Tethys
Revista de meteorologia
i climatologia mediterrània

Tethys 2013, **10**, 25–34
www.tethys.cat
ISSN-1697-1523
eISSN-1139-3394
DOI:10.3369/tethys.2013.10.03
Revista editada per **ACAM**

Proposta de tres variables termodinàmiques per discriminar entre tempestes amb pedregades i tempestes amb pluges intenses

C. Farnell i M. C. Llasat

Departament d'Astronomia i Meteorologia, Universitat de Barcelona, Barcelona

Rebut: 25-IV-2012 – Acceptat: 17-V-2013 – **Versió Original**

Correspondència a: mcarme7@gmail.com

Resum

Entre finals de primavera i principis de tardor és usual que a Catalunya es desenvolupin tempestes, que, malgrat que usualment produeixen xàfecs intensos de curta durada, també poden donar lloc a temps sever amb calamarsa o pedregades. Si bé aquestes darreres afecten usualment comarques de l'interior i existeixen publicacions per aquest casos, l'anàlisi dels episodis que afecten la costa produint danys en material públic i privat, no està tan desenvolupada. L'objectiu d'aquest estudi és proporcionar més indicadors termodinàmics que ajudin a diferenciar les tempestes acompanyades de pedra de les tempestes sense pedra, considerant casos que han afectat diferents regions de Catalunya, i, principalment, zones costaneres. La finalitat és donar més informació per millorar el pronòstic i poder detallar la informació en aquest tipus de situacions. El procediment elaborat ha estat estudiar diversos episodis de pluges fortes i pedregades que van afectar Catalunya durant el període 2003-2009, principalment, a les comarques de Girona, i validar la proposta durant la campanya de final d'estiu i tardor de 2009 així com del 2012. Per cada un d'ells s'han analitzat diverses variables vinculades amb la temperatura, la humitat i el vent a diferents nivells de l'atmosfera alhora que també s'ha tingut present la informació proporcionada pel radiosondatge de Barcelona. D'aquest estudi se'n deriva que la diferència de temperatura entre 500 hPa i 850 hPa, la humitat a capes baixes de l'atmosfera i l'índex LI són bons indicadors per a la detecció de possibles pedregades associades a una tempesta.

Paraules clau: variables termodinàmiques, pluges intenses, pedregades, zones costaneres, Catalunya

1 Introducció

A Espanya es produeixen cada any pèrdues a l'agricultura superiors a 650 milions d'euros, essent Catalunya, concretament el sector nord-est i Ponent, una de les zones on es produeixen més pedregades (Ceperuelo et al., 2009). L'època més favorable per a la seva formació comprèn des del mes d'abril fins a l'octubre, època en la qual també es produeixen fortes precipitacions i en la qual, per tant, moltes vegades existeix una notable dificultat en la predicció dels meteors associats a les tempestes previstes.

Existeixen diversos estudis que tracten les pedregades a Catalunya. En essència, es poden agrupar en tres tipus: els estudis de casos específics, els referits a la vall de l'Ebre i pla de Lleida, i els que abasten tota Catalunya. Entre els primers trobem els de Ceperuelo et al. (2006) sobre l'episodi de l'11 de setembre de 2004, o els de Farnell et al. (2009) i Pineda et al. (2009) sobre l'episodi del 17 de setembre de 2007. Referits a períodes més llargs trobem els de Pascual (2002), qui va realitzar un estudi de les pedregades al pla de Lleida, el de Ceperuelo et al. (2009) que presenta una tècnica de millora en la identificació de pedra en la zona de la vall de l'Ebre utilitzant observacions radar, zona a la qual també es refereix l'estudi inèdit de Merino (2009), sobre caracterització termodinàmica, o el d'Aran et al. (2011) que relaciona diversos patrons de circulació atmosfèrica amb episodis de pedregades a les terres de Lleida. Finalment, entre els referits a tota Catalunya i a períodes de temps més o

(cc) BY *2013 Autor(s). Aquest treball té llicència "Creative Commons".*

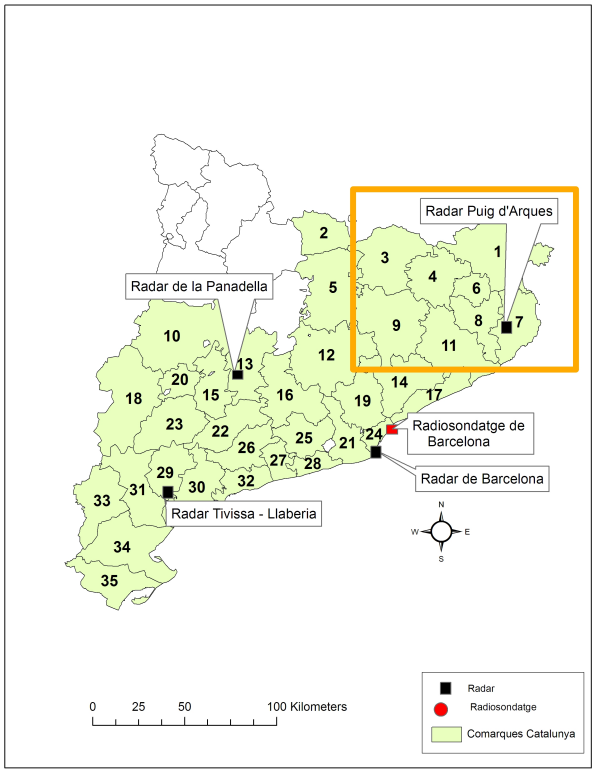

Figura 1. Ubicació dels 4 radars de la xarxa del SMC (la Panadella, Puig d'Arques, Vallirana i Tivissa-Llaberia) i l'estació de radiosondatge de Barcelona, representada amb un punt vermell. Localització de la zona d'estudi i del sector nord-est (requadre). En color verd es mostren les comarques afectades pels episodis analitzats i esmentats en les Taules 1, 2 i 3. 1 Alt Empordà; 3 Ripollès; 2 Cerdanya; 4 Garrotxa; 6 Pla de l'Estany; 7 Baix Empordà; 8 Gironès; 11 La Selva; 9 Osona; 5 Berguedà; 12 Bages; 14 Vallès Oriental; 17 Maresme; 24 Barcelonès; 19 Vallès Occidental; 21 Baix Llobregat; 28 Garraf; 25 Alt Penedès; 16 Anoia; 13 Segarra; 15 Urgell; 20 Pla d'Urgell; 10 Noguera; 23 Garrigues; 18 Segrià; 22 Conca de Barberà; 26 Alt Camp; 30 Baix Camp; 32 Tarragonès; 29 Priorat; 31 Ribera d'Ebre; 33 Terra Alta; 32 Baix Ebre; 35 Montsià.

menys llargs, trobem els treballs inèdits desenvolupats dins del projecte SEVERUS de la CICYT, de Boshoms (2008) i Bernal (2008), que mostren una anàlisi espacial i temporal de les pedregades a Catalunya en el període 1996-2006, o la referència a l'evolució de les pedregades en un context de canvi climàtic (Llasat i Corominas, 2010).

Malgrat l'extensa bibliografia ja esmentada amb prou feines existeixen treballs sobre les tempestes de calamarsa a la zona litoral de Catalunya. És per això que l'objectiu del present treball és analitzar també alguns episodis de pedra i de pluja intensa que s'han produït al nord-est de Catalunya amb la finalitat de poder aportar uns criteris simples que ajudin a discriminar la possibilitat que les tempestes siguin amb pedra o sense pedra, i que poden ser molt útils per complementar altres procediments que es comenten més endavant. En efecte, a diferència del pla de Lleida o la Vall de l'Ebre on la major part de tempestes produeixen pedra, a la costa solen produir pluges intenses, i, en menor grau, pluges amb calamarsa, o calamarsa o pedra sense pluja.

Per a la formació de la pedra és necessari que hi hagi convecció profunda. S'entén per convecció profunda una regió on existeixen forts corrents ascendents (> 10 m s^{-1}), que s'estén per la major part de la troposfera i que porta associats fenòmens tan diversos com: pedra, tornados, forts vents, precipitacions intenses i/o descàrregues elèctriques (Weisman i Klemp, 1986). Els efectes que produeixen en superfície es classifiquen segons la severitat, intensitat de la precipitació, tipus de precipitació. El National Weather Service (NWS) defineix tempesta severa quan conté un d'aquests fenòmens: pedra de 2 cm de diàmetre o més, ràfegues de vent de més de 50 kt o bé tornados. Aquest criteri també és seguit per l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET) i el Servei Meteorològic de Catalunya (SMC).

Existeixen diferents eines i metodologies per estimar la probabilitat de convecció profunda, o bé per analitzar-la. Una possibilitat és recórrer a l'ús del radar meteorològic i, en el cas de la pedra, utilitzar variables com poden ser la densitat de VIL (quantitat de líquid vertical integrat en una columna), VIL del dia o la Probabilitat d'Observació de Pedra (San Ambrosio, 2001; Aran et al., 2007), o l'algoritme proposat per Witt et al. (1998). López (2003) va definir uns indicadors per discriminar les cèl·lules amb pedra o sense pedra a partir del VIL, DVIL, reflectivitat màxima i mitjana, sostre del núvol, alçada de la màxima reflectivitat, volum, massa, velocitat de la tempesta, o la variació d'algunes variables (màxima alçada del núvol, volum, etc) per unitat de temps. Posteriorment, Ceperuelo et al. (2009) van aplicar la tècnica d'anàlisi en components principals i van reduir els 25 paràmetres radar en cinc noves variables que expliquen la caracterització física de la cèl·lula convectiva mitjançant l'observació 3D. Aquestes cinc variables són: i) Intensitat; ii) Dimensions físiques de la cèl·lula; iii) Nivell de fusió i refredament de la cèl·lula convectiva; iv) Estat del cicle de vida de la cèl·lula; v) Reflectivitat i organització del sistema.

Una altra possibilitat, que en essència complementa l'anterior, es basa en l'anàlisi termodinàmica i mesoscalar, com seria el treball de Sánchez et al. (2003). En aquest cas s'han de conèixer els factors necessaris per a la formació de tempestes i els factors que discriminen les tempestes de les tempestes severes. Els factors comuns són la humitat a capes baixes, la inestabilitat convectiva i els mecanismes de forçament (McGingley, 1986). En ambdós casos és necessària la presència de corrents ascendents intensos. Alguns dels factors discriminatoris, que només es formen en les tempestes severes, són la presència d'una capa seca a nivells mitjans i la cisalla del vent (McGingley, 1986). A més existeixen diversos ingredients a considerar per a la formació de pedra: estructures organitzades de llarga duració, alçada de la isozero i les isotermes de -5°C i -10°C (Pascual, 2002), alçada de la base del núvol (Martín et al., 2007) i alçada del cim del núvol (Pascual, 2002). Els índexs termodinàmics que cal tenir present són la CAPE (energia potencial con-

Taula 1. Episodis estudiats amb l'hora, lloc, fenòmens, duració i danys que es van produir. El nom de les comarques afectades van acompanyades d'un número que fa referència a la localització d'aquestes en la Figura 1.

	Hora d'inici	Lloc	Fenòmens i observacions	Duració	Danys
20/08/2003	18 h	Garrotxa (4), Pla de l'Estany (6)	Pedra: pilotes de tennis; pluja intensa; vent fort	30 min	Arbres trencats, cotxes i habitatges trencats, cultius de panís destrossats
16/06/2006	14 h	Pla d'Urgell (20) i Urgell (15)	Pedra 4 cm; pluges fortes; petit tornado; llamps 35000	10-30 min	Cultius destrossats, habitatges i coberts destrossats, teulades aixecades
18/10/2006	Migdia	Comarques de Girona (1-4, 6-8, 11) i Barcelona (5, 9, 11, 12, 14, 16, 17, 19, 21, 24, 25, 28)	Pluges intenses (100 mm 30 min^{-1}); un tornado	Durant la tarda	Inundacions als baixos dels immobles, arbres caiguts, desallotjament de col·legis
11/09/2008	Al migdia al Pirineu, a les 15 h a Girona i a les 17 h a Lleida	Alt Empordà (1), Pla de l'Estany (6), Garrotxa (4) i Ripollès (3), Comarques de Lleida (10, 13, 15, 18, 20, 23)	Pedra; pluja; vent fort; trons i llamps	15 min	Pèrdues de cultius, sobretot poma i préssecs. Caiguda d'arbres a causa del vent, sortides de bombers per inundacions, despreniments de carreteres a Port Ainé (Pallars Sobirà)
05/07/2009	Primera hora de la tarda	Pla de l'Estany (6) i Gironès (8)	Pedra 4 cm, pilotes de golf; pluja i vent	30 min	Arbres desplomats a causa del vent, carrers inundats, cultius afectats per la pedra
09/07/2009	12 h	Comarques de Barcelona (5, 9, 11, 12, 14, 16, 17, 19, 21, 24, 25, 28)	Pluges intenses	3 hores	Les més intenses van caure a les comarques de Barcelona. Va coincidir amb el dia del Tour de França
04/09/2009	Mitja tarda	Comarques de Girona (1-4, 6-8, 11) i Barcelona (5, 9, 11, 12, 14, 16, 17, 19, 21, 24, 25, 28)	Pluges intenses	Durant la tarda	Desbordament d'un torrent a Rupit. Carrers inundats

vectiva disponible), el LI (*Lifted Index*), el TTI (Índex Total de Totals), la Tc (Temperatura de convecció) i el NCC (Nivell de Condensació per Convecció). Aquests índexs han estat utilitzats també en els estudis de Rigo (2004), López (2003), Brooks i Craven (2002), Mitzeva et al. (2007) i Kunz (2007).

En els casos que s'analitzen a continuació s'han tingut presents les metodologies anteriors, si bé ens hem centrat en l'anàlisi sinòptica, mesoscalar i termodinàmica, a fi de poder trobar unes condicions discriminants simples que ajudessin a la millora de la predicció a Catalunya. Amb aquest objectiu l'article es distribueix com s'esmenta a continuació. Després d'aquesta introducció, es presenta a l'apartat 2 la zona estudiada. En el tercer punt s'explica quins casos s'han estudiat i quines han estat les fonts d'informació. En l'apartat 4 s'explica la metodologia aplicada i en el cinquè punt els resultats obtinguts. Finalment en el sisè apartat se n'extreuen les conclusions.

2 Àrea d'estudi i fonts d'informació

Els estudis realitzats aquí es centren a Catalunya, al nord-est de la Península Ibèrica (Figura 1). Aquesta regió es troba envoltada pel Pirineu al nord i per les serralades del Prelitoral i Litoral. A l'est s'hi troba el mar Mediterrani i al sector oest la plana de Lleida juntament amb la continuació de les serralades del Litoral i Prelitoral, i del Pirineu. Aquesta orografia tan complexa afavoreix la formació de pedregades, majoritàriament els mesos d'estiu, i de pluges intenses, les qual provoquen inundacions, especialment durant els mesos de tardor. S'han analitzat diversos episodis que han afectat aquesta zona però especialment les comarques de Girona.

Per a l'anàlisi dels episodis s'ha utilitzat informació procedent de la xarxa de radars doppler en banda C del SMC i del radiosondatge del SMC que es llença des de la Universitat de Barcelona diàriament a les 00 UTC i 12 UTC. Indirectament també s'ha fet servir informació analitzada dins dels projectes MONEGRO (REN2003-09617-

Taula 2. Episodis analitzats el setembre del 2009. Es mostra l'hora d'inici, lloc i fenòmens que es van produir. El nom de les comarques afectades van acompanyades d'un número que fa referència a la localització d'aquestes en la Figura 1.

	Hora (UTC)	Lloc	Fenòmens
12/09/2009	16:00 h	Garrotxa (4); Anoia (16); Pla d'Urgell (20)	Pedra; calamarsa
13/09/2009	12:00 h	Baix Camp (30)	Ruixats amb tempesta; pedra; calamarsa
14/09/2009	13:30 h	Barcelonès (24)	Ruixats intensos amb tempesta i calamarsa
17/09/2009	A partir de 17:00 h	Comarques de Barcelona (5, 9, 11, 12, 14, 16, 17, 19, 21, 24, 25, 28) i Tarragona (22, 26-35)	Pluges intenses
18/09/2009	00:00 h	Comarques de Girona (1-4, 6-8, 11)	Pluges intenses

C02-02), SEVERUS (CGL2006-13372-CO2-02) i FLASH (*Framework Programme European Commission, project no.* 036852), procedent de la xarxa de 172 granímetres instal·lada a la part de Lleida (Ceperuelo et al., 2009), i dels 126 pluviòmetres de la xarxa SAIH de l'Agència Catalana de l'Aigua i de la xarxa d'estacions meteorològiques automàtiques del SMC, XEMA (Atencia et al., 2011), a fi d'identificar les característiques en superfície de la pedra i la precipitació. Les dades de les estacions meteorològiques automàtiques també s'han fet servir per al seguiment dels episodis en el període de validació.

Des del punt de vista dels models meteorològics s'ha treballat amb: i) Reanàlisis del NCEP; ii) Mapes mesoscalars del MM5 corregut pel grup GAMA de la UB, segons les parametritzacions i anualment explicat a Barrera et al. (2007).

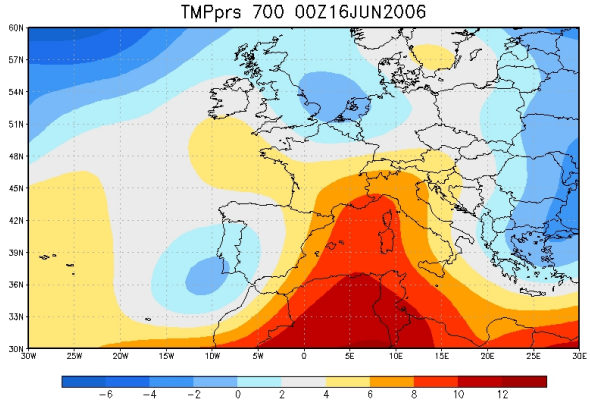

Figura 2. Anàlisi de temperatura a 700 hPa el dia 16 de juny de 2006 a les 00 UTC.

3 Casos d'estudis seleccionats i fonts d'informació

3.1 Casos d'estudis seleccionats

Els casos d'estudi s'han seleccionat a partir de quatre criteris: i) Àrea afectada: s'han buscat indrets susceptibles de patir inundacions i pedregades; ii) Diàmetre de la pedra > 2 cm, ja que en aquest cas es produeixen danys considerables a l'agricultura però també en infrastructures i vehicles, a banda de possibles danys personals directes; iii) Elevada intensitat mitjana de la precipitació; iv) Danys notables.

Els casos s'han seleccionat després de fer una recerca sistemàtica en la base de dades de premsa desenvolupada pel grup GAMA, PRESSGAMA (Llasat et al., 2009), la base de dades d'inundacions INUNGAMA (Barnolas i Llasat, 2007), atenent a la homogeneïtat de la informació meteorològica disponible i, finalment, als períodes d'estudi contemplats en els projectes MONEGRO SEVERUS i FLASH. En total s'han seleccionat set casos compresos en el període 2003-2009, centrant-nos en el període de campanyes de seguiment de pedregades, maig-setembre, i amb especial incidència en casos que van afectar la costa. A aquests s'han afegit a títol de validació de les conclusions uns casos més recents produïts durant l'estiu 2009 i durant la primavera i estiu del 2012. També s'han inclòs alguns casos que van afectar comarques de l'interior a fi de poder efectuar una comparació.

En la Taula 1 es mostren els diferents episodis estudiats, les zones més afectades, la descripció sintètica dels fenòmens i els danys que es varen produir. Per classificar la pedra s'utilitza la classificació de ANELFA atenent a les seves dimensions (Dessens et al., 2007).

Posteriorment es van realitzar cinc estudis més per tal de validar-ne el mètode (Taula 2) i 21 més, tres anys desprès

Taula 3. Episodis analitzats, del març fins al setembre del 2012. Es mostra l'hora, lloc i fenòmens que es van produir. El nom de les comarques afectades van acompanyades d'un número que fa referència a la localització d'aquestes en la Figura 1.

	Hora (UTC)	Lloc	Fenòmens
19/3/2012		Osona (9)	Calamarsa
26/3/2012	Tarda	Segrià (18)	Calamarsa
3/4/2012	Tarda - vespre	Pla d'Urgell (20)	Calamarsa
6/4/2012	Tarda	Interior comarca de Tarragona (22, 26-35)	Calamarsa
12/5/2012	Tarda	Pirineu; Prepirineu; Comarques de Girona (1-4, 6-8, 11)	Calamarsa
13/5/2012	Tarda	Maresmes; Osona (9, 17)	Calamarsa
19/5/2012	Tarda	Franja de Ponent (10, 18, 31, 33)	Calamarsa
20/5/2012	Matí	Urgell, Pla d'Urgell, Segrià, Garrigues (15, 18, 20, 23)	Calamarsa
	Tarda	Mollet del Vallès (19)	Calamarsa
		Meitat est de Catalunya	Pluja intensa
27/5/2012	Tarda	Planes d'Hostoles Tordera (4, 17)	Calamarsa
12/6/2012	Tarda	Pirineu; Prepirineu; Comarques de Girona (1-4, 6-8, 11)	Pluja intensa; tempestes
19/6/2012	Matinada	Palau d'Anglesola (20)	Calamarsa
1/7/2012	Tarda	Vilafranca del Penedès; Badalona (24, 25)	Calamarsa
5/7/2012	Tarda	Pla Urgell; Segrià; Urgell; Berguedà; Bagès; Serra de l'Obach (5, 10, 12, 15, 18, 20)	Pedra
27/7/2012	Tarda	Segrià (18)	Pedra; Calamarsa
28/7/2012	Matí	Aldea; Valentins del Montsià (35)	Pedra
5/8/2012	Tarda	Segrià; Noguera (10, 18)	Pedra; calamarsa
30/8/2012	Matí	Generals a tota Catalunya	Xàfecs intensos
9/9/2012	Tarda	Prat Lluçanès, Castellar del Riu (5, 9)	Pedra
	Tarda	St Vicenç de Torelló; Rierades Gironella (9)	Calamarsa
10/09/2012	Tarda	Berguedà (5)	Pedra; Pluja intensa
	Tarda	Alfès (18)	Calamarsa
12/9/2012	Tarda	Comarques de Girona (1-4, 6-8, 11)	Pluges intenses

(Taula 3). L'avantatge és que es van poder aplicar els criteris proposats a partir de les anàlisis anteriors en la seva predicció i es va fer un seguiment en temps real d'aquests esdeveniments. El seguiment es va fer a través de les diverses fonts explicades en el punt 2 i els resultats d'aquestes anàlisis es poden veure en detall en els resultats. En aquest cas es va distingir entre calamarsa ($<$ 10 mm de diàmetre) i pedra ($>$ 10 mm de diàmetre).

4 Metodologia

El treball s'ha iniciat analitzant els episodis de pedra i pluja intensa de la Taula 1. A través d'aquestes anàlisis s'ha arribat a la selecció d'uns factors discriminants entre els episodis de pluja i pedra. Aquests s'han examinat durant dues campanyes experimentals, les quals s'han dut a terme durant el mes de setembre del 2009 i durant la primavera i estiu del 2012. L'anàlisi realitzada contempla els passos que es mostren a continuació.

4.1 Anàlisi a escala sinòptica

La Taula 4 mostra les variables i factors estudiats per a cada episodi a les 00 UTC, 06 UTC, 12 UTC i 18 UTC, a partir de les anàlisis del NCEP. En primer lloc s'han tingut presents aquells factors que afavoreixen la formació de tempestes (McGingley, 1986; Martín et al., 2007): i) Humitat a capes baixes i mitjanes; ii) Inestabilitat convectiva ; iii) Mecanismes de forçament (efectes orogràfics, frontera tèrmica o d'humitat, microfronts en ratxa, jet a nivells baixos). També s'han analitzat factors discriminants entre tempestes i tempestes severes (McGingley, 1986; Martín et al., 2007): i) Capa seca a nivells mitjans; ii) Cisalla del vent. S'ha de tenir present que la cisalla vertical referent a la direcció afavoreix la profundització i organització de la convecció. Segons López (2003), si la cisalla és molt intensa, sobretot entre 500 i 200 hPa, inhibeix la convecció.

A capes altes també s'ha observat la temperatura. Segons Martín et al. (2007), els núvols generadors de pedra han de tenir el seu cim entre -20°C i -40°C (els 5 i 10 km d'alçada). Finalment la presència d'una depressió propera també és un factor important a considerar, sobretot per la convergència que pot crear i per l'organització del flux d'aire (Rigo i Llasat, 2007).

4.2 Anàlisi mesoscalar

Per a cada episodi s'han analitzat els següents camps mesoscalars a diferents nivells de l'atmosfera (superfície, 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa i 300 hPa) de les 00 UTC, 12 UTC i 18 UTC, a partir de les sortides del MM5: i) Temperatura; ii) Humitat relativa; iii) Direcció i velocitat del vent, amb especial incidència en les zones de convergència. Segons

Taula 4. Factors analitzats a escala sinòptica per a cada un dels episodis.

Nivells atmosfera	300 hPa	500 hPa	700 hPa	850 hPa	925 hPa	Superfície
Pressió						X
Màxim de vent	X					
Velocitat del vent		X	X	X	X	
Direcció del vent	X	X	X	X	X	
Solc		X				
Vorticitat		X				
Dorsal tèrmica			X			
Advecció tèrmica			X	X		
Temperatura	X	X	X	X		X
Humitat		X	X	X	X	X

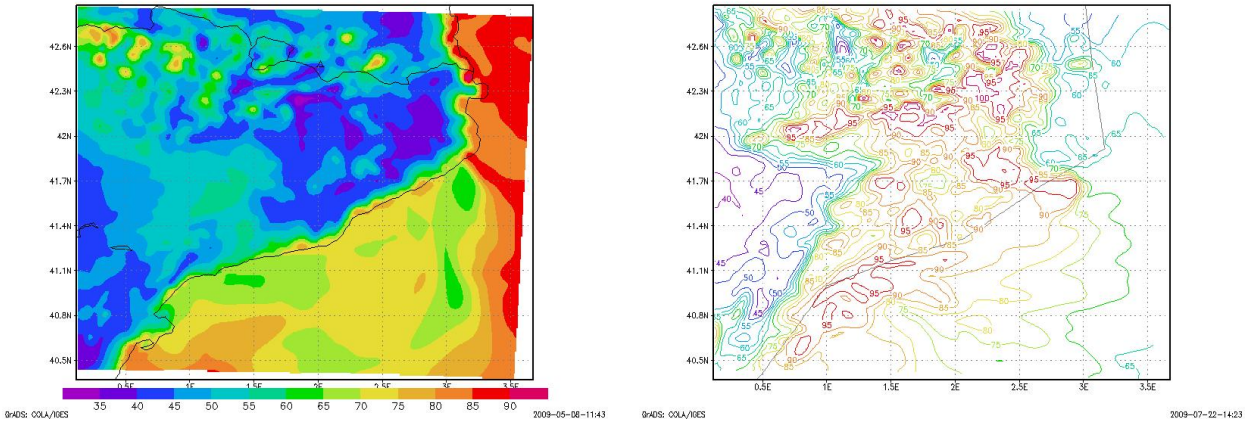

Figura 3. Mapes mesoscalars d'humitat a les 12 UTC. A l'esquerra (a), l'episodi de pedra del 11/09/2008. A la dreta (b), l'episodi de pluja del 09/07/2009.

Martín et al. (2007), aquests factors esmentats també poden actuar com a mecanismes de forçament a nivell mesoscalar. La parametrització i inicialització del MM5 utilitzades es detallen a Barrera et al. (2007), però bàsicament es basen en l'esquema de Kain-Fritsch (Kain i Fritsch, 1993).

4.3 Anàlisi termodinàmica i radar

S'han analitzat diferents factors i índexs termodinàmics a través del radiosondatge de Barcelona de les 00 UTC i 12 UTC i) Presència de corrents ascendents intensos. La intensitat d'aquests corrents està determinada per l'energia potencial convectiva disponible, CAPE, (Weisman i Klemp, 1986) i la velocitat màxima vertical, VMAX, (Martín et al., 2007); ii) Alçada de la isocero i de la isocero del termòmetre humit, (López, 2003; Martín et al., 2007); iii) Alçada de les isotermes de -5°C, -10°C, -20°C (Martín et al., 2007); iv) LI, (Galway, 1956); v) Índex Total de totals, TTI, (Miller et al., 1972); vi) Nivell de condensació per elevació, NCE; vii) Nivell de condensació per convecció, NCC; viii) Massa d'aigua precipitable, MAP.

Les imatges radar s'han fet servir per seguir l'evolució de les tempestes i localitzar les zones afectades per a cada una d'elles. Posteriorment s'han observat els danys produïts en cada una de les zones.

5 Resultats

5.1 Anàlisi sinòptica i mesoscalar

En tots els casos, siguin associats a pedregades o a pluges intenses, a 300 hPa la temperatura està compresa entre -38°C i -42°C, sense trobar cap diferència discriminant entre ambdós tipus d'episodis. Així mateix, el vent bufa de sud-oest a aquest nivell, amb un màxim de velocitat que es troba entre 15 i 20 m s^{-1}, en tots els casos.

La circulació a 500 hPa i 700 hPa no sempre està ben definida. En la major part dels episodis, el que s'identifiquen són solcs secundaris i la vorticitat és petita o gairebé nul·la. Tot i això, existeixen dos episodis (16/06/2006 i 18/10/2006), que van afectar les terres de Lleida i de Girona, respectivament, on es troba una depressió tancada freda o bé un solc profund a 500 hPa, a l'oest de la regió. El vent dominant en la

Taula 5. Índexs termodinàmics en cada un dels episodis (RDS 12 UTC). Les sigles estan definides en el text.

	Pedra				Pluja		
	16/06/2006	05/07/2009	11/09/2008	20/08/2003	09/07/2009	04/09/2009	18/10/2006
NCC (m)	2660	2223	1685	2223	463	1129	1000,9
NCE (m)	1705	909	892	1292	500	446	704
ISO O	3872	4050	4392	3952	3812	4393	3258
LI	-2,3	-8	-4,7	-3,3	5,2	-6,2	-1,2
TTI	52,2	51	46	45,6	40,3	47	51,8
CAPE	283	2457	1960	788	0	2291	233
MAP	3,46	3,26	3,61	2,81	4	3,48	3,6
Tc	33,2	34,6	32	37,8	23	28,2	19,6
T850-T500	32,6	28,3	28,1	37,2	23,0	25,9	19,0

Taula 6. Humitat (%) a diferents nivells de l'atmosfera en els episodis de pluja. Els nombres en cursiva indiquen baixa humitat ($< 60\%$), mentre que els nombres en negreta indiquen humitat $> 90\%$. S'indica també el valor de l'índex LI i la diferència de temperatures entre 850 i 500 hPa.

Episodis	Humitat (%) a diferents nivells atmosfèrics					Índexs termodinàmics	
	500 hPa	700 hPa	850 hPa	925 hPa	1000 hPa	LI	T850-T500
09/07/2009	82	**97**	**95**	89	85	5,2	23
04/09/2009	*44*	*20*	81	**95**	65	-3	28,2
18/10/2006	69	**98**	**100**	86	85	-1,2	19,6

part davantera de la borrasca és de l'oest o sud-oest amb una velocitat compresa entre 15 i 20 m s^{-1}. En el primer d'aquest casos, que va afectar les comarques de Lleida, s'observa una marcada entrada d'aire càlid del sud a nivells mitjos i alts (Figura 2), situant-se la zona afectada en el sector d'entrada de la dorsal tèrmica. La humitat es troba per sota del 60% en tots els casos excepte en l'episodi de pluja del 09/07/2009 que va afectar les comarques de Barcelona on és del 90%.

A 850 hPa, la diferència d'humitat entre els episodis de pedra i pluja és marcada. En els casos de pedra la humitat es troba per sota del 70%, mentre que en els episodis de pluja supera el 80%. El tret comú és l'existència d'una petita entrada d'aire fred, que fa baixar la temperatura entre 1 i 2°C. El vent, també en tots els casos, és fluix i no s'ha trobat una direcció dominant.

En el nivell de 925 hPa la diferència d'humitat, entre els episodis associats a la pedra i a la pluja, continua força remarcada. En els primers, la humitat es troba per davall del 70%, en canvi en els casos de pluja la humitat és superior al 90%. El vent es manté molt semblant al de 850 hPa, és fluix i sense una direcció predominant.

En l'anàlisi mesoscalar en superfície es perceben diferències entre els episodis de pedra i pluja. En els episodis de pedra, la humitat és inferior al 67%, excepte en l'episodi del 16 de juny de 2006 que conté un 78% (Figura 3). En els episodis de pluja la humitat és superior al 85% tret de l'episodi del 4 de setembre del 2009 que conté un 65%.

5.2 Índexs termodinàmics

La Taula 5 mostra una síntesi dels resultats per l'estudi termodinàmic a partir del radiosondatge de Barcelona. L'anàlisi de la diferència entre la temperatura de 500 hPa i 850 hPa mostra que en els episodis de pedra és superior als 28°C; en els casos de pluja, la diferència és inferior als 26°C.

Un altre indicador que mostra diferències entre els diferents episodis és el nivell de condensació per convecció (NCC). Segons Pascual (2002), si el NCC està excessivament alt, els corrents ascendents poden no desenvolupar-se amb suficient energia o bé no desenvolupar-se. En tots els casos de pedra estudiats aquí el NCC es troba per sobre dels 1600 m, mentre que en els episodis de pluja aquest es situa per davall dels 1100 m.

Si la Tc és excessivament alta pot no arribar a produir-se la convecció (Pascual, 2002). En les anàlisis elaborades en els diferents episodis s'ha obtingut que en els episodis de pedra la Tc és superior als 32°C, i en els episodis de pluja és inferior als 23°C, excepte en l'episodi del 04/09/2009 que obté una temperatura de convecció de 28°C. Es tracta, per tant, de temperatures que són assumibles a l'estiu.

En els casos de pedra el LI presenta valors baixos i permet diferenciar en general els casos de pedra i els de pluja. En els episodis de pedra aquest té un valor inferior a -2. En els casos de pluja és superior a -1, excepte en l'episodi del 04/09/2009 que conté un valor de -6.

Els índex CAPE, TTI i la ISO 0 són bons indicadors de temps inestable però no són suficients per diferenciar els ca-

Taula 7. Humitat (%) a diferents nivells de l'atmosfera en els episodis de pedra. Els nombres en cursiva indiquen baixa humitat (< 60%). S'indica també el valor de l'índex LI i la diferència de temperatures entre 850 i 500 hPa.

Episodis	Humitat (%) a diferents nivells atmosfèrics					Índexs termodinàmics	
	500 hPa	700 hPa	850 hPa	925 hPa	1000 hPa	LI	T850-T500
16/06/2006	*38*	83	61	*56*	78	-2,3	33,2
05/07/2009	*44*	*43*	83	74	*55*	-4,8	34,6
11/09/2008	*28*	71	63	76	67	-5,6	31,5
20/08/2003	*22*	*50*	*28*	*47*	*52*	-3,3	37,8

Taula 8. Factors i índexs analitzats per corroborar o refutar la hipòtesi. Els nombres en cursiva indiquen baixa humitat (< 60%), mentre que els nombres en negreta indiquen humitat > 90%. S'indica també el valor de l'índex LI i la diferència de temperatures entre 850 i 500 hPa.

Episodis	Hora (UTC)	Humitat (%) a diferents nivells atmosfèrics					Índexs termodinàmics	
		500 hPa	700 hPa	850 hPa	925 hPa	1000 hPa	LI	T850-T500
12/09/2009	12	72	65	*48*	*53*	*50*	-1,4	30
13/09/2009	00	67	90	*47*	65	*56*	-1,1	28,5
	12	*58*	85	75	**100**	72	-1,1	28,5
14/09/2009	00	80	**92**	61	80	72	-1,7	26,6
	12	67	*55*	88	73	**94**	2,9	24,1
17/09/2009	12	65	**93**	75	65	60	0	24,5
18/09/2009	00	64	83	76	75	**91**	-1,43	26,4

sos de pedra dels de pluja ja que les diferències entre ells són poc marcades.

5.3 Selecció de les variables més discriminants

En l'apartat anterior s'han analitzat per cada un dels casos esmentats 9 variables entre 300 hPa i 1000 hPa, i 10 índexs calculats a partir dels radiosondatges. Les Taules 6 i 7 pretenen sintetitzar aquelles variables més representatives i que han indicat diferències entre els episodis de pedra i pluja.

En l'anàlisi dels mapes s'ha observat una única diferència significativa, la humitat en baixos nivells. Per treballar amb aquesta variable i de forma més precisa s'han agafat els valors d'humitat a diferents nivells a partir dels radiosondatges de les 00 UTC i 12 UTC. S'observa que en els episodis de pluja la humitat es troba per sobre del 95% entre 850 hPa i 925 hPa (Taula 6). En canvi en els episodis de pedra, la humitat es troba per sota del 85% i en cap cas s'arriba al 100% d'humitat (Taula 7).

En l'anàlisi termodinàmica resulten bons indicadors la diferència de temperatura entre 500 hPa i 850 hPa i l'índex LI. Aquesta diferència és superior a 28°C en els episodis de pedra i inferior a aquest llindar en els episodis de pluja. L'índex LI és inferior a -2 en els episodis de pedra, i superior a -1 en els de pluja. En certa manera aquests resultats són coherents amb els obtinguts per Gibergans-Bàguena i Llasat (2007) després d'analitzar 2393 (00 UTC) i 2265 (12 UTC) radiosondatges de Palma de Mallorca, per al període 1975-1989, i cercar entre 22 paràmetres termodinàmics, els més discriminats sobre la pluja a Catalunya. Dels set índexs obtinguts, el LI i la temperatura relativa a 850 hPa eren dos d'ells.

S'ha estudiat més a fons l'episodi de pluja del 4 de setembre del 2009 ja que al llarg de l'anàlisi s'ha observat que els valors obtinguts en diversos índexs, el NCC i Tc, són pròxims als valors dels casos de pedra, i l'índex LI obté un valor igual. La pregunta formulada és: per què no va caure pedra? Si bé amb aquest estudi no podem donar la resposta concloent, sí que podem observar que per sota dels 850 hPa la humitat és superior al 90%.

5.4 Validació de les hipòtesis

Durant el mes de setembre del 2009 es va fer una campanya de seguiment per corroborar o refutar les hipòtesis desenvolupades en l'anàlisi anterior. Es van analitzar cinc episodis en què va caure pluja intensa i/o calamarsa o pedra (Taula 2). Els factors analitzats en aquests episodis van ser la humitat en els nivells compresos entre 1000 hPa i 500 hPa, l'índex termodinàmic LI, i la diferència entre la temperatura de 500 hPa i 850 hPa. La Taula 8 mostra com la humitat a 850 hPa va ser inferior al 50% sols en els dos casos en què va haver-hi pedra, i que en els casos dominats per la pluja, va ser superior al 75% en aquest nivell. L'estudi detallat de tots els nivells entre 850 hPa i superfície mostra com en els casos dominats per la pluja en algun nivell es superava el 95%.

Referent als índexs termodinàmics s'observa que el *Lifted Index* és inferior a -1 en els casos dominats per la pedra, en els quals la diferència de temperatura entre 500 hPa i 850 hPa es troba inferior als 28°C (Taula 8).

Durant l'any 2012 es va fer una segona campanya experimental entre els mesos de març i setembre (Taula 3), agafant episodis de pluja intensa, calamarsa i pedra. Dels 21 casos d'estudi seleccionats, sols 6 van enregistrar pedregades, i la resta pluges intenses i/o calamarsa. D'aquests 6 episodis i atenent als radiosondatges de Barcelona i Saragossa, tots van enregistrar valors de LI $<$ -3, humitats per sota del 80% (5 d'ells, per sota del 70%) i la diferència de temperatura en nivells mitjos va estar per sobre dels 28°C. Tanmateix, cap dels altres casos, en què es va produir pluja o bé pluja acompanyada de calamarsa, es van donar aquestes tres condicions.

6 Conclusions

De l'anàlisi meteorològica de 33 casos de tempestes amb pluja i tempestes amb pedra produïts entre 2003 i 2012, a través de 9 variables i 10 índexs termodinàmics, s'arriba a la conclusió que existeixen tres índexs termodinàmics que poden ajudar a diferenciar les tempestes amb pedra de les tempestes sense pedra. Així, valors de LI $<$ -2, diferències de temperatura entre 850 hPa i 500 hPa superiors a 28°C i humitats entre superfície i 850 hPa per sota del 70%, són els principals indicadors. Per contra, en els episodis de pluja el LI és usualment superior a -1, la humitat en baixos nivells supera el 85%, i el gradient de temperatura en nivells mitjos és considerablement inferior al que es dóna en casos de calamarsa.

Aquest resultat és coherent amb la producció de tempestes severes en front de tempestes amb pluges intenses, a la zona d'estudi. En el cas de pedregades mostra la important inestabilitat en nivells mitjans, que en el cas de pluges es concentra sobretot a nivells baixos, així com el requeriment de majors humitats en aquests darrers casos. En l'estudi de Gibergans-Bàguena i Llasat (2007) sobre factors termodinàmics discriminants de pluges intenses a Catalunya, a partir dels radiosondatges fets a Mallorca, ja es detectava la importància de valors alts de massa d'aigua precipitable entre 700 i 500 hPa i les elevades temperatures a nivells baixos. D'altra banda, la situació sinòptica presenta en tots dos tipus d'esdeveniments característiques molt similars, associats a la producció de tempestes de primavera, estiu i principis de tardor, amb la presència d'un talweg a l'oest, o d'una depressió propera, l'entrada d'aire càlid en baixos nivells. El marcat gradient de temperatura obtingut pels casos de pedregada, apuntaria a una entrada d'aire relativament fred en nivells mitjos.

Agraïments. Aquest treball va ser iniciat dins del projecte del Ministeri d'Educació i Ciència, SEVERUS (CGL2006-13372-CO2-02). El nostre agraïment a Montserrat Aran, Tomeu Rigo i Equip de predicció i vigilància del Servei Meteorològic de Catalunya per les dades facilitades, així com a A. Merino, M. Bernal i M. Boshoms, per donar-nos accés als seus treballs de fi de màster.

Referències

Aran, M., Sairouni, A., Bech, J., Toda, J., Rigo, T., Cunillera, J., i Moré, J., 2007: *Pilot project for intensive surveillance of hail events in Terres de Ponent (Lleida)*, Atmos Res, **83**, 315–335.

Aran, M., Peña, J. C., i Torà, M., 2011: *Atmospheric circulation patterns associated with hail events in Lleida (Catalonia)*, Atmos Res, **100**, 428–438.

Atencia, A., Mediero, L., Llasat, M. C., i Garrote, L., 2011: *Effect of radar rainfall time resolution on the predictive capability of a distributed hydrologic model*, Hydrol Earth Syst Sci, **15**, 3809–3827, doi:10.5194/hess–15–3809–2011.

Barnolas, M. i Llasat, M. C., 2007: *A flood geodatabase and its climatological applications: the case of Catalonia for the last century*, Nat Hazards Earth Syst Sci, **7**, 271–281.

Barrera, A., Altava-Ortiz, V., Llasat, M. C., i Barnolas, M., 2007: *Heavy rain prediction using deterministic and probabilistic models. the flash flood cases of 11-13th October 2005 in Catalonia (NE of Spain)*, Advances in Geosciences, **12**, 121–126, doi:10.5194/adgeo–12–121–2007.

Bernal, M., 2008: Aplicación de un SIG al análisis espacial de las tormentas de granizo en el NE de la Península Ibérica, Universitat de Barcelona, Barcelona, treball del Màster Oficial en Meteorologia.

Boshoms, M., 2008: Tempestes de calamarsa a Catalunya. Cap a la creació duna base de dades depisodis de calamarsa. Anàlisi temporal per al període (1996-2006), Universitat de Barcelona, Barcelona, treball del Màster Oficial en Meteorologia.

Brooks, H. E. i Craven, J. P., 2002: A database of proximity soundings for significant severe thunderstorms, 1957-1993, American Meteorological Society, Preprints, 21st Conference on Severe Local Storms, San Antonio, TX, 639-642.

Ceperuelo, M., Llasat, M. C., López, L., García, E., i Sánchez, J. L., 2006: *Study of 11 September 2004 hailstorm event using radar identification of 2D systems and 3D cells*, Advances in Geosciences, **1**, 215–222.

Ceperuelo, M., Rigo, T., Llasat, M. C., i Sánchez, J. L., 2009: *Improving hail identification in the Ebro valley region using radar observations: probability equations and warning thresholds*, Atmos Res, **93**, 474–482.

Dessens, J., Berthet, C., i Sánchez, J. L., 2007: *A point hailfall classification based on hailpad measurements: The ANELFA scale*, Atmos Res, **83**, 132–139.

Farnell, C., Aran, M., Andrés, A., Busto, M., Pineda, N., i Torà, M., 2009: *Study of the September 17th 2007 severe hailstorm in Pla d'Urgell. Part I: fieldwork and analysis of the hailpads*, Tethys, **6**, 69–81, doi: 10.3369/tethys.2009.6.05.

Galway, J. G., 1956: *The lifted index as a predictor of latent instability*, Bull Amer Meteorol Soc, **37**, 528–529.

Gibergans-Bàguena, J. i Llasat, M. C., 2007: *Improvement of the analog forecasting method by using local thermodynamic data. Application to autumn precipitation in Catalonia*, Atmos Res, **86**, 173–193.

Kain, J. S. i Fritsch, J. M., 1993: Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme, in: The representation of cumulus convection in numerical models, Emanuel, K. A. and Raymond, D. J., Meteorological Monograph of the American Meteororological Society, 46, 165-170.

Kunz, M., 2007: *The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms*, Nat Hazards Earth Syst Sci, **7**, 327–342.

Llasat, M. C. i Corominas, J., 2010: Riscos associats al clima. Segon informe sobre el canvi climàtic a Catalunya, J.E. Llebot (coord.), Institut dEstudis Catalans i Generalitat de Catalunya, Departament de la Vicepresidència, Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible de Catalunya, pp. 243-307, ISBN (IEC): 978-84-9965-027-2, ISBN (Gencat): 978-84-393-8615-5, Dipòsit Legal: B. 44160-2010, 2010.

Llasat, M. C., Llasat-Botija, M., i López, L., 2009: *A press database on natural risks and its application in the study of floods in northeastern Spain*, Nat Hazards Earth Syst Sci, **9**, 2049–2061, doi:10.5194/nhess–9–2049–2009.

López, L., 2003: Convección atmosférica severa: pronóstico e identificación de tormentas de granizo, Universidad de León, tesis doctoral, 207 pp.

Martín, F., Elizaga, F., Carretero, O., i San Ambrosio, I., 2007: Diagnóstico y predicción de la convección profunda, STAP Nota técnica Núm. 35.

McGingley, J., 1986: Nowcasting Mesoscale Phenoma, ed. P.S. Ray, American Meteorological Society, Boston, Massachussets, 657-688.

Merino, A., 2009: Caracterización termodinámica de la atmósfera en situaciones de granizo en el valle medio del Ebro y comparación con otras regiones de formación de tormentas, Universitat de Barcelona, Barcelona, treball del Master Oficial en Meteorologia.

Miller, R. C., Bidner, A., i Maddox, R. A., 1972: Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the air force global weather control, AFGWC Tech. Rep 200, Air Weather Service, US Air Force, 102 pp.

Mitzeva, R., Dimitrova, T., i Savtchenco, A., 2007: Enviromental conditions responsible for the type of precpitation in summer convective over Bulgaria, Faculty of Physics, University of Sofia and Agency Hail Suppression, Sofia, Bulgaria.

Pascual, R., 2002: Estudio de las granizadas en el llano de Lleida, Nota técnica núm. 3. Centro Meteorológico Territorial de Catalunya, http://www.aemet.es/es/divulgacion/varios/detalles/biblioteca_tempoweb.

Pineda, N., Aran, M., Andres, A., Busto, M., Farnell, C., i Torà, M., 2009: *Study of the September 17th 2007 severe hailstorm in Pla d'Urgell. Part II: meteorological analysis*, Tethys, **6**, 83–103, doi: 10.3369/tethys.2009.6.06.

Rigo, T., 2004: Estudio de sistemas convectivos mesoescalares en la zona mediterránea occidental mediante el uso de radar meteorológico, tesis doctoral, 215 pp.

Rigo, T. i Llasat, M. C., 2007: *Analysis of mesoscale convective systems in Catalonia (NE of Spain) using radar for the period 1996-2000*, Atmos Res, **83**, 458–472.

San Ambrosio, I., 2001: Primera valoración de algoritmos para la estimación de la probabilidad de ocurrencia de granizo, V Simposio Nacional de Predicción. Memorial "Alfonso Ascaso", Madrid 20-23 Noviembre 2001, 6 pp.

Sánchez, J. L., Fernández, M. V., Fernández, J. T., Tudurí, E., i Ramis, C., 2003: *Analysis of mesoscale convective systems with hail precipitation*, Atmos Res, **67-68**, 573–588.

Weisman, M. L. i Klemp, J. B., 1986: Characteristics of Isolated Convective Storms. Mesoscale Meteorology and Forecasting, Ed. P.S. Ray, American Meteorological Society, Boston, Massachussets, 331-358.

Witt, A., Eilts, M. D., Stumpf, G. J., Johnson, J. T., Mitchell, E. D., i Thomas, K. W., 1998: *An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D*, Weather Forecast, **13**, 286–303.