteriscos.

La tabla 6.30 muestra que la *energía cinética* medida en los granizómetros, presenta una correlación significativa al nivel 0.01 con la *reflectividad puntual* ($\text{mm}^6 \text{mm}^{-3}$), el *VIL instantáneo* (kg m^{-2}), el *VIL acumulado* durante toda la tormenta (kg m^{-2}), la *altura del centroide* (km), las *reflectividades máxima y media* (dBZ), el *techo* (km), el *volumen* (km^3), la *masa* (kt), el *área media* (km^2), el *flujo de precipitación* ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), el *área de precipitación* (km^2) y la *tasa de cambio del flujo de precipitación* ($\text{m}^3 \text{s}^{-2}$). Así, a diferencia del caso de los granizómetros de Zaragoza, la energía sí está correlacionada con las reflectividades de la célula y con las variables relativas al tamaño de la tormenta. Además, todas las correlaciones son más elevadas que en el caso de la red zaragozana.

Tabla 6.31. Correlaciones bivariadas entre el *diámetro máximo* del granizómetro y las *variables radar*.
Oasis sur 2005/06-2006/07.

		Dmax (mm)			Dmax (mm)
Zh ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$)	Correlación de Pearson	0.652(**)	Mean area (km^2)	Correlación de Pearson	0.312(**)
	Sig. (bilateral)	0.000		Sig. (bilateral)	0.002
	N	100		N	100
VIL (kg m^{-2})	Correlación de Pearson	0.652(**)	Precip flux ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Correlación de Pearson	0.397(**)
	Sig. (bilateral)	0.000		Sig. (bilateral)	0.000
	N	100		N	100
cumVIL (kg m^{-2})	Correlación de Pearson	0.604(**)	Precip area (km^2)	Correlación de Pearson	0.338(**)
	Sig. (bilateral)	0.000		Sig. (bilateral)	0.001
	N	100		N	100
Ht of refl. centroid (km)	Correlación de Pearson	0.023	Tilt angle (°)	Correlación de Pearson	-0.031
	Sig. (bilateral)	0.818		Sig. (bilateral)	0.758
	N	100		N	100
Ht of centroid (km)	Correlación de Pearson	0.606(**)	Speed (km h^{-1})	Correlación de Pearson	0.004
	Sig. (bilateral)	0.000		Sig. (bilateral)	0.967
	N	100		N	100
Max reflectivity (dBZ)	Correlación de Pearson	0.473(**)	Dtop/Dt (km h^{-1})	Correlación de Pearson	0.148
	Sig. (bilateral)	0.000		Sig. (bilateral)	0.140
	N	100		N	100
Mean reflectivity (dBZ)	Correlación de Pearson	0.371(**)	Dvolume/Dt ($\text{km}^3 \text{h}^{-1}$)	Correlación de Pearson	0.188
	Sig. (bilateral)	0.000		Sig. (bilateral)	0.061
	N	100		N	100
Top (km)	Correlación de Pearson	0.641(**)	Dprecip_flux/Dt ($\text{m}^3 \text{s}^{-2}$)	Correlación de Pearson	0.229(*)
	Sig. (bilateral)	0.000		Sig. (bilateral)	0.022
	N	100		N	100
Ht of max reflectivity (km)	Correlación de Pearson	0.217(*)	Dmass/Dt (kt h^{-1})	Correlación de Pearson	0.241(*)
	Sig. (bilateral)	0.030		Sig. (bilateral)	0.016
	N	100		N	100
Volume (km^3)	Correlación de Pearson	0.401(**)	DdBz_max/Dt (dBZ h^{-1})	Correlación de Pearson	0.062
	Sig. (bilateral)	0.000		Sig. (bilateral)	0.540
	N	100		N	100
Mass (kt)	Correlación de Pearson	0.402(**)	** . La correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral). * . La correlación es significante al nivel 0.05 (bilateral).		
	Sig. (bilateral)	0.000			
	N	100			

Observando la tabla 6.31, se puede comprobar que el *diámetro máximo* del granizo está correlacionado con las mismas variables que la *energía cinética* con una significación estadística al nivel 0.01 salvo para la *tasa de cambio del flujo de precipitación* ($\text{m}^3 \text{s}^{-2}$), significativa al 0.05. Adicionalmente, también se correlaciona significativamente al 0.05 con la *altura de la máxima reflectividad* (km) y la *tasa de cambio de la masa* (kt h^{-1}).

6.3.2.4. Análisis cluster

Para realizar este análisis, se utilizan las mismas *variables radar seleccionadas* que en el caso del radar de Zaragoza, también tipificadas.

A continuación, se observan los *dendrogramas* obtenidos utilizando la *vinculación inter-grupos*, con la *distancia euclídea al cuadrado*, para las *variables radar seleccionadas* (figura 6.6) y para estas mismas variables incluyendo la *energía cinética* medida en los granizómetros (figura 6.7).

Figura 6.6. Dendrograma obtenido a través del *análisis cluster* de las *variables radar seleccionadas*. Oasis sur 2005/06-2006/07.

El *dendrograma* de las *variables radar seleccionadas* (figura 6.6) revela la asociación de las mismas. Por un lado, se agrupan el *volumen* (km^3), la *masa* (kt), el *flujo de precipitación* ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), el *área media* (km^2), el *área de precipitación* (km^2), la *tasa de cambio del volumen* ($\text{km}^3 \text{h}^{-1}$), la *tasa de cambio de la masa* (kt h^{-1}) y la *tasa de cambio del flujo de precipitación* ($\text{m}^3 \text{s}^{-2}$), es decir, las variables relacionadas con las **dimensiones de la tormenta** y la **dinámica temporal**. Próximo a éste, aparece el grupo relativo a la **estructura vertical de la tormenta**, que incluye la *altura del centroide de reflectividad* (km), la *altura del centroide* (km) y el *techo* (km). De nuevo, aparece un grupo relativo a la **cantidad de agua**, que se encuentra formado por la *reflectividad puntual sobre el granizómetro* ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$), el *VIL* (kg m^{-2}), el *VIL*

acumulado (kg m^{-2}), la máxima reflectividad de la célula (dBZ) y la reflectividad media de la célula (dBZ). A su vez, este grupo está relacionado con otro formado por el ángulo de inclinación ($^{\circ}$) y la velocidad de desplazamiento (km h^{-1}), más cercanos entre sí, la tasa de cambio del techo (km h^{-1}) y la tasa de cambio de la reflectividad máxima (dBZ h^{-1}). Por último, se encuentra la altura de la máxima reflectividad (km), alejada del resto.

Figura 6.7. Dendrograma obtenido a través del análisis cluster de las variables radar seleccionadas y la energía cinética medida en cada granizómetro. Oasis sur 2005/06-2006/07.

Al añadir el valor de la *energía cinética* medida en el granizómetro (J m^{-2}) a las *variables radar seleccionadas*, la estructura arborescente se mantiene (figura 6.7). La *energía* aparece en el conglomerado que incluye **dimensiones, estructura vertical y cantidad de agua**, encontrándose especialmente próximo a este último grupo de variables. Al incluir el *diámetro máximo* en vez de la energía, la estructura es similar pero el *diámetro máximo* se encuentra en el conglomerado formado por la *altura del centroide*, la *altura del centroide en reflectividad* y el *techo*, para después unirse a los demás conglomerados.

6.3.2.5. Análisis de componentes principales

Se realiza un *análisis de componentes principales*, utilizando el método de rotación *Normalización Varimax con Kaiser*, aplicado a las *variables radar seleccionadas*. Al igual que en el caso de Zaragoza, para cada análisis realizado se expone una tabla con la varianza total explicada para cada componente y la tabla de componentes rotados. También se utiliza el criterio de Leiker (1988) por el que las saturaciones con valor absoluto mayor o igual a 0.5 en cierta componente, quedan asociadas a ella.

Paralelamente al apartado anterior, en primer lugar se realiza un ACP para todos los datos, para posteriormente discriminar grupos en función de la *energía cinética* o del *tamaño*.

1. ACP SOBRE TODOS LOS GRANIZÓMETROS

A. Variables radar seleccionadas

Como se observa en las tablas 6.32 y 6.33, el ACP extrae 5 componentes, alcanzando el 81.53 % de la varianza.

Tabla 6.32. Varianza total explicada para las *variables radar seleccionadas*. Oasis sur 2005/06-2006/07.

Componente	Autovalores iniciales	% de la varianza	% acumulado
1	10.257	48.843	48.843
2	2.746	13.075	61.918
3	1.638	7.799	69.717
4	1.415	6.739	76.456
5	1.066	5.075	81.531

Tabla 6.33. Matriz de componentes rotados para las *variables radar seleccionadas*. Oasis sur 2005/06-2006/07.

	Componente				
	1	2	3	4	5
Zh ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$)	0.866	0.136	0.017	-0.110	-0.068
VIL (kg m^{-2})	0.832	0.222	0.182	-0.098	-0.023
cumVIL (kg m^{-2})	0.840	0.323	0.065	-0.096	-0.078
Ht of refl. centroid (km)	0.749	0.187	0.446	0.078	0.273
Ht of centroid (km)	0.685	0.263	0.516	0.121	0.195
Max reflectivity (dBZ)	0.868	0.119	-0.092	-0.103	0.080
Mean reflectivity (dBZ)	0.729	0.311	-0.056	0.065	0.298
Top (km)	0.680	0.237	0.461	0.145	0.189
Ht of max reflectivity (km)	0.141	-0.008	0.710	0.152	0.104
Volume (km^3)	0.581	0.734	-0.076	0.285	0.000
Mass (kt)	0.583	0.752	-0.066	0.236	0.077
Mean area (km^2)	0.525	0.727	-0.187	0.305	-0.049
Precip flux ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	0.625	0.693	-0.175	0.230	0.076
Precip area (km^2)	0.511	0.661	-0.200	0.336	-0.113
Tilt angle ($^\circ$)	0.107	0.204	-0.689	0.300	0.340
Speed (km h^{-1})	-0.074	0.300	0.001	0.203	0.753
Dtop/Dt (km h^{-1})	0.214	0.022	0.039	-0.320	0.616
Dvolume/Dt ($\text{km}^3 \text{h}^{-1}$)	0.075	0.921	0.158	-0.012	0.188
Dprecip_flux/Dt ($\text{m}^3 \text{s}^{-2}$)	0.192	0.818	-0.060	-0.308	0.164
Dmass/Dt (kt h^{-1})	0.155	0.912	0.142	0.006	0.240
DdBz_max/Dt (dBZ h^{-1})	0.096	-0.070	-0.080	-0.874	0.011

La primera componente explica el 48.84 % de la varianza e incluye la *reflectividad puntual sobre el granizómetro*, el *VIL*, el *VIL acumulado*, la *reflectividad máxima y media de la célula*, la *altura del centroide* y del *centroide de reflectividad* y el *techo*. Es decir, las variables relativas a la **cantidad de agua** y la **estructura vertical** (salvo la *altura de la máxima reflectividad*).

Con la segunda componente principal extraída se alcanza el 61.92 % de la varianza acumulada. Agrupa el *volumen*, la *masa*, el *área media*, el *flujo de precipitación* y el *área de precipitación*, variables

relacionadas con las **dimensiones espaciales de la tormenta**, y la *tasa de cambio del volumen, del flujo de precipitación y de la masa*, variables relacionadas con la **dinámica temporal de las dimensiones**.

La tercera componente aumenta la varianza acumulada hasta el 69.72 % e incluye la *altura de la máxima reflectividad y el ángulo de inclinación*.

La cuarta componente hace incrementar la varianza hasta el 76.46 %, y sólo incluye la *tasa de cambio de la reflectividad máxima*.

Por último, la quinta componente formada por la *velocidad y la tasa de cambio del techo* permite alcanzar un total de varianza explicada del 81.53 %.

B. Variables radar seleccionadas y variables derivadas de granizómetros (energía cinética y diámetro máximo)

Al añadir la *energía cinética* medida en el granizómetro a las 21 *variables radar seleccionadas*, se continúan extrayendo cinco componentes principales. La *energía cinética* queda incluida en la primera componente junto con las variables de la **estructura vertical** y las relacionadas con la **cantidad de agua**.

Cuando se incluye en el análisis el *diámetro máximo* hallado en cada granizómetro en lugar de la energía, los resultados son similares a los anteriores. También se extraen cinco componentes principales que engloban a las mismas variables y la varianza acumulada total alcanza un 80.28 %. El *diámetro máximo* se presenta de nuevo asociado a la primera componente.

Dado que los resultados son muy parecidos al ACP de las *variables radar seleccionadas*, no se exponen las tablas de varianza explicada ni de componentes rotados, sino que la tabla 6.34 proporciona directamente un resumen comparativo.

En comparación con los resultados obtenidos en Zaragoza, donde los grupos de variables establecidos previamente a partir del dendrograma se reproducían en cada uno de las componentes, en el caso de Mendoza, las componentes principales agrupan variables de varios grupos, por lo que la interpretación meteorológica de cada una de las componentes no es tan clara.

Así, la primera componente incluye variables referentes tanto a la **cantidad de agua** como a la **estructura vertical** de la tormenta. Es precisamente en esta primera componente donde aparece incluida la *energía cinética* (y el *diámetro máximo*). Por lo tanto, al igual que para el caso de Zaragoza, la *energía cinética* se encuentra próxima al grupo de variables que caracterizan la **cantidad de agua**. No obstante, y al contrario de lo que sucede en Zaragoza, este grupo de variables se presenta en este caso como determinante a la hora de explicar el comportamiento de las tormentas, ya que aparece en la primera componente, con un elevado porcentaje de varianza explicada (47.69 %, y 48.12 % en el caso del ACP del *diámetro máximo*), unido además a variables que caracterizan la **estructura vertical**.

Hay que tener en cuenta que en los procesos de crecimiento de granizo intervienen, no solamente el número de hidrometeoros, sino también la distribución de sus tamaños. Desde el punto de vista microfísico, los mecanismos de crecimiento de las piedras de granizo en el interior de las tormentas son dependientes del flujo vertical de hidrometeoros y de sus características. Por tanto este primer grupo de variables, que aporta casi la mitad de la varianza explicada, es consistente con los mecanismos microfísicos de formación y crecimiento del granizo. En la medida en que haya un mayor flujo de hidrometeoros (y mejor aún que algunos de ellos tengan tamaños privilegiados) mayor eco producirán y, por tanto, también mayor será la reflectividad detectada en el radar. Por otra parte, al incorporarse este flujo de hidrometeoros a la corriente ascensional, más activos serán los mecanismos de crecimiento de granizo. Por último, al utilizar un radar de la banda S, se garantiza que aún en el caso de que el flujo de hidrometeoros sea muy elevado, el apantallamiento de la reflectividad está minimizado.

Tabla 6.34. Resultados obtenidos en el ACP de los 100 granizómetros sin intervalos. Oasis sur 2005/06-2006/07.

Variables radar seleccionadas

COMPONENTE	1	2	3	4	5
% cum σ^2	48.843	61.918	69.717	76.456	81.531
VARIABLES	Zh VIL cumVIL Max reflectivity Mean reflectivity Ht of refl. centroid Ht of centroid Top	Volume Mass Mean area Precip flux Precip area Dvolume/Dt Dprecip_flux/Dt Dmass/D	Ht of max reflectivity Tilt angle	DdBz_max/Dt	Speed Dtop/Dt

Variables radar seleccionadas + Ec

COMPONENTE	1	2	3	4	5
% cum σ^2	47.690	60.692	68.515	74.967	79.865
VARIABLES	Zh VIL cumVIL Max reflectivity Mean reflectivity Ht of refl. centroid Ht of centroid Top Ec	Volume Mass Mean area Precip flux Precip area Dvolume/Dt Dprecip_flux/Dt Dmass/D	Ht of max reflectivity Tilt angle	DdBz_max/Dt	Speed Dtop/Dt

Variables radar seleccionadas + Dmax

COMPONENTE	1	2	3	4	5
% cum σ^2	48.119	61.547	68.992	75.429	80.279
VARIABLES	Zh VIL cumVIL Max reflectivity Mean reflectivity Ht of refl. centroid Ht of centroid Top Dmáx	Volume Mass Mean area Precip flux Precip area Dvolume/Dt Dprecip_flux/Dt Dmass/D	Ht of max reflectivity Tilt angle	DdBz_max/Dt	Speed Dtop/Dt

La segunda componente se refiere a las **dimensiones** de la tormenta y la **dinámica temporal** de las mismas. Así, las tormentas grandes, en su fase de madurez tienden a generar precipitaciones de granizo con elevada energía más frecuentemente.

La tercera componente, incluye a la *altura de la máxima reflectividad* y la *inclinación de la tormenta*. La *altura de la máxima reflectividad* es clave para localizar las zonas más ricas en concentración y tamaño de hidrometeoros. Por otro lado, la *inclinación* está relacionada con velocidades elevadas del viento en altura.

La *tasa de cambio de la reflectividad*, incluida en la cuarta componente es una medida de la dinámica temporal de la tormenta.

Finalmente, la última componente agrupa la *tasa de cambio del techo*, que podría ser interpretada como una medida indirecta de las velocidades de las corrientes ascensionales, y la *velocidad de desplazamiento*, ligada a la componente horizontal de la velocidad del viento en altura. Es

decir, esta quinta componente es una medida de las componentes horizontal y vertical de la velocidad. Por tanto, se debe tener que la velocidad es un factor determinante en la estimación de los valores de *energía cinética* en el suelo.

2. INTERVALOS DE ENERGÍA CINÉTICA

A. $E_c < 20 \text{ J m}^{-2}$

Como ya se ha señalado, de los 100 granizómetros que forman la muestra, 42 de ellos presentan una *energía cinética* menor de 20 J m^{-2} . Al realizar el ACP, se extraen seis componentes principales con las cuales se consigue explicar el 81.46 % de la varianza acumulada (tablas 6.35 y 6.36).

Tabla 6.35. Varianza total explicada para las *variables radar seleccionadas + Energía cinética* para el intervalo de energía de $E_c < 20 \text{ J m}^{-2}$. Oasis sur 2005/06-2006/07.

Componente	Autovalores iniciales	% de la varianza	% acumulado
1	8.865	40.294	40.294
2	3.242	14.738	55.032
3	1.832	8.325	63.358
4	1.660	7.546	70.904
5	1.284	5.838	76.742
6	1.040	4.727	81.469

Tabla 6.36. Matriz de componentes rotados para las *variables radar seleccionadas + Energía cinética* para el intervalo de energía de $E_c < 20 \text{ J m}^{-2}$. Oasis sur 2005/06-2006/07.

	Componente					
	1	2	3	4	5	6
Zh ($\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$)	0.743	-0.300	0.200	0.144	0.120	-0.007
VIL (kg m^{-2})	0.733	-0.099	0.394	0.213	0.034	-0.053
cumVIL (kg m^{-2})	0.780	-0.241	0.256	0.135	0.176	-0.218
Ht of refl. centroid (km)	0.545	0.096	0.706	0.217	0.216	0.066
Ht of centroid (km)	0.506	0.228	0.696	-0.093	0.023	-0.157
Max reflectivity (dBZ)	0.696	-0.161	0.141	0.483	0.041	0.185
Mean reflectivity (dBZ)	0.588	-0.014	0.211	0.474	0.124	0.211
Top (km)	0.541	0.216	0.598	-0.009	0.099	-0.032
Ht of max reflectivity (km)	-0.142	-0.088	0.814	0.109	-0.075	0.133
Volume (km^3)	0.844	0.446	0.062	-0.141	-0.049	-0.147
Mass (kt)	0.898	0.364	0.071	-0.087	-0.021	-0.090
Mean area (km^2)	0.807	0.453	-0.063	-0.138	-0.056	-0.148
Precip flux ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	0.953	0.213	0.007	-0.044	0.059	-0.033
Precip area (km^2)	0.772	0.440	-0.102	-0.090	-0.148	-0.195
Tilt angle ($^\circ$)	0.092	-0.154	0.217	0.669	-0.482	-0.172
Speed (km h^{-1})	-0.149	-0.084	0.061	-0.043	-0.098	0.935
Dtop/Dt (km h^{-1})	0.070	0.064	0.101	0.132	0.862	-0.108
Dvolume/Dt ($\text{km}^3 \text{ h}^{-1}$)	0.040	0.929	0.111	-0.082	0.036	-0.123
Dprecip_flux/Dt ($\text{m}^3 \text{ s}^{-2}$)	0.300	0.622	-0.245	0.385	0.193	0.076
Dmass/Dt (kt h^{-1})	0.114	0.918	0.128	-0.056	0.004	0.013
DdBz_max/Dt (dBZ h^{-1})	-0.149	0.041	0.001	0.827	0.235	-0.033
E_c (J m^{-2})	0.576	0.212	0.248	-0.027	-0.332	0.154

La primera componente es responsable del 40.29 % de la varianza y consta de las variables relacionadas con la **cantidad de agua**, las variables ligadas a las **dimensiones de la tormenta** y la *energía cinética*.

La segunda componente engloba las *tasas de cambio del volumen, del flujo de precipitación y de la masa* y explica hasta el 55.03 % de la varianza.

En la tercera componente aparecen las variables de la **estructura vertical de la tormenta**, alcanzando un 63.36 % de la varianza.

La cuarta componente explica hasta el 70.90 % de la varianza e incluye el *ángulo de inclinación y la tasa de cambio de la reflectividad máxima*.

La quinta componente consiste en la *tasa de cambio del techo* y aumenta la varianza hasta el 76.74 %.

Para finalizar, la sexta componente está compuesta por la *velocidad*, gracias a la cual se consigue un 81.47 % de varianza total explicada.

B. $Ec > 20 \text{ J m}^{-2}$

Tabla 6.37. Varianza total explicada para las *variables radar seleccionadas + Energía cinética* para el intervalo de energía de $Ec > 20 \text{ J m}^{-2}$. Oasis sur 2005/06-2006/07.

Componente	Autovalores iniciales	% de la varianza	% acumulado
1	9.512	43.236	43.236
2	3.188	14.491	57.727
3	2.302	10.462	68.189
4	1.540	6.999	75.188
5	1.100	5.000	80.188

Tabla 6.38. Matriz de componentes rotados para las *variables radar seleccionadas + Energía cinética* para el intervalo de energía de $Ec > 20 \text{ J m}^{-2}$. Oasis sur 2005/06-2006/07.

	Componente				
	1	2	3	4	5
Zh ($\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$)	0.167	0.897	0.146	0.038	-0.010
VIL (kg m^{-2})	0.191	0.759	0.297	0.093	0.042
cumVIL (kg m^{-2})	0.373	0.783	0.215	0.095	0.002
Ht of refl. centroid (km)	0.176	0.314	0.854	0.064	-0.130
Ht of centroid (km)	0.198	0.246	0.863	0.179	-0.153
Max reflectivity (dBZ)	0.332	0.721	0.120	0.002	-0.350
Mean reflectivity (dBZ)	0.670	0.365	0.277	-0.012	-0.355
Top (km)	0.230	0.169	0.787	0.033	-0.161
Ht of max reflectivity (km)	-0.049	0.067	0.708	-0.117	0.344
Volume (km^3)	0.931	0.232	0.154	-0.100	0.032
Mass (kt)	0.945	0.222	0.171	0.001	0.004
Mean area (km^2)	0.928	0.221	0.036	-0.155	0.044
Precip flux ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	0.926	0.297	0.097	-0.040	-0.026
Precip area (km^2)	0.872	0.202	-0.035	-0.293	0.049
Tilt angle ($^\circ$)	0.227	0.066	-0.061	-0.104	0.664
Speed (km h^{-1})	0.621	-0.336	0.277	0.356	-0.055
Dtop/Dt (km h^{-1})	0.066	-0.040	0.235	0.584	-0.346
Dvolume/Dt ($\text{km}^3 \text{ h}^{-1}$)	0.818	-0.010	0.212	0.372	0.234
Dprecip_flux/Dt ($\text{m}^3 \text{ s}^{-2}$)	0.689	0.270	0.066	0.513	0.235
Dmass/Dt (kt h^{-1})	0.832	0.006	0.216	0.369	0.206
DDbz_max/Dt (dBZ h^{-1})	-0.348	0.327	-0.369	0.636	-0.020
Ec (J m^{-2})	0.000	0.770	0.077	-0.039	0.225

Existen 58 granizómetros en los que se mide una *energía cinética* mayor de 20 J m^{-2} . Para esta muestra, al realizar el ACP se obtienen cinco componentes principales que explican el 80.19 % de la varianza (tablas 6.37 y 6.38).

En la primera componente, aparecen las variables ligadas a las **dimensiones de la tormenta**, la *velocidad*, las *tasas de cambio del volumen, del flujo de precipitación y de la masa*, con los que se explica un 43.24 %.

La segunda componente reúne las variables relacionadas con la **cantidad de agua** y la *energía cinética*, llegando a un 57.73 % de varianza explicada.

La tercera componente está formada por las variables de la **estructura vertical** de la tormenta como en el caso de la clase de *baja energía*, y explica 68.19 % de la varianza.

La cuarta componente se refiere a la *tasa de cambio del techo y de la reflectividad máxima*, que incrementan la varianza explicada hasta un 75.19 %.

Por último, con la quinta componente se alcanza el 80.19 % de varianza total explicada y solamente está formada por el *ángulo de inclinación*.

También para esta clasificación de la energía se proporciona una tabla resumen (tabla 6.39) que facilita la comparación.

Tabla 6.39. Resumen de los resultados obtenidos en el ACP tomando dos intervalos de *energía cinética* (variables radar seleccionadas + Ec). Oasis sur 2005/06-2006/07.

$E < 20 \text{ J m}^{-2}$: 42 casos

COMPONENTE	1	2	3	4	5	6
% cum σ^2	40.294	55.032	63.358	70.904	76.742	81.469
VARIABLES	Zh VIL cumVIL Max reflectivity Mean reflectivity Volume Mass Mean area Precip flux Precip area Ec	Dvolume/Dt Dprecip_flux/Dt Dmass/Dt	Ht of refl. centroid Ht of centroid Top Ht of max reflectivity	Tilt angle DdBz_max/Dt	Dtop/Dt	Speed

$E > 20 \text{ J m}^{-2}$: 58 casos

COMPONENTE	1	2	3	4	5
% cum σ^2	43.236	57.727	68.189	75.188	80.188
VARIABLES	Volume Mass Mean area Precip flux Precip area Speed Dvolume/Dt Dprecip_flux/Dt Dmass/Dt	Zh VIL cumVIL Max reflectivity Mean reflectivity Ec	Ht of refl. centroide Ht of centroid Top Ht of max reflectivity	Dtop/Dt DdBz_max/Dt	Tilt angle

3. INTERVALOS DE DIÁMETRO MÁXIMO

A. $D_{\text{máx}} < 15 \text{ mm}$

En la muestra, existen 36 granizómetros con un *diámetro máximo* menor de 15 mm. Al realizar el ACP se extraen cinco componentes principales y se logra explicar el 79.18 % de la varianza.

La primera componente principal agrupa las variables relacionadas con la **cantidad de agua**, las variables relativas a las **dimensiones de la tormenta** y la *energía cinética*, explicando un 43.04 % de la varianza.

La segunda componente incluye las *tasas de cambio del volumen, del flujo de precipitación y de la masa* y explica hasta el 55.99 % de la varianza.

En la tercera componente aparecen las variables que expresan la **estructura vertical de la tormenta** y la *tasa de cambio del techo*, que aumentan la varianza explicada hasta el 66.59 %.

La cuarta componente es responsable de incrementar la varianza hasta un 73.92 % y contiene solamente la *tasa de cambio de la reflectividad máxima*.

La última componente añade el *ángulo de inclinación* y la *velocidad* y consigue el 79.18 % de la varianza.

B. $D_{\text{máx}} > 15 \text{ mm}$

Se cuenta con 64 granizómetros cuyo *diámetro máximo* es mayor de 15 mm. Aplicando el ACP, se resumen las 22 variables en cinco componentes principales explicando el 82.02 % de la varianza.

La primera componente reúne las variables relativas a las **dimensiones de la tormenta** (salvo el *área de precipitación*), la *velocidad* y las *tasas de cambio del volumen, del flujo de precipitación y de la masa*. Con ellas se alcanza un 45.54 % de varianza explicada.

En la segunda componente se encuentran las variables que caracterizan la **cantidad de agua disponible** y la *energía cinética*, que explican el 60.60 % de la varianza acumulada.

La tercera componente se refiere a las variables de la **estructura vertical de la tormenta** y aumenta la varianza explicada hasta el 69.91 %.

Gracias a la cuarta componente se consigue un 76.94 % de la varianza y engloba el *área de precipitación, el ángulo de inclinación y la reflectividad máxima*.

En último lugar, la quinta componente está formada por la *tasa de cambio del techo* y con ella se alcanza el total de 82.02 % de varianza acumulada, ligeramente superior a la conseguida con los diámetros pequeños.

Debido a la similitud con los resultados obtenidos para las dos clases de energía, tampoco se muestran las tablas de varianza y componentes rotados para este ACP. Sin embargo, la tabla 6.40 resume los resultados del ACP según las dos clases de *diámetro máximo*. Al igual que en la clasificación anterior según la energía, se encuentra mayor número de granizómetros con un *diámetro máximo* mayor de 15 mm en la muestra del oasis sur de Mendoza que en Zaragoza. Los granizómetros de Zaragoza presentan un *diámetro máximo* medio de 11.38 mm, mientras que en la red argentina, éste es de 20.16 mm.

Tabla 6.40. Resumen de los resultados obtenidos en el ACP tomando dos intervalos de *diámetro máximo* (variables radar seleccionadas + Ec). Oasis sur 2005/06-2006/07.*D_{máx} < 15 mm: 36 casos*

COMPONENTE	1	2	3	4	5
% cum σ^2	43.037	55.988	66.590	73.932	79.176
VARIABLES	Zh VIL cumVIL Max reflectivity Mean reflectivity Volume Mass Mean area Precip flux Precip area Ec	Dvolume/Dt Dprecip_flux/Dt Dmass/Dt	Ht of refl. centroid Ht of centroid Top Ht of max reflectivity Dtop/Dt	DdBz_max/Dt	Tilt angle Speed

D_{máx} > 15 mm: 64 casos

COMPONENTE	1	2	3	4	5
% cum σ^2	45.554	60.596	69.913	76.943	82.016
VARIABLES	Volume Mass Mean area Precip flux Speed Dvolume/Dt Dprecip_flux/Dt Dmass/Dt	Zh VIL cumVIL Max reflectivity Ec	Ht of refl. centroid Ht of centroid Top Ht of max reflectivity	Precip area Tilt angle DdBz_max/Dt	Dtop/Dt

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Analizando los resultados para cada uno de los ACPs, se observa de nuevo, en este caso, que las *tormentas de alta energía y/o con granizo de diámetro grande* presentan unos resultados similares entre sí. Para la clase de *baja energía y/o granizo de diámetro pequeño*, la primera componente está asociada a la **cantidad de agua** y las **dimensiones de la tormenta**. La *energía cinética* aparece ligada a esta primera componente. Por otro lado, para las clases de *alta energía y/o las precipitaciones de granizo de diámetro grande* es el grupo de variables ligado a las **dimensiones**, así como los cambios en las mismas los que ocupan la primera componente, explicando la mayor parte de la varianza. En la segunda componente aparece la **cantidad de agua**, relacionada con la *energía cinética* de la tormenta.

6.3.3. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA LAS REDES DE GRANIZÓMETROS DE ZARAGOZA Y EL OASIS SUR DE MENDOZA

Una vez expuestos por separado los resultados obtenidos en las dos áreas de estudio, se presenta una comparación entre ambas a modo de resumen de cada uno de los análisis realizados a lo largo del capítulo.

1. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

Tanto los valores medios como los valores extremos de la muestra del oasis sur de Mendoza son mayores que los encontrados en Zaragoza para todas las variables medidas en los granizómetros y para

todas las *variables radar*, salvo para la *altura del centroide*, la *altura del centroide en reflectividad*, la *altura de la máxima reflectividad*, y algunas de las *tasas temporales*, que son mayores en el caso de Zaragoza. Efectivamente, los valores de *reflectividad* medidos a través de un radar de la banda S (utilizado en Mendoza) son mayores que en los radares de la banda C. Por tanto, también lo serán las variables directamente calculadas a partir de ellos. Además, las tormentas de la zona de Mendoza son de mayor magnitud que las del valle del Ebro como se estudia en el capítulo 4 y como muestran las variables medidas en los granizómetros.

En cuanto a los intervalos establecidos en función de la *energía cinética* y del *diámetro máximo* medidos en los granizómetros, en ambas zonas de estudio, la mayoría de las variables analizadas presentan medias mayores para los grupos de *tormentas de alta energía* y con *granizo de diámetro grande* que para las *de baja energía* y con *granizo de diámetro pequeño*.

En el caso de Zaragoza, los intervalos de *energía cinética* presentan mayor número de diferencias significativas entre las medias de las variables que los intervalos de *diámetro máximo*. Se podría decir que la *energía cinética* puede discriminar mejor entre tormentas de cierta intensidad y de menor intensidad, en función de esas variables de granizómetros y *variables radar* analizadas.

2. CORRELACIONES BIVARIADAS

En general, las *variables radar* de la base de datos del oasis sur de Mendoza están mejor correlacionadas entre sí. Las correlaciones son más altas que en la base de datos de Zaragoza.

En concreto, existen más variables correlacionadas significativamente con la *energía cinética* en la base de datos de Mendoza. En ambas, ésta se encuentra correlacionada con la *reflectividad puntual*, el *VIL instantáneo*, el *VIL acumulado* durante toda la tormenta, la *altura del centroide* y el *techo*. Además de estas variables comunes, en el caso de Zaragoza, la *energía cinética* está relacionada con la *altura del centroide de reflectividad* y con la *altura de la máxima reflectividad*. En el caso de Mendoza, a parte de las variables en común, la energía está correlacionada con las *reflectividades máxima y media*, el *volumen*, la *masa*, el *área media*, el *flujo de precipitación*, el *área de precipitación* y la *tasa de cambio del flujo de precipitación*.

En cuanto a las correlaciones del *diámetro máximo* con las *variables radar*, en Zaragoza, se observan las mismas variables correlacionadas que con la energía salvo las *alturas del centroide*. En el caso de Mendoza, el *diámetro máximo* además de estar correlacionado con las mismas variables que la *energía cinética* también lo está con la *altura de la máxima reflectividad* y con la *tasa de cambio de la masa*.

Es decir, en Mendoza se obtienen correlaciones de la *energía cinética* y el *diámetro máximo* con mayor número de *variables radar* y además, los coeficientes de correlación son más altos. Se puede afirmar que la correlación es mejor para el radar de la banda S del caso argentino, ya que los radares de esta longitud de onda detectan mejor el granizo.

3. ANÁLISIS CLUSTER

Los resultados de Zaragoza muestran unos dendrogramas más ramificados, con más jerarquías entre las variables y entre los conglomerados. En cambio, los de Mendoza presentan dentro de cada grupo variables más próximas entre sí y con escasas jerarquías entre conglomerados. Además, en Zaragoza, la *velocidad* es la variable más alejada del resto, siendo en Mendoza la *altura de la máxima reflectividad* la más alejada. Al añadir la *energía cinética* al análisis, en Zaragoza, ésta se une al nudo en el que el conglomerado formado por la *tasa de cambio del techo* y de la *reflectividad máxima* se une a los demás conglomerados. Sin embargo, en Mendoza, la *energía* se incluye en los conglomerados junto con los grupos de dimensiones espaciales, estructura vertical y cantidad de agua.

Para las dos áreas de estudio, se pueden establecer los siguientes grupos:

- Variables relacionadas con las **dimensiones espaciales** de la tormenta: *volumen, masa, flujo de precipitación, área media y área de precipitación.*
- Variables relacionadas con la **dinámica temporal**: *tasa de cambio del volumen, de la masa, del flujo de precipitación, del techo y de la máxima reflectividad.*
- Variables relacionadas con la **cantidad de agua**: *reflectividad puntual, reflectividades máxima y media de la célula, VIL instantáneo y VIL acumulado.*
- Variables relacionadas con la **estructura vertical** de la tormenta: *altura del centroide, altura del centroide en reflectividad, techo y altura de la máxima reflectividad.*

De manera general, quedan fuera de los grupos el *ángulo de inclinación* y la *velocidad de desplazamiento*.

4. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

A. Todos los granizómetros sin establecer intervalos

En Zaragoza, los grupos de variables establecidos previamente a través del *análisis cluster* se corresponden perfectamente a cada componente principal. Así, se extraen cuatro componentes formadas por las **dimensiones**, la **dinámica temporal**, la **estructura vertical** y la **cantidad de agua** respectivamente, alcanzando en torno a un 80 % de varianza explicada. La *energía cinética* y el *tamaño máximo* se encuentran ligados a la cuarta componente.

En Mendoza, las componentes principales agrupan variables de varios de estos cuatro grupos preestablecidos a través del *análisis cluster*. Además, aportan más explicación de varianza las variables relacionadas con la **cantidad de agua** y la **estructura vertical** que las **dimensiones espaciales** de la tormenta como en el caso de Zaragoza. La *energía cinética* y el *diámetro máximo* se incluyen en la primera componente. El porcentaje de varianza explicada es ligeramente superior al de Zaragoza.

B. Intervalos de energía cinética

Comparando los datos de Zaragoza y los de Mendoza en las muestras de granizómetros seleccionados, en el oasis sur de Mendoza se encuentra mayor número de granizómetros cuya *energía cinética* supera el umbral de 20 J m^{-2} . De hecho, el valor medio de *energía cinética* medida en los granizómetros de la red argentina es mayor que la de la red española (239.42 J m^{-2} frente a 27.56 J m^{-2}). Al igual que sucede sin establecer intervalos, con estas dos clases de energía, las componentes extraídas son distintas.

En el caso de Zaragoza, se extraen también cuatro componentes principales para los dos grupos teniendo mayor peso en los dos, las variables de las **dimensiones** de la tormenta. En concreto, para la *clase de baja energía* (menores de 20 J m^{-2}), se explica el 75 % de la varianza total pero la *energía cinética* no se puede asociar a ninguna de las componentes. Además, el segundo grupo en importancia es la **estructura vertical**. En cambio, para las tormentas con *alta energía cinética*, (mayores de 20 J m^{-2}), se explica hasta el 87 % de la varianza, incluyendo la energía en la cuarta componente y teniendo más importancia las variables ligadas a la **dinámica temporal** que la **estructura vertical**.

Sin embargo, en Mendoza, para la clase de *baja energía* se extraen seis componentes principales llegando a explicar el 81 % de la varianza, donde la componente con más peso engloba la **cantidad de agua** y las **dimensiones** de la tormenta, además de la *energía cinética*. En la clase de *granizo de alta energía*, se alcanza un 80 % de varianza explicada con cinco componentes principales, siendo la

más importante la que incluye las **dimensiones** y la **dinámica temporal**. En la segunda componente se incluye la *energía*.

C. Intervalos de diámetro máximo

Al igual que en la clasificación anterior, al comparar los resultados, se encuentra mayor número de granizómetros con un *diámetro máximo* mayor de 15 mm en la muestra del oasis sur de Mendoza que en Zaragoza. Efectivamente, los granizómetros de Zaragoza presentan un *diámetro máximo* medio de 11.38 mm mientras que el los argentinos es de 20.16 mm.

En Zaragoza, los resultados obtenidos al dividir la muestra según el *diámetro máximo* son iguales a los obtenidos al dividir la muestra según la *energía cinética*. En Mendoza son prácticamente iguales a los de la *energía cinética*, con excepción de que para la clase de *baja energía* se extraen seis componentes, mientras que para el *granizo de diámetro pequeño* se extraen cinco.

Además, en el caso de las *tormentas de alta energía* y con *granizo de diámetro grande*, la varianza explicada acumulada es mayor que en el caso de las *tormentas de baja energía* y con *granizo de diámetro pequeño*. De hecho, en las primeras, extrayendo una componente menos, es decir, con tres componentes principales se explica más varianza que con cuatro componentes en las segundas. Por tanto, las relaciones de las *variables radar* de las *tormentas de alta energía* y con *granizo de diámetro grande* están mejor definidas que las de las *tormentas de baja energía* y con *granizo de diámetro pequeño*.

6.4. BIBLIOGRAFÍA

- Billet, J., DeLisi, M. and Smith, B.G., 1997. Use of regression techniques to predict hail size and the probability of large hail. *Wea. Forecasting*, **12**, 154 – 164.
- Changnon, S.A., Jr., 1964. Surface features of two intersecting hailstorms. *Nubila*, **6**, 74 – 86.
- Changnon, S.A., 1971. Hailfall characteristics related to crop damage. *J. Appl. Meteor.*, **10**, 270 – 274.
- Cuadras, C., 1991. *Métodos de análisis multivariante*. Promociones y publicaciones universitarias, Barcelona, 644 pp.
- Douglas, R.H., 1964. Hail size distributions. *Proc. 1964 World Conf. Radio Meteorology and 11th Weather Radar Conf., Boulder, Amer. Meteor. Soc.* 47 – 149.
- Federer B. and Waldvogel, A., 1975. Hail and raindrop size distributions from a Swiss multicell storm. *J. Appl. Meteor.*, **14**, 91 – 97.
- Federer B. and Waldvogel, A., 1978. Time-resolved hailstone analyses and radar structure of Swiss storms. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **104**, 69 – 90.
- Fovell, R.G. and Fovell, M.C., 1993. Climate zones of the conterminous United States defined using cluster analysis, *Journal of Climate*, **6**, 2103-2135.
- Fraile, R., Berthet, C., Dessens, J. and Sánchez, J.L., 2003. Returns periods of severe hailfalls computed from hailpad data. *Atmos. Res.*, **67 – 68**, 189 – 202.
- Greene, D.R. and Clark, R.A., 1972. Vertically Integrated Liquid Water – A new analysis tool. *Mon. Wea. Rev.*, **100**, 548 – 552.
- Hair, F.J. Jr., Anderson, R.E., Tatham, R.L. and Black, W.C., 1999. *Análisis multivariante*. Prentice Hall, Madrid, 799 pp.
- Hohl, R., Schiesser, H.H. and Knepper, I., 2002. The use of weather radars to estimate hail damage to automobiles: An exploratory study in Switzerland. *Atmos. Res.*, **61**, 215 – 238.

- Hohl, R., Schiesser, H.H. and Aller, D., 2002. Hailfall: the relationship between radar-derived hail kinetic energy and hail damage to buildings. *Atmos. Res.*, **63**, 177 – 207.
- Iniuchin, V.S., Makitov, V.S., 1987. An observational and theoretical study of methods of radar measurements of kinetic energy of hailfalls. *Trans. High Mountain Geophysical Institute*, **69**, 62 – 69.
- Iniuchin, V.S., Makitov, V.S., 1989. Radar reflectivity of melting hail. *Trans. High Mountain Geophysical Institute*, **82**, 40 – 52.
- Katz, R.W. and Garcia, P.R., 1981. Statistical relationships between hailfall and damage to wheat. *Agricult. Meteorol.*, **24**, 29 – 43.
- Lemon, L.R., 1978. On the use of storm structure for hail identification. *Preprints, 18th Conf. on Radar Meteorology, Atlanta, GA, Amer. Meteor. Soc.*, 203 – 206.
- Leiker, K.K., 1988. Application of Factor Analysis techniques to the mapping of tornado data: a New England application. *15th Conference on Severe Local Storms, AMS, Baltimore*, 517 – 519.
- Long, A.B., 1980. On estimating hail frequency and hailfall area. *J. Appl. Meteor.*, **19**, 1351 – 1362.
- López, L. and Sánchez, J.L., 2009. Discriminant methods for radar detection of hail. *Atmos. Res.*, **93**, 358 – 368.
- Makitov, V., 2007. Radar measurements of integral parameters of hailstorms used on hail suppression projects. *Atmos. Res.*, **83**, 380 – 388.
- Mason, B.J., 1971. *The Physics of Clouds, Second edition*. Clarendon Press, Oxford, 671 pp.
- Morgan, G. and Towery, N., 1975. Small-scale variability of hail and its significance for hail prevention experiments. *J. Appl. Meteor.*, **14**, 763 – 770.
- Morgan, G. and Towery, N., 1976. On the role of strong winds in damage to crops by hail and its measurement with a simple instrument. *J. Appl. Meteor.*, **15**, 891 – 898.
- Pérez, C., 2001. *Técnicas estadísticas con SPSS®*. Prentice Hall, Madrid, 592 pp.
- Sarrat, J.L., Mezeix, J.F. and Admirat, P., 1977. *Etalonnage des grêlimètres à feuille d'aluminium*. Rapp. Tech. no. 27, GNEFA, Montpellier, France, 30 pp.
- Schiesser, H.H., 1990. Hailfall: The relationship between radar measurements and crop damage. *Atmos. Res.*, **25**, 559 – 82.
- Schlesener, R.A., Marwitz, J.D. and Cox, W.L., 1965. Hailfall data from a fixed network for the evaluation of a hail modification experiment. *J. Appl. Meteor.*, **4**, 61 – 68.
- Schmid, W., Schiesser, H.H. and Waldvogel, A., 1992. The kinetic energy of hailfalls. Part IV: Patterns of hailpad and radar data. *J. Appl. Meteorol.*, **31**, 1165 – 78.
- Smith, P.L., Myers, C.G. and Orville, H.D., 1975. Radar reflectivity factor calculations in numerical cloud models using bulk parameterization of precipitation. *J. Appl. Meteor.*, **14**, 1156 – 1165.
- Sokal, R.R. and Michener, C.D., 1958. A statistical method for evaluating systematic relationship. *Univ. Kansas Sci. Bull.*, **38**, 1409 – 1438.
- Statheropoulos, M., Vassiliadis, N. and Pappa, A., 1998. Principal Component and Canonical Correlation Analysis for examining air pollution and meteorological data. *Atmospheric Environment*, **32**, 1087 – 1095.
- Thurstone, L.L., 1935. *The vectors of mind*. Chicago, Chicago University Press.
- Ulbrich, C.W., 1977. Doppler radar relationships for hail at vertical incidence. *J. Appl. Meteor.*, **16**, 1349 – 1359.
- Vento, D., 1976. The hailpad calibration for Italian hail damage documentation. *J. Appl. Meteor.*, **16**, 1018 – 1022.
- Vinet, F., 2001. Climatology of hail. *Atmos. Res.*, **56**, 309 – 323.
- Waldvogel, A., 1974. The N_0 jump of raindrop spectra. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1067 – 1078.

- Waldvogel, A. and Federer, B., 1976. Large raindrops and the boundary between rain and hail. *Preprints, 17th Conf. Radar Meteorology*, Seattle, Amer. Meteor. Soc., 167-72
- Waldvogel, A., Schmid, W. and Federer, B., 1978. The kinetic energy of hailfalls. Part I: Hailstone spectra. *J. Appl. Meteor.*, **17**, 515 – 520.
- Waldvogel, A., Federer, B., Schmid, W. and Mezeiz, J.F., 1978. The kinetic energy of hailfalls. Part II: Radar and hailpads. *J. Appl. Meteor.*, **17**, 1680 – 1693.
- Waldvogel, A., Federer, B. and Grimm, P., 1979. Criteria for the detection of hail cells. *J. Appl. Meteorol.* **18**, 1521 – 1525.
- Waldvogel, A., Federer, B. and Högl, D., 1980. On the correlation between hailpad and radar data. *Preprints, 19th Conf. Radar Meteorology*, Miami, Amer. Meteor. Soc., 493 – 98.
- Waldvogel, A. and Schmid, W., 1982. The kinetic energy of hailfalls. Part III: Sampling errors inferred from radar data. *J. Appl. Meteorol.*, **21**, 1228 – 1238.
- Waldvogel, A. and Schmid, W., 1983. Single wavelength radar measurements of hailfall kinetic energy. *Preprints, 21st Conf. Radar Meteor.*, Edmonton, Amer. Meteor. Soc., 425 – 428.
- Wilks, D.S., 1995. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic Press, San Diego, 467 pp.
- Wojtiw, L and Ewing, C., 1983. The use of radar to estimate crop damage for hailstorms in Alberta, Canada. *Preprints, 21st Conf. Radar Meteorology*, Edmonton, Amer. Meteor. Soc., 435 – 441.
- Wojtiw, L and Ewing, C., 1986. The relationship of time-integrated radar reflectivity with hail crop damage. *Preprints, 23rd Conf. Radar Meteorology*, Snowmass, Amer. Meteor. Soc., 23 – 26.

7

REGRESIÓN LOGÍSTICA APLICADA A LA DISCRIMINACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA DEL GRANIZO

7.1. INTRODUCCIÓN

El *análisis discriminante* y la *regresión logística* son dos técnicas estadísticas muy útiles para predecir variables dependientes no métricas, es decir, categóricas, a partir de un conjunto de variables independientes métricas (Hair et al., 1999). Estas dos técnicas se diferencian en el número de grupos que presente la variable categórica (la *regresión logística* está restringida a dos categorías mientras el *análisis discriminante* puede tener dos o más) y en la robustez que presentan frente a una serie de supuestos estadísticos que se deben cumplir.

En concreto, cuando la variable categórica presenta dos grupos (variable dicotómica) y no se cumple estrictamente esa serie de supuestos estadísticos, se considera más adecuado aplicar la *regresión logística*. Así, el objetivo de esta técnica se centra en predecir la presencia o ausencia de una determinada característica a partir de un conjunto de *variables predictoras, explicativas o independientes*. Dado que la *variable dependiente* es dicotómica, se le adjudica el valor de 0 si el hecho no ocurre (ausencia de la característica), o 1 si el hecho ocurre (presencia de la característica). Por ello, se trata de un *proceso binomial* ya que solo tiene dos posibles resultados, siendo la probabilidad de cada uno de ellos constante en una serie de repeticiones. Además, la *regresión logística*, al igual que otras técnicas multivariantes, permite evaluar la posible influencia de cada una de las variables independientes sobre la variable dependiente y controlar el efecto del resto de variables.

Tanto la *regresión logística* como la *discriminante* han sido ampliamente utilizadas en estudios meteorológicos desde que fueron introducidas por Brelford y Jones (1967) y Jones (1968), y han sido especialmente aplicadas en los últimos años (Angus et al., 1988; Dubrovsky, 1994; Billet et al., 1997; Sánchez et al., 1998; Sánchez et al., 2001b; Schmeits et al., 2005; López et al., 2007; Sánchez et al., 2007a; Sánchez et al., 2009). Así, por ejemplo, en una predicción meteorológica a corto plazo de aparición de tormentas convectivas, los modelos discriminantes permiten conocer la probabilidad de ocurrencia de un determinado fenómeno a partir de los valores alcanzados por una serie de variables meteorológicas previamente seleccionadas y que caracterizan el estado preconvectivo de la atmósfera en la zona de estudio. No obstante, estos modelos también han sido aplicados con otros fines meteorológicos como la predicción de probabilidad de precipitación (Crosby et al., 1995) o la predicción de la visibilidad en la *capa límite* (Hilliker y Fritsch, 1999).

El objetivo de este capítulo se centra en construir un *modelo de regresión logística* para efectuar la estimación de la *energía cinética* esperada de las precipitaciones de granizo producidas por una célula tormentosa. Esto permitiría *predecir* a priori las zonas más afectadas por daños en los cultivos. Para la construcción del mismo, se toman las *variables radar* (descritas en el capítulo 2) como *variables explicativas* de la probabilidad de precipitación de granizo de elevada energía. Como en los anteriores capítulos, se asume que la *energía cinética* se refiere a la componente vertical, debida exclusivamente a las piedras de granizo que arroja la tormenta hacia abajo.

7.2. FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS DE REGRESIÓN LOGÍSTICA

Como ya se ha señalado, el modelo logístico ha sido muy aplicado en diferentes estudios meteorológicos. Para comprender el fundamento de dicha técnica estadística, en este apartado se realiza una breve descripción matemática.

En primer lugar, se debe aclarar que el *modelo de regresión logística* permite conocer la probabilidad condicional para un determinado fenómeno (*variable respuesta o dependiente* en términos matemáticos) a través de un grupo de *variables independientes o explicativas* $X_1, X_2, \dots, X_n$.

En este caso, esas *variables explicativas* son magnitudes meteorológicas, en concreto, las *variables radar*, a partir de las cuales se pretende estimar la probabilidad de precipitaciones de granizo con elevada energía, siendo la *variable respuesta* esa *energía cinética* medida en los granizómetros.

La *energía cinética* de cada uno de los granizómetros estudiados se clasifica en uno de los grupos en función del umbral de 20 J m^{-2} , utilizado en el capítulo anterior para distinguir entre:

- *Grupo de alta energía*. Presenta *riesgo* de granizo con energía moderada o fuerte ($E_c > 20 \text{ J m}^{-2}$).
- *Grupo de baja energía*. Presenta *no riesgo* de energía moderada o fuerte, es decir, la *energía cinética* precipitada será débil ($E_c < 20 \text{ J m}^{-2}$).

Matemáticamente, la función logística viene definida por:

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (7.1)$$

Además, en términos estrictamente matemáticos, el *modelo logístico* se expresa como z , una combinación de *variables explicativas*, X_i :

$$z = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_j X_k \quad (7.2)$$

donde k es el número total de variables incluidas en el modelo, α es una *constante* y β_j para $j = 1 \dots k$ son las diferentes *ponderaciones discriminantes* o *coeficientes* β . Estas dos últimas son los parámetros desconocidos que pueden ser estimados usando los datos de las *variables explicativas* y *respuesta* medidas en una muestra de datos.

Sustituyendo en la ecuación 7.1, la expresión 7.2 se obtiene:

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j)}} \quad (7.3)$$

Para cada uno de los eventos de la muestra, los valores de las *variables radar* son conocidos y también lo es el dato que clasifica la *energía cinética* en *alta* o *baja energía*. Los datos del primer grupo han sido codificados con el valor 1, y los del segundo con el valor 0. Así, la función $f(z)$, tomará valores entre 0 y 1. Entonces, esta función puede ser interpretada como una función de probabilidad, variando la probabilidad entre 0 y 1. En nuestro caso concreto, la probabilidad de que un determinado granizómetro reciba granizo de *alta energía* variará entre 0 y 1, y esa probabilidad será obtenida mediante una combinación de *variables explicativas* seleccionadas e introducidas en la ecuación 7.3.

Esta ecuación, por tanto, puede ser reescrita en términos de probabilidad como:

$$P(R = 1 | X_1, X_2, \dots, X_k) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j)}} \quad (7.4)$$

donde $P(R = 1 | X_1, X_2, \dots, X_k)$ representa la probabilidad condicional de que la *variable respuesta* tome valor 1 (es decir, $R = 1$). Con fines operativos de predicción se suele utilizar la siguiente notación:

$$P(R = 1 | X_1, X_2, \dots, X_k) = P(X) \quad (7.5)$$

Por lo tanto, la expresión final viene dada por:

$$P(X) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j)}} \quad (7.6)$$

Para que esta ecuación pueda ser utilizada como una *variable predictora* es necesario establecer un criterio para clasificar un píxel de la imagen de radar en el grupo de *riesgo* o *no riesgo* de granizo de *alta energía*. Este criterio consiste en fijar un punto de corte para la ecuación 7.6. Numerosos estudios

(Hosmer y Lemeshow, 1989; Crosby et al., 1995) utilizan el valor 0.5, es decir, que solamente existe riesgo de precipitaciones de *alta energía*, si el valor de la ecuación 7.6 es igual o superior a 0.5.

Existen varios métodos para la construcción de la ecuación discriminante. En concreto, se opta por el *método stepwise* de incorporación de variables, utilizado recientemente por varios autores como López et al. (2007) o Sánchez et al. (2008). Esta herramienta estadística incluye o excluye a los diferentes parámetros o índices de la ecuación en función de su potencial de predicción (Hair et al., 1999). De esta forma, las variables seleccionadas proporcionan la mejor discriminación posible entre los grupos definidos a priori. En cada iteración del modelo, los valores teóricos de cada variable son ponderados de tal manera que la diferencia intergrupos es maximizada y la diferencia intragrupos minimizada. Para dirigir la inclusión de las variables, así como evaluar la significación estadística de las diferentes iteraciones existen diferentes herramientas estadísticas como se trata posteriormente.

En realidad el poder predictor de la ecuación logística depende en gran medida de la adecuada selección de las *variables explicativas*. En el caso de los modelos de regresión, existen técnicas estadísticas que permiten construir una ecuación predictora con criterios puramente estadísticos a partir de un grupo de variables preseleccionadas.

Sin embargo, la combinación de variables debe tener un respaldo meteorológico. Así, Doswell y Schultz (2006) señalaron que las variables termodinámicas individuales usadas para crear un *índice* deben tener relevancia meteorológica para el fenómeno estudiado, ya que si carecen de ella, puede dar lugar a numerosos errores. Sus argumentos se pueden extrapolar a este estudio, ya que la metodología empleada y el modelo matemático es el mismo. Además, los mismos autores señalaron que la *“metodología basada en ingredientes”* (Doswell et al., 1996) podría ser el camino científico para evaluar una ecuación construida utilizando una metodología estrictamente estadística.

Estos argumentos han sido recientemente utilizados por diferentes autores (Sánchez et al., 2008, 2009). Por ejemplo, Sánchez et al. (2009) desarrollaron un modelo logístico de predicción de tormentas, realizando una selección de variables desde el punto de vista estadístico. En el análisis de resultados se comprobó que las variables explicativas seleccionadas se encontraban dentro de los diferentes grupos de variables (*“ingredientes”*) necesarios para el desarrollo de la aparición y crecimiento de tormentas.

Por tanto, para corroborar la aplicabilidad de la ecuación logística construida mediante criterios puramente estadísticos, se debe analizar la significación meteorológica.

En el presente capítulo, en primer lugar se muestran los resultados obtenidos al aplicar dicha técnica para la base de datos de la zona de estudio del oasis sur de Mendoza con un radar de la banda S y posteriormente, se discute la obtención de resultados no satisfactorios para la bases de datos de la zona de estudio de Zaragoza con un radar de la banda C.

7.3. APLICACIÓN EN LA RED DE GRANIZÓMETROS DEL OASIS SUR DE MENDOZA

7.3.1. BASE DE DATOS Y METODOLOGÍA

La base de datos empleada en este análisis está formada por 100 casos de la red de granizómetros del oasis sur de Mendoza y del radar de la banda S instalado en el mismo, seleccionados durante las campañas experimentales de 2005/06 y 2006/07. La metodología para crear dicha base de datos se describe en el capítulo 3. Para cada caso se dispone de los parámetros medidos en el granizómetro y de las *variables radar* de la célula tormentosa que generó cada granizada, descritas en el

capítulo 2 de la Memoria. En la tabla 3.5 se puede consultar la notación utilizada. Estos mismos casos son estudiados en el capítulo 6 con el fin de establecer las relaciones entre las variables.

A la hora de establecer dos categorías para efectuar el análisis, se utiliza el umbral de 20 J m^{-2} fijado en el capítulo 6. Como se expone en el apartado 6.3.2.2, en 42 de los granizómetros la *energía cinética* registrada es inferior a los 20 J m^{-2} . Así, para construir un modelo de regresión logístico binomial se crea una nueva variable categórica, que asigna el valor 1 a los granizómetros con valores de *energía cinética* superiores a 20 J m^{-2} (granizo con elevada *energía cinética* susceptible de provocar daños, grupo de *alta energía*) y el valor 0 a los inferiores a 20 J m^{-2} (habitualmente sin daños en los cultivos dignos de mención, grupo de *baja energía*). La notación de las variables y sus abreviaturas coincide con la de la tabla 3.5 del capítulo 3.

7.3.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.3.2.1. Verificación de los supuestos del análisis multivariante

Al igual que en los demás análisis multivariantes, en los modelos estadísticos de regresión, es necesario contrastar el cumplimiento de determinados supuestos previos: normalidad de las variables independientes y homocedasticidad de varianzas (Hair et al., 1999). Estas hipótesis, son clave en la construcción de *modelos discriminantes lineales*. Cuando no se cumplen, se recomienda utilizar la *regresión logística*. Además, ésta permite incluir relaciones no lineales entre las variables explicativas y la variable independiente.

Para comprobar el supuesto de *normalidad* se aplica el *test de Kolmogorov-Smirnov*, con la corrección propuesta por Lilliefors (Hair et al., 1999). Ya que no todas las variables cumplen los criterios de normalidad, se realizan transformaciones de las mismas (raíz cuadrada, logaritmo decimal e inversa) con el objetivo de ajustar los valores de las variables a una distribución normal. Las transformaciones necesarias para alcanzar la normalidad son: *raíz cuadrada del VIL acumulado*, *inversa del techo de la tormenta*, *raíz cuadrada de la altura de la máxima reflectividad* y *raíz cuadrada del flujo de precipitación*. Sin embargo, tras intentar varias transformaciones, las variables *tasa de cambio del volumen*, *tasa de cambio del flujo de precipitación* y *tasa de cambio de la masa* siguen sin ajustarse a una distribución normal con un nivel de significación del 0.05. A pesar de estas desviaciones de la normalidad, McMachlan (1992) señaló que los modelos discriminantes son ampliamente utilizados desde el punto de vista operativo, debido a la robustez que presentan respecto a este tipo de desviaciones.

Por otro lado, a través del *test de Levene*, se evalúa la *homocedasticidad*. Los resultados señalan que con un nivel de significación del 0.05 la hipótesis nula de igualdad de las matrices debe ser rechazada para las variables *raíz cuadrada del flujo de precipitación*, *tasa de cambio del volumen*, *tasa de cambio del flujo de precipitación* y *tasa de cambio de la masa*.

Además de estos dos criterios, para la construcción de los modelos discriminantes lineales es muy importante el cumplimiento del criterio de *no multicolinealidad*, es decir, que dos o más variables independientes estén muy correlacionadas. En este caso, todas las variables están muy correlacionadas entre sí, por lo que no se cumple.

Los resultados de los tres supuestos conducen a la aplicación de la *regresión logística* en lugar del *análisis discriminante*.

7.3.2.2. Selección de las variables explicativas y ajuste del modelo

En la construcción de la *ecuación logística*, inicialmente se estima el denominado *modelo base*, con el objetivo de disponer de una referencia que permita realizar comparaciones desde las primeras iteraciones. Este método emplea la media global del ajuste denominada *verosimilitud* para establecer el modelo base, calculando el valor de un estadístico: menos dos veces el *logaritmo de la verosimilitud* (denominado habitualmente $-2LL$ y así denotado en sucesivo). A partir de este primer modelo, se obtienen las correlaciones parciales para cada variable y se comienza a elegir las variables con más capacidad de discriminación.

El *estadístico de puntuación* (Wilks, 1995) (denominado en lo sucesivo *puntuación*) permite obtener una *medida* para identificar aquellas variables con mayor capacidad discriminante. En la tabla 7.1 se muestran las puntuaciones obtenidas para las variables. En este caso, el valor con un mayor estadístico de puntuación es el *VIL puntual*, por lo que es el primero en ser introducido en el modelo.

Tabla 7.1. Valores alcanzados por el estadístico de puntuación para crear el modelo logístico de discriminación de *energía cinética* en el oasis sur de Mendoza.

	Puntuación	Significación
Zh	34.641	0.000
VIL	36.623	0.000
Ht. of reflectivity centroid	32.921	0.000
Precip area	17.539	0.000
Volume	22.204	0.000
Mean area	16.288	0.000
Mass	22.921	0.000
Tilt angle	0.483	0.487
Max reflectivity	20.073	0.000
Mean reflectivity	17.227	0.000
Dtop/Dt	2.036	0.154
Dvolume/Dt	6.054	0.014
Dprecip_flux/Dt	2.891	0.089
Dmass/Dt	9.536	0.002
DdBz_max/Dt	0.123	0.726
Speed	0.849	0.357
$\sqrt{\text{cumVIL}}$	35.496	0.000
$\sqrt{\text{Ht. of max reflectivity}}$	0.365	0.546
$1/\text{Top}$	36.078	0.000
$\sqrt{\text{Precip flux}}$	21.692	0.000

Como ya se ha indicado, para realizar la incorporación de las variables en el modelo se utiliza el método de incorporación de variables denominado *stepwise* (Hair et al., 1999). Como criterio de incorporación se utiliza la significación estadística de los *coeficientes* β de las variables introducidas usando el *estadístico de Wald* (Hair et al., 1999). El valor umbral de entrada para las variables en el modelo se fija en 0.05 y el de salida en 0.1.

En la Tabla 7.2 se observan los resultados de las pruebas sobre la disminución del $-2LL$, es decir, la ganancia obtenida en cada modelo. Para cada uno de los pasos, se presentan los valores del *paso* y *modelo* (Hair et al., 1999), así como los *grados de libertad*, abreviados como *df*. Dado que las variables se introducen en un solo bloque, los resultados del *bloque* y del *modelo* coinciden (Carrasco y Hernán, 1993). El valor *Chi cuadrado* (Hair et al., 1999) para cada uno de ellos se calcula como:

- *Chi cuadrado del modelo*: diferencia entre el estadístico *-2LL* para el modelo nulo y *-2LL* para el modelo actual. Se contrasta la hipótesis nula que postula que los coeficientes de todos los términos respecto a la constante son igual a cero.
- *Chi cuadrado del paso*: diferencia entre el *-2LL* de pasos sucesivos. Se contrasta la hipótesis de que los coeficientes de las variables introducidas en el último paso sean iguales a cero.

En todos los casos el valor de *Chi cuadrado* es significativo (al 0.05 salvo en el paso 3, al 0.1), rechazando las hipótesis contrastadas. La ecuación de regresión se determina tras tres iteraciones.

Tabla 7.2. *Test ómnibus* sobre los coeficientes del modelo logístico de *energía cinética* del oasis sur de Mendoza.

		Chi cuadrado	df	Significación
Paso 1	Paso	47.878	1	0.000
	Modelo	47.878	1	0.000
Paso 2	Paso	9.228	1	0.002
	Modelo	57.106	2	0.000
Paso 3	Paso	3.564	1	0.059
	Modelo	60.670	3	0.000

Una vez efectuada la incorporación de variables al *modelo base*, se ha de medir el buen ajuste del modelo. Para ello, se aplica el test propuesto por Hosmer y Lemeshow (Hair et al., 1999) que contrasta la hipótesis nula de la existencia de diferencias entre los valores observados y los predichos por el modelo. En este caso, los resultados (tabla 7.3) muestran que la hipótesis nula es rechazada, señalando un buen ajuste del modelo en las tres iteraciones.

Tabla 7.3. *Test de Hosmer y Lemeshow* para las diferentes iteraciones del modelo logístico de *energía cinética* del oasis sur de Mendoza.

Paso	Chi cuadrado	df	Significación
1	8.029	8	0.431
2	11.529	8	0.173
3	13.021	8	0.111

La tabla 7.4 presenta un mayor detalle de las iteraciones llevadas a cabo por el modelo. Se observa que el valor del *-2LL* es menor en el segundo (78.953) y tercer paso (75.388). Esto indica que la verosimilitud es mayor y, por tanto, el ajuste del modelo resulta ser más adecuado.

Por otro lado, para evaluar el ajuste global del modelo se calculan el valor de *R cuadrado de Cox y Snell* (Hair et al., 1999), resultando un valor de 0.455 para el tercer paso, y el valor de *R cuadrado de Nagelkerke* (Hair et al., 1999), con un valor final de 0.612. Este último estadístico varía entre 0 y 1, por lo que un valor de 0.612 es un resultado satisfactorio.

Tabla 7.4. Resumen de las iteraciones realizadas hasta la construcción del modelo logístico de *energía cinética* del oasis sur de Mendoza.

Paso	-2LL	R ² de Cox y Snell	R ² de Nagelkerke
1	88.180	0.380	0.512
2	78.953	0.435	0.585
3	75.388	0.455	0.612

Finalmente, los *coeficientes* β estimados para la constante y para las tres variables independientes se evalúan mediante el *estadístico de Wald*, que señala que todas las variables introducidas en la ecuación son estadísticamente significativas a un nivel de 0.05, salvo la *raíz cuadrada*

de la altura de la máxima reflectividad que lo es a un nivel de 0.1. Por tanto, las tres variables introducidas en la ecuación son susceptibles de ser interpretadas, siendo 3 el valor de k en la ecuación 7.2. La tabla 7.5 muestra los valores del coeficiente β para cada una de las variables y el valor de α en la ecuación final (8.395), además de sus *errores estándar (E.S.)*, el *estadístico de Wald*, la significación y el exponencial del coeficiente.

Tabla 7.5. Variables en la ecuación del modelo logístico de *energía cinética* del oasis sur de Mendoza.

		β	E.S.	Wald	Significación	Exp(β)
Paso 3	VIL	0.075	0.021	12.348	0.000	1.078
	$\sqrt{Ht. of max reflectivity}$	-1.299	0.721	3.246	0.072	0.273
	$1/Top$	-100.731	33.388	9.102	0.003	0.000
	Constante	8.395	3.575	5.515	0.019	4425.413

Gracias a la ecuación construida, se clasifica una célula con granizo de *alta energía* cuando su probabilidad es superior a 0.5, siguiendo el criterio de autores como Crosby et al. (1995) o Hosmer y Lemeshow (1989). No obstante, pueden adoptarse otros umbrales de decisión. La selección de los mismos depende del riesgo que se desee adoptar en relación al número de falsas alarmas o a la frecuencia de eventos perdidos.

7.3.2.3. Evaluación del modelo logístico de energía

Así, en la ecuación logística final se introducen tres variables: el *VIL*, la *altura de la máxima reflectividad* (su raíz cuadrada) y el *techo de la tormenta* (su inversa).

En meteorología, es común evaluar los resultados obtenidos a través un determinando modelo mediante el uso de *tablas de contingencia*. En ellas, se enfrentan los resultados obtenidos a través del modelo, con los valores observados. En la tabla 7.6, se presentan las tablas de contingencia para las diferentes iteraciones. Se aprecia como el porcentaje global de datos correctamente clasificados mejora en la última iteración respecto a los resultados de los pasos precedentes, llegando hasta el 88 %.

Tabla 7.6. Tabla de contingencia para el modelo logístico de *energía cinética* del oasis sur de Mendoza.

		Pronosticado		
	Observado	0	1	% correcto
Paso 1	0	32	10	76.2
	1	10	48	82.8
	% global			80.0
Paso 2	0	33	9	78.6
	1	7	51	87.9
	% global			84.0
Paso 3	0	36	6	85.7
	1	6	52	89.7
	% global			88.0

A partir de la información de las *tablas de contingencia*, se calculan diferentes índices que dan cuenta de distintos aspectos de la validez del modelo. Las fórmulas para el cálculo de los mismos, sus siglas, así como los valores alcanzados por el modelo logístico de energía se resumen en las tablas 7.7 y 7.8.

Los valores de la tabla 7.8 muestran unos resultados suficientemente satisfactorios. La POD es del 85.7 %, con una FAR del 14.3 %, considerado un valor bajo en meteorología. Además, la FOM tiene

un valor de 14.3 %, garantizando que pocos de los casos en los que se produzca la precipitación de granizo *de alta energía* serán mal pronosticados.

Tabla 7.7. Tabla de contingencia del modelo logístico de *energía cinética* del oasis sur de Mendoza.

	Predicción SÍ	Predicción NO	Modelo de energía	
Observación SI	X	Y	36	6
Observación NO	Z	W	6	52

Tabla 7.8. Índices de precisión, siglas correspondientes a cada uno de los índices, cálculo a partir de la tabla de contingencia y resultados alcanzados por el modelo logístico de *energía cinética* del oasis sur de Mendoza.

Skill scores	Siglas	Cálculo	Modelo
Tasa de falsas alarmas	FAR	$Z / (X+Z)$	0.143
Frecuencia de aciertos	POH	$X / (X+Z)$	0.857
Frecuencia de errores	FOM	$Y / (X+Y)$	0.143
Probabilidad de detección	POD	$X / (X+Y)$	0.857
Probabilidad de evento nulo	PON	$W / (Z+W)$	0.896
Probabilidad de falsa detección	POFD	$Z / (Z+W)$	0.103
Tasa de fallos	DFR	$Y / (Y+W)$	0.103
Frecuencia correcta de eventos nulos	FOCN	$W / (Y+W)$	0.896
Índice de bondad de ajuste de Heidke	HSS	$2(XW-YZ) / [(X+Y)(Z+W)+(X+Z)(Z+W)]$	0.754
Índice de bondad de ajuste verdadero	TSS	$(XW-YZ) / [(X+Y)(Z+W)]$	0.754

También se calcula el *índice de bondad de ajuste de Heidke*, conocido como *HSS* (del inglés *Heidke's Skill Score*). Doswell et al., (1990) consideraron que era muy útil en fenómenos infrecuentes como las tormentas, donde las tablas de contingencia suelen presentar un número elevado de falsas alarmas. Por otro lado, el *índice de bondad de ajuste verdadero* o *TSS* (del inglés *True Skill Score*) tiene en cuenta la ocurrencia o no ocurrencia del fenómeno (Gandin y Murphy, 1992). Para ambos índices, una predicción perfecta vendría determinada por el valor 1. Los valores alcanzados de 0.754, en los dos casos, muestran un comportamiento razonablemente adecuado para el modelo de predicción logístico de energía.

7.3.2.4. Interpretación meteorológica

Aunque la ecuación esté rigurosamente construida mediante el uso de criterios estadísticos, y tanto los resultados de ajuste del modelo como los resultados de los índices de precisión sean adecuados, carece de validez si no cuenta con un significado meteorológico.

Por tanto, es necesario evaluar si las variables seleccionadas cumplen la metodología basada en la inclusión en el modelo de diferentes "*ingredientes*" que permitan conocer si el granizo puede considerarse o *de alta o baja energía*.

En el capítulo 6 de esta Memoria, se establecen las características generales de la estructura que presentan las tormentas con granizo cuando son observadas mediante radares de la banda C y S. Para ello se determinan las *variables radar* que mejor explican la varianza total en los datos de *energía cinética*, aglutinadas en 3 grandes grupos o componentes principales, que son capaces de explicar el 69.72 % de la varianza total (tablas 6.28 y 6.29 del capítulo 6):

- Variables relativas a la **cantidad de agua disponible** y la **estructura vertical** de la tormenta.
- Variables relativas a las **dimensiones** de la tormenta y a la **dinámica temporal**.
- Variables *altura de la máxima reflectividad e inclinación* de la célula.

Para intentar establecer un algoritmo que combine *variables radar* que permitan estimar la *energía cinética* de la precipitación en esos dos grupos fijados, como se constata a lo largo de los apartados anteriores, se construye una ecuación logística con tres *variables radar*, que llegan a explicar un 61.2 % de la varianza (tabla 7.4). Por tanto, el método permite establecer el pronóstico en tiempo real de la *energía cinética* que tienen las precipitaciones de granizo asociadas a las tormentas.

Así, por un lado, con radares convencionales de la banda S se puede realizar una estimación de la *energía cinética* estableciendo una separación entre aquellas tormentas con precipitaciones de granizo de *energía moderada o alta* (mayor de 20 J m^{-2}) y aquellas que no llegan a dicho umbral. Es posible para las tormentas del sur de Mendoza y probablemente pueda ser extrapolado a otras zonas.

Por otro lado, no se puede alcanzar valores más elevados de varianza explicada y, en consecuencia, el método tiene una limitación en sus pronósticos.

La primera de las variables introducida en el modelo es el *VIL*, que estima la cantidad de agua líquida distribuida verticalmente en el interior de una célula de tormenta. Es decir, se trata de uno de los ingredientes más importantes que interviene en los mecanismos de crecimiento del granizo. Como se observa en el Capítulo 6 (apartado 6.3.2.5), esta variable se encuentra dentro de aquellas incorporadas a la primera componente principal. En el modelo logístico se le atribuye un *peso* elevado (el mayor de todos en términos comparativos), es decir, el modelo la selecciona como la principal variable predictora.

La segunda variable es la altura del *techo* de la tormenta. El coeficiente beta de signo negativo y la inversa de dicha variable hacen que el modelo indique que cuanto más alto sea su valor, mayor será la *energía cinética* de la precipitación de granizo. Esto es consistente con los procesos de crecimiento ya que cuanto más recorrido tengan las piedras de granizo a través de un ambiente favorable (con concentraciones elevadas de agua líquida), mayor serán los tamaños alcanzados. Esta variable *techo* señala la contribución del segundo ingrediente necesario para la formación de granizo de alta energía y muestra la importancia que tiene la distancia recorrida por la distribución de piedras de granizo en su recorrido vertical.

Finalmente, la ecuación logística se completa con la incorporación de la variable *altura de la máxima reflectividad*. El modelo indica que cuanto mayor sea el valor de esta variable, menor será la probabilidad de que precipite *granizo de alta energía*. Esto implica que, en una tormenta madura, cuando la acumulación de los hidrometeoros se produce en cotas bajas, la precipitación que alcanza el suelo es elevada. Sin embargo cuando esta zona de acumulación se encuentra a cotas medias o elevadas, la corriente ascensional todavía es capaz de evitar que al menos una parte de la precipitación alcance el suelo. Esto suele ocurrir cuando la tormenta, o bien no tiene demasiado granizo de tamaño grande, o bien cuando aún no ha alcanzado su intervalo de mayor intensidad. Por tanto, el modelo la selecciona como la tercera y última variable predictora.

En resumen, los resultados muestran que el radar discrimina de forma razonable entre tormentas que tienen/no tienen asociadas precipitaciones de granizo de *alta energía* a partir de tres variables. El modelo las combina formando un algoritmo que tiene en cuenta la estimación del contenido vertical de agua líquida que contiene la tormenta, el recorrido que efectúan los hidrometeoros en su interior y la altura a la que se produce una mayor acumulación de los mismos. Por tanto las variables incluidas en la ecuación logística, pueden ser agrupadas en dos tipos, las que incorporan los aspectos microfísicos (concentración de gotas líquidas subfundidas y el tamaño de los hidrometeoros) y la estructura vertical de la tormenta (zona de crecimiento y altura a la que se encuentra la parte de la tormenta con mayor número de hidrometeoros). Estos serían los ingredientes necesarios, y las variables incluidas en el modelo se seleccionan como variables eficaces de pronóstico de los mismos.

Sin embargo, no es posible mejorar los resultados de la ecuación logística mediante la inclusión de variables ligadas a las otras componentes. De hecho, el modelo *stepwise* no selecciona ninguna variable ligada a las componentes 2, 4 y 5 (tabla 6.34 del capítulo 6), determinadas por las dimensiones de la tormenta y la dinámica temporal de las variables en la misma (su fase dentro del ciclo de vida). Esto puede ser debido, en buena parte, a que las variables asignadas a estas componentes son *variables de diagnóstico*, es decir, sólo caracterizan y no presentan un comportamiento adecuado para ser buenas pronosticadoras de la *energía cinética* de las precipitaciones de granizo.

7.4. APLICACIÓN EN LA RED DE GRANIZÓMETROS DE ZARAGOZA

7.4.1. LIMITACIONES DE LOS RADARES DE LA BANDA C EN LA ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA DE LAS PRECIPITACIONES

En el apartado 2.2.3 de la presente Memoria de Tesis Doctoral, se señalan las diferencias encontradas entre los radares de la banda S y los radares de la banda C, especialmente en lo que a comportamiento de la reflectividad se refiere. Diferentes estudios muestran que los blancos con diámetros superiores a 1.5 cm presentan una reflectividad inferior a la obtenida para dispersores de menor tamaño. En las figuras 2.27 y 2.28 del capítulo 2 se observa esa atenuación de la reflectividad. Por tanto, las características de este tipo de radares hacen presuponer que no será posible establecer una relación en términos de probabilidad entre determinadas *variables radar* y la presencia de precipitación de granizo de elevada energía similar a la ya obtenida para los radares de la banda S.

Además, en la tabla 6.10 del capítulo anterior, se aprecia cómo la media de los *diámetros máximos* para aquellos granizómetros que cuentan con un valor de *energía cinética* igual o inferior a 20 J m^{-2} es de 9.99 mm, llegando a alcanzar valores máximos de 15.85 mm. Por otro lado, el intervalo de valores con energía superior a los 20 J m^{-2} presenta una media de 17.18 mm. Es decir, los grupos de energía establecidos, presentan unos *diámetros máximos* medios bastante diferentes, incluyendo el rango de comportamiento no lineal de la reflectividad (a partir de 15 mm) en ambos grupos, pero especialmente en el de *granizo de alta energía*. Este hecho puede dar lugar a que granizadas de *alta energía*, y con diámetros medios de granizo elevados presenten reflectividades inferiores a granizadas de *baja energía*.

Por lo tanto, la discriminación entre estas clases utilizando radares de la banda C, no es viable debido a las propias limitaciones instrumentales de los radares que operan en esta longitud de onda.

Los radares de la banda S, tampoco están exentos de un comportamiento no lineal de la reflectividad, sin embargo, el mismo comienza a partir de valores de 3.5 cm de diámetro como se aprecia en la figura 2.28 del capítulo 2. En el área de estudio de Mendoza la media de diámetros en la clase de *baja energía* es de 11.49 mm frente a los 26.44 mm de la clase de *alta energía*. Por tanto, ninguno de los grupos se encuentra en la zona de comportamiento no lineal (ya que los valores son inferiores), y solo afecta a las piedras de granizo de mayor tamaño del segundo grupo. Se puede concluir que los datos derivados de este tipo de radares sí son susceptibles de proporcionar relaciones adecuadas de las piedras de granizo con el tamaño máximo de las mismas, como se ha constatado a lo largo del presente capítulo.

Por otro lado, en el capítulo 5, se analiza el ajuste a una distribución bimodal de los datos de *energía cinética* de las redes de granizómetros tanto de Zaragoza como de Mendoza. Los datos de Zaragoza, presentan un *breakpoint* para valores por encima de 3 cm de diámetro. En el oasis sur de Mendoza, no se constata el ajuste de los datos a este tipo de distribución bimodal, no detectando por tanto, un cambio en la pendiente de la distribución de los tamaños de granizo. Este hecho añade más incertidumbre a los datos derivados de los granizómetros en Zaragoza, que unido al comportamiento no

lineal del radar de la banda C, hace teóricamente inviable la obtención de un modelo de *energía cinética* que dé lugar a resultados satisfactorios.

Resumiendo, los datos de Argentina, tanto los proporcionados por el radar, como los proporcionados por los granizómetros, son más representativos, y conducen a los resultados satisfactorios del presente capítulo.

7.4.2. BASE DE DATOS Y METODOLOGÍA

Al igual que en el capítulo anterior, los datos utilizados se corresponden con los 119 granizómetros de la red de Zaragoza seleccionados durante las campañas experimentales 2006 y 2007 y sus correspondientes variables del radar de la banda C situado en Zaragoza. Estos datos son analizados a lo largo del apartado 6.3.1 del capítulo anterior para estudiar la relación entre las variables.

Continuando con el umbral de *energía cinética* de 20 J m^{-2} para diferenciar dos clases, se observa que de los 119 casos, existen 96 en los que la *energía cinética* registrada es inferior a dicho umbral (apartado 6.3.1.2). El tamaño de las dos clases es muy diferente (96 casos frente a 23). De igual modo que para Mendoza, la nueva variable categórica asigna el valor 1 a los granizómetros con valores de *energía cinética* superiores a 20 J m^{-2} y el valor 0 a los inferiores.

7.4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.4.3.1. Construcción del modelo logístico de energía

Constatando lo anticipado desde el punto de vista teórico, los resultados del ajuste del modelo, así como los obtenidos en las tablas de contingencia son muy deficientes.

La metodología aplicada es la misma que la detallada para la provincia de Mendoza. Es decir, se emplea el *método stepwise* de incorporación de variables utilizando el *estadístico de Wald* para guiar la incorporación de las mismas en de la ecuación. El modelo sólo realiza una iteración, seleccionando la variable *raíz cuadrada del VIL acumulado*. Esta también es la primera variable seleccionada en el modelo de energía construido para Mendoza. El ajuste global del modelo evaluado a través del *estadístico de Hosmer y Lemeshow*, señala unos resultados poco satisfactorios. Igualmente, los estadísticos *R cuadrado de Cox y Snell* y la *R cuadrado de Nagelkerke* presentan valores de 0.091 y 0.146 sobre 1, mostrando un ajuste deficiente.

7.4.3.2. Evaluación del modelo logístico de energía

La tabla de contingencia presenta unos valores muy elevados de casos perdidos. Tan sólo el 79.8 % de los datos clasificados en la tabla es correcto. Este resultado es especialmente negativo cuando se evalúa el porcentaje de granizo precipitado de *alta energía* correctamente pronosticado, ya que alcanza tan sólo el 13 %. Es decir, el modelo de predicción no pronostica granizo de *alta energía* y este sí sucede. Este hecho es consistente con la presencia de errores debidos al coeficiente de atenuación en este tipo de radares, para tamaños de granizo severo. Con esta tabla de contingencia, la probabilidad de detección es inferior al 20 % de los casos.

Los resultados alcanzados no mejoran con la inclusión de todas las *variables radar* en la ecuación logística. Aunque la *R cuadrado de Cox y Snell* aumenta ligeramente, las *tablas de contingencia* no varían.

Así, como se apunta desde el punto de vista teórico, la implementación de modelos de predicción de energía cinética con este tipo de radares resulta inviable.

7.5. BIBLIOGRAFÍA

- Angus, P.J., Rasmussen, S. and Seiter, K., 1988. Short-Term prediction of thunderstorm probability and intensity by screening observational and derived predictors, *Reprints AMS 15th Conference on Severe Local Storms*, Baltimore, MA., 368 – 371.
- Billet, J., Delisi, M., Smith, B. and Gates, C., 1997. Use of regression techniques to predict hail size and the probability of large hail. *Wea. Forecasting*, **12**, 154 – 164.
- Brelsford, W.M. and Jones, R.H., 1967. Estimating probabilities. *Mon. Wea. Rev.*, **95**, 570 – 576.
- Carrasco, J.L. and Hernán, M.A., 1993. Estadística multivariante en las ciencias de la vida: fundamentos, métodos y aplicación. Ed. Ciencia 3 S.L., Madrid, 363 pp.
- Crosby, D.S., Ferraro, R.R. and Wu, H., 1995. Estimating the probability of rain in a SSM/I FOV using logistic regression. *J. of Appl. Met.*, **34**, 2476 – 2480.
- Doswell, C.A., Brooks, H.E. and Maddox, R.A., 1996. Flash flood forecasting. an ingredients-based methodology. *Wea. Forecast*, **11**, 560 – 581.
- Doswell, C. A. III, and D. M. Schultz, 2006. On the use of indices and parameters in forecasting severe storms. *Electronic J. Severe Storms Meteor.*, **1**, 1 – 14.
- Dubrovsky, M., 1994. Probabilistic prediction of thunderstorm occurrence, *Meteorologické Zpravy*, **47**, 103 – 112.
- Hair, F.J. Jr., Anderson, R.E., Tatham, R.L. and Black, W.C., 1999. *Análisis multivariante*. Prentice Hall, Madrid, 799 pp.
- Hilliker, J.L. and Fritsch, J.M., 1999. An observations-based statistical system for warm-season hourly probabilistic forecasts of low ceiling at the San Francisco International Airport. *J. Appl. Meteor.*, **38**, 1692 – 1705.
- Hosmer, D.W. and Lemeshow, S., 1989. *Applied logistic regression*. John Wiley & Sons, New York, 307 pp.
- Jones, R.H., 1968. A nonlinear model for estimating probabilities of K events. *Mon. Wea. Rev.*, **96**, 383 – 384.
- López, L., García-Ortega, E., and Sánchez, J.L., 2007. A short-term forecast model for hail. *Atmos. Res.*, **83**, 176 – 184.
- Sánchez, J.L., Fraile, R., de la Fuente, M.T. and Marcos, J.L., 1998a. Discriminant Analysis Applied to the forecasting of thunderstorms, *Met. and Atm. Phys.*, **68**, 187 – 195.
- Sánchez, J.L., Marcos, J.L., De la Fuente, M.T. and Castro, A., 1998b. A logistic regression model applied to short-term forecast of hail risk. *Physics and Chemistry of the Earth*, **23**, 645 – 648.
- Sánchez, J.L., Dessens, J., López, L. and Berthet, C. 2007. Characterizing preconvective conditions in southern France to improve ANELFA forecasts. *4th European Conf. On Severe Storms, Trieste, Italy*, 10 – 14 September 2007.
- Sánchez, J.L., López, L., Bustos C., Marcos, J.L. and García-Ortega E., 2008. Short-term forecast of thunderstorms in Argentina. *Atmos. Res.*, **88**, 36 – 45.
- Sánchez, J.L., Marcos, J.L., Dessens, J., López, L., Bustos, C. and García-Ortega, E., 2009. Assessing sounding-derived parameters as storm predictors in different latitudes. *Atmos. Res.*, **93**, 446 – 456.
- Schmeits, M.J., Kok, K.J. and Daan H.P. Vorgeleang, 2005. Probabilistic Forecasting of (Severe) Thunderstorms in Netherlands Using Model Output Statistics, *Wea. Forecasting*, **20**, 134 – 148.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

El desarrollo de esta Tesis Doctoral ha dado lugar a las siguientes conclusiones:

- En cuanto al objetivo de caracterizar las precipitaciones de granizo en distintas latitudes del mundo y proceder a su comparación:
 1. En la red de granizómetros de Zaragoza, los valores máximos encontrados en una sola placa son: un *número de impactos* de 9222 impactos m^{-2} , una *masa de hielo* de 4.0 kg m^{-2} , una *energía cinética* de 819.97 J m^{-2} y un *diámetro máximo* de 4.30 cm.
 2. Los valores máximos registrados en un solo granizómetro de la red del oasis sur de Mendoza son: un *número de impactos* de 9924 impactos m^{-2} , una *masa de hielo* de 8.7 kg m^{-2} , una *energía cinética* de 2.6 kJ m^{-2} y un *diámetro máximo* de 4.95 cm. Se observa que todos estos valores son superiores a los de la red de Zaragoza.
 3. Los *espectros de tamaño* del granizo en todas las redes de granizómetros analizadas se ajustan a una distribución exponencial cuya pendiente no está afectada por el tamaño de las clases de diámetro elegido.
 4. Los *diámetros medios característicos* se estiman a partir de la pendiente de las distribuciones exponenciales. Comparando los resultados obtenidos en las tres áreas de estudio, los valores menores se encuentran en las redes de Francia, en torno a 8 mm; los mayores, en las redes de Mendoza, superando los 9 mm; y los intermedios, en el Valle Medio del Ebro.
 5. Cuatro de las cinco redes analizadas presentan una distribución bimodal, observándose un *punto de ruptura* o *breakpoint* que varía entre 2 y 3.7 cm. Ese carácter bimodal se atribuye a que puede existir una diferencia entre los procesos microfísicos de crecimiento del granizo en las piedras según alcancen tamaños grandes o pequeños.
 6. La *energía total diaria* medida en las cinco redes de granizómetros del Valle Medio del Ebro y de Mendoza se ajusta a una *distribución log-normal*. Los valores medios de *energía total diaria* que caracterizan dichas distribuciones son menores en las redes del Valle Medio del Ebro (11.78 J m^{-2} en la red de Lérida), y mayores en las redes argentinas (121.62 J m^{-2} en la red del oasis noreste). Muy probablemente estos valores medios son característicos de cada zona y consecuencia de su climatología.
- En lo referente al objetivo de seleccionar y agrupar las *variables radar* que expliquen los valores de la *energía cinética* del granizo en el suelo:
 1. Las relaciones lineales y potenciales encontradas entre la *energía cinética* medida en cada granizómetro y la *reflectividad puntual máxima* de la tormenta que precipita sobre él, no consiguen explicar, en el mejor de los casos, más allá de 42 % de la varianza. Es por ello que se hace necesario construir nuevas funciones que incluyan otras *variables radar*.
 2. La *energía cinética* y el *diámetro máximo* medidos en cada granizómetro están correlacionados con algunas de las *variables radar*. En el caso de la banda S utilizada en Mendoza se obtienen mayor número de correlaciones significativas y con coeficientes de correlación más altos que cuando se emplea el de la banda C en Zaragoza.
 3. A través del *análisis cluster* se aglutinan las *variables radar* en cuatro grupos que se interpretan como las dimensiones espaciales de la tormenta, su dinámica temporal, la cantidad de agua disponible en el interior de la célula, y, por último su estructura vertical. En el caso de Mendoza, estos grupos resultan estar menos jerarquizados que en Zaragoza.

4. Al aplicar el *análisis de componentes principales (ACP)* al conjunto formado por las *variables radar* obtenidas de cada célula que dan lugar a granizo y su correspondiente *energía cinética* registrada sobre el granizómetro en el que se produce la precipitación, se encuentra que:
 - En la muestra de Zaragoza la componente que más varianza explica es la referida a las dimensiones de la tormenta, seguida por su dinámica temporal, la estructura vertical y por último, la cantidad de agua disponible. Con esas cuatro componentes se llega a explicar el 78 % de la varianza acumulada. La variable *energía cinética* está incluida en la cuarta componente.
 - En la red del oasis sur de Mendoza, las variables incluidas en la primera componente (que explican el 48 % de la varianza) son aquellas relacionadas con la cantidad de agua disponible y la estructura vertical y además está asociada a ella la *energía cinética*. La segunda componente incorpora las variables referidas a las dimensiones de la tormenta y su dinámica temporal, aportando un 13 % de la varianza. Con las cinco componentes extraídas se alcanza el 80 % de la varianza explicada.
 5. Realizando el ACP sobre el conjunto de las *variables radar* y, en este caso, añadiendo el *diámetro máximo* medido en el suelo, los resultados encontrados muestran agrupaciones idénticas al caso anterior, siendo las varianzas explicadas del 77 % para el caso del radar de la banda C, y del 80 % para el de la banda S.
 6. Para intentar profundizar en las agrupaciones de las *variables radar* y aquellas otras que mejor explican la varianza de las bases de datos, se procede a clasificar la muestra total en *tormentas de baja energía* o de *alta energía* (según superen o no el umbral de 20 J m^{-2}). Los resultados encontrados muestran:
 - Para el caso de la banda C y con la red de granizómetros de Zaragoza, se obtienen varianzas explicadas del 75.6 % para la clase de *baja energía* y del 86.9 % para la de *alta energía*, ambas extrayendo 4 componentes principales.
 - Para el caso de la banda S y con la red de granizómetros del oasis sur de Mendoza, se obtienen varianzas explicadas del 81.5 % con 6 componentes principales en el caso de la clase de *baja energía* y del 80.2 % con 5 componentes principales en el caso de *alta energía*.
 7. Resultados análogos se encuentran al dividir la muestra según el *diámetro máximo*, utilizando un umbral de 15 mm (granizo de *diámetro grande* o de *diámetro pequeño*), si bien en este caso la varianza explicada aumenta respecto a la obtenida en las clases de *energía*, llegando a ser del 90.7 % en la clase de *diámetro grande* de Zaragoza y del 82.0 % en la de Mendoza.
 8. Los radares de la banda S son más apropiados para establecer relaciones entre las *variables radar* y la *energía cinética* en el suelo, ya que consiguen explicar un porcentaje de la varianza más alto, siendo aún mayor, para la clase de *alta energía*.
- Respecto al desarrollo de algoritmos para el pronóstico de la *energía cinética* a partir de *variables radar*:
 1. Se construye un modelo de *regresión logística* haciendo uso del método de incorporación de variables *stepwise*. Al aplicarlo sobre la base de datos obtenida en el oasis sur de Mendoza, utilizando su red de granizómetros y el radar de la banda S, el modelo se construye tras tres iteraciones que incluyen finalmente tres *variables radar*: el *VIL*, la *altura de la máxima reflectividad* (su raíz cuadrada) y el *techo de la tormenta* (su inversa). Estas tres variables hacen referencia a dos de los ingredientes necesarios para la formación de granizo: la cantidad de agua disponible y la estructura vertical de la tormenta.
 2. La interpretación de los resultados señala que cuanto más *agua líquida disponible* presente, cuanto mayor sea el *techo de la tormenta* y cuanto más baja esté la *altura de la máxima*

reflectividad, mayor será la probabilidad de que una tormenta produzca granizo de *alta energía*.

3. Los índices de precisión alcanzados muestran una probabilidad de detección del 85.7 % y un ratio de falsas de alarmas del 14.3 %. La varianza explicada es del 61.2 %, no pudiendo aumentar dicho valor al incluir más variables.
4. Al realizar un análisis similar al anterior con los datos de Zaragoza y del radar de la banda C, los resultados obtenidos apenas consiguen clasificar el 13 % de las situaciones en las que el granizo es de *alta energía*. Esto redundaría en la conclusión de que este tipo de longitud de onda no es el más apropiado para establecer relaciones entre la *energía cinética* del granizo en el suelo y las *variables radar*. Todo ello es consistente con la respuesta de esta banda al granizo de *diámetro grande* y por tanto más energético.

CONCLUSIONS

The development of this Doctoral Thesis has led to the following conclusions:

- In terms of the objective of characterising hail precipitation in different latitudes of the world and comparing them:
 1. In the hailpad network in Zaragoza, the maximum values found on a single pad are: a *number of hailstones* of 92222 impacts per m^{-2} , an *ice mass* of 4.0 kg m^{-2} , a *kinetic energy* of 819.97 J m^{-2} and a *maximum diameter* of 4.30 cm.
 2. The maximum values recorded by a single hailpad from the network in the southern oasis of Mendoza are: a *number of hailstones* of 9924 impacts per m^{-2} , an *ice mass* of 8.7 kg m^{-2} , a *kinetic energy* of 2.6 kJ m^{-2} and a *maximum diameter* of 4.95 cm. It may be seen that all of these values are higher than those for the network in Zaragoza.
 3. The *hailstone size spectra* for all of the hailpad networks analysed fit an exponential distribution, whose slope is not affected by the size of the selected diameter classification.
 4. The *characteristic mean diameters* are estimated according to the slope of the exponential distributions. Comparing the results obtained in the three study zones, the lowest values are found in the networks in France, around 8 mm; the highest, in the networks in Mendoza, which higher than 9 mm; and the medium sizes, in the mid-Ebro Valley.
 5. Four out of the five networks analysed have a bimodal distribution, with a *breakpoint* that varies between 2 and 3.7 cm. This bimodal character is attributed to the fact that there may be a difference between the microphysical processes of hail growth in the hailstones depending on whether they achieve large or small sizes.
 6. The *total daily energy* measured in the five hailpad networks in the mid-Ebro Valley and in Mendoza fit a *log-normal distribution*. The mean values for the *total daily energy* that characterise these distributions are lower in the networks from the mid-Ebro Valley (11.78 J m^{-2} in the network in Lérida), and higher in the Argentinean networks (121.62 J m^{-2} in the network in the northeast oasis). In all likelihood, these mean values are characteristic of each zone and a consequence of their climatology.
- With regard to the objective of selecting and grouping the *radar variables* that explain the values of the *kinetic energy* of hail on the ground:
 1. The linear and potential relationships found between the *kinetic energy* measured by each hailpad and the *maximum specific reflectivity* of the storm precipitating on it are not able to explain, in the best case, more than 42% of the variance. For this reason, it is necessary to construct new functions that include other *radar variables*.
 2. The *kinetic energy* and the *maximum diameter* measured on each hailpad are correlated with some of the *radar variables*. In the case of the S-band used in Mendoza, a higher number of significant correlations are obtained, with higher correlation coefficients than when the C-band is used in Zaragoza.
 3. Using a *cluster analysis*, the *radar variables* are combined in four groups that are interpreted as the spatial dimensions of the storm, its temporal dynamics, the amount of available water inside the cell, and finally, its vertical structure. In the case of Mendoza, these groups are less hierarchized than in Zaragoza.
 4. On applying the *principal components analysis (PCA)* to the information pertaining to the *radar variables* obtained from each cell that led to hail and their corresponding *kinetic energy* recorded by the hailpad where the precipitation occurred, we find that:

- In the sample from Zaragoza, the component that explains the most variance refers to the dimensions of the storm, followed by its temporal dynamics, the vertical structure, and finally the amount of available water. These four components explain 78% of the accumulated variance. The *kinetic energy* variable is included in the fourth component.
 - In the network in the southern oasis in Mendoza, the variables included in the first component (which explain 48% of the variance) are those that are related to the amount of available water and the vertical structure, as well as the *kinetic energy*. The second component incorporates the variables that refer to the dimensions of the storm and its temporal dynamics, providing 13% of the variance. 80% of the total explained variance is obtained from the five components that were extracted.
5. Carrying out the PCA on the series of *radar variables*, and, in this case, adding the *maximum diameter* measured on the ground, the results reveal identical groupings to the previous case, explaining 77% of the variance for the C-band radar, and 80% of the variance for the S-band radar.
 6. In order to explore in greater detail the groupings of the *radar variables* and those that best explain the variance of the databases, the total sample is classified into *low energy* or *high energy storms* (depending on whether they exceed the threshold of 20 J m^{-2} or not). The results found show:
 - In the case of the C-band radar and the hailpad network in Zaragoza, explained variances of 75.6% are obtained for the *low energy* class, and 86.9% for the *high energy* class, with both extracting 4 principal components.
 - In the case of the S-band radar and the hailpad network in the south oasis of Mendoza, explained variances of 81.5% are obtained with 6 principal components in the case of the *low energy* class, and 80.2% with 5 principal components in the *high energy* class.
 7. Similar results are found on dividing the sample according to the *maximum diameter*, using a threshold of 15 mm (*large diameter* or *small diameter* hail). However, in this case the explained variance rises with respect to that obtained in the *energy* classes, reaching 90.7% in the case of *large diameter* hail for Zaragoza, and 82.0% for Mendoza.
 8. The S-band radars are more suitable for establishing relationships between the *radar variables* and *kinetic energy* on the ground, as they are able to explain a higher percentage of variance, an even higher for the *high energy* class.
- With respect to the development of algorithms for predicting the *kinetic energy* based on *radar variables*:
 1. A *logistical regression* model is constructed using the *stepwise* method to include the variables. On applying it to the database obtained from the south oasis of Mendoza, using its hailpad network and S-band radar, the model is constructed after three iterations, which finally include three *radar variables*: the *VIL*, the *maximum reflectivity height* (its square root), and the *top* of the storm (its inverse). These three variables refer to two of the ingredients necessary for the formation of hail: the amount of available water and the vertical structure of the storm.
 2. The interpretation of the results indicates that the more *available liquid water* present, the higher the *top* of the storm and the lower the *maximum reflectivity height*, the higher the probability of storm producing *high energy* hail.
 3. The precision indices obtained indicate a probability of detection of 85.7% and a false alarm ratio of 14.3%. The explained variance is 61.2%, and this value cannot be increased by including more variables.

4. On carrying out a similar analysis to the above with the data from Zaragoza and the C-band radar, the results obtained are barely capable of classifying 13% of the situations in which the hail belongs to the *high energy* class. This leads to the conclusion that this type of wavelength is not the most appropriate for establishing relationships between the *kinetic energy* of the hail on the ground and the *radar variables*. All of this is consistent with the response of the S-band to *large diameter* hail, and therefore the most energetic.

GLOSARIOS

GLOSARIO DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1. Número estimado de días al año con condiciones favorables para el desarrollo de tormentas severas (Fuente: Brooks, 2004).

CAPÍTULO 2

Figura 2.1. Esquema de un granizómetro. (Fuente: Fraile et al., 1992)

Figura 2.2. Granizómetro de la red de Lérida. (Fuente: ADV Terres de Ponent)

Figura 2.3. Granizómetro de la red de Zaragoza.

Figura 2.4. Placa impactada después de su entintado.

Figura 2.5. Dimensiones de una placa de un granizómetro de la red de Zaragoza.

Figura 2.6. Estructura metálica de un granizómetro de la red de Zaragoza.

Figura 2.7. Zona de estudio y alcance del radar meteorológico en Aragón.

Figura 2.8. Relieve de Aragón.

Figura 2.9. Cuenca del Ebro. (Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro)

Figura 2.10. Temperatura media estival en Aragón.

Figura 2.11. Precipitación media estival en Aragón.

Figura 2.12. Ombrotipo de la ciudad de Zaragoza.

Figura 2.13. Ombrotipo de la ciudad de Teruel.

Figura 2.14. Rosa de los vientos en varias localidades de Aragón.

Figura 2.15. Mapa de localización de la red de granizómetros de Zaragoza.

Figura 2.16. Mapa de la red de granizómetros de Zaragoza sobre las curvas de nivel y superposición de la cuadrícula UTM, huso 30.

Figura 2.17. Mapa de localización de la red de granizómetros de Lérida.

Figura 2.18. Mapa de la red de granizómetros de Lérida sobre las curvas de nivel y superposición de la cuadrícula UTM, huso 31.

Figura 2.19. Distribución espacial del riesgo de granizo en Francia. (Fuente: Vinet, 2001)

Figura 2.20. Mapa de situación de las tres zonas adheridas a la ANELFA: en gris, la zona atlántica; en negro la zona interior y en blanco la zona mediterránea (Fuente: ANELFA)

Figura 2.21. Mapa de posición de los granizómetros en las tres áreas adheridas a la ANELFA (Fuente: ANELFA)

Figura 2.22. Mapa de situación de la provincia de Mendoza y sus departamentos. (Fuente: Sánchez et al., 2008)

Figura 2.23. Mapa físico y político de la provincia de Mendoza. (Fuente: DACC)

Figura 2.24. Esquema explicativo del viento Zonda. (Fuente: <http://www.tutiempo.net>)

Figura 2.25. Localización de los tres oasis agrícolas de la provincia de Mendoza y sus respectivas redes de granizómetros. (Fuente: DACC)

Figura 2.26. Esquema de los elementos que componen un radar meteorológico (Fuente: adaptado de Battan, 1973)

Figura 2.27. Representación de la *reflectividad* (a) y el *coeficiente de atenuación* (b) en función del diámetro del granizo comparando un radar de banda C y un radar de banda S, para una concentración de 1 g m^{-3} de granizo esférico seco de tamaño uniforme. (Fuente: Féral et al., 2003)

Figura 2.28. Representación de la *reflectividad* (a), el *coeficiente de atenuación* (b) y la diferencia de reflectividad banda S - banda C en función del diámetro del granizo comparando un radar de banda C y un radar de banda S, para una mezcla del 50 % de lluvia con una intensidad de 100 mm h^{-1} y del 50 % de granizo (50 %, seco; 35 %, cubierto con una capa de agua de 0.01 cm de espesor; y 15 %, cubierto con una capa de agua de 0.05 cm de espesor). (Fuente: Féral et al., 2003)

Figura 2.29. Instalación del radar meteorológico de Zaragoza.

Figura 2.30. Alcance del radar meteorológico de Zaragoza. Los puntos azules representan los granizómetros de la red de Zaragoza, dentro del alcance efectivo, y los puntos rojos representan los granizómetros de la red de Lérida, fuera del alcance efectivo.

Figura 2.31. Instalación del radar meteorológico de San Rafael. (Fuente: DACC)

Figura 2.32. *Curva de calibración* para el radar de la banda C de Zaragoza (azimut: 22.5º y elevación: 52.2º). (Fuente: López, 2003)

Figura 2.33. *Curva de calibración* para el radar de la banda S de San Rafael (azimut: 251.4º y elevación: 29.5º). (Fuente: DACC)

Figura 2.34. Comparación entre el campo de reflectividad de *TITAN* con los *ecos fijos* (izquierda) y sin los *ecos fijos* (derecha).

Figura 2.35. Esquema simplificado del funcionamiento del sistema radar con todos sus elementos. Los programas están representados por elipses y los ficheros de datos por rectángulos, todos ellos en inglés. (Fuente: López, 2003)

Figura 2.36. Esquema del dominio de *TITAN* utilizado en los presentes estudios. (Fuente: DACC)

Figura 2.37. Esquema del cálculo del campo *Composite* de *TITAN*. (Fuente: DACC)

CAPÍTULO 3

Figura 3.1. Campo del *factor de reflectividad* (dBZ) en *TITAN*. (Tormentas del 19 de julio de 2006 en Zaragoza sobre la red de granizómetros, puntos blancos).

Figura 3.2. Campo de la *probabilidad logística de granizo* (%) en *TITAN*. (Tormentas del 19 de julio de 2006 en Zaragoza sobre la red de granizómetros, puntos blancos).

Figura 3.3. Granizómetro de la red de Zaragoza.

Figura 3.4. Placa impactada antes de tratar.

Figura 3.5. Equipo necesario para la medida de los granizómetros.

Figura 3.6. Escaneado de la placa.

Figura 3.7. Pasos sucesivos en el tratamiento y medida de una placa impactada el 27 de junio de 2006 en la red de Zaragoza: a) placa entintada y escaneada sin tratar; b) placa filtrada por el *Image-Pro® Plus*; c) placa medida por el *Image-Pro® Plus*.

Figura 3.8. Medida de los impactos de granizo en cada placa de forma semiautomática con el programa *Image-Pro® Plus* supervisado por una persona.

Figura 3.9. Ejemplos de restricciones no cumplidas en el radar de Zaragoza: célula apantallada por otra célula entre ella misma y el radar (izquierda) e interferencia generalizada (derecha).

Figura 3.10. Ejemplo de selección de granizómetros situados en la parte central de la trayectoria de granizo de una tormenta en el Oasis Sur de Mendoza: campo de reflectividad (izquierda) y campo de probabilidad de granizo acumulada (derecha), ambas en la pantalla de visualización de *TITAN*.

CAPÍTULO 4

Figura 4.1. Frecuencia de la hora de aparición de los primeros ecos en los días de actividad convectiva en Aragón.

Figura 4.2. Frecuencia horaria del número de células existente en los días de actividad convectiva en Aragón.

Figura 4.3. Número de granizómetros afectados cada día de la campaña 2005 en la red de Zaragoza.

Figura 4.4. Número de granizómetros afectados cada día de la campaña 2006 en la red de Zaragoza.

Figura 4.5. Número de granizómetros afectados cada día de la campaña 2007 en la red de Zaragoza.

Figura 4.6. Número de granizómetros afectados cada día para el acumulado de las tres campañas experimentales (de 2005 a 2007) en la red de Zaragoza.

Figura 4.7. Número de granizómetros afectados cada mes durante las tres campañas experimentales (de 2005 a 2007) en la red de Zaragoza.

Figura 4.8. Número de granizómetros afectados cada mes para el acumulado de las tres campañas experimentales (de 2005 a 2007) en la red de Zaragoza.

Figura 4.9. Frecuencia diaria de superficie equivalente afectada por granizo durante las tres campañas experimentales (de 2005 a 2007) en la red de Zaragoza.

Figura 4.10. Mapas de municipios de Aragón afectados cada año por el granizo según la *verdad terreno* y el *modelo de probabilidad de granizo* para los años 2005, 2006 y 2007.

- Figuras 4.11. Mapas de municipios de Aragón afectados por el granizo según la *verdad terreno* y el *modelo de probabilidad de granizo* para el acumulado de los años 2005, 2006 y 2007.
- Figura 4.12. Distribución de los núcleos de población en Aragón. (López, 2003)
- Figura 4.13. Distribución de los núcleos de la densidad de población en 1998 en Aragón. (López, 2003)
- Figura 4.14. Distribución espacial del número placas impactadas y de las variables medidas en los granizómetros de la red de Zaragoza durante la campaña de 2005.
- Figura 4.15. Distribución espacial del número placas impactadas y de las variables medidas en los granizómetros de la red de Zaragoza durante la campaña de 2006.
- Figura 4.16. Distribución espacial del número placas impactadas y de las variables medidas en los granizómetros de la red de Zaragoza durante la campaña de 2007.
- Figura 4.17. Distribución espacial acumulada del número placas impactadas y de las variables medidas en los granizómetros de la red de Zaragoza durante las campañas de 2005, 2006 y 2007.
- Figura 4.18. Granizo y daños causados por el mismo el 16 de agosto de 2003 en Alcañíz (Teruel).
- Figura 4.19. Granizo y daños causados por el mismo el 19 de julio de 2006 en Maluenda (Zaragoza).
- Figura 4.20. Histograma de frecuencias de N , *número de impactos* por unidad de superficie (impac m^{-2}) registrados en los 413 granizómetros de la red de Zaragoza durante las campañas 2003 a 2007.
- Figura 4.21. Histograma de frecuencias de M , *masa de hielo precipitada* por unidad de superficie (g m^{-2}) registrada en los 413 granizómetros de la red de Zaragoza durante las campañas 2003 a 2007.
- Figura 4.22. Histograma de frecuencias de E_c , *energía cinética* por unidad de superficie (J m^{-2}) registrada en los 413 granizómetros de la red de Zaragoza durante las campañas 2003 a 2007.
- Figura 4.23. Histograma de frecuencias de D_{max} , *diámetro máximo* (mm) registrado en los 413 granizómetros de la red de Zaragoza durante las campañas 2003 a 2007.
- Figura 4.24. Porcentaje acumulado de D_{max} , *diámetro máximo* (mm) registrado en los 413 granizómetros de la red de Zaragoza durante las campañas 2003 a 2007.
- Figura 4.25. Histograma de frecuencias de N , *número de impactos* total acumulado diariamente (impactos) en 58 días en la red de Zaragoza durante las campañas 2003 a 2007.
- Figura 4.26. Histograma de frecuencias de M , *masa de hielo precipitada* total acumulada diariamente (toneladas) en 58 días en la red de Zaragoza durante las campañas 2003 a 2007.
- Figura 4.27. Histograma de frecuencias de E_c , *energía cinética* acumulada diariamente (kJ) en 58 días en la red de Zaragoza durante las campañas 2003 a 2007.
- Figura 4.28. Histograma de frecuencias de D_{max} , *diámetro máximo* diario (mm) en 58 días en la red de Zaragoza durante las campañas 2003 a 2007.
- Figura 4.29. Porcentaje acumulado de D_{max} , *diámetro máximo* diario (mm) en 58 días en la red de Zaragoza durante las campañas 2003 a 2007.
- Figura 4.30. Frecuencia de la hora de aparición de los primeros ecos en los días de actividad convectiva en el oasis sur de Mendoza desde 1983/84 hasta 2007/08 (Fuente: DACC).
- Figura 4.31. Frecuencia horaria de la actividad convectiva en el oasis sur de Mendoza (Fuente: DACC).
- Figura 4.32. Frecuencia de la *duración de la actividad convectiva* en el oasis sur de Mendoza (Fuente: DACC).
- Figura 4.33. Número de granizómetros afectados cada día de la campaña 2004/05 en el oasis sur.
- Figura 4.34. Número de granizómetros afectados cada día de la campaña 2005/06 en el oasis sur.
- Figura 4.35. Número de granizómetros afectados cada día de la campaña 2006/07 en el oasis sur.
- Figura 4.36. Número de granizómetros afectados cada día de la campaña 2007/08 en el oasis sur.
- Figura 4.37. Número de granizómetros afectados cada día para el acumulado de las cuatro campañas experimentales (2004/05 a 2007/08) en el oasis sur.
- Figura 4.38. Número de granizómetros afectados cada mes durante las cuatro campañas experimentales (de 2004/05 a 2007/08) en el oasis sur.
- Figura 4.39. Número de granizómetros afectados cada mes para el acumulado de las cuatro campañas experimentales (de 2004/05 a 2007/08) en el oasis sur.
- Figura 4.40. Frecuencia diaria de superficie equivalente afectada por granizo durante las cuatro campañas experimentales (de 2004/05 a 2007/08) en el oasis sur.
- Figura 4.41. Zonas de formación de las tormentas en el oasis sur de Mendoza y trayectorias habituales. (Fuente DACC)
- Figura 4.42. Mapa de porcentaje de daño máximo en el oasis sur de Mendoza durante 10 años (Fuente: DACC).
- Figura 4.43. Mapa de frecuencia de daños en el oasis sur de Mendoza durante 10 años (Fuente: DACC).

- Figura 4.44. Distribución espacial de las variables medidas en los granizómetros de la red del oasis sur de Mendoza durante la campaña de 2004/05.
- Figura 4.45. Distribución espacial de las variables medidas en los granizómetros de la red del oasis sur de Mendoza durante la campaña de 2005/06.
- Figura 4.46. Distribución espacial de las variables medidas en los granizómetros de la red del oasis sur de Mendoza durante la campaña de 2006/07.
- Figura 4.47. Distribución espacial de las variables medidas en los granizómetros de la red del oasis sur de Mendoza durante la campaña de 2007/08.
- Figura 4.48. Distribución espacial del acumulado de las variables medidas en los granizómetros de la red del oasis sur de Mendoza durante las cuatro campañas.
- Figura 4.49. Histograma de frecuencias de N , *número de impactos* por unidad de superficie (impac m^{-2}) registrados en los 750 granizómetros del oasis sur durante las campañas 2004/05 a 2007/08.
- Figura 4.50. Histograma de frecuencias de M , *masa de hielo precipitada* por unidad de superficie (g m^{-2}) registrada en los 750 granizómetros del oasis sur durante las campañas 2004/05 a 2007/08.
- Figura 4.51. Histograma de frecuencias de E_c , *energía cinética* por unidad de superficie (J m^{-2}) registrada en los 750 granizómetros del oasis sur durante las campañas 2004/05 a 2007/08.
- Figura 4.52. Histograma de frecuencias de D_{max} , *diámetro máximo* (mm) registrado en los 750 granizómetros del oasis sur durante las campañas 2004/05 a 2007/08.
- Figura 4.53. Porcentaje acumulado de D_{max} , *diámetro máximo* (mm) registrado en los 750 granizómetros del oasis sur durante las campañas 2004/05 a 2007/08.
- Figura 4.54. Histograma de frecuencias de N , *número de impactos* total acumulado diariamente (impactos) en 96 días en el oasis sur durante las campañas 2004/05 a 2007/08.
- Figura 4.55. Histograma de frecuencias de M , *masa de hielo precipitada* total acumulada diariamente (toneladas) en 96 días en el oasis sur durante las campañas 2004/05 a 2007/08.
- Figura 4.56. Histograma de frecuencias de E_c , *energía cinética* acumulada diariamente (kJ) en 96 días en el oasis sur durante las campañas 2004/05 a 2007/08.
- Figura 4.57. Histograma de frecuencias de D_{max} , *diámetro máximo* diario (mm) en 96 días en el oasis sur durante las campañas 2004/05 a 2007/08.
- Figura 4.58. Histograma de frecuencias de D_{max} , *diámetro máximo* diario (mm) en 96 días en el oasis sur durante las campañas 2004/05 a 2007/08.

CAPÍTULO 5 y traducción de las figuras en inglés de la publicación del anexo

- Figura 5.1. Distribuciones normales del *logaritmo de la energía diaria acumulada* de Zaragoza, Lérida, oasis noreste, centro y sur de Mendoza para el acumulado de las campañas experimentales disponibles.
- Figura 1. Histograma de frecuencias del porcentaje de impactos en cada clase de tamaños en la red de granizómetros de Valjalón (España).
- Figura 2. Histograma de frecuencias del porcentaje de impactos en cada clase de tamaños en la red de granizómetros de Lérida (España).
- Figura 3. Histograma de frecuencias del porcentaje de impactos en cada clase de tamaños en la red de granizómetros del área interior (Francia).
- Figura 4. Histograma de frecuencias del porcentaje de impactos en cada clase de tamaños en la red de granizómetros del área atlántica (Francia).
- Figura 5. Histograma de frecuencias del porcentaje de impactos en cada clase de tamaños en la red de granizómetros del área mediterránea (Francia).
- Figura 6. Histograma de frecuencias del porcentaje de impactos en cada clase de tamaños en la red de granizómetros del oasis centro (Argentina).
- Figura 7. Histograma de frecuencias del porcentaje de impactos en cada clase de tamaños en la red de granizómetros del oasis sur (Argentina).
- Figura 8. Histograma de frecuencias del porcentaje de impactos en cada clase de tamaños en la red de granizómetros del oasis noreste (Argentina).
- Figura 9. *Regresión por partes* para la red de granizómetros del oasis centro (Argentina).
- Figura 10. *Regresión por partes* para la red de granizómetros de Lérida (España).

Figura 11. *Distribución exponencial linealizada* antes del valor de *breakpoint* para la red de granizómetros del oasis centro (Argentina).

Figura 12. *Distribución exponencial linealizada* después del valor de *breakpoint* para la red de granizómetros del oasis centro (Argentina).

Figura 13. *Distribución exponencial linealizada* antes del valor de *breakpoint* para la red de granizómetros de Lérida (España).

Figura 14. *Distribución exponencial linealizada* después del valor de *breakpoint* para la red de granizómetros de Lérida (España).

CAPÍTULO 6

Figura 6.1. *Relaciones Z- $\dot{E}$ reales* para los espectros con $\dot{E} > 0.1 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Waldvogel et al., 1978a)

Figura 6.2. Resultados de las regresiones entre $E_c(h)$ (J m^{-2}) y Zh ($\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$), para los 119 datos con $E_c(h) > 0 \text{ J m}^{-2}$. Zaragoza 2006-07: a) y b) regresiones lineal y potencial respectivamente, c) y d) correlaciones lineales entre $E_c(h)$ (J m^{-2}) y $E_c(Z)$ (J m^{-2}) (ver explicación en el texto).

Figura 6.3. Resultados de las regresiones entre $E_c(h)$ (J m^{-2}) y Zh ($\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$), para los 100 datos con $E_c(h) > 0 \text{ J m}^{-2}$. Oasis sur 2005/06-2006/07: a) y b) regresiones lineal y potencial respectivamente, c) y d) correlaciones lineales entre $E_c(h)$ (J m^{-2}) y $E_c(Z)$ (J m^{-2}) (ver explicación en el texto).

Figura 6.4. Dendrograma obtenido a través del *análisis cluster* de las *variables radar seleccionadas*. Zaragoza 2006-07.

Figura 6.5. Dendrograma obtenido a través del *análisis cluster* de las *variables radar seleccionadas* y la *energía cinética* medida en cada granizómetro. Zaragoza 2006-07.

Figura 6.6. Dendrograma obtenido a través del *análisis cluster* de las *variables radar seleccionadas*. Oasis sur 2005/06-2006/07.

Figura 6.7. Dendrograma obtenido a través del *análisis cluster* de las *variables radar seleccionadas* y la *energía cinética* medida en cada granizómetro. Oasis sur 2005/06-2006/07.

GLOSARIO DE TABLAS

CAPÍTULO 2

- Tabla 2.1. Equivalencias de tamaño utilizadas en la interpretación de los datos obtenidos a partir de encuestas telefónicas.
- Tabla 2.2. Características de los granizómetros de las ocho redes.
- Tabla 2.3. Escala ANELFA de intensidad de granizadas. (Fuente: Dessens et al., 2006)
- Tabla 2.4. Tamaño y diámetro del granizo en relación a la escala TORRO (Fuente: Webb et al., 1986)
- Tabla 2.5. Escala TORRO de intensidad de granizadas (Fuente: Webb et al., 1986)
- Tabla 2.6. Tipos de radares meteorológicos según la frecuencia emitida (Battan, 1973)
- Tabla 2.7. Unidades en las que se miden las magnitudes más importantes del radar.
- Tabla 2.8. Valores de ejemplo de la reflectividad en función de la intensidad de precipitación. (Rogers and Yau, 1989)
- Tabla 2.9. Características del radar de la banda C utilizado en el área de estudio de Aragón.
- Tabla 2.10. Localización geográfica del radar meteorológico de Zaragoza.
- Tabla 2.11. Características del radar de la banda S utilizado en el área de estudio del Oasis Sur de Mendoza (San Rafael).
- Tabla 2.12. Localización geográfica del radar meteorológico de San Rafael.
- Tabla 2.13. Relaciones y parámetros utilizados en el proceso de calibración del radar de Zaragoza.
- Tabla 2.14. Relaciones y parámetros utilizados en el proceso de calibración del radar de San Rafael.
- Tabla 2.15. *Variables radar* extraídas de TITAN.

CAPÍTULO 3

- Tabla 3.1. Valores de *probabilidad de detección (POD, Probability of Detection)* y *ratio de falsas alarmas (FAR, False Alarm Ratio)* para los modelos creados con el *análisis discriminante* y la *regresión logística*. (López y Sánchez, 2008)
- Tabla 3.2. Datos principales obtenidos a través de la medida de los granizómetros.
- Tabla 3.3. Variables de radiosondeos utilizadas en el capítulo 4.
- Tabla 3.4. Número de granizómetros válidos en la base de datos de radar para cada red de granizómetros.
- Tabla 3.5. *Variables de granizómetros y variables radar seleccionadas* para la creación del modelo de estimación de energía.

CAPÍTULO 4

- Tabla 4.1. Duración media de las tormentas en el Valle del Ebro.
- Tabla 4.2. Número de granizómetros impactados mensualmente durante las cinco campañas experimentales de la red de granizómetros de Zaragoza (*en 2003 y 2004 se estaba efectuando la instalación de la red).
- Tabla 4.3. Porcentaje de primeras tormentas registradas en las distintas subzonas propuestas.
- Tabla 4.4. Valores característicos por granizómetro de las variables medidas en los 413 granizómetros impactados durante las cinco campañas experimentales (de 2003 a 2007) de Zaragoza.
- Tabla 4.5. Valores característicos por día de las variables medidas en los 58 días con granizómetros impactados durante las cinco campañas experimentales (de 2003 a 2007) de Zaragoza.
- Tabla 4.6. Parámetros de los radiosondeos obtenidos en los 38 días disponibles con granizómetros afectados en la red de granizómetros de Zaragoza desde 2003 a 2007.
- Tabla 4.7. Correlaciones bivariadas entre las variables de radiosondeo y las variables del granizómetro con *energía cinética* máxima cada día.
- Tabla 4.8. Número de granizómetros impactados mensualmente durante las cuatro campañas experimentales de la red de granizómetros del oasis sur de Mendoza.

- Tabla 4.9. Valores característicos por granizómetro de las variables medidas en los 750 granizómetros impactados durante las cuatro campañas experimentales (de 2004/05 a 2007/08) del oasis sur.
- Tabla 4.10. Valores característicos por día de las variables medidas en los 96 días con granizómetros impactados durante las cuatro campañas experimentales (de 2004/05 a 2007/08) del oasis sur.
- Tabla 4.11. Número de casos y valores medios y desviación estándar de las variables de radiosondeos utilizadas para comparar días de tormenta y de no tormenta por Sánchez et al. (2008).

CAPÍTULO 5 y traducción de las tablas en inglés de la publicación del anexo

- Tabla 5.1. Número de días de granizo que afecta a granizómetros y número de granizómetros impactados en cada campaña en la red de granizómetros de Zaragoza.
- Tabla 5.2. Número de días de granizo que afecta a granizómetros y número de granizómetros impactados en cada campaña en la red de granizómetros de Lérida.
- Tabla 5.3. Número de días de granizo que afecta a granizómetros y número de granizómetros impactados en cada campaña en la red de granizómetros del oasis noreste de Mendoza.
- Tabla 5.4. Número de días de granizo que afecta a granizómetros y número de granizómetros impactados en cada campaña en la red de granizómetros del oasis centro de Mendoza.
- Tabla 5.5. Número de días de granizo que afecta a granizómetros y número de granizómetros impactados en cada campaña en la red de granizómetros del oasis sur de Mendoza.
- Tabla 5.6. Intervalos de *logEdiaria* y de *Ediaria* más frecuentes para las distribuciones normales.
- Tabla 5.7. Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para contrastar la normalidad del *logaritmo de energía diaria acumulada* en las cinco redes de granizómetros.
- Tabla 5.8. Parámetros normales de la distribución de la *energía cinética diaria acumulada* en las cinco redes de granizómetros.
- Tabla 1. Datos disponibles en cada una de las 8 redes de granizómetros.
- Tabla 2. Resultados del test de Mann-Whitney en las redes de granizómetros argentinas.
- Tabla 3. Resultados del test de Kruskal-Wallis en las redes de granizómetros francesas.
- Tabla 4. Resultados del test de Kruskal-Wallis en las redes de granizómetros españolas.
- Tabla 5. Cálculo de los valores de *pendiente* (cm^{-1}) de la función de la *distribución exponencial* obtenida aplicando el *método de mínimos cuadrados* en las bases de datos españolas toman tres *umbrales* diferentes (5, 7 y 9 mm) y tres *clases de tamaño* diferentes (1 mm, 2 mm y los intervalos franceses).
- Tabla 6. Parámetros obtenidos de la distribución exponencial tras linealizar y aplicar el *método de mínimos cuadrados*.
- Tabla 7. Resultados obtenidos de la técnica de *regresión por partes*.
- Tabla 8. Datos y resultados obtenidos de la *distribución exponencial* antes del *breakpoint*.
- Tabla 9. Datos y resultados obtenidos de la *distribución exponencial* después del *breakpoint*.

CAPÍTULO 6

- Tabla 6.1. Características de cada ajuste propuesto para relacionar la *energía cinética medida en el granizómetro* $E_c(h)$ (J m^{-2}) y la *reflectividad puntual sobre dicho granizómetro* Z_h ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$), tomando diferentes umbrales. Zaragoza 2006-07.
- Tabla 6.2. Coeficientes de correlación entre la *energía cinética medida en el granizómetro* $E_c(h)$ (J m^{-2}) y la *energía cinética calculada a partir de la reflectividad* $E_c(Z)$ a través de cada una de las relaciones lineales y potenciales, tomando diferentes umbrales. Zaragoza 2006-07.
- Tabla 6.3. Características de cada ajuste propuesto para relacionar la *energía cinética medida en el granizómetro* $E_c(h)$ (J m^{-2}) y el *flujo de energía cinética medido en el granizómetro* $\dot{E}(h)$, $\dot{E}_{90}(h)$ y $\dot{E}_{40}(h)$ ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$) con la *reflectividad puntual sobre dicho granizómetro* Z_h ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$), asumiendo diferentes tiempos. Zaragoza 2006-07.

- Tabla 6.4. Coeficientes de correlación entre la *energía cinética medida en el granizómetro $E_c(h)$ ($J m^{-2}$)* y la *energía cinética calculada a partir de la reflectividad $E_c(Z)$* a través de cada una de las relaciones lineales y potenciales, asumiendo diferentes tiempos. Zaragoza 2006-07.
- Tabla 6.5. Características de cada ajuste propuesto para relacionar la *energía cinética medida en el granizómetro $E_c(h)$ ($J m^{-2}$)* y la *reflectividad puntual sobre dicho granizómetro Z_h ($mm^6 m^{-3}$)*, tomando diferentes umbrales. Oasis sur 2005/06-2006/07.
- Tabla 6.6. Coeficientes de correlación entre la *energía cinética medida en el granizómetro $E_c(h)$ ($J m^{-2}$)* y la *energía cinética calculada a partir de la reflectividad $E_c(Z)$* a través de cada una de las relaciones lineales y potenciales, tomando diferentes umbrales. Oasis sur 2005/06-2006/07.
- Tabla 6.7. Características de cada ajuste propuesto para relacionar la *energía cinética medida en el granizómetro $E_c(h)$ ($J m^{-2}$)* y el *flujo de energía cinética medido en el granizómetro $\dot{E}(h)$ ($J m^{-2} s^{-1}$)* con la *reflectividad puntual sobre dicho granizómetro Z_h ($mm^6 m^{-3}$)*. Oasis sur 2005/06-2006/07.
- Tabla 6.8. Coeficientes de correlación entre el *flujo de energía cinética medido en el granizómetro $\dot{E}(h)$ ($J m^{-2}$)* y la *energía cinética calculada a partir de la reflectividad $E_c(Z)$* a través de cada una de las relaciones lineales y potenciales, asumiendo diferentes tiempos. Oasis sur 2005/06-2006/07.
- Tabla 6.9. Estadísticos descriptivos de las *variables de granizómetros* y de las *variables radar*. Zaragoza 2006-07.
- Tabla 6.10. Resumen de los estadísticos descriptivos de las variables medidas en los granizómetros y de las variables radar para cada una de las clases de *energía cinética* con umbral en $20 J m^{-2}$. Zaragoza 2006-07.
- Tabla 6.11. Resultados de la *prueba T para la igualdad de medias* para las variables medidas en los granizómetros y las variables de radar para las dos clases de *energía cinética* con umbral en $20 J m^{-2}$. Zaragoza 2006-07.
- Tabla 6.12. Resumen de los estadísticos descriptivos de las variables medidas en los granizómetros y de las variables radar para cada una de las clases de *diámetro máximo* con umbral en 15 mm. Zaragoza 2006-07.
- Tabla 6.13. Resultados de la *prueba T para la igualdad de medias* para las variables medidas en los granizómetros y las variables de radar para las dos clases de *diámetro máximo* con umbral en 15 mm. Zaragoza 2006-07.
- Tabla 6.14. Correlaciones bivariadas entre la *energía cinética* del granizómetro y las *variables radar*. Zaragoza 2006-07.
- Tabla 6.15. Correlaciones bivariadas entre el *diámetro máximo* del granizómetro y las *variables radar*. Zaragoza 2006-07.
- Tabla 6.16. Varianza total explicada para las *variables radar seleccionadas*. Zaragoza 2006-07.
- Tabla 6.17. Matriz de componentes rotados para las *variables radar seleccionadas*. Zaragoza 2006-07.
- Tabla 6.18. Resumen de los resultados obtenidos en el ACP de los 119 granizómetros sin intervalos. Zaragoza 2006-07.
- Tabla 6.19. Varianza total explicada para las *variables radar seleccionadas + Energía cinética* para el intervalo de energía de $E_c < 20 J m^{-2}$. Zaragoza 2006-07.
- Tabla 6.20. Matriz de componentes rotados para las *variables radar seleccionadas + Energía cinética* para el intervalo de energía de $E_c < 20 J m^{-2}$. Zaragoza 2006-07.
- Tabla 6.21. Varianza total explicada para las *variables radar seleccionadas + Energía cinética* para el intervalo de energía de $E_c > 20 J m^{-2}$. Zaragoza 2006-07.
- Tabla 6.22. Matriz de componentes rotados para las *variables radar seleccionadas + Energía cinética* para el intervalo de energía de $E_c > 20 J m^{-2}$. Zaragoza 2006-07.
- Tabla 6.23. Resumen de los resultados obtenidos en el ACP tomando dos intervalos de *energía cinética (variables radar seleccionadas + E_c)*. Zaragoza 2006-07.
- Tabla 6.24. Resumen de los resultados obtenidos en el ACP tomando dos intervalos de *diámetro máximo (variables radar seleccionadas + E_c)*. Zaragoza 2006-07.
- Tabla 6.25. Estadísticos descriptivos de las *variables de granizómetros* y de las *variables radar*. Oasis sur 2005/06-2006/07.
- Tabla 6.26. Resumen de los estadísticos descriptivos de las variables medidas en los granizómetros y de las variables radar para cada una de las clases de *energía cinética* con umbral en $20 J m^{-2}$. Oasis sur 2005/06-2006/07.

- Tabla 6.27. Resultados de la *prueba T para la igualdad de medias* para las variables medidas en los granizómetros y las variables de radar para las dos clases de *energía cinética* con umbral en 20 J m^{-2} . Oasis sur 2005/06-2006/07.
- Tabla 6.28. Resumen de los estadísticos descriptivos de las variables medidas en los granizómetros y de las variables radar para cada una de las clases de *diámetro máximo* con umbral en 15 mm. Oasis sur 2005/06-2006/07.
- Tabla 6.29. Resultados de la *prueba T para la igualdad de medias* para las variables medidas en los granizómetros y las variables de radar para las dos clases de *diámetro máximo* con umbral en 15 mm. Oasis sur 2005/06-2006/07.
- Tabla 6.30. Correlaciones bivariadas entre la *energía cinética* del granizómetro y las *variables radar*. Oasis sur 2005/06-2006/07.
- Tabla 6.31. Correlaciones bivariadas entre el *diámetro máximo* del granizómetro y las *variables radar*. Oasis sur 2005/06-2006/07.
- Tabla 6.32. Varianza total explicada para las *variables radar seleccionadas*. Oasis sur 2005/06-2006/07.
- Tabla 6.33. Matriz de componentes rotados para las *variables radar seleccionadas*. Oasis sur 2005/06-2006/07.
- Tabla 6.34. Resumen de los resultados obtenidos en el ACP de los 100 granizómetros sin intervalos. Oasis sur 2005/06-2006/07.
- Tabla 6.35. Varianza total explicada para las *variables radar seleccionadas + Energía cinética* para el intervalo de energía de $E_c < 20 \text{ J/m}^2$. Oasis sur 2005/06-2006/07.
- Tabla 6.36. Matriz de componentes rotados para las *variables radar seleccionadas + Energía cinética* para el intervalo de energía de $E_c < 20 \text{ J/m}^2$. Oasis sur 2005/06-2006/07.
- Tabla 6.37. Varianza total explicada para las *variables radar seleccionadas + Energía cinética* para el intervalo de energía de $E_c > 20 \text{ J/m}^2$. Oasis sur 2005/06-2006/07.
- Tabla 6.38. Matriz de componentes rotados para las *variables radar seleccionadas + Energía cinética* para el intervalo de energía de $E_c > 20 \text{ J/m}^2$. Oasis sur 2005/06-2006/07.
- Tabla 6.39. Resumen de los resultados obtenidos en el ACP tomando dos intervalos de *energía cinética* (*variables radar seleccionadas + E_c*). Oasis sur 2005/06-2006/07.
- Tabla 6.40. Resumen de los resultados obtenidos en el ACP tomando dos intervalos de *diámetro máximo* (*variables radar seleccionadas + E_c*). Oasis sur 2005/06-2006/07.

CAPÍTULO 7

- Tabla 7.1. Valores alcanzados por el estadístico de puntuación para crear el modelo logístico de discriminación de *energía cinética* en el oasis sur de Mendoza.
- Tabla 7.2. *Test ómnibus* sobre los coeficientes del modelo logístico de *energía cinética* del oasis sur de Mendoza.
- Tabla 7.3. *Test de Hosmer y Lemeshow* para las diferentes iteraciones del modelo logístico de *energía cinética* del oasis sur de Mendoza.
- Tabla 7.4. Resumen de las iteraciones realizadas hasta la construcción del modelo logístico de *energía cinética* del oasis sur de Mendoza.
- Tabla 7.5. Variables en la ecuación del modelo logístico de *energía cinética* del oasis sur de Mendoza.
- Tabla 7.6. Tabla de contingencia para el modelo logístico de *energía cinética* del oasis sur de Mendoza.
- Tabla 7.7. Tabla de contingencia del modelo logístico de *energía cinética* del oasis sur de Mendoza.
- Tabla 7.8. Índices de precisión, siglas correspondientes a cada uno de los índices, cálculo a partir de la tabla de contingencia y resultados alcanzados por el modelo logístico de *energía cinética* del oasis sur de Mendoza.

GLOSARIO DE ECUACIONES

CAPÍTULO 2

Ecuación 2.1. Ecuación del radar meteorológico:

$$\bar{P}_r = \frac{\pi^3 c}{1024 \ln 2} \left[\frac{P_t \tau G^2 \theta^2}{\lambda^2} \right] \left[|K|^2 \frac{Z}{r^2} \right]$$

Ecuación 2.2. Cálculo de la ganancia axial de la antena del radar:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}$$

Ecuación 2.3. Cálculo del *término de refracción*:

$$K = \frac{(m^2 - 1)}{(m^2 + 2)}$$

Ecuación 2.4. Cálculo del *índice de refracción complejo de la esfera*:

$$m = n - i k$$

Ecuación 2.5. Cálculo de la *sección eficaz de retrodispersión*:

$$\sigma = 64 \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 r_0^6$$

Ecuación 2.6. Cálculo del *factor de reflectividad*:

$$Z = \sum_v D^6 = \int N(D) D^6 dD$$

Ecuación 2.7. Cálculo de la *reflectividad efectiva*:

$$Z_e(\text{dBZ}) = 10 \log_{10} \left(\frac{Z (\text{mm}^6 \text{m}^{-3})}{1 \text{ mm}^6 \text{m}^{-3}} \right)$$

Ecuación 2.8. Relación entre la *potencia recibida* y el *factor de reflectividad*:

$$10 \log \bar{P}_r = 10 \log Z - 20 \log r + C$$

Ecuación 2.9. Distribución de gotas por tamaños (Marshall y Palmer, 1948):

$$N(D) = N_0 e^{-\Lambda D}$$

Ecuación 2.10. Cálculo de la pendiente de la distribución de Marshall y Palmer (1948):

$$\Lambda(R) = 41 R^{-0.21}$$

Ecuación 2.11. Relación entre el *factor de reflectividad* y la *intensidad de precipitación*:

$$Z = N_0 \frac{6!}{\Lambda^7} = N_0 \frac{6!}{(41)^7} R^{1.47}$$

Ecuación 2.12. Relación empírica entre el *factor de reflectividad* y la *intensidad de precipitación* para la lluvia (Marshall y Palmer, 1948):

$$Z = 200 R^{1.6}$$

Ecuación 2.13. Relación empírica entre el *factor de reflectividad* y la *intensidad de precipitación* para la nieve:

$$Z = 2000 R^2$$

Ecuación 2.14. Cálculo del *tamaño eléctrico*:

$$a = \pi \frac{D}{\lambda}$$

Ecuación 2.15. Cálculo del VIL:

$$VIL = 3.44 \times 10^{-6} \sum_{Base}^{Techo} Z^{4/7} \Delta h$$

Ecuación 2.16. Relación entre el *factor de reflectividad* y la *masa de agua* (Dixon y Winner, 1993):

$$Z = 20300 M^{1.67}$$

CAPÍTULO 3

Ecuación 3.1. Cálculo del *diámetro* de una piedra de granizo a partir del *diámetro del impacto* dejado sobre la superficie del granizómetro:

$$Di = d_{imp} (k + m)$$

Ecuación 3.2. Cálculo de la *velocidad terminal de caída* de una piedra de granizo:

$$v_t = \sqrt{\frac{1}{3} \frac{\rho_h g Di}{\rho_a C_d}}$$

Ecuación 3.3. Cálculo de la *masa de hielo* de una piedra de granizo:

$$Mi = \rho \frac{4}{3} \pi \left(\frac{Di}{2} \right)^3$$

Ecuación 3.4. Cálculo de la *energía cinética* de una piedra de granizo:

$$Eci = \frac{1}{2} Mi v_t^2$$

CAPÍTULO 5 y traducción de las ecuaciones en inglés de la publicación del anexo

Ecuación 1. *Función exponencial* a la que se ajusta el espectro de tamaños de granizo:

$$N(D) = N_0 e^{-\Lambda D}$$

Ecuación 2. *Función exponencial* linealizada:

$$\ln N(D) = \ln N_0 - \Lambda D$$

Ecuación 3. Velocidad terminal de caída (Knight y Knight, 2001):

$$V_T = \left(\frac{4 g \rho_i D}{3 C_D \rho_a} \right)^{1/2}$$

Ecuación 4. Modelo de *regresión por partes* más simple:

$$y_i = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1 x_i + e_i & \text{para } x_i \leq \alpha \\ \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 (x_i - \alpha) + e_i & \text{para } x_i > \alpha \end{cases}$$

Ecuación 5. Modelo de *regresión por partes* más simple linealizado:

$$\log y = \begin{cases} \log N_0 + k_1 x & \text{para } x \leq bkpt \\ \log N_0 + k_1 x + k_2 (x - bkpt) & \text{para } x > bkpt \end{cases}$$

Ecuación 5.1. Función de densidad de probabilidad de la distribución normal:

$$f(x) = \frac{1}{x \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} (x - \mu)^2\right)$$

Ecuación 5.2. Transformación de una variable normal en una variable normal estándar:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Ecuación 5.3. Función de densidad de probabilidad de la distribución log-normal:

$$g(y) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log y - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \frac{1}{y} \quad y > 0$$

CAPÍTULO 6

Ecuación 6.1. Cálculo del factor de reflectividad.

$$Z = \int_0^\infty N(D) D^6 dD = \frac{N_6 6!}{\Lambda^7}$$

Ecuación 6.2. Cálculo del flujo de energía cinética.

$$\dot{E} = \frac{\pi \rho v_0^3 (4.5)!}{12 \times 10^6} \frac{N_0}{\Lambda^{5.5}}$$

Ecuación 6.3. Relación Z- É teórica (Waldvogel et al., 1978a)

$$\dot{E} = 7.79 \times 10^{-8} \rho v_0^3 N_0^{0.214} Z^{0.786}$$

Ecuación 6.4. Primera relación Z- É semiempírica (Waldvogel et al., 1978a)

$$\dot{E} = 1.023 \times 10^{-5} Z^{0.786}$$

Ecuación 6.5. Segunda relación Z- É semiempírica (Waldvogel et al., 1978a)

$$\dot{E} = 4.65 \times 10^{-6} Z^{0.8455}$$

Ecuación 6.6. Cálculo del *flujo de energía* a partir de los espectros de tamaño de los granizómetros (Waldvogel et al., 1978a).

$$\dot{E} = \frac{\pi \rho v_0^2}{F t 12 \times 10^6} \sum_{i=1}^p n_i D_i^4$$

Ecuación 6.7. Cálculo de la *reflectividad* a partir de los espectros de tamaño de los granizómetros (Waldvogel et al., 1978a).

$$Z = \frac{1}{F t v_0} \sum_{i=1}^p n_i D_i^{5.5}$$

Ecuación 6.8. Relación Z- É empírica general (Waldvogel et al., 1978a)

$$\dot{E} = 5 \times 10^{-6} Z^{0.840}$$

Ecuación 6.9. Cálculo de la *masa de hielo precipitada* a partir de la Relación Z- É empírica general (Waldvogel et al., 1978a)

$$M = 2.32 \times 10^{-5} Z^{0.706}$$

Ecuación 6.10. Cálculo de la *intensidad de precipitación* a partir de la Relación Z- É empírica general (Waldvogel et al., 1978a)

$$H = 6.53 \times 10^{-4} Z^{0.747}$$

Ecuación 6.11. Cálculo de la *energía cinética* a partir de los espectros de tamaños de los granizómetros (Waldvogel et al., 1978b)

$$E = 4.58 \times 10^{-6} \sum_{i=1}^p n_i D_i^4$$

Ecuación 6.12. Relación entre la *reflectividad de radar* y la *reflectividad calculada a partir de la distribución de tamaños de un espectrómetro* suponiendo N_0 constante (Smith et al., 1975)

$$Z_e = Z^{0.95}$$

Ecuación 6.13. Relación entre la *reflectividad de radar efectiva* y el *diámetro medio en ese volumen* (Ulbrich, 1977)

$$Z_e = 0.254 N_0 D_0^{5.82}$$

Ecuación 6.14. Relación entre la *reflectividad de radar* y la *reflectividad calculada a partir de la distribución de tamaños de un espectrómetro* (Waldvogel et al., 1978b)

$$Z_e = 1.68 Z^{0.88}$$

Ecuación 6.15. *Fórmula de Lance y Williams* para describir los topos de enlaces de los métodos jerárquicos aglomerativos del *análisis cluster*:

$$D_{k(i,j)} = \alpha_i D_{ki} + \alpha_j D_{kj} + \beta D_{ij} + \gamma |D_{ki} - D_{kj}|$$

Ecuación 6.16. Cálculo de las componentes principales en el *análisis de componentes principales*:

$$Z_{hi} = u_{h1} X_{1i} + u_{h2} X_{2i} + \dots + u_{hp} X_{pi} \quad h = 1 \dots p \quad i = 1 \dots n$$

CAPÍTULO 7

Ecuación 7.1. Ecuación de la función logística:

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$

Ecuación 7.2. Expresión matemática del modelo logístico:

$$z = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_j X_k$$

Ecuación 7.3. Ecuación de la función logística combinación de las dos anteriores:

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j)}}$$

Ecuación 7.4. Ecuación de la función logística en términos de probabilidad:

$$P(R = 1 | X_1, X_2, \dots, X_k) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j)}}$$

Ecuación 7.5. Notación más operativa de la ecuación de la función logística en términos de probabilidad:

$$P(R = 1 | X_1, X_2, \dots, X_k) = P(X)$$

Ecuación 7.6. Ecuación final de la función logística:

$$P(X) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j)}}$$

GLOSARIO DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS (por orden alfabético)

A0 a A5	-	Clases de intensidad de las granizadas de la escala ANELFA
ADV	-	<i>Agrupació de Defensa Vegetal de les Terres de Ponent</i> (Agrupación de Defensa Vegetal Tierras de Poniente)
AEMET	-	Agenda Estatal de Meteorología
AFC	-	<i>Automatic Frequency Control</i> (Control Automático de Frecuencia)
AGL	-	<i>Above Ground Level</i> (Sobre el nivel del suelo)
AIAG	-	<i>Association Internationale des Assureurs contre la Grêle</i> (Asociación Internacional de Aseguradores contra el Granizo)
ANELFA	-	<i>Association Nationale d'Etude et de Lutte contre les Fléaux Atmosphériques</i> (Asociación Nacional de Estudio y de Lucha contra las Adversidades Atmosféricas)
AMS o Am. Meteorol. Soc.	-	<i>American Meteorological Society</i> (Sociedad Americana de Meteorología)
aprox.	-	Aproximadamente
Atmos. Res.	-	<i>Atmospheric Research</i> (revista)
AZTI (55)	-	<i>Area of Reflectivity 55 Time Integrated</i> (Área de 55 dBZ integrada en el tiempo)
BRN	-	<i>Bulk Richardson Number</i> (Número de Bulk Richardson)
CAPE	-	<i>Convective Available Potential Energy</i> (Energía Convectiva Potencial Disponible)
CAPPI	-	<i>Constant Altitude Plan Position Indicators</i> (Indicadores Plano-Posición a Altitud Constante)
CCL	-	<i>Convective Condensation Level</i> (Nivel de Condensación Convectivo)
CICYT	-	Comisión Interministerial de Ciencia Y Tecnología
Conf.	-	<i>Conference</i> (Conferencia, congreso)
DACC	-	Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas del Gobierno de Mendoza

Desv. Est.	-	Desviación Estándar o Típica
Df	-	<i>Degrees of freedom</i> (Grados de libertad del test de Kolmogorov-Smirnov)
E	-	Este
Ed.	-	Editorial
EE.UU.	-	Estados Unidos de América
EHl	-	<i>Energy Helicity Index</i> (Índice de Energía-Helicidad)
EFR	-	<i>Embryos Formation Region</i> (Región de Formación de Embriones)
EL	-	<i>Equilibrium Level</i> (Nivel de Equilibrio)
ERAD	-	European Conference on RADar in Meteorology and Hydrology (Congreso Europeo de RADar en meteorología e hidrología)
et al.	-	<i>et alii</i> (y otros)
FAR	-	<i>False Alarm Ratio</i> (Tasa de Falsas Alarmas)
FPI	-	Formación de Personal Investigador
GFA	-	Grupo de Física de la Atmósfera de la Universidad de León
GRASS	-	<i>Geographic Resources Analysis Support System</i> (Sistema de Soporte de Análisis de Recursos Geográficos)
H0 a H10	-	Clases de intensidad de las granizadas de la escala TORRO
HGR	-	<i>Hail Growth Region</i> (Región de Crecimiento de Granizo)
HIRLAM	-	<i>High Resolution Limited Area Model</i> (Modelo de Alta Resolución en Área Limitada)
Ht	-	<i>Height</i> (Altura)
I + D + i	-	Investigación + Desarrollo + Innovación tecnológica
imp.	-	Impactos
INM	-	Instituto Nacional de Meteorología, actual AEMET
IR	-	Canal Infrarrojo del Meteosat
J. Appl. Meteorol.	-	<i>Journal of Applied Meteorology</i> (revista)

J. Atmos. and Ocean. Tech.	-	<i>Journal of Atmospheric and Oceanic Technology</i> (revista)
J. Atmos. Sci.	-	<i>Journal of Atmospheric Sciences</i> (revista)
J. Clim. Appl. Meteor.	-	<i>Journal of Climatology and Applied Meteorology</i> (revista)
J. Geophys. Res.	-	<i>Journal of Geophysical Research</i> (revista)
J. Meteor.	-	<i>Journal of Meteorology</i> (revista)
J. Wea. Mod.	-	<i>Journal of Weather Modification</i> (revista)
JI	-	<i>Jefferson Index</i> (Índice de Jefferson)
LAN	-	<i>Local Area Network</i> (Red de Área Local)
LCL	-	<i>Lifted Condensation Level</i> (Nivel de Condensación por Elevación)
LFC	-	<i>Level of Free Convection</i> (Nivel de Convección Libre)
log	-	Logaritmo decimal
MAPA	-	Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación
MASS	-	<i>Mesoscale Atmospheric Simulation Model</i> (Modelo de Simulación Atmosférica a Mesoscala)
Máx	-	Máximo
Me	-	Mediana
MEC	-	Ministerio de Educación y Ciencia
MCS	-	<i>Mesoscale Convective System</i> (Sistema Convectivo a Mesoescala)
MDV	-	<i>Meteorological Data Variable</i> (Variables de Datos Meteorológicos)
Meteorol. App.	-	<i>Meteorological Applications</i> (revista)
Meteorol. Monogr.	-	<i>Meteorological Monography</i> (Monografía meteorológica)
Mín	-	Mínimo
MM5	-	<i>Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model</i> (Quinta generación del Modelo a Mesoscala del NCAR/Penn State)
Mo	-	Moda

MONEGRO	- Título del proyecto: “ <i>Modelización de la Energía cinética de las precipitaciones de GRanizo</i> ” Referencia: CICYT REN2003-09617-C02-01 Organismo responsable: Universidad de León Organismos colaboradores: Instituto Nacional de Meteorología, Universidad de las Islas Baleares, Diputación General de Aragón, Generalidad de Cataluña, ADV Terres de Ponent, Sistemas Lógicos Financiado por: CICYT (Comisión Interministerial de Ciencia Y Tecnología), ADV Terres de Ponent, Generalitat de Cataluña y Diputación General de Aragón. Plazo de ejecución: 01/01/2004 – 31/12/2006
Mon. Wea. Rev.	- <i>Monthly Weather Review</i> (revista)
MSG	- <i>Meteosat Second Generation</i> (Meteosat de Segunda Generación)
msnm	- Metros sobre el nivel del mar
N	- Norte
Nº o N	- Número de datos
n.s.	- No significativo
NCAR	- <i>National Center for Atmospheric Research</i> (Centro Nacional de Investigación Atmosférica)
NE	- Noreste
NEXRAD	- <i>NEXT Generation RADars</i> (Radares de la Siguiete Generación, pertenecientes al Servicio Meteorológico Americano)
NW	- Noroeste
NWP	- <i>Numerical Weather Prediction</i> (Predicción Numérica del Tiempo)
ONU	- Organización de las Naciones Unidas
p.p.	- Páginas
PAIRAGRA	- Título del proyecto: “Desarrollo de metodologías y de sus aplicaciones para el Pronóstico, Análisis e Identificación mediante un Radar meteorológico de Alta resolución temporal, de las precipitaciones de GRANizo que afectan al valle medio del Ebro” Referencia: REN2000-1210 CLI Organismo responsable: Universidad de León Organismos colaboradores: Instituto Nacional de Meteorología, Universidad de las Islas Baleares, Diputación General de Aragón, Generalidad de Cataluña, ADV Terres de Ponent, Sistemas Lógicos Financiado por: CICYT (Comisión Interministerial de Ciencia Y Tecnología), ADV Terres de Ponent, Generalitat de Cataluña y Diputación General de Aragón. Plazo de ejecución: 01/01/2001 – 31/12/2003

POD	-	<i>Probability Of Detection</i> (Probabilidad De Detección)
POH	-	<i>Probability Of Hail</i> (Probabilidad De Granizo)
Precip	-	<i>Precipitation</i> (Precipitación)
PPI	-	<i>Plan Position Indicator</i> (Indicador Plano-Posición)
PRF	-	<i>Pulse Repetition Frequency</i> (Frecuencia de Repetición de Pulsos)
Publ.	-	Publicación
Quart. J. Roy. Meteor. Soc.	-	<i>Quarterly Journal of Meteorology Society</i> (revista)
RADAR	-	<i>Radio Detection And Ranging</i> (Detección y Localización por Ondas de Radio)
RAM	-	<i>Random Access Memory</i> (Memoria de Acceso Directo)
RAP	-	<i>Research Applications Program</i> (Programa de Aplicaciones de la Investigación)
RDAS	-	<i>Radar Data Acquisition System</i> (Sistema de Adquisición de Datos Radar)
Refl.	-	<i>Reflectivity</i> (Reflectividad)
RHI	-	<i>Range Height Indicators</i> (Indicadores de Rango-Altura)
S	-	Sur
SE	-	Sureste
Sec	-	<i>Seconds</i> (Segundos)
Serv. Meteorol. Nac.	-	Servicio Meteorológico Nacional
SEVERUS	-	Título del proyecto: "Observaciones, análisis y modelización de las situaciones de granizo sobre el NE Peninsular (SEVERUS)" Referencia: CGL2006-13372-C02-01/CLI Organismo responsable: Universidad de León Organismos colaboradores: Instituto Nacional de Meteorología, Universidad de Barcelona, ADV Terres de Ponent, y Confederación Hidrográfica del Ebro Financiado por: CICYT (Comisión Interministerial de Ciencia Y Tecnología) y ADV Terres de Ponent.

Plazo de ejecución: 01/12/2006 – 30/09/2009

SPC	- <i>Signal Processor Card</i> (Tarjeta Procesadora de la Señal)
SPSS	- <i>Statistical Package for Social Sciences</i> (Paquete Estadístico para las Ciencias Sociales)
Theor. Appl. Climatol.	- <i>Theoretical and Applied Climatology</i> (revista)
TITAN	- <i>Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting</i> (Identificación, Seguimiento, Análisis y Pronóstico a corto plazo de tormentas)
TORRO	- <i>TORnado and storm Research Organization</i> (Organización para la Investigación de Tornados y Tormentas)
UPGMA	- <i>Unweighted Pair Group Method using Arithmetic Averages</i> (Método de Agrupación por Pares No Ponderados utilizando Medias Aritméticas)
UTC	- <i>Universal Time Coordinated</i> (Tiempo Universal Coordinado)
UTM	- <i>Universal Tranverse Mercator</i> (Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator)
VIL	- <i>Vertically Integrated Liquid</i> (Agua líquida integrada verticalmente)
VIS	- Canal Visible del Meteosat
Vol.	- <i>Volume</i> (Volumen)
W	- <i>West</i> (Oeste)
Wea. Forecasting	- <i>Weather Forecasting</i> (revista)
WMO	- <i>World Meteorological Organization</i> (Organización Meteorológica Mundial)
WNW	- <i>West North West</i> (Oeste noroeste)

GLOSARIO DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS DE VARIABLES (por orden alfabético) Ver también tablas 2.15, 3.3 y 3.5.

a	-	Tamaño eléctrico (-)
A_e	-	Apertura de la antena (m^2)
BOYDEN	-	Índice BOYDEN de inestabilidad (-)
BRN	-	<i>Bulk Richardson Number</i> , Número de Bulk Richardson (-)
BRN-shr	-	Cizalladura del número de Bulk Richardson ($m^2 s^{-2}$)
C	-	Constante de sensibilidad (-)
C	-	Diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura de la parcela en el CCL ($^{\circ}C$)
c	-	Velocidad de la luz ($m s^{-1}$)
C_d	-	Coefficiente de arrastre (0.6 según Vento, 1976)
c_t o τ	-	Duración o longitud del impulso (μs)
CAP	-	Máxima diferencia de temperaturas entre el perfil ambiental y el de la parcela ($^{\circ}C$)
CAPE	-	<i>Convective Available Potential Energy</i> , Energía Convectiva Potencial Disponible ($J kg^{-1}$)
CAPE -	-	Energía Convectiva Potencial Disponible negativa ($J kg^{-1}$)
CCL	-	<i>Convective Condensation Level</i> , Altura del Nivel de Condensación Convectivo (m)
cumVIL	-	VIL acumulado durante toda la tormenta ($kg m^{-2}$)
cum σ^2	-	Varianza acumulada
D	-	Diámetro del dispersor (mm)
D_0	-	Diámetro medio de los dispersores en cierto volumen (mm)
d	-	Estadístico del test de Kolmogorov-Smirnov
d_c	-	Valor crítico del estadístico del test de Kolmogorov-Smirnov
D_i	-	Diámetro medio (mm)
D_i	-	Diámetro de cada piedra de granizo (mm)
D_{imp}	-	Eje mayor de cada impacto dejado por cada piedra de granizo sobre la superficie del granizómetro (mm)
d_{imp}	-	Eje menor de cada impacto dejado por cada piedra de granizo sobre la superficie del granizómetro (mm)
Dmax	-	Diámetro máximo del granizo registrado en un granizómetro (mm)
ΔD_i	-	Intervalo de diámetro (mm)

$D_{k(i,j)}$	-	Distancia entre grupos en el análisis de conglomerados
$D_{i,j}$	-	Distancia entre grupos i y j
D_{top}/Dt	-	Tasa de cambio del techo de la tormenta (km h^{-1})
D_{volume}/Dt	-	Tasa de cambio del volumen de la tormenta ($\text{km}^3 \text{h}^{-1}$)
D_{precip_flux}/Dt	-	Tasa de cambio del flujo de precipitación de la tormenta ($\text{m}^3 \text{s}^{-2}$)
D_{mass}/Dt	-	Tasa de cambio de la masa de la tormenta (kt h^{-1})
D_{dBz_max}/Dt	-	Tasa de cambio de la reflectividad puntual máxima (dBZ h^{-1})
E_c, E	-	Energía cinética total o por unidad de superficie ($\text{J}, \text{J m}^{-2}$)
E_{ci}	-	Energía cinética de una piedra de granizo individual (J)
$E_c(h)$	-	Energía cinética medida en el granizómetro (J m^{-2})
$E_c(Z), E(Z)$	-	Energía cinética calculada a partir de la reflectividad (J m^{-2})
E_{diaria}	-	Energía cinética acumulada durante un día (J m^{-2})
E_G	-	Energía cinética global multi-anual (J m^{-2})
E_{Tm}	-	Energía cinética puntual máxima (J m^{-2})
E_{tot}	-	Energía cinética acumulada de todos los puntos de una granizada (J m^{-2})
$\dot{E}$	-	Flujo de energía cinética ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
$\dot{E}(h)$	-	Flujo de energía cinética medido en el granizómetro ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
$\dot{E}_{90}(h)$	-	Flujo de energía cinética medido en el granizómetro calculado a partir de t_{90} ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
$\dot{E}_{40}(h)$	-	Flujo de energía cinética medido en el granizómetro calculado a partir de t_{40} ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
EHI	-	<i>Energy Helicity Index</i> , Índice de Energía-Helicidad (-)
$EL-CCL$	-	Capa entre el Nivel de Equilibrio y el Nivel de Condensación Convectivo (m)
$EL-LCL$	-	Capa entre el Nivel de Equilibrio y el Nivel de Condensación Forzado (m)
F	-	Área de muestreo del espectrómetro de granizo (cm^2)
f_r o PRF	-	Frecuencia de repetición de impulsos (s^{-1})
$F_1, F_2, \dots, F_p$	-	Factores no directamente observables en el ACP
F_{850}, F_{500} o F_{200}	-	Velocidad del viento a 850, 500 o 200 hPa respectivamente (kn)
G	-	Ganancia axial de la antena (dB)
g	-	Aceleración de la gravedad (9.8 m s^{-2})
H	-	Humedad (%)
H_0	-	Altura de la isocero (m, ft)

H_{-5}	-	Altura a la que se encuentran -5°C (m, ft)
H_{-10}	-	Altura a la que se encuentran -10°C (m, ft)
H_{45}	-	Altura a la que aparece en el RHI la reflectividad de 45 dBZ (m)
Δh	-	Intervalo de altura entre capas adyacentes en la vertical (m)
HAIL	-	Índice HAIL que estima el tamaño del granizo a partir pruebas en el túnel del viento y la estimación de la velocidad ascensional en tormentas
JI	-	<i>Jefferson Index</i> , Índice de Jefferson ($^{\circ}\text{C}$)
K	-	Término de refracción (-)
k	-	Coeficiente de absorción (-)
k	-	Número de factores no directamente observables ($F_1, F_2, \dots F_p$) en el ACP
k	-	Pendiente de la recta de regresión que relaciona el diámetro de los impactos de granizo en los granizómetros y el diámetro de las piedras de granizo
KI	-	<i>K Index</i> , Índice K ($^{\circ}\text{C}$)
KO	-	Índice KO de inestabilidad (-)
LCL	-	<i>Lifted Condensation Level</i> , Altura del Nivel de Condensación Forzado (m)
LFC	-	<i>Level of Free Convection</i> , Altura del Nivel de Convección Libre (m)
LI	-	<i>Lifted Index</i> , Índice de Elevación ($^{\circ}\text{C}$)
logEdiaria	-	Logaritmo de la energía cinética acumulada durante un día
M	-	Masa de hielo precipitada total o por unidad de superficie (kg , g, kg m^{-2} , g m^{-3})
Mi	-	Masa de hielo de una piedra de granizo individual (g)
m	-	Índice de refracción complejo de la esfera (-)
m	-	Ordenada en el origen de la recta de regresión que relaciona el diámetro de los impactos de granizo en los granizómetros y el diámetro de las piedras de granizo
MVV	-	<i>Maximum Vertical Velocity</i> , Velocidad Vertical Máxima (kn)
N	-	Número de impactos total o por unidad de superficie (N° impactos, N° impactos m^{-2})
n	-	Índice de refracción (-)
n_i	-	Número de piedras con diámetro en el intervalo $D_i \pm \Delta D_i$,
N (D) dD	-	Número de difusores por unidad de volumen (N° difusores m^{-3})
N_0	-	Origen de ordenadas o interceptados (cm^{-4} , $\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$)
N_{tot}	-	Número de piedras de granizo con diámetro superior a 0.64 cm
N (μ, σ)	-	Distribución normal de media μ y desviación típica σ
N (0,1)	-	Distribución normal estándar de media 0 y desviación típica 1

P_t	-	Potencia instantánea emitida en un impulso o potencia del máximo o pico (kW)
$\bar{P}_r$	-	Potencia media procedente de un radio r (kW)
$10 \log \bar{P}_r$	-	Potencia (dBm)
p	-	Clase de diámetro mayor
p	-	Número de variables observadas ($X_1, X_2, \dots, X_p$) en el ACP
p	-	Nivel crítico p del contraste (probabilidad de obtener una discrepancia mayor o igual que la observada en la muestra si la hipótesis nula es cierta). Según Peña (2001), cuando $p > 0.25$, no existe evidencia clara para rechazar la hipótesis.
$\mathcal{R}$	-	Intensidad de la precipitación (mm h^{-1})
R	-	Coefficiente de correlación
R^2	-	Coefficiente de determinación
r	-	Radio (mm)
SI	-	<i>Showalter Index</i> , Índice de Showalter ($^{\circ}\text{C}$)
S_G	-	Superficie global granizada (km^2)
SRH03, SRH02 o SRH01	-	<i>Storm-relative Helicity</i> , Helicidad de la tormenta entre 0 y 3 km, entre 0 y 2 km o entre 0 y 1 km respectivamente ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)
SWEAT	-	<i>Severe Weather ThrEAT Index</i> , Índice de Amenaza de Tiempo Severo (-)
T30	-	Periodo de tiempo en que la tormenta supera los 30 dBZ (min)
t	-	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
$\bar{t}$	-	Tiempo en el que se recogen las piedras de granizo en un espectrómetro de granizo
t	-	Tiempo total que pasa la tormenta sobre el granizómetro (s)
t_{90}	-	Tiempo en el que la <i>probabilidad de granizo</i> según el modelo logístico de López (2003) es mayor del 90 % (s)
t_{40}	-	Tiempo en el que la <i>reflectividad puntual sobre el granizómetro</i> supera los 40 dBZ: t_{40} (s)
Δt_i	-	Tiempo en el que la reflectividad se encuentra en cada intervalo de reflectividad (min)
T_c	-	Temperatura convectiva ($^{\circ}\text{C}$)
T_d	-	<i>Dew temperature</i> , Temperatura de punto de Rocío ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{d_{\text{superficie}}}$	-	<i>Dew temperature</i> , Temperatura de punto de Rocío en la superficie ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{d_{850}}$	-	<i>Dew temperature</i> , Temperatura de punto de Rocío a 850 hPa ($^{\circ}\text{C}$)
TI	-	<i>Thompson Index</i> , Índice de Thompson ($^{\circ}\text{C}$)
TT	-	<i>Total Totals</i> , Total de Totales ($^{\circ}\text{C}$)

T^2 Gust	-	Ráfaga máxima probable, derivada del método T2 (kn)
u_h	-	Eje factorial h-ésimo del ACP
v	-	Velocidad de caída de las piedras de granizo ($m\ s^{-1}$)
$V_{850}, V_{500}, V_{250}$	-	Velocidad del viento en las alturas de 850, 500 y 200 hPa (kt)
VGP	-	<i>Vorticity Generation Parameter</i> , Parámetro de Generación de Vorticidad ($m\ s^{-2}$)
VIL	-	<i>Vertically Integrated Liquid</i> , Agua líquida integrada verticalmente ($kg\ m^{-2}$)
WBZ	-	<i>Wet Bulb Zero</i> , Cero del Termómetro Húmedo ($^{\circ}C$)
WI	-	Índice W que estima el potencial de microburst (kn)
$\bar{X}$	-	Media aritmética
$X_1, X_2, \dots, X_k$	-	Variables explicativas, exógenas, independientes o predictores en la regresión lineal
$X_1, X_2, \dots, X_p$	-	Variables observadas en el ACP
x	-	Variable dependiente, variable aleatoria normal
Y	-	Variable endógena, explicada, dependiente o criterio
Z	-	Factor de reflectividad ($mm^6\ m^{-3}$)
Z	-	Estadístico del test de Kolmogorov-Smirnov calculado a partir de la diferencia mayor (en valor absoluto) entre las funciones de distribución acumuladas teórica y observada
z	-	Variable aleatoria normal estándar
Z_e	-	Reflectividad efectiva (dBZ)
Z_h	-	Reflectividad puntual sobre el granizómetro ($mm^6\ m^{-3}$)
Z_h	-	Componente principal h-ésima del ACP
$10\ log\ Z$	-	Reflectividad o factor de reflectividad en escala logarítmica (dBZ)
α	-	Nivel de significación del contraste (probabilidad de rechazar erróneamente la hipótesis nula)
α, β, γ	-	Parámetros de la <i>fórmula de Lance y Williams</i>
λ	-	Longitud de onda (cm)
u	-	Radiofrecuencia (GHz, MHz)
u_0	-	Constante para hallar la velocidad de caída de las piedras de granizo (según Mason, 1971, $4.41\ m\ s^{-1}\ mm^{-0.5}$)
θ	-	Anchura del haz ($^{\circ}$)
σ	-	Sección eficaz de retrodispersión (-)
σ	-	Desviación estándar o típica

σ^2	-	Varianza
μ	-	Media
ρ_h	-	Densidad del hielo (0.9 g cm^{-3})
ρ_a	-	Densidad del aire ($1.1 \cdot 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$)
Λ	-	Pendiente de la distribución exponencial ($\text{mm}^{-1}, \text{cm}^{-1}$)

ANEXO I

Characterization of hailstone size spectra in hailpad networks in France, Spain, and Argentina

J.L. Sánchez^{a,*}, B. Gil-Robles^a, J. Dessens^b, E. Martin^c, L. Lopez^a, J.L. Marcos^a, C. Berthet^b, J.T. Fernández^a, E. García-Ortega^a

^a Laboratory of Atmospheric Physics. IMA. University of León, Spain

^b ANELFA, Toulouse, France

^c Dirección de Agricultura y C. Climáticas. Min. Economía. Mendoza, Argentina

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 January 2008

Received in revised form 5 September 2008

Accepted 19 September 2008

Keywords:

Hailstorms

Hailpads

Hail size distribution

ABSTRACT

Hailstone size distribution has been an integral part of hailfall measurement in several research projects. The exponential distribution is usually assumed to be an adequate representation of hailstone size spectra. This paper presents the results of the fitting to the exponential distribution of databases obtained from several hailpad networks set up in southern France (3 networks with 1,081 hailpads), Spain (2 networks with 269 hailpads), and Argentina (3 networks with 567 hailpads). These networks use the same type of plate, method of calibration, and semi-automatic measurement procedure. Results show that the characteristic parameters of the fittings are different in each area, even in areas that lie geographically quite close to each other. The values of the slopes obtained in the French networks are higher than the ones found in Spain and Argentina. Statistical techniques were applied to detect “breakpoints” in the hail size distribution, using piece-wise regression models (or “broken-stick” models). These points were used to estimate critical thresholds associated with transitions between two hailstone size distributions. In 4 networks in Spain and Argentina, breakpoints appear in large hail. The results show that, in 2 of the networks, the distribution is exponential (statistically significant) again from the breakpoint on.

© 2008 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Hail phenomena occur in many regions of the world but the small scale of hailfalls (usually a few square kilometers) is an important obstacle for research and for improving our knowledge of this type of event. The AMS Glossary defines hailstones (Huschke, 1959) as a type of precipitation: “a ball or irregular lump of ice ranging in size from that of a pea to that of a grapefruit” (that is, from 5 mm to more than 7 cm in diameter, or in mass terms, from 0.06 g to more than 160 g). The main principles of hailstone growth have been described by several authors (e.g., List, 1985; Rogers and Yau, 1989 or Knight and Knight, 2001), but there are still problematic issues with respect

to the formation of hailstorms and the growth of large, giant, and enormous hailstones (Polston, 1996; Changnon et al., 1999).

For decades scientists have been collecting information about observed hailstones from analyses of hail spectra measured at the ground. Such observations and measurements offer a potential of additional knowledge of hailstorm dynamics as Cheng and English (1983) noted. The scarce information available is due to the small zones affected, generally covering a land area of only a few tens of km². This reveals a need to study hailstones in greater detail. Hailstone spectra are an important part in many research programs (Admirat, 1973; Waldvogel et al., 1978a,b; Mezeix and Doras, 1981; Dessens, 1986; Federer and Waldvogel, 1975; Morgan, 1992; Dessens et al., 2007; Gaiotti et al., 2001) providing useful information on the regional climatology of hailfalls and on the characteristics of hailstones, thus increasing our understanding of hailstorm structures and mechanisms.

* Corresponding author. Laboratory of Atmospheric Physics, Instituto de Medio Ambiente, C/La Serna Universidad de León, 24071 León, Spain.

E-mail address: jl.sanchez@unileon.es (J.L. Sánchez).

The hailpad, developed by Schleusener and Jennings (1960) and Decker et al., (1960), is a very basic instrument, but for the time being it is the only device that can be widely used to offer a detailed analysis of hailstones: sizes, spectra, structures, shapes, etc. Due to its low cost and simplicity, it remains the ideal tool for widespread distribution in the field. With an appropriate selection of polystyrene, a dense network of hailpads provides an estimate of the hail size distribution at a particular point. Most of the size distributions reported in the literature have been obtained from hailpads.

Additionally, hailpads provide an important database for comparing storms, as well as a new approach to hail climatology. After being collected, the hailpads have to be properly calibrated and analyzed (Fraile et al., 1992). Semi-automatic procedures are used to extract information about hailstone spectra, using pattern recognition and image processing software as well as human efforts.

It is usually assumed that the exponential distribution is an adequate representation of hailstone spectra at the ground. (Douglas 1963; Cheng et al., 1985; Ulbrich, 1977; Dessens and Fraile, 1994; Morgan and Towery, 1975; Gaiotti et al., 2001; Wong et al., 1988). With respect to the distribution parameters, it may be noted that the origin coordinate N_0 cannot be considered constant in the case of hail, contrary to the case of rain (e.g. Houze et al., 1979). The differences in the distribution slope are attributed to differences in the thermodynamics of storms (Cheng et al., 1985), but their values usually lie between 3 and 4 cm^{-1} . The structure of the storms and the amount and distribution of hail are reflected in the hail size.

Estimating the mean hail diameter of the hail size distribution is important. For instance, Van den Heever and Cotton (2004) have conducted four sensitivity tests in which the hail size distribution was altered by progressively increasing the mean hail diameter from 3 mm to 1 cm, pointing out the importance of understanding how changes in hailstone size and the microphysical structure of clouds may alter hailstorm dynamics.

Consequently the purpose of this paper is to provide a detailed analysis of the hail size distributions in different areas with dense hailpad networks available in all of them.

For this study we have worked with 8 hailpad networks located in France, Spain, and Argentina. In the case of France, there are 3 hailpad networks with 1076 hailpads. Two other areas were chosen in Spain, both in the Ebro Valley. One of the Spanish networks comprises 100 hailpads in a mountainous area, and the other one comprises another 170 hailpads set up in a relatively flat area. In addition, data were available from 3 networks in Mendoza, Argentina, all of them located in flat regions and comprising 400 hailpads in an area with a very high

frequency of occurrence of hail phenomena. The aim of this paper is to determine the hailstone size distributions by applying a number of different techniques and to carry out a careful analysis of these distributions to compare results and improve our knowledge of the mechanisms that lead to the formation of large hailstones.

2. Databases

2.1. Calibration and semi-automatic processing

It is assumed that the size of the dents left by hailstones on hailpads is a function of the kinetic energy of the impact (Lozowski and Strong, 1978). In the 8 networks used for the present study, the plates were collected after the hailfalls and carefully calibrated to avoid some of the recurrent problems in hailpad studies, in particular those related to the size of the smallest hailstones (Lozowski et al., 1978; Vento, 1978) or to the sample itself (Changnon, 1973; Gertzman and Atlas, 1977; Vento and Morgan, 1980; Vento, 1978; Fraile et al., 1992). The calibration process was carried out using six balls with sizes between 5 and 20 mm, as this is the most common size range in the study zones. In the case of giant or enormous hailstones, additional calibration balls were used with sizes between 25 and 30 mm. The ball with the smallest diameter (5 mm) was thrown three times onto the plate to reduce errors at the smallest hailstones sizes. So, at least 8 dents were obtained for the calibration of each plate. The methodology used minimizes uncertainty in the measurement of the dents.

Next, the data were digitalized and pattern recognition and image processing software were applied to measure the dents with the help of a technician. This type of semi-automatic data processing allows the identification and correction of cases such as dent overlaps, dents not caused by hailstones, etc.

The hailstone dents were then classified according to their sizes. In the hailpad networks in Spain and Argentina, the classes were set from millimeter to millimeter, beginning at 5 mm, which is the lowest threshold for a hailstone. The types were 5–6, 6–7, 7–8, 8–9 mm, and so on up to the maximum diameter found. In contrast, in France the measurement was carried out manually in the first years and different intervals were used: 5–7, 7–9, 9–11, 11–13, 13–15, 15–17, 17–21, 21–25, 25–29, 29–33, 33–37, 37–41, 41–45, 45–60 mm. This classification was subsequently preserved, in order to maintain a uniform data in the French networks.

Hailstone dent distributions were obtained for every “campaign” day for at least 5 months, it is to say, in the North Hemisphere (France and Spain networks) from May 1 to September 30 and in the Southern Hemisphere (Argentina

Table 1

Available data in each of the 8 hailpad networks.

	Inland Area (France)	Atlantic Area (France)	Mediterranean Area (France)	Valjalón (Spain)	Lérida (Spain)	Central Oasis (Argentina)	South Oasis (Argentina)	North-East Oasis (Argentina)
	1987–2005	1988–2005	1989–2005	2003–2006	2000–2006	2004/05–2005/06	2004/05–2005/06	2004/05–2005/06
No. of hail days	582	405	96	46	79	34	52	34
No. of analyzed plates	2473	1689	228	359	595	154	437	253
No. dents/ m^2 $D \geq 5$ mm	7,181,630	4,069,911	488,959	324,787	399,188	118,917	415,991	328,444
No. dents/ m^2 $D \geq 20$ mm	15,819	6138	809	3500	2778	2287	8222	5278
No. dents/ m^2 $D \geq 40$ mm	20	20	0	9	59	28	83	65

networks) from November 1 to Mars 31 (a minimum of 150 days). Hailstone dent distributions were obtained for every hail day on which hail was registered on at least 2 hailpads.

2.2. Hailpad networks

Five of the 8 hailpad networks are set up on both sides of the Pyrenees in areas with frequent hailfalls. The other 3 networks are located in Mendoza, Argentina, in an area strongly influenced by the Andes mountain range. Table 1 shows the data provided by each of the 8 networks.

a) Networks in France:

As mentioned above, in France the data available have been provided by the three hailpad networks run by the ANELFA (Association Nationale d'Étude et de Lutte contre les Fléaux Atmosphériques). The distribution is as follows:

- Atlantic zone: comprises 490 hailpads set up in 1988.
- Inland zone: 419 hailpads set up in 1987.
- Mediterranean zone: 167 hailpads set up in 1989.

The hailpads are distributed uniformly. The plate is made of Styrofoam Wallmate® with an exposed surface of 1.026 cm².

b) Networks in Spain:

Both networks are located in the Ebro Valley, an area with frequent hailstorms, some of which are severe hailstorms. The two networks are the following:

The Valjalón network lies in the province of Zaragoza in a mountainous region with frequent hailstorms and comprises 100 hailpads with a density of 1 hailpad every 25 km². The hailpads are distributed homogeneously and the network was set up in 2003.

The network in Lérida comprises 174 hailpads distributed in a grid of 4×4 km² in a relatively flat area similar to the 3 networks in France. This network was set up in the year 2000 and has undergone no changes since then.

In both cases the surface of the plates made of Styrofoam Wallmate® is 1,050 cm².

c) Networks in Argentina:

The type of hailpad used here is identical to the one used in Spain. All the networks lie in the 3 agricultural oases of Mendoza and are set up in the form of a grid: one hailpad every 25 km². The database used is the one corresponding to the summer campaigns of 2004/05 and 2005/06. The three networks are distributed as follows:

- North-Eastern Oasis: 188 hailpads.
- Central Oasis: 81 hailpads.
- Southern Oasis: 130 hailpads.

Table 2

Results of Mann–Whitney test in Argentinean hailpad networks.

	Central Oasis	South Oasis	North-East
	2004/05–2005/06	2004/05–2005/06	2004/05–2005/06
No. of years	2	2	2
Z	1.96	−0.59	−0.76
Adjusted Z	1.95	−0.6	−0.78
Same population	Yes	Yes	Yes

Table 3

Results of Kruskal–Wallis test in French hailpad networks.

	Inland Area	Atlantic Area	Mediterranean Area
	1987–2005	1988–2005	1989–2005 (without 1994)
No. of years	19	18	16
Degrees of freedom	18	17	15
Theoretical χ^2	28.9	27.6	25
ANOVA			
<i>H</i>	12.09	17.4	19.71
<i>p</i>	0.8423	0.43	0.1834
Same population	Yes	Yes	Yes
Median test			
χ^2	9.71	8.57	22.4
<i>df</i>	18	17	15
<i>p</i>	0.9408	0.9528	0.098
Same population	Yes	Yes	Yes

As in the Spanish networks, the surface of the plates is 1,050 cm².

2.3. Preliminary analysis of the data series

Taking into account the variability of hailfalls every summer, it is necessary to know whether, for each of the eight networks, the data series for each summer can be grouped together with the series of all the campaigns. In other words, it is essential to check the homogeneity of the series formed by each database of dents measured by each of the eight networks. The Kruskal–Wallis test was used for this purpose in the French and Spanish networks. In the Argentinean networks, only two campaigns have then been carried out, so the Mann–Whitney test was used instead. The results found show that, from a statistical point of view, the series formed belong to the same population (see Tables 2–4), and, consequently, they may be grouped to form a unified database for each of the 8 networks.

In the 8 networks used for the study, slightly over 13 million dents were analyzed, corresponding to 1328 hail days. Table 1 shows that hail is much more likely to occur in the two Spanish networks than in the 3 French ones. This fact demonstrates that hail climatology may vary even when the study zones are not very far from each other, as is the case here. The case of the networks in Mendoza, Argentina, is different. This province, located in the steepest area of the Andes, presents a very high hailstorm frequency. Only two campaigns were carried out, but nearly 844 plates were dented by hailstones. The figures in Table 1 are self-explanatory.

Table 4

Results of Kruskal–Wallis test in Spanish hailpad networks.

	Valjalón	Lérida
	2003–2006	2000–2006
No. of years	4	7
Degrees of freedom	3	6
Theoretical χ^2	7.81	12.6
ANOVA		
<i>H</i>	3.99	15.58
<i>p</i>	0.2626	0.0162
Same population	Yes	No
Median test		
χ^2	3.59	6.4
<i>df</i>	3	6
<i>p</i>	0.3093	0.381
Same population	Yes	Yes

Table 5

Calculation of the slope values (cm^{-1}) of the exponential distribution function obtained applying the least squares method in Spanish databases, taking three different thresholds (5, 7, and 9 mm) and three different size classes (1 mm, 2 mm and French intervals).

		Valjalón 2003–2006	Lérida 2000–2006
$D > 5$ mm	$\delta = 1$ mm	2.70	2.43
	$\delta = 2$ mm	2.71	2.46
$D > 7$ mm	$\delta = 1$ mm	2.67	2.34
	$\delta = 2$ mm	2.69	2.38
$D > 9$ mm	$\delta = 1$ mm	2.61	2.25
	$\delta = 2$ mm	2.64	2.29

Among the available data from 8 networks, there are a relatively high number of large hailstones with diameters over 20 mm: 22,766 in the French networks, 6278 in the Spanish ones, and 15,787 in the Argentinean ones.

3. Hail spectra distribution

Hail spectra are well approximated by an exponential function when large samples of hailfall are considered (Douglas, 1963; Federer and Waldvogel, 1975, 1978; Ulbrich, 1974, 1977; Crow et al., 1979; Cheng and English, 1983). So

$$N(D) = N_0 e^{-\Lambda D}, \quad 0.5 \text{ cm} \leq D \leq D_{\max}, \quad (1)$$

where, $N(D)$ ($\text{m}^{-2} \text{cm}^{-1}$) is the number of hailstones per unit of surface in each diameter interval, D (cm) is the hailstone diameter, $D_{\max}$ is the maximum hailstone diameter, Λ (cm^{-1}) is the slope of the regression line and N_0 ($\text{m}^{-2} \text{cm}^{-1}$) is the intercept. This parameter is a function of the threshold size taken, so the result is different depending on whether we take it to be 5, 6, 7 mm, or even larger sizes.

According to Ulbrich (1977), the distribution is truncated at the maximum diameter $D_{\max}$. Dennis and Musil (1973) attribute this to physical reasons, since the maximum diameter correlates strongly with the maximum updraft velocity and the vertical profile of the updraft temperature. Nelson (1983) pointed out that a broad moderate updraft has more influence for large hail growth than the maximum updraft speed. At any rate, a hailstone may not grow physically to an infinite size. When the terminal velocity is higher than the updraft velocity, a hailstone falls. For instance an updraft greater than 16 m s^{-1} is necessary to sustain hailstones with a diameter of 1–2 cm (Morgan, 1992).

In order to obtain the parameters of the hail size distribution, Cheng and English (1983) have linearized the distribution function taking the logarithms in Eq. (1) and fitting it using the least squares method. There are references to results found in hailpad networks in different parts of the world. There are several different methods for fitting the exponential. In the present case, to facilitate the comparison of slopes, the least squares fit was applied. In particular, Levenberg–Marquart method was used between the minimum threshold and the maximum size of hailstones. In NHRE (National Hail Research Experiment), Ulbrich (1977) fitted data series between 6 and 30 mm and also between 6 and 20 mm. In France, Dessens and Fraile (1994) used an interval between 7 and 17 mm. More recently Gaiotti et al. (2001) published the fitting results found in Friuli-Venezia Giulia in Italy for hailstone sizes between 8 and 40 mm. When comparing results it is crucial to take into account not only the fitting method used, but also the threshold, the discretization of hailstone classes, and the hailstone diameter at which the exponential function is truncated.

With these results, it seems reasonable to begin by analyzing variations in the slope from different thresholds. In addition, the discretization of the selected hailstone classes must also be taken into account. Consequently, the δ intervals of the hailstone classes

Fig. 1. Frequency histogram of the % of impacts in each size class in the Valjalón hailpad network (Spain).

Fig. 2. Frequency histogram of the % of impacts in each size class in the hailpad network in LÉRIDA (Spain).

must be established counting the number of dents with a diameter between x and $x + \delta$. The databases of the two Spanish networks were used to this purpose because a relatively large sample is available: 953 plates, 723,975 dents obtained on 125 haildays, grouped into sets of $\delta = 1$ mm. The data of the two networks have been fitted to an exponential function. Table 5 shows the values of the slopes obtained for the six options analyzed (with 3 different thresholds and two δ sizes).

From the analysis of the data in Table 5 it may be concluded that:

1. It is important to establish a threshold value from which to represent the size distribution. The value of the fitting slope varies according to the threshold selected. Of course, the mean hail diameter also varies. If the hailpad measurement is carried out meticulously, the threshold value

Fig. 3. Frequency histogram of the % of impacts in each size class in the Inland Area hailpad network (France).

Fig. 4. Frequency histogram of the % of impacts in each size class in the Atlantic Area hailpad network (France).

for hailstones should be set at 5 mm, which is the minimum size for any ice particle to be considered a hailstone. If a larger threshold is set, the smaller hailstones will not be included. As they are the most numerous ones, this would distort the real mean hail diameter of the distribution.

2. In contrast, varying the size of the intervals taking $\delta = 1$ mm or 2 mm hardly affects the value of the distribution slope.

4. Characteristic parameters of hail size distributions

Using the results mentioned above, the databases of each of the 8 networks were elaborated taking 5 mm as the threshold value. The data were normalized and Figs. 1–8 represent the hailstone size distributions.

Hailstones with a diameter of 5 mm have a mass of 0.06 g and leave a very small dent when hitting hailpads. Their

Fig. 5. Frequency histogram of the % of impacts in each size class in the Mediterranean Area hailpad network (France).

Fig. 6. Frequency histogram of the % of impacts in each size class in the Central Oasis hailpad network (Argentina).

detection is not a minor issue. But an adequate choice in the material used for hailpads (Styrofoam Wallmate©) together with the use of careful calibration and measurement techniques (Fraile et al., 1992) make it possible to register with great accuracy the dents left on hailpad plates by very small hailstones. As a result, corrections like the one suggested in NHRE (National Hail Research Experiment) (see Morgan, 1990) were considered unnecessary. The analysis of the 8 distribu-

tions illustrates that the number of hailstones between 5 and 6 mm is much higher than between 6 and 7 mm, a result which is consistent with hail formation and growth processes and confirm the adequacy of the detection and measurement systems employed.

Another aspect that needs to be mentioned is that in the 2 Spanish networks and the 3 Argentinean ones, from large hail on ($D \geq 20$ mm) the frequencies fluctuate greatly. Even

Fig. 7. Frequency histogram of the % of impacts in each size class in the South Oasis hailpad network (Argentina).

MENDOZA: NORTHEAST OASIS 2004-2005

Fig. 8. Frequency histogram of the % of impacts in each size class in the North-East Oasis hailpad network (Argentina).

though the percentage of large hail is small (around 1% of the total), there are high numbers of dents in these classes: 2778 in Lérida, 3500 in Valjalón, 2287 in the Central Oasis, 5278 in the North-Eastern Oasis and 8222 in the Southern Oasis. In these 5 networks, the data discretization was carried out using a δ interval of 1 mm, identical for all classes.

In contrast, in the 3 French networks the fluctuations are not so clear. In this case, $\delta = 4$ mm was used for large hail (from 21 to 44 mm), except for hailstones between 45 and 60 mm, where $\delta = 15$ mm was used. The intervals are large and include hailstones with different sizes, which may explain the lack of fluctuations.

With the distributions obtained, the exponential function was linearized as -follows:

$$\ln N(D) = \ln N_0 - \Lambda D \tag{2}$$

Next, the least squares method was used to estimate the parameters of the function. This method assigns more weight to the higher values of the independent variable, to the detriment of the smaller ones. This method was also chosen because the focus here lies on hailstones with diameters larger than 10 mm.

Several authors have obtained the characteristic parameters of their hail size distributions. In Switzerland, Mezeix (1990) computed the distribution between 7 and 17 mm and found $\Lambda = 4.83 \text{ cm}^{-1}$ and $N_0 = 1324 \text{ cm}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Ulbrich (1977) used an interval between 6 and 30 mm and found $\Lambda = 3.91 \text{ cm}^{-1}$ and $N_0 = 1198 \text{ cm}^{-1} \text{ m}^{-2}$, and for the interval between 6 and 20 mm the slope changed to $\Lambda = 4.93 \text{ cm}^{-1}$. This is a good example showing the weight of the largest hailstones in the distribution parameters. In Italy, Gaiotti et al. (2001) took an interval between 8 and 40 mm and obtained $\Lambda = 4.83 \text{ cm}^{-1}$ and $N_0 = 1830 \text{ cm}^{-1} \text{ m}^{-2}$.

Table 6 shows the parameters of the distribution. The slopes take values between 2.19 cm^{-1} in the Central Oasis (Argentina) and 3.47 cm^{-1} in the Mediterranean network (France). In general, the slope values found in the 8 networks analyzed in this study are lower than the values found in other parts of the world. Two Mediterranean zones, one in southern France and the other one in Italy (Friuli-Venezia Giulia), present very different slopes: 3.39 cm^{-1} in the first case versus 4.83 cm^{-1} in the second. However, the mean hail diameters are similar: 0.79 cm in France and 0.80 in Italy. The two Spanish networks, both in the Central Ebro Valley and located only 100 km away

Table 6
Parameters obtained from the exponential distribution after linearizing and applying the least squares method.

	Inland Area (France)	Atlantic Area (France)	Mediterranean Area (France)	Valjalón (Spain)	Lérida (Spain)	Central Oasis (Argentina)	South Oasis (Argentina)	North-East Oasis (Argentina)
	1987–2005	1988–2005	1989–2005	2 0 0 3 – 2006	2 0 0 0 – 2006	2004/05–2005/ 06	2004/05–2005/ 06	2004/05–2005/ 06
$N_0 \text{ (m}^{-2} \text{ cm}^{-1}\text{)}$	3741	2175	4446	2040	1223	1442	1687	1796
$\Lambda \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	3.19	3.01	3.47	2.70	2.43	2.19	2.29	2.47

from each other, present slopes of 2.70 cm^{-1} (Valjalón) and 2.43 cm^{-1} (Lérida) and a mean hail diameter of 0.87 cm and 0.91 cm, respectively. These data confirm that each study zone presents its own characteristic distribution, which is different from others, even when the two areas share similar geographic characteristics or are relatively close to each other.

The values of the slopes obtained in the French networks are higher than the ones found in Spain and Argentina. The two latter countries have rather similar slopes and mean hail sizes (around 0.9 cm).

The N_0 values found (see Table 6) range between 1223 m^{-2} cm^{-1} (Valjalón) and $4446 \text{ m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ (in the Mediterranean area of France). The same threshold was used in all cases, 0.5 cm, so the results indicate that this value may vary considerably depending on the area.

For the mean hail diameter, the values found range are between 0.79 (Mediterranean area of France) and 0.96 cm (Central Oasis in Mendoza). This means an average mass between 0.23 and 0.42 g, which is an important variation. This fact must be taken into account when using simulation models. Increasing the mean hail diameter results in a hail size distribution in which the number of small hailstones is lower, while the number of large hailstones is higher. Given the importance of understanding changes in hailstone size and microphysical structure, it is essential to use simulated models determining the likelihood of changes both in mean hail diameter and in hail size distribution (Van den Heever and Cotton, 2004).

Finally, it may be concluded that in all cases the estimated parameters of the exponential distribution were significant (Table 6).

5. Large hail distribution versus hail distribution: a bimodal distribution?

Hail size distributions have traditionally been analyzed to improve our knowledge of hail climatology in different parts of the world. In the Spanish and Argentinean hailpad networks, large hail is recorded relatively frequently, and this fact has prompted a more detailed analysis of this type of hydrometeor. The two Spanish networks have been selected for this in-depth study and a very detailed description has been carried out of 400 dents of hailstones larger than 2 cm in diameter. The dents left on the hailpads have been classified in three groups:

1. Round shape: 145 dents – 36.25% of cases.
2. Elliptical shape: 241 dents – 60.25% of cases.
3. Other shapes: 14 dents – 3.50% of cases.

Hailpad analysis techniques assume hailstones are perfectly round. If the horizontal component of the wind velocity is similar to the terminal fall velocity, the dent will have an elliptical shape.

Table 7

Results obtained from the piece-wise regression technique.

	Central Oasis (Argentina)	North-East Oasis (Argentina)	Valjalón (Spain)	Lérida (Spain)
	2004/05–2005/06	2004/05–2005/06	2003–2006	2000–2006
bkpt + 5	1.98	3.74	3.38	2.54
N_0	2716	2749	2876	3335
k_1	2.96	2.81	3.00	3.42
k_2	–1.20	–3.01	–2.58	–2.09
R	0.993	0.995	0.996	0.996

Table 8

Data and results obtained from the exponential distribution before the breakpoint.

	Central Oasis (Argentina)	North-East Oasis (Argentina)	Valjalón (Spain)	Lérida (Spain)
	2004/05–2005/06	2004/05–2005/06	2003–2006	2000–2006
No. of dents before the bkpt	116,630	328,361	324,694	398,416
% of dents before the bkpt	98.08	99.97	99.97	99.81
No. of classes before the bkpt	15	33	29	21
N_0	2716	2756	2874	3221
k	2.96	2.81	3.00	3.37
$1/k + 5$	8.38	8.55	8.34	7.97
R	0.992	0.995	0.996	0.997

In this case the hailstone diameter has traditionally been estimated using the minor axis of the ellipse. This hypothesis is adequate for small hailstones ($D < 2 \text{ cm}$) because the horizontal component of the wind velocity may be similar to or even higher than the fall velocity of the hailstone. The terminal fall velocity follows the equation (Knight and Knight, 2001)

$$V_T = \left(\frac{4g\rho_i D}{3C_D\rho_a} \right)^{1/2} \quad (3)$$

where g is the acceleration due to gravity, ρ_i and ρ_a the densities of the ice and the air, C_D is the drag coefficient, and D is the diameter of the hailstone. For $D = 2 \text{ cm}$, the terminal fall velocity is around 18 m s^{-1} . This means that for hailstorms with a wind speed of 10 m s^{-1} – and this situation is rather common – the horizontal component of the kinetic energy of a hailstone with a diameter of 2 cm is around 0.21 J and the vertical one is nearly three times this figure. For hailstones with a diameter of around 4 cm, the vertical fall velocity is of about 15 J and the horizontal one (considering wind speed 10 m s^{-1}) is only 1.68 J. In other words, in the case of large hailstones, the values of the vertical component of the kinetic energy are much higher than those of the horizontal wind velocity. It may thus be concluded that, in these cases, an elliptical dent (around 60% of the total) on the Styrofoam Wallmate® plate is at least partially due to the fact that the hailstone has that shape, and not only due to the effect of the wind.

Table 9

Data and results obtained from the exponential distribution after the breakpoint.

	Central Oasis (Argentina)	North-East Oasis (Argentina)	Valjalón (Spain)	Lérida (Spain)
	2004/05–2005/06	2004/05–2005/06	2003–2006	2000–2006
No. of dents after the bkpt	2287	83	93	772
% of dents after the bkpt	1.92	0.03	0.03	0.19
No. of classes after the bkpt	20	7	6	18
N_0	463	–	–	37
k	1.76	–	–	1.26
$1/k + 5$	2.54	–	–	3.33
R	0.959	–	–	0.912

Fig. 9. Piece-wise function for the Central Oasis hailpad network (Argentina).

So if all hailstones are considered to be round – and the data illustrate that in the case of large hail this is not very likely – there may be cases in which a particular hailstone is classified in the 3 cm diameter group, when in fact the hailstone has an elliptical shape with a minor axis of 3 cm and a major axis of more than 3 cm. The methods used to measure

large hail should take into account this fact and correct the current *underestimation*. In other words, the real size of large hail may be much larger than the size actually assigned to the hailstones.

As mentioned above, distributions obtained in Spain and Argentina (Figs 1, 2, and 6–8) hailstones were always

Fig. 10. Piece-wise function for the Lérida hailpad network (Spain).

Fig. 11. Linearized exponential distribution before the breakpoint value for the Central Oasis hailpad network (Argentina).

assumed to be round. Considerable variations were observed at the points that correspond to the larger diameters. Bearing in mind the discussion in the paragraph above, this frequency may in fact be even higher.

Recent ecology studies have focused on the detection of critical thresholds associated with habitat fragmentation (e.g., Fahrig, 2001; Toms and Lesperance, 2003) using *piecewise regression* techniques. This is a *broken-stick model* in which two or more lines join at unknown *breakpoints*. These

techniques enable us to determine shifts in the distributions in which two different populations fit.

The simplest piecewise-regression model joins two straight lines at breakpoint as follows:

$$y_i = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1 x_i + e_i & \text{for } x_i \leq \alpha \\ \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 (x_i - \alpha) + e_i & \text{for } x_i > \alpha \end{cases} \quad (4)$$

where y_i is the value for the i th observation, x_i is the corresponding value for the independent variable and α is

Fig. 12. Linearized exponential distribution after the breakpoint value for the Central Oasis hailpad network (Argentina).

Fig. 13. Linearized exponential distribution before the breakpoint value for the Lérída hailpad network (Spain).

the threshold or breakpoint. For the best fit, e_i are the additive errors with mean zero, constant variance, and finite absolute moment of some > 2 (Seber and Wild, 1989). It is assumed that β_1 is the slope before the breakpoint and $\beta_1 + \beta_2$ is the slope after the breakpoint, where $\beta_2 \neq 0$. This model is appropriate when there is an abrupt transition at the breakpoint, forcing

the continuity. These techniques present some problems when the fitting is carried out with few data because it is not possible to clearly determine the distribution in which the population fits from the breakpoint on.

In the present case, the question was whether there was any discontinuity in the hail size distribution that distin-

Fig. 14. Linearized exponential distribution after the breakpoint value for the Lérída hailpad network (Spain).

guished large hail from small hail. The piecewise regression was thus applied to detect any possible breakpoint.

When linearizing Eq. (4) the following relation is obtained:

$$Ly = \begin{cases} LN_0 + k_1x & \text{for } x \leq \text{bkpt} \\ LN_0 + k_1x + k_2(x - \text{bkpt}) & \text{for } x > \text{bkpt} \end{cases} \quad (4)$$

where x is the independent variable (in this case hail diameter minus the threshold of 0.5 cm), N_0 is the intercept, and k_1 and $k_1 + k_2$ are the values of the slopes before and after the breakpoint (bkpt), respectively.

This technique was applied to the databases of the 5 Spanish and Argentinean networks, in which fluctuations are observed in large hail. The results are shown in Table 7. It may be noticed that, in 4 networks, there are statistically significant breakpoints. This suggests that, from a certain size onwards (large hail), there is an abrupt change in the hail size distribution. The breakpoints obtained lie between 1.98 cm (Central Oasis) and 3.74 cm (North-Eastern Oasis).

With this new threshold, a new question arises: what distribution do the hailstone sizes fit now? The values for large hail in the 4 networks have been taken and fitted to an exponential distribution. When the breakpoint lies at very high values (3.38 in Valjalón and 3.74 cm in the North-Eastern Oasis), the number of hail groups from then on is 6 (Valjalón) and 7 (North-Eastern Oasis). In both cases this number is too small to establish the distribution of the larger sizes.

The results (see Tables 8 and 9) illustrate that, from the breakpoint on in 2 of the networks (Lérida and Central Oasis), the distribution is exponential again (statistically significant). Thus, in the case of Lérida, from 0.5 cm to 2.54 cm, the hailstones follow an exponential distribution with a slope of 3.37 cm^{-1} . From 2.54 cm on, they follow another exponential distribution where the slope is 1.26 cm^{-1} . In the Central Oasis, the results show that there are again two exponential distributions with a slope of 2.96 cm^{-1} , until size 1.98 cm, and of 1.76 cm^{-1} after the breakpoint.

Consequently, in these two cases, the databases of the hail size distribution were fitted to bimodal distributions. Figs. 9 and 10 illustrate the fitting of the two cases. In addition, Figs. 11–14 show the linearized exponential distributions (which are statistically significant) before and after the breakpoint value estimated above.

6. Conclusions

The development of several hail prevention projects in France, Spain, and Argentina has favored the installation and long-term operation of hailpad networks in different areas of these countries. The hailpad data are firstly used on a short-term basis to improve severe storm forecast and hail prevention control, but, year after year, they also provide a data set for a physical hail climatology which had not existed before in these countries. As a first step in building this climatology, a comparison of hail size distributions is made in 8 areas with very different meteorological conditions, varying from maritime to continental, and even mountainous.

The normalization of the data operated in this paper is specially intended to compare the slopes of the hailstone size distributions, since the number of hailstones per class of diameter is normalized by the total number of hailstones larger than 0.5 cm. The results show that the distributions are

nearly exponential and that the highest values of their slopes are found in the 3 networks in France and the lowest values in 2 networks in Argentina. Differences in the ratio of the number of supercells to the total number of hail cells are probably related to this observation.

In 4 networks in Spain and Argentina, a break in the mean exponential distributions is observed at a hailstone diameter of 1.5 to 2.0 cm. A technique specially aimed at detecting breakpoints in size distributions shows that the distributions before and after the breakpoints are exponential at a high statistical level. A possible explanation of the breakpoint could be related to the observation that about 60% of the hailstones larger than 2 cm are elliptical in the concerned areas. The rarity of large hail is the major obstacle to fix an approach to a bimodal distribution. Their study could add much to knowledge of the factors involved in large hail formation.

Acknowledgments

The authors are grateful to Dr. Noelia Ramón for translating the paper into English. This study was supported by the MEC through the, CGL2006-13372-C02-01/CLI, Gobierno de Aragón, ADV Terres de Ponent, ANELFA and Gobierno de Mendoza.

References

- Admirat, P., 1973. Natural hail cores and their ability to estimate the efficiency of hail prevention systems. Proceedings, WMO/IAMAP Scientific Conference on Weather Modification, Tashkent. WMO N° 399, pp. 197–206.
- Changnon, S.A., 1973. Hail sensing and small-scale variability of windblown hail. *J. Wea. Mod.* 5, 30–42.
- Changnon, S.A., Fosse, E.R., Lecomte, E.L., 1999. Interactions between the atmospheric sciences and insurers in the U.S. *Climatic Change* 42, 57–67.
- Cheng, L., English, M., 1983. A relationship between hailstone concentration and size. *J. Atmos. Sci.* 40, 204–213.
- Cheng, L., English, M., Wong, R., 1985. Hailstone size distributions and their relationship to storm thermodynamics. *J. Clim. Appl. Meteor.* 24, 1059–1067.
- Crow, E.L., Long, A.B., Dye, J.E., Ulbrich, C.W., 1979. Results of a randomized hail suppression experiment in northeast Colorado. Part III: analysis of hailstone size distributions for seeding and yearly effects. *J. Appl. Meteor.* 18, 1559–1568.
- Decker, Fred W., Calvin, Lyle, D., 1960. Hailfall of 10 September 1959 Near Medford Oregon. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 42, 475–480.
- Dennis, A.S., Musil, D.H., 1973. Calculations of hailstone growth and trajectories in a simple cloud model. *J. Atmos. Sci.* 30, 278–288.
- Dessens, J., 1986. Hail in southwestern France: I. Hailfall characteristics and hailstorm environment. *J. Clim. Appl. Meteor.* 25, 35–47.
- Dessens, J., Fraile, R., 1994. Hailstone size distributions in southwestern France. *Atmos. Res.* 33, 57–73.
- Dessens, J., Berthet, C., Sánchez, J.L., 2007. A point hailfall classification based on hailpad measurements: the ANELFA scale. *Atmos. Res.* 83, 132–139.
- Douglas, R.H., 1963. Recent hail research: a review. *Meteor. Monogr.* 5 (27), 157–167.
- Fahrig, L., 2001. How much habitat is enough? *Biological Conservation* 100, 65–74.
- Federer, B., Waldvogel, A., 1975. Hail and raindrop size distributions from a Swiss multicell storm. *J. Appl. Meteor.* 14, 91–97.
- Federer, B., Waldvogel, A., 1978. Time-resolved hailstone analyses and radar structure of Swiss storms. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 104, 69–90.
- Fraile, R., Castro, A., Sánchez, J.L., 1992. Analysis of hailstone size distributions from a hailpad network. *Atmos. Res.* 28, 310–326.
- Gertzman, H.S., Atlas, D., 1977. Sampling errors in the measurement of rain and hail parameters. *J. Geophys. Res.* 82, 4955–4966.
- Giaiotti, D., Ganesini, E., Stel, F., 2001. Heuristic considerations pertaining to hailstone size distributions in the plain of Friuli–Venezia Giulia. *Atmos. Res.* 57, 269–288.
- Houze Jr., R.A., Hobbs, P.V., Herzegh, P.H., Parsons, D.B., 1979. Size distributions of precipitation particles in frontal clouds. *J. Atmos. Sci.* 37, 156–162.
- Huschke, R.E., 1959. Glossary of meteorology. *Amer. Meteorol. Soc.* 638 pp.

- Knight, C.A., Knight, N.C. 2001. Hailstorms. Severe Convective Storms. Meteor. Monogr., Vol 28, No. 50, Amer. Meteor. Soc., 223–254.
- List, R., 1985. In: Kessler, E. (Ed.), Properties and growth of hailstones. Thunderstorm Morphology and Dynamics. University of Oklahoma Press, pp. 259–276.
- Lozowski, E.P., Strong, G.S., 1978. On the calibration of hailpads. J. Appl. Meteor. 17, 521–528.
- Lozowski, E.P., Erb, R., Wojtiw, L., Wong, M., Strong, G.S., Matson, R., Long, A., Vento, D., Admirat, P.L., 1978. The hail sensor intercomparison experiment. Atmosphere-Ocean 16, 94–106.
- Mezeix, J.F., 1990. Further exploratory evaluations of Grossversuch IV using hailpad data: analysis of hail patterns and stratification by storm type for seeding effect. J. Appl. Meteor. 29, 401–417.
- Mezeix, J.F., Doras, N., 1981. Various kinetic energy characteristics of hail patterns in the Grossversuch IV experiment. Amer. Meteor. Soc. 20, 377–385.
- Morgan, G., 1990. La grandine. E.R.S.A., Gorizia, 147 pp.
- Morgan, G., 1992. Some results of aircraft investigation of internal properties of thunderstorm cloud systems in northeastern Italy with an interpretation for hail prevention. Atmos. Res. 28, 259–269.
- Morgan, G., Towery, N., 1975. On the role of strong winds in damage to crops by hail and its measurement with a simple instrument. J. Appl. Meteor. 15, 891–898.
- Nelson, S.P., 1983. The influence of storm flow structure on hail producer. Part II: General characteristics and implications for hail growth. J. Atmos. Sci. 40, 1965–1983.
- Polston, K., 1996. Synoptic patterns and environmental conditions associated with very large events. Preprints, 18th Conference on Severe Local Storms. San Francisco, CA. Amer. Meteor. Soc. , pp. 349–356.
- Rogers, R.R., Yau, M.K., 1989. A short course in cloud physics, 3d ed. Elsevier, 290 pp.
- Schleusener, R.A., Jennings, P.C., 1960. An energy method for relative estimates of hail intensity. Bull. Amer. Meteor. Soc. 41, 372–376.
- Seber, G.A.F., Wild, C.J., 1989. Nonlinear regression. John Wiley and Sons, New York. New York, USA.
- Toms, J.D., Lesperance, M.L., 2003. Piecewise regression: a tool for identifying ecological thresholds. Ecology, 84 8, 2034–2041.
- Ulbrich, C.W., 1974. Analysis of Doppler radar spectra of hail. J. Appl. Meteor. 13, 387–396.
- Ulbrich, C.W., 1977. Doppler radar relationships for hail at vertical incidence. J. Appl. Meteor. 16, 1249–1359.
- Van den Heever, S.C., Cotton, W.R., 2004. The impact of hail size on simulated supercell storms. J. Appl. Meteor. 61, 1596–1609.
- Vento, D., 1978. L'angle de chute au sol de la grêle. Atmosphere-Ocean 16, 81–85.
- Vento, D., Morgan, G., 1980. A study of the direction of wind accompanying hail in Colorado, Illinois, Italy and Switzerland, and of wind-caused variations of hailfall on an ultra-fine scale hailpad network containing obstacles to windflow. Preprints, Third WMO Sci. Conf. On Weather Modification, Clermont-Ferrand, WMO, pp. 615–621.
- Waldvogel, A., Schmid, W., Federer, B., 1978a. The kinetic energy of hailfalls. Part I: Hailstone spectra. J. Appl. Meteor. 17, 515–520.
- Waldvogel, A., Federer, B., Schmid, W., Mezeix, J.F., 1978b. The kinetic energy of hailfalls. Part II: Radar and hailpads. J. Appl. Meteor. 17, 1680–1693.
- Wong, R.K.W., Chidambaram, N., Cheng, L., English, M., 1988. The sampling variations of hailstone size distributions. J. Appl. Meteor. 27, 254–260.

Diseño de la portada: Antonio Ribont

Fotos y tratamiento de las mismas: Beatriz Gil

MODELIZACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES DE GRANIZO

MODELLING OF HAIL PRECIPITATION

Tesis Doctoral dirigida por:
Dr. Jose Luis Sánchez Gómez
Dra. Laura López Campano