

Capítol 3. Anàlisi observacional de les condicions de propagació de radar meteorològic

En la primera part d'aquest capítol es fa una anàlisi de les condicions de propagació a partir de les observacions de diversos anys de radiosondatges de Barcelona. L'anàlisi contempla diverses magnituds. Posteriorment es realitza una comparació amb d'altres estacions de radiosondatge de la Mediterrània Occidental i el seu entorn. Finalment s'il·lustren diversos casos de propagació anòmala amb imatges del radar meteorològic de Vallirana.

3.1 Dades de radiosondatge

Les observacions de radiosondatge han estat tradicionalment l'única font d'informació dels perfils de refractivitat amb prou continuïtat per ser usats en l'elaboració de climatologies de condicions de propagació. A l'igual que en d'altres aplicacions, com ara l'estudi de la humitat (Elliot and Gaffen, 1991) o la temperatura (Luers and Eskridge, 1995; Zhai and Eskridge, 1996), els radiosondatges permeten construir sèries temporals d'una certa durada. No obstant cal prestar atenció a possibles problemes instrumentals, especialment en les capes més baixes (Parlange and Brutsaert, 1990; Connell and Miller, 1995).

3.1.1. L'estació de radiosondatge de Barcelona

Des del setembre de 1997 es realitzen radiosondatges a la Facultat de Física de la Universitat de Barcelona, finançats pel Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) del Departament de Medi Ambient. Inicialment els radiosondatges es feien a les 12 hores Temps Universal (T.U.), però a l'abril de 1999 s'iniciaren també els llançaments de sondes de les 00 T.U. . Les coordenades precises del lloc de llançament són 41.38°N, 2.12°E i 98 m d'altitud.

Aquests radiosondatges tenen diverses aplicacions. D'una banda s'utilitzen en les tasques de previsió del SMC; també per a la inicialització del model meteorològic de predicció numèrica MASS, adaptat per fer previsions a la zona de Catalunya (Codina et al., 1997); finalment en estudis locals concrets com ara la caracterització d'índexs d'inestabilitat (Sairouni et al., 2000); previsió específica de calamarsa i pedra (Segalà et al., 2002) o el tema

que ens ocupa, la caracterització de la propagació anòmala (per exemple Bech et al., 1998; Bech et al., 2000; Bech et al., 2002).

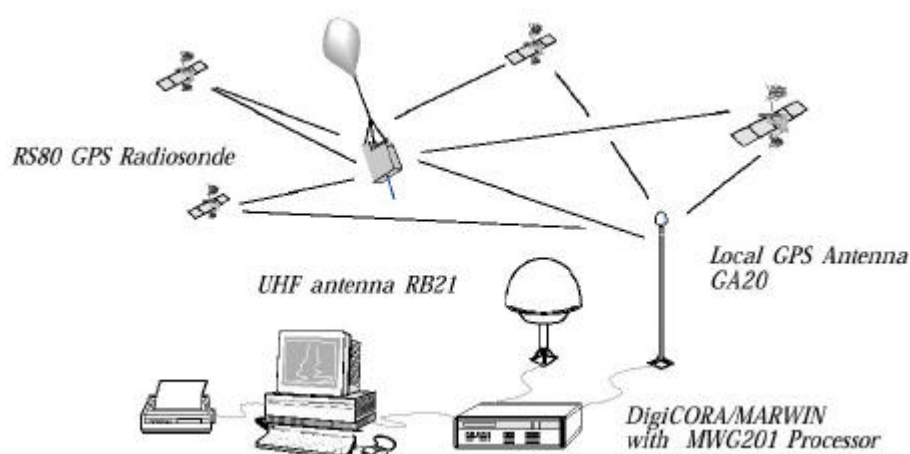
Cal mencionar que hi ha precedents a aquesta sèrie de dades. No fa gaire anys a Barcelona ja s'havien fet radiosondatges, si bé amb globus captiu. Estaven bàsicament orientats al seguiment de la qualitat de l'aire però també van usar-se pel càlcul de la refractivitat de l'aire (Lorente i Alonso, 1987).

Molt anteriorment, també s'havien fet sondatges a Barcelona per part de l'antic Servei Meteorològic de Catalunya. En aquell cas, però, no eren radiosondatges sinó que es tractava de globus que no disposaven de transmissor sinó que es seguien des de terra per un observador. Això permetia deduir el perfil vertical del vent però no de la temperatura i la humitat i, per tant, no es podia calcular la refractivitat de l'aire ni la seva variació amb l'alçada. De fet, del total de Notes d'Estudi que publicà l'antic SMC (al voltant de setanta), una vintena estaven dedicades als sondatges cobrint les observacions del període 1921 a 1931, a més de dos volums complets anteriors dedicats a l'estació aerològica (veure per exemple, Fontserè, 1914).

3.1.2. La sonda Vaisala RS-80

El tipus de sonda utilitzada per enregistrar les dades tractades en aquest treball és el model RS-80 fabricat per la companyia finesa Vaisala. L'equip mesura pressió, temperatura, humitat i vent conforme s'enlaira aixecat per la força ascensional d'un globus inflat amb heli. Un transmissor UHF envia les dades a l'estació terrestre receptora, proporcionant el perfil vertical de cada variable. La pressió, temperatura i humitat són mesurades per diversos sensors mentre que un receptor GPS permet estimar la força i direcció del vent mitjançant un antena receptora GPS instal·lada a l'estació receptora (veure la figura 3-1).

Fig. 3-1 Esquema de les comunicacions d'una radiosonda GPS-80 (Vaisala, 1999).



La resolució, rangs i altres detalls tècnics de les mesures de pressió, temperatura i humitat de la sonda Vaisala RS-80 es resumeixen a la Taula 3-1.

Taula 3-1 Característiques dels sensors de la sonda RS-80 (Vaisala, 1997)

MAGNITUD	CARACTERÍSTICA
Pressió	
Tipus de sensor:	BAROCAP ® aneroide capacitiu
Rang de mesura:	1060 hPa a 3hPa
Resolució	0.1 hPa
Precisió	
Reproduïbilitat (1)	0.5 hPa
Repetibilitat de calibració (2)	0.5 hPa
Temperatura	
Tipus de sensor	THERMOCAP ® "bead" capacitiu
Rang de mesura:	+60 °C a - 90 °C
Resolució	0.1 °C
Precisió	
Reproduïbilitat (1)	0.2 °C fins a 50 hPa, 0.3 °C per 50-15 hPa, 0.4°C per sobre de 15 hPa level
Repetibilitat de calibració (2)	0.2 °C
Inèrcia	< 2.5 s (6 m/s flux a 1000 hPa)
Humitat	
Tipus de sensor	HUMICAP ® capacitor de capa fina
Rang de mesura:	0 a 100 % RH
Resolució	1 % RH
Precisió	
Reproduïbilitat (1)	<3 %RH
Repetibilitat de calibració (2)	2 %RH
Inèrcia	1 s (6 m/s flux a 1000 hPa, +20 °C)

1) Segons dades comparatives internacionals de radiosondes de la OMM Fases I, II (WMO/TD No. 195 i 451).

2) Desviació estàndar de les diferències de dues calibracions successives.

La inèrcia dels sensors pot tenir efectes significatius en els càlculs de refractivitat, atesos els problemes de mesura existents a molt baixes temperatures (Miloshevich et al. 2001) o en altres condicions. Així, Bean i Dutton (1968) mencionen diverses correccions a efectuar per eliminar aquest efecte. No obstant, els equips actuals han millorat considerablement (un

retard de 1 s per la humitat comparat amb els 5 s mencionat per aquells autors) i per aquest motiu no es considera aquest tipus de correccions, a part de que el rang de temperatures considerat queda fora dels valors amb problemes significatius de mesura.

3.1.3. Dades TEMP i dades d'alta resolució

L'estació receptora que registra les dades de les sondes RS-80 permet generar dos tipus de codificació dels sonatges. Un és l'estàndard conegut com TEMP i l'altra, de resolució vertical variable, en aquest cas amb mostres cada 10 segons.

El format estàndard TEMP està regulat per l'Organització Meteorològica Mundial (OMM) i s'utilitza per transmetre i intercanviar les observacions de radiosondatge a través de la Xarxa de Comunicacions Global de la OMM (comunment coneguda com GTS, acrònim de l'expressió anglesa *Global Telecommunication System*).

El format TEMP especifica les observacions en els nivells coneguts com estàndard i en els nivells significatius. Els nivells estàndard estan definits com els de 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 100, 70, 50, 30, 20 i 10 hPa. Els nivells significatius es defineixen com aquells on es donen certs gradients de les variables observades.

3.1.4. Control de qualitat

Dins del preprocessament de les dades de radiosondatge, previ als càlculs rellevants a l'estimació de condicions de propagació electromagnètica, s'han realitzat diversos controls de qualitat. Aquests es poden dividir en dos tipus: d'una banda controls destinats a assegurar que el format de les dades comparades és coherent i constant; d'altra banda, un segon tipus de control orientat a descartar inconsistències en les mesures físiques enregistrades. Els controls de qualitat formen part del conjunt de programes que s'han elaborat per tractar i analitzar les dades. S'han utilitzat programes en ANSI-C, la llibreria Numerical Recipes (Press et al., 1993), scripts de Unix i del llenguatge de processament alfanumèric *awk*.

El control de qualitat relatiu al format està encaminat a assegurar que els fitxers de dades de radiosondatges d'alta resolució són correctes i seran llegits sense problemes pels programes de processament.

En general, les dades d'alta resolució s'enregistren en fitxers tipus ASCII, amb una certa capçalera de quatre línies que descriu les magnituds observades a cada nivell d'observació i la resta de línies on s'expressen les observacions, una línia per nivell observat. D'una banda es comprova que efectivament el fitxer s'ha transferit entre sistemes informàtics com a fitxer ASCII (en cas que s'hagi transferit com a fitxer binari pot causar problemes en la lectura pel fet que en sistemes operatius Unix el final de línia és diferent d'altres sistemes).

També es comprova que el nivell inicial té una altitud de 98 m i no hi hagut problemes en l'enregistrament dels nivells més baixos. Igualment es realitza una comprovació sobre l'altitud mínima assolida (per exemple per gradients dels 1000 m primers de l'atmosfera el programa comprova que efectivament s'ha superat el nivell desitjat). Finalment, es comprova que la capçalera del fitxer disposa de les quatre línies preceptives (de fet es genera un fitxer temporal que sí té la capçalera que és el que es processa i després s'esborra).

Un cop superat aquests controls sobre el format se'n fan d'altres pròpiament dits de qualitat de les dades. Aquests estan basats en el procediment de control de qualitat de radiosondatges de la GTS descrits al document *Quality Control on GTS data at Météo-France* (Météo-France, 1997).

Aquests tipus de control de qualitat són similars als realitzats en d'altres estudis amb observacions de radiosondatge. Per exemple Llasat et al. (1996) i Gibergans (2001), per tal d'establir relacions entre radiosondatges i pluges intenses, descriuen un sistema de control de qualitat que també verifica tant aspectes de format com de contingut dels fitxers amb les observacions.

El resultat del filtratge s'il·lustra en la figura 3-2. D'un total de 2485 radiosondatges registrats entre setembre de 1997 i març de 2002, un 86% (2140) superen els controls i són considerats en les estadístiques. La Taula 3-2 dona els detalls precisos de nombres mensuals i percentatge de dades vàlides.

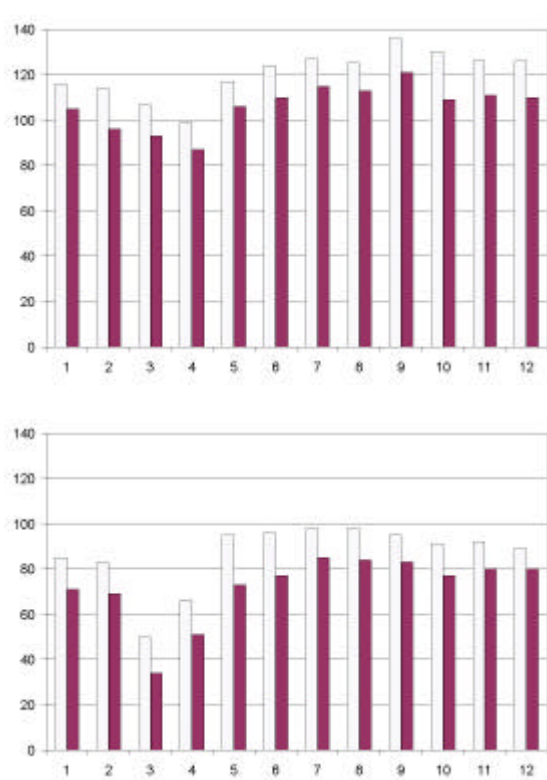


Fig. 3-2 Efecte del control de qualitat sobre les dades de radiosondatge de Barcelona per cada mes (indicat pel número en l'eix x), corresponent l'histograma superior a les dades de les 00 Z i l'inferior a les 12 Z. Les barres clares indiquen els sondatges disponibles inicialment i les barres sòlides indiquen el nombre de sondatges vàlids.

Taula 3-2 Nombre de radiosondatges mensuals considerats en els càlculs per a les dades de mitjanit (00 Z), migdia (12 Z) i el total mensual. La darrera línia dóna el nombre total del conjunt de les dades.

MES	00 Z	12 Z	TOTAL
Gener	71	105	176
Febrer	69	96	165
Març	34	93	127
Abril	51	87	138
Maig	73	106	179
Juny	77	110	187
Juliol	85	115	200
Agost	84	113	197
Setembre	83	121	204
Octubre	77	109	186
Novembre	80	111	191
Desembre	80	110	190
TOTAL	864	1276	2140

3.2 Refractivitat superficial

En el capítol anterior s'ha definit la refractivitat de l'aire, N , i s'ha discutit la seva importància en els estudis sobre caracterització de les condicions de propagació d'ones electromagnètiques com les microones utilitzades pels radars meteorològics.

3.2.1. Refractivitat

Com s'ha vist anteriorment, segons Bean i Dutton (1968) la refractivitat N pot escriure's en funció de la temperatura T , la pressió de l'aire p i la pressió de vapor e , com:

$$N = \frac{77.6}{T} \left(p + \frac{4810}{T} e \right) \quad \text{Eq. 3-1}$$

expressió vàlida en les condicions especificades en el capítol anterior que es verifiquen en el nostre cas.

Malgrat alguns autors han suggerit posteriorment noves formulacions pel càlcul de la refractivitat (per exemple, Thayer, 1974) majoritàriament s'ha seguit acceptant la mateixa fórmula original de Bean i Dutton (veure, per exemple, ITU 1997a) així que per tal de poder obtenir estadístiques comparables amb aquests treballs s'ha optat per utilitzar-la.

3.2.2. Estadística de N superficial

En aquesta secció es mostra informació estadística de la refractivitat superficial de Barcelona. Concretament s'ha calculat la mitjana, moda, desviació estàndar, valor mínim, percentil 25, 50 i 75 i valor màxim, desglossats per cada mes de l'any, per les dades de les 00 i 12 T.U., l'estadística resum de cada període horari així com una estadística del total de les 00 i les 12 T.U. (Taula 3-3).

Taula 3-3 Estadística de refractivitat superficial (en unitats N) a Barcelona per les 00 T.U., 12 T.U. i per totes les dades.

00 T.U.							
MES	Mitjana	Desv_st	Min	P25	P50	P75	Màx
Gener	315	8	291	310	315	320	335
Febrer	317	10	293	309	318	325	334
Març	316	10	296	310	319	323	334
Abril	320	10	292	314	322	329	335
Maig	329	13	294	319	332	339	351
Juny	341	13	297	334	343	350	366
Juliol	347	15	302	336	351	357	372
Agost	354	15	303	346	355	364	382
Setembre	344	13	309	338	345	354	371
Octubre	336	14	305	326	335	347	367
Novembre	316	13	286	309	314	321	367
Desembre	313	11	284	305	312	318	339
Total	330	19	284	315	328	346	382
12 T.U.							
MES	Mitjana	Desv_st	Mín	P25	P50	P75	Màx
Gener	312	10	286	305	311	317	340
Febrer	309	11	284	302	310	317	331
Març	316	12	292	306	316	324	342
Abril	313	13	268	306	315	324	336
Maig	326	13	300	316	328	336	352
Juny	335	13	285	326	338	344	367
Juliol	341	16	265	332	341	352	388
Agost	344	16	298	331	345	356	369
Setembre	337	17	300	322	340	350	368
Octubre	328	15	299	316	327	340	359
Novembre	312	12	283	305	311	319	348
Desembre	311	11	278	303	310	318	338
Total	325	18	265	312	324	339	388
Total							
00 i 12	327	19	265	313	325	341	388
T.U.							

Tot i que el gradient de refractivitat, més que la refractivitat per ella mateixa, és més rellevant pel que fa a les condicions de propagació electromagnètica, existeix un cert interès en els valors superficials de N , denominada N_s . Concretament, N_s apareix en els models exponencials d'atmosfera o la caracterització de la magnitud A (veure Capítol 2).

A la taula 3-3 s'observa com els valors nocturns són lleugerament més baixos: les mitjanes mensuals de les 00 Z sempre queden per sota i s'assoleixen 5 unitats N menys pel cas dels valors mitjans anuals. No obstant, la moda de les 00 i les 12, tenen una diferència inferior. Probablement el més destacable és el marcat màxim anual del mes d'agost i el mínim de desembre-gener. Aquesta variació estacional s'aprecia clarament a la Figura 3-3. També és destacable el fet que durant el màxim estival augmenta la dispersió dels valors (queda reflectit a la desviació estàndar i a les diferències entre els valors percentils representats).

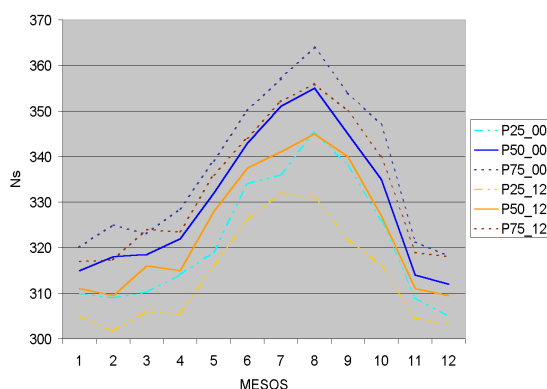


Fig. 3-3. Variació mensual dels percentils 25, 50 i 75 de la refractivitat superficial de les 00 i 12 T.U. a Barcelona.

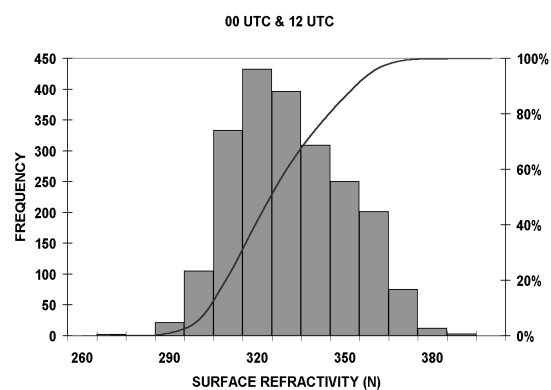


Fig. 3-4. Histograma i distribució de freqüència acumulada de refractivitat superficial a Barcelona per a les 00 UTC i 12 UTC.

3.2.3. Distribució acumulada de freqüències

Per tal d'analitzar els conjunts de valors de la mitjanit, migdia i globalment, pot fer-se un histograma i calcular la distribució acumulada de freqüències per cada cas. Això es mostra a les figures 3-4 i 3-5 amb histogrames fets a intervals de 5 unitats N . S'aprecia una distribució unimodal, on la classe de valors més nombrosos és la corresponent a 320 N en els tres casos. El pendent de la distribució és més marcat en els valors inferiors al màxim, mentre que les freqüències de valors superiors decauen més suaument.

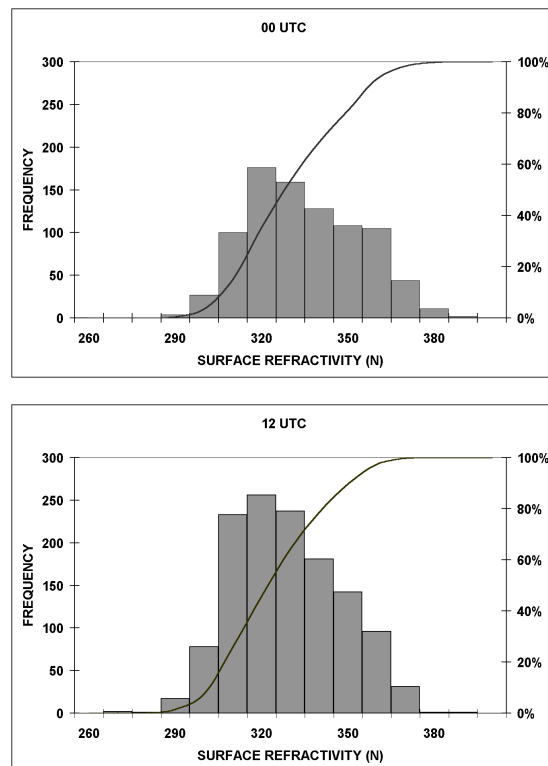


Fig. 3-5 . Histogrames i distribucions de freqüència acumulada de refractivitat superficial a Barcelona per a les 00 UTC i 12 UTC.

Tant a les 00 com a les 12, el màxim està centrat a la classe de 320 unitats N. No obstant, pels valors diürns s'observa com les classes precedents són més nombroses que en les dades nocturnes.

3.3 Gradient vertical de refractivitat

Com s'ha comentat a bastament al capítol anterior, el gradient vertical de refractivitat és el factor clau per a la caracterització de les condicions de propagació electromagnètiques. En aquesta secció es comenta com s'ha calculat el gradient i es mostren estadístiques mensuals del gradient vertical de refractivitat de l'aire a Barcelona.

3.3.1. Càlcul del gradient de N

Primerament cal concretar que el gradient de refractivitat descrit a continuació, tret dels casos en els quals s'especifica el contrari, correspon al del primer estrat d'aire de 1000 m d'altura sobre la superfície terrestre. Aquest gradient és el que es considera de forma estàndar en els treballs de la Unió Internacional de Telecomunicacions (ITU, 1997a, 1997b) i també per Doviak i Zrnic (1993) com el valor representatiu que cal avaluar per saber si existeixen condicions de propagació anòmla del feix del radar.

El gradient vertical de la refractivitat de l'aire pot calcular-se de diverses formes. La més senzilla, adoptada per la ITU i proposada com a estàndar per a la comparació internacional de mesures, consisteix en obtenir la diferència entre la mesura de refractivitat (calculada tal com s'ha descrit a l'apartat anterior) a la superfície, N_s , i a 1000 m d'altura sobre la superfície, N_{1000m} . Cal notar que no es tracta de la refractivitat a 1000 m d'altitud, sinó d'altura sobre la superfície del terra. Aquesta definició pot justificar-se tenint present que per angles d'elevació petits de l'antena (propers a 1°), la major part de l'energia del feix es trobarà dins d'aquest estrat per distàncies de curt abast (suposant les condicions habituals d'un radar meteorològic: banda S, C o X, amplada de feix propera a 1° , etc...).

En general, a partir del radiosondatge no s'obindrà una mesura a 1000 m de la superfície directament, sinó a nivells immediatament superior i inferior. Per això la forma d'obtenir el valor de N_{1000m} més simple consisteix en interpolar els dos valors més propers a aquest nivell. S'ha efectuat una interpolació simple a partir dels fitxers de dades d'alta resolució, atenent el fet que interpolacions d'altres tipus (cúbica, per "splines",...), poden introduir valors poc realistes per una excessiva suavització (Free et al., 2002).

Aquesta forma de calcular el gradient, si bé és actualment estàndar, sembla clar que en ocasions proporciona gradients poc representatius. Això és especialment cert pel cas en què, per exemple, existeixin capes amb gradients molt diferents del normal dins d'una capa d'extensió superior (com el primer estrat de 100 m de gruix considerat) on el gradient sí sigui normal.

Cal tenir present que el feix del radar, en trobar-se una capa molt superrefractiva o subrefractiva, si es donen les condicions adequades (veure ITU, 1997c), serà corbat de mode diferent a l'habitual, i en sortir de la capa i entrar en una altra amb gradient normal, s'afegirà la nova curvatura pròpia del gradient experimentat a la nova capa. En resum, la curvatura final

del feix ve donada per un procés acumulatiu de totes les curvatures adquirides en cada estrat travessat pel feix (Bean i Dutton, 1968). Per això, la presència de capes estretes amb gradients extrems, pot suposar que el gradient estàndar tal com s'ha definit anteriorment sigui poc representatiu.

Per aquest motiu s'ha considerat un altre enfoc diferent per tal d'intentar obtenir un gradient vertical que sí tingui en compte la totalitat de mesures contingudes a l'estrat. Concretament, s'ha assimilat el gradient de l'estrat al pendent de la recta obtinguda per regressió lineal de les mesures de refractivitat.

La Taula 3-4, mostra una comparació entre l'estadística despresada del mètode convencional (VRG1) i el gradient obtingut per mínims quadrats (VRG2), per diversos estrats. Concretament s'han considerat estrats des de la superfície (98 m) fins a 1km d'altitud, 2, 3 i 4, a més dels estrats resultants de considerar bases i cims a 1, 2, 3 i 4 (en total 10 estrats). A més per cada estrat s'especifica el nombre de radiosondatges considerats. Les dades corresponen a radiosondatges obtinguts entre 1997 i 1998 a les 12 T.U. a Barcelona.

Taula 3-4. Comparació d'estadístiques derivades del gradient de refractivitat convencional (VRG1) i el gradient calculat a partir de mínims quadrats (VRG2), els dos en unitats N/km, per estrats de diferent base i cim observats a Barcelona.

Base (m)	98	98	98	98	1000	1000	1000	2000	2000	3000
Cim (m)	1000	2000	3000	4000	2000	3000	4000	3000	4000	4000
	VRG1	VRG2	VRG1	VRG2	VRG1	VRG2	VRG1	VRG2	VRG1	VRG2
Nombr.	294	294	292	292	291	291	291	295	294	296
Sondatges										
Min	-115	-101	-76	-71	-58	-58	-51	-51	-92	-106
Max	-16	-17	-24	-24	-26	-24	-26	-24	-9	-24
Mitjana	-44	-40	-42	-42	-38	-38	-35	-35	-41	-41
Mediana	-41	-35	-41	-41	-38	-37	-35	-34	-38	-37
Moda	-34	-26	-37	-37	-42	-36	-36	-33	-35	-28
Desvest	16	16	9	10	6	7	5	5	15	17

A partir d'aquests resultats pot observar-se com les diferències varien entre els diversos estrats. Les disparitats més destacades (5 a 6 unitats N/km tant a la mitjana com a la mediana) apareixen al primer estrat (98 m - 1 km), essent mínimes a la resta d'estrats. Sembla remarcable el fet que la mitjana, mediana i moda de VRG2 siguin superiors a VRG1 (caràcter més subrefractiu). La moda del segon estrat (1 km a 2 km) també presenta una diferència destacada entre VRG1 i VRG2, contràriament al que passa amb la mitjana i mediana que són molt similars. La desviació estàndar del primer (98 m a 1 km) i segon (1 km a 2 km) estrats són relativament grans comparades amb la resta. Es pot concloure que el mètode de mínims

quadrats proporciona gradients similars o lleugerament superiors a l'habitual i que, pels estrats analitzats, la mostra de VRG2 té una desviació estàndar superior o igual a la corresponent a VRG1.

3.3.2. Estadística del gradient de N

La Taula 3-5 mostra diversos valors estadístics mensuals i anuals del gradient vertical de refractivitat pels primers 1000 m observat a Barcelona amb radiosondatges de les 00 i les 12 T.U.. El gradient s'ha calculat pel mètode estàndar (VRG1).

Taula 3-5. Resum estadístic del gradient vertical de refractivitat a Barcelona, en unitats N/km.

00 z								
MES	Mitjana	Moda	Desv.S.	Mín	P25	P50	P75	Màx
Gener	-43	-38	10	-86	-47	-41	-38	-29
Febrer	-45	-48	10	-69	-53	-43	-37	-24
Març	-46	-45	9	-65	-50	-45	-39	-29
Abril	-46	-41	10	-77	-51	-45	-39	-27
Maig	-49	-49	13	-88	-54	-47	-41	-23
Juny	-61	-50	15	-97	-68	-59	-50	-27
Juliol	-62	-75	18	-105	-75	-61	-46	-29
Agost	-69	-74	22	-121	-82	-71	-54	-23
Setembre	-58	-45	17	-105	-68	-57	-45	-30
Octubre	-55	-59	13	-96	-63	-55	-45	-29
Novembre	-43	-40	11	-111	-46	-41	-36	-25
Desembre	-44	-47	9	-68	-48	-43	-39	-25
TOTAL 00 Z	-52	-43	17	-121	-62	-49	-40	-23
12 z								
MES	Mitjana	Moda	Desv.S.	Mín	P25	P50	P75	Màx
Gener	-40	-29	10	-72	-45	-39	-32	-22
Febrer	-40	-40	11	-86	-44	-39	-32	-21
Març	-43	-39	11	-78	-49	-41	-36	-25
Abril	-40	-35	10	-63	-46	-40	-33	-10
Maig	-46	-44	12	-84	-53	-44	-37	-27
Juny	-49	-44	13	-91	-57	-47	-41	-26
Juliol	-52	-40	16	-96	-62	-50	-40	-27
Agost	-54	-40	19	-109	-64	-53	-40	-19
Setembre	-49	-32	18	-105	-57	-44	-35	-26
Octubre	-45	-36	15	-83	-55	-42	-34	-17
Novembre	-39	-34	9	-72	-43	-38	-33	-22
Desembre	-41	-39	10	-70	-46	-40	-34	-22
TOTAL 12 Z	-44	-40	14	-109	-50	-42	-35	-10
TOTAL 00 Z & 12 Z	-48	-40	15	-121	-55	-44	-37	-10

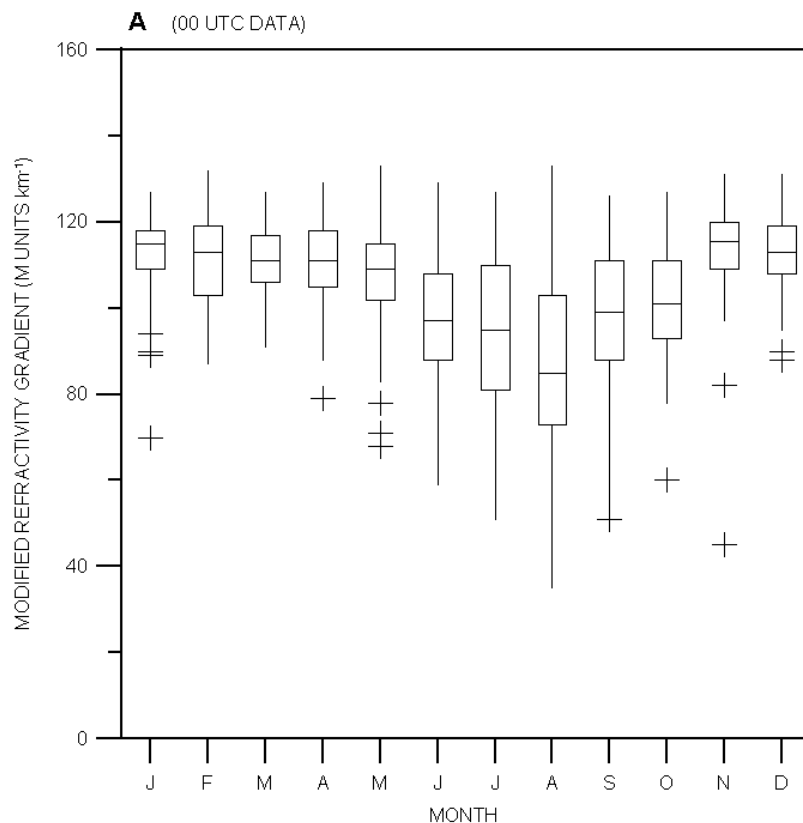
La variació mensual que s'aprecia a la taula anterior és molt destacable. Per visualitzar-la millor s'ha elaborat un diagrama de capsos ("Box Whisker Plot") per representar les dades mensuals. En aquests diagrames es dibuixa un rectangle amb una línia superior, central i inferior que representen respectivament la primera, segona i tercera quartila (percentil 75, 50 i 25).

Aquest diagrama també representa una línia vertical, l'extensió de la qual ve donada per la diferència entre el percentil 75 i el percentil 25 (o Rang entre quartiles, IQR) restada 1.5 vegades al percentil 75 i al percentil 25 respectivament per a determinar el límit superior i inferior respectivament de la línia. És a dir:

$$\begin{aligned} \text{LímitSuperior} &= P_{75} + 1.5IQR \\ \text{LímitInferior} &= P_{25} - 1.5IQR \end{aligned} \quad \text{Eq. 3-2}$$

$$\text{on } IQR = P_{75} - P_{25}$$

Els valors que queden fora d'aquesta línia s'anomenen valors atípics o *outliers*, i es consideren poc significatius respecte a la resta de valors; en aquest cas es representen amb creus. El gradient s'ha calculat per la refractivitat modificada M (118 unitats més que el gradient de N; veure capítol 2 per detalls).



(continua)

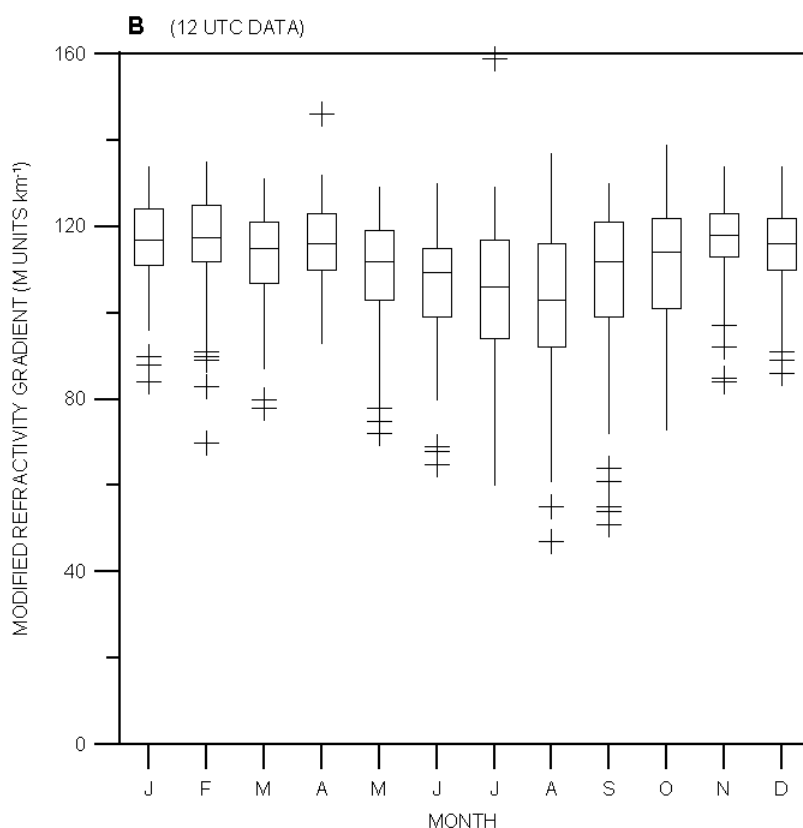
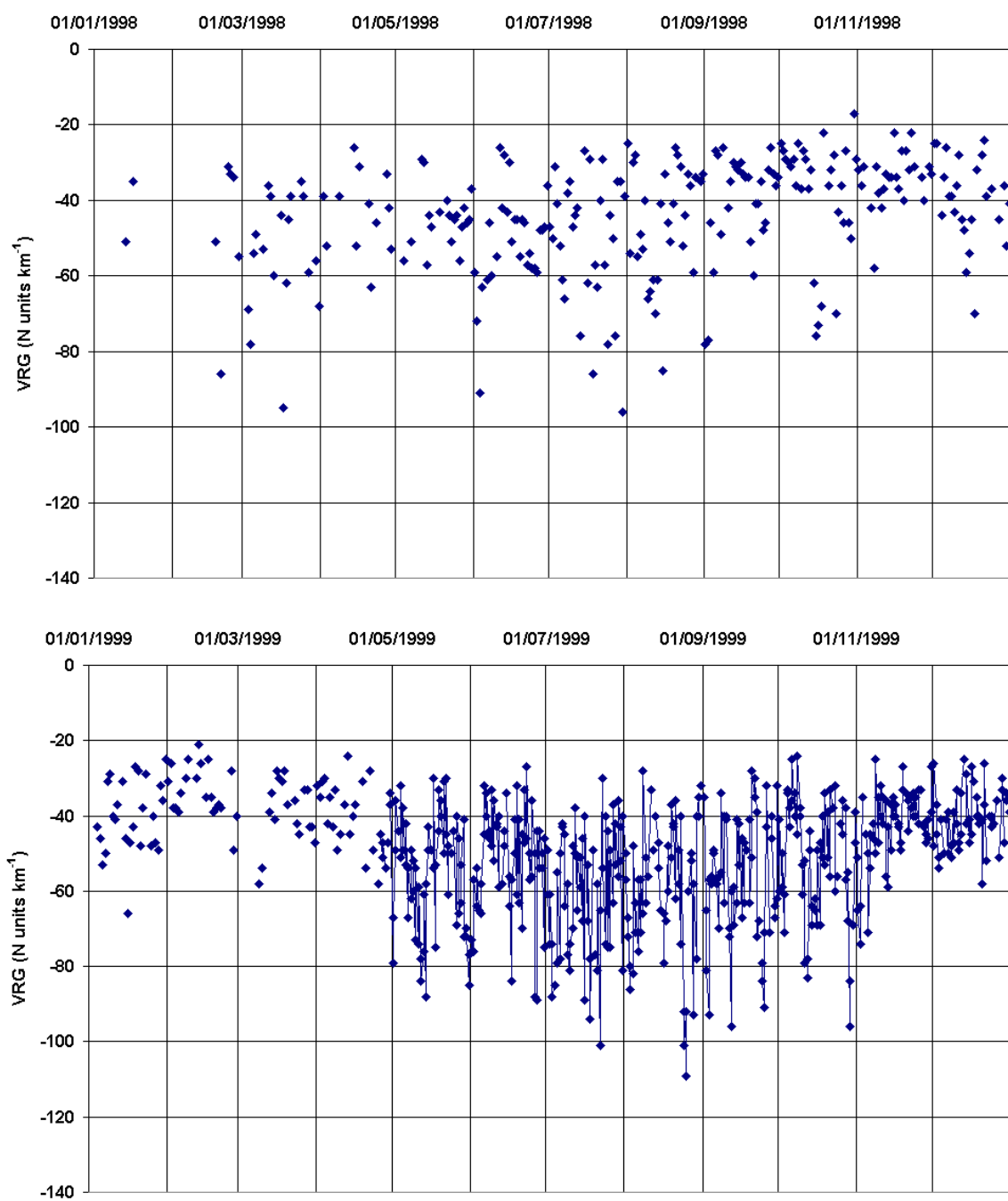


Fig. 3-6 Diagrames de caps del gradient vertical de refractivitat de l'aire a Barcelona per a les 00 Z i les 12 Z .

Queda ben patent el mínim estacional que s'observa durant el mesos més càlids (juliol i agost), tant a les dades de la mitjanit com a les de migdia. A més aquest màxim ve acompanyat d'un increment de la dispersió que disminueix al període més fred (es veu clarament com les "capses" es fan més grans en el període càlid).

Per tal d'apreciar la distribució estacional del VRG s'ha representat la sèrie temporal d'aquesta magnitud. Concretament s'ha triat el gradient de N i s'han representat els anys 1998, 1999, 2000 i 2001 (tots aquells dels quals es disposaven dades de tot l'any) al Gràfic 3-7. S'han connectat les mesures consecutives (00 a 12 i 12 a 00), i s'han eliminat alguns "outliers". S'observa com l'any 1998 no hi ha mesures continuades i durant la primavera de 1999 s'inicien els llançaments de les 00 T.U.



(continua)

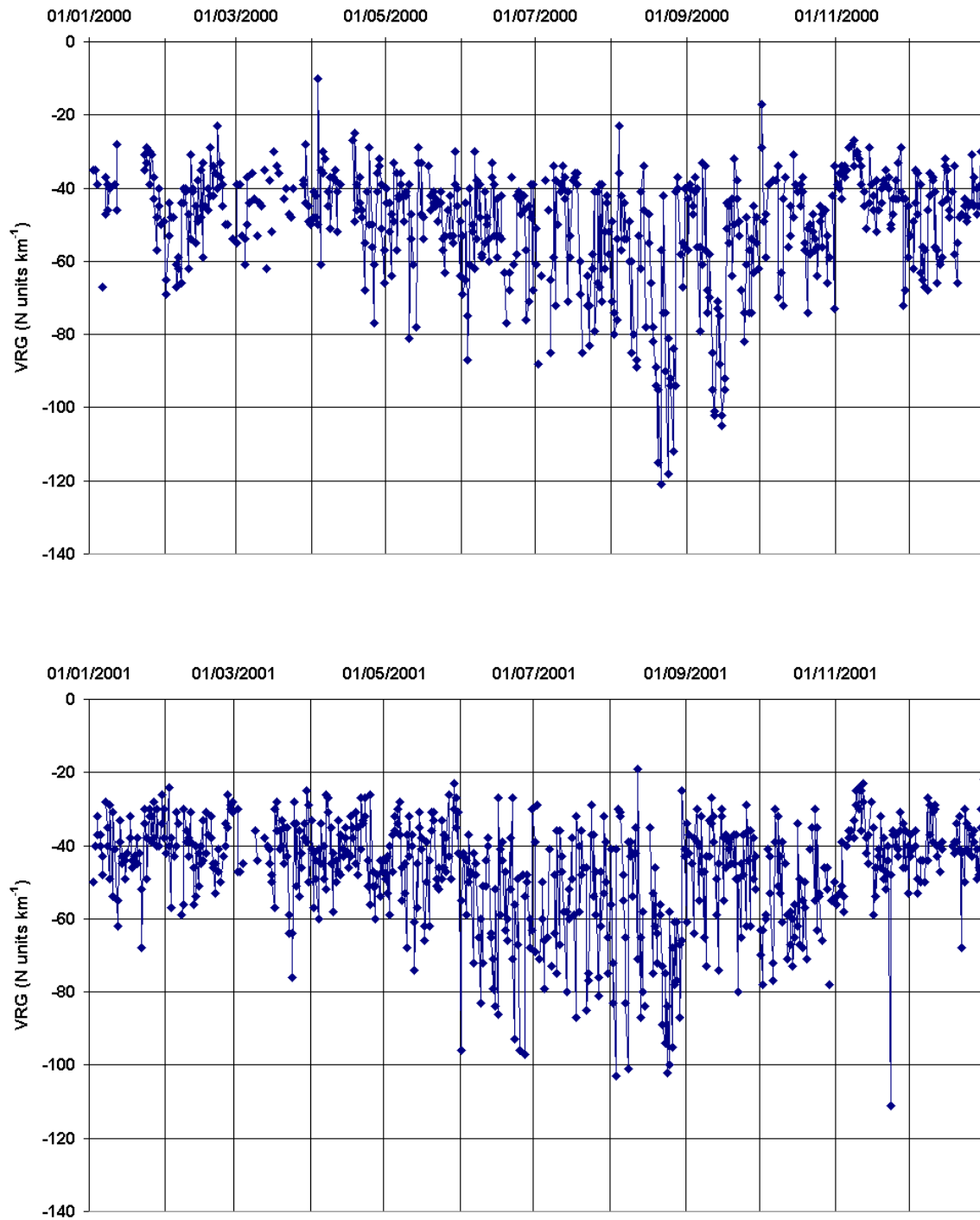


Fig. 3-7. Sèrie temporal del gradient vertical de refractivitat pel primer kilòmetre d'altura a Barcelona des de l'any 1998 al 2001.

A més del gradient vertical de l'estrat corresponent al primer kilòmetre d'altura, també s'ha considerat el del primer hectòmetre. L'estadística obtinguda es resumeix a la Taula 3-6. S'observa una major dispersió de les dades (valors de la desviació estàndar i rangs totals majors) així com un màxim estival, també més marcat en els valors nocturns.

Taula 3-6. Estadística del gradient vertical refractivitat del primer hectòmetre sobre Barcelona.

00 Z								
MES	Mitjana	Moda	Desv_st	min	P25	P50	P75	Màx
Gener	-85	-101	30	-192	-102	-89	-66	-24
Febrer	-94	-114	41	-252	-114	-92	-68	-27
Març	-101	-89	34	-178	-116	-105	-84	-14
Abril	-87	-79	47	-216	-115	-83	-55	1
Maig	-108	-48	42	-233	-126	-105	-83	-38
Juny	-134	-120	69	-505	-142	-122	-108	-3
Juliol	-138	-146	45	-327	-161	-134	-107	-47
Agost	-150	-190	54	-346	-179	-143	-118	-30
Setembre	-128	-107	49	-319	-148	-125	-104	-25
Octubre	-125	-98	38	-203	-145	-124	-109	77
Novembre	-100	-109	69	-659	-109	-94	-78	-21
Desembre	-96	-70	40	-310	-117	-88	-70	-34
Total 00Z	-114	-108	53	-659	-138	-109	-84	77

12 Z								
MES	Mitjana	Moda	Desv_st	min	P25	P50	P75	Max
Gener	-67	-60	41	-251	-80	-64	-49	164
Febrer	-63	-35	33	-160	-84	-62	-45	70
Març	-85	-104	44	-344	-104	-80	-57	-22
Abril	-74	-73	50	-224	-95	-73	-52	243
Maig	-105	-95	43	-220	-129	-104	-81	-8
Juny	-125	-106	55	-370	-149	-122	-96	-7
Juliol	-115	-130	65	-372	-145	-116	-86	356
Agost	-120	-68	59	-243	-164	-119	-80	186
Setembre	-115	-111	49	-341	-144	-111	-85	-28
Octubre	-100	-75	45	-251	-131	-102	-67	58
Novembre	-77	-48	34	-211	-94	-74	-53	-23
Desembre	-70	-56	34	-143	-93	-70	-49	97
Total 12Z	-94	-80	52	-372	-122	-89	-61	356
Total	-102	-70	53	-659	-130	-98	-69	356

3.3.3. Distribució acumulada de freqüències

Com ja s'ha fet anteriorment amb la refractivitat superficial, pot representar-se el conjunt de dades per observar-ne la distribució de freqüències en un histograma i la corresponent distribució acumulada. La figura 3-8 mostra aquesta representació per les dades de les 00 T.U., 12 T.U. i el conjunt de totes les dades. Als histogrammes s'han considerat intervals de 5 unitats N km^{-1} per a les diferents classes.

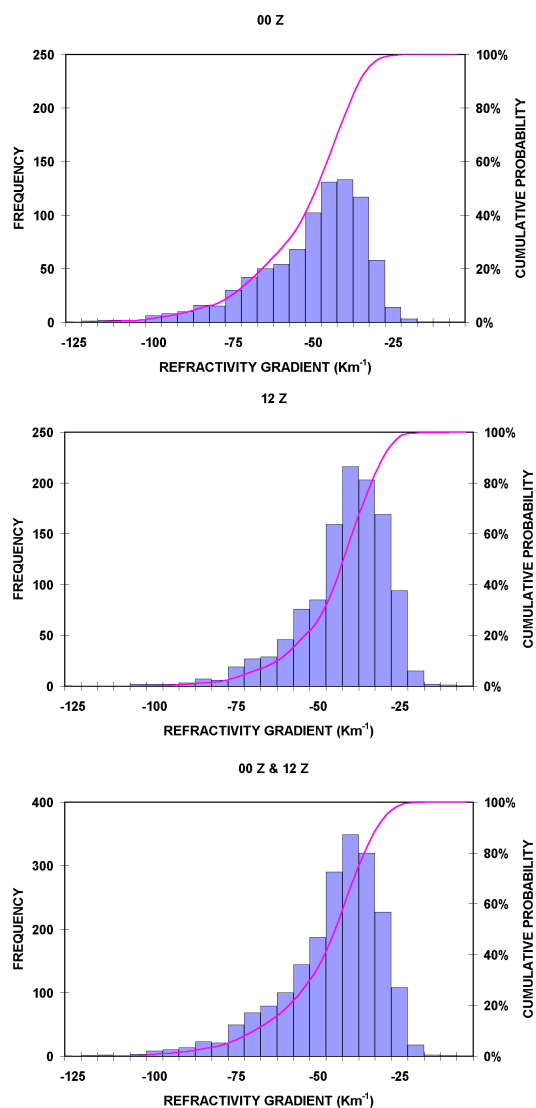


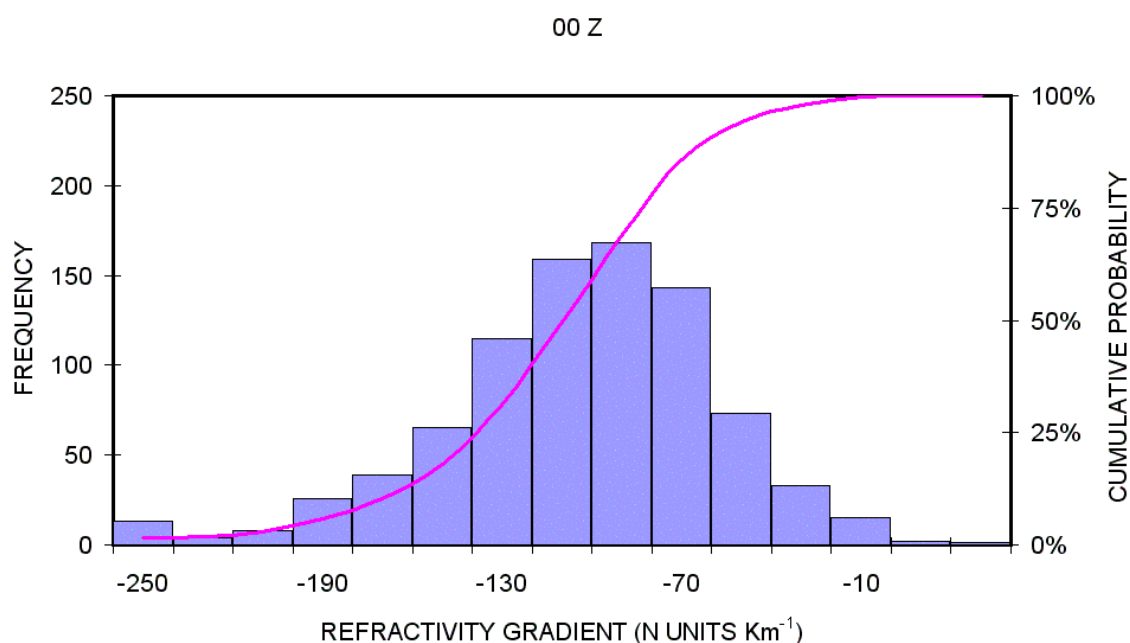
Fig. 3-8 Histogrames i distribucions acumulades de probabilitat del gradient vertical de refractivitat de l'aire pels primers 1000 m d'altura a Barcelona per a les 00 Z, les 12 Z i pel conjunt total de les dades.

En la figura anterior pot observar-se com les distribucions del migdia i la mitjanit són força similars, amb màxims al voltant del valor normal de -40 N km^{-1} , si bé els gradients nocturns són lleugerament més superrefractius. Per exemple la classe més freqüent de la mitjanit és la de -40 N km^{-1} essent molt semblant a la de -45 N km^{-1} ; fins la classe -50 N km^{-1} s'acumulen el 50 % de les dades (la mediana és -49 N km^{-1}). En canvi, en els valors del migdia (12 T.U.) el màxim de la distribució està centrat a la classe -40 N km^{-1} , molt propera en nombre a la de -35 N km^{-1} . En aquest cas la mediana és de -42 N km^{-1} .

En tots dos casos s'observa com la distribució és asimètrica, de pendent més suau cap als valors més superrefractius (per exemple quasi el 20% dels gradients nocturns són inferiors a -70 N km^{-1}), mentre que en la banda subrefractiva el pendent és molt més marcat ja que les freqüències decauen bruscament en augmentar el valor del gradient.

L'histograma conjunt reflecteix aquestes característiques, reproduint una forma similar a la corresponent als valors diürns, fet lògic si tenim present que la proporció d'aquestes observacions és superior a la de les nocturnes (1276 en front de 864).

Igualment, també s'han representat els histogrames i distribucions acumulades dels gradients de refractivitat corresponents al primer hectòmetre. En aquest cas, s'han triat classes de 20 unitats N / km per construir els histogrames.



(continua)

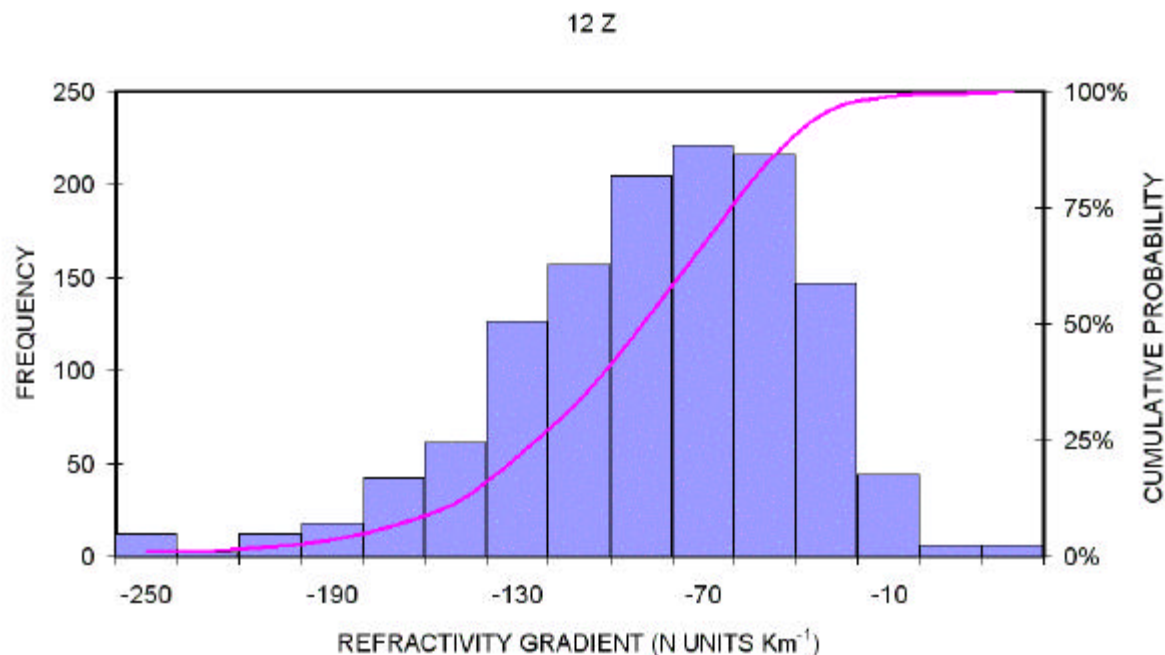


Fig. 3-9. Histogrames i distribucions acumulades de probabilitat del gradient vertical de refractivitat de l'aire pels primers 100 m d'altura a Barcelona per a les 00 Z i les 12 Z.

La forma de la distribució de freqüències del gradient de refractivitat del primer hectòmetre té algunes similituds respecte la del gradient del primer kilòmetre. D'una banda també té un màxim principal (centrat a -90 i -70 unitats N /km per les 00 i les 12 Z, respectivament). A més el pendent també és aproximadament més suau en la zona precedent al màxim (zona superrefractiva) que a la zona posterior.

No obstant, com s'ha comentat anteriorment, en aquest cas el rang de valors possibles és molt més gran i es donen, a més de les condicions normals i superrefractivs, tant situacions de conductes com de subrefracció. De fet en el cas de les 00 Z, el pendent a la banda subrefractiva és apreciable i la forma de la distribució és gairebé simètrica. D'altra banda la capa té un caràcter predominantment superrefractiv, especialment a la nit.

3.3.4. Modelització del radi equivalent

Com s'ha vist al capítol anterior, el model de radi equivalent de la Terra és un dels més senzills i per això dels més utilitzats pels càlculs simples de propagació electromagnètica prop de la superfície terrestre. De fet és l'aproximació estàndar emprada en els programaris de meteorologia radar.

En aquest model es considera un cert radi fictici de la Terra que és el mateix que el radi de curvatura del raig propagat, de forma que la superfície terrestre es pot considerar plana. D'acord amb l'exposat al capítol 2, el quocient entre el radi fictici, o equivalent, i el de la terra és el factor de radi equivalent k_e , que per un angle d'antena de zero graus pot escriure's com:

$$k_e = \frac{1}{1 + R \left(\frac{dN}{dh} \right)} \quad \text{Eq. 3-3}$$

on R és el radi de la Terra i dN/dh el gradient vertical de refractivitat. Pel valor empíric del gradient vertical de refractivitat a latituds mitjanes de -40 N km^{-1} es dedueix un factor k_e equivalent a uns $4/3$ (ca. 1.33) ; per aquest motiu el model també s'anomena model de $4/3$ de R .

A partir de l'equació anterior es veu que gradients superrefractius suposaran valors del factor k_e superiors a $4/3$ i els subrefractius implicaran valors inferiors a aquesta xifra.

De l'estadística del gradient del primer kilòmetre d'altura que apareix a la Taula 3-6, podem generar els valors corresponents del factor de radi equivalent k_e . Així, considerant la mediana del gradient vertical de refractivitat s'obtenen els valors mensuals per a les 00 T.U., 12 T.U. i dades conjuntes que es recullen a la Taula 3-7.

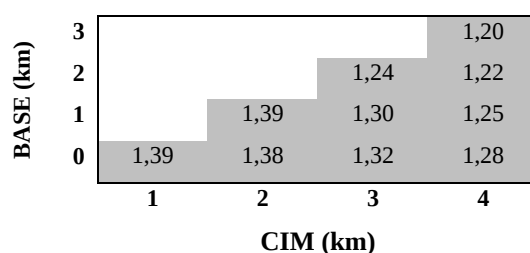
Taula 3-7. Medianes mensuals del radi equivalent de la Terra obtinguts pel primer kilòmetre d'altura a Barcelona.

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	TOTAL	GLOBAL
00 Z	1.354	1.377	1.402	1.402	1.427	1.602	1.636	1.826	1.570	1.539	1.348	1.377	1.454	1.390
12 Z	1.331	1.325	1.354	1.342	1.390	1.421	1.467	1.510	1.390	1.365	1.319	1.342	1.365	

Igualment, pot fer-se un càlcul similar per estrats de diferents altures per tal d'aplicar el factor de radi equivalent esglaonadament a diversos casos possibles del feix del radar (elevacions d'angles diferents, prop i lluny del radar,...). Aquest càlcul estava contemplat a l'informe final de l'acció COST-73 (Newsome, 1992), acció dedicada a les xarxes de radars meteorològics. Concretament es suggeria avaluar localment les condicions del factor de radi equivalent per avaluar si existien diferències significatives de les condicions estàndar.

Aquest càlcul per diversos estrats s'il·lustra a continuació. Concretament, la taula 3-8 mostra factors de radi equivalent considerant les medianes de gradients verticals de refractivitat mesurats a Barcelona. S'han elaborat a partir de 653 radiosondatges, cobrint tots els mesos, entre setembre de 1997 i gener de 2000. Els estrats considerats tenen bases de 98 m (0 km), 1, 2 i 3 km i cims de 1, 2, 3 i 4 km.

Taula 3-8. Factors de radi equivalent per estrats de diferent base i cim calculats a partir d'observacions de radiosondatge a Barcelona.



Aquesta taula es pot comparar amb la dels valors teòrics donada per Newsome (1992) que presenta sis conjunts de factors de radi equivalent per diverses temperatures superficials, perfils adiabàtics humits i atmosferes seques i saturades:

Taula 3-9. Factors de radi equivalent per diverses condicions i estrats (Newsome, 1992).

Altitud		0-1	0-2	0-3	0-4	1-2	1-3	1-4	2-3	2-4	3-4
(km)											
Temp a 0 km	20° C	1.45	1.41	1.37	1.34	1.37	1.34	1.31	1.31	1.28	1.25
	10° C	1.35	1.32	1.30	1.27	1.29	1.27	1.25	1.25	1.23	1.21
HR 100%	0° C	1.28	1.26	1.25	1.23	1.24	1.23	1.21	1.21	1.20	1.18
Temp a 0 km	20° C	1.24	1.22	1.20	1.19	1.20	1.19	1.18	1.18	1.16	1.15
	10° C	1.24	1.23	1.21	1.20	1.21	1.20	1.18	1.18	1.17	1.16
HR 0%	0° C	1.26	1.24	1.22	1.21	1.22	1.21	1.21	1.19	1.18	1.17

Pot observar-se com les dades obtingudes per Barcelona concorden força bé amb el cas d'atmosfera humida (propera a la saturació), fet que sembla corroborar-se amb la climatologia local costanera, on les humitats solen ser relativament elevades.

No obstant, la temperatura superficial mitjana a la que equivalen els valors obtinguts per Barcelona no sembla quedar tan clarament reflectida. D'una banda, les primeres quatre capes (0-1, 0-2, 0-3 i 0-4 km) indiquen una temperatura superficial de 15° C, fet que novament coincideix amb la climatologia ja que aquesta és justament la temperatura mitjana anual de la ciutat. En canvi, les capes corresponents als estrats entre 2-3, 2-4 i 3-4 km semblen indicar una temperatura superficial inferior, entre 0° C i 10° C. La resta corresponen a una situació més càlida.

Aquesta inhomogeneïtat entre la part baixa i alta de la capa d'aire que s'estén entre 0 i 4 km podria explicar-se per la circulació de la brisa marina, la qual domina el règim de vents de Barcelona (Redaño et al., 1991). Un altre factor, possiblement en combinació amb la brisa, és l'efecte d'illa tèrmica de la ciutat. Aquests dos factors poden causar un contrast tèrmic significatiu entre els nivells baixos i alts de la capa d'aire dels primers 4000 m.

3.3.5. Modelització del perfil de N amb la funció exponencial

Al capítol 2 s'ha mostrat que una forma més precisa de modelitzar les variacions de la refractivitat amb l'altura respecte el model de radi equivalent és considerar una variació exponencial. Llavors, pot escriure's:

$$N = N_s \exp\{-c_e(h - h_s)\}, \quad \text{Eq. 3-4}$$

on:

$$c_e = \ln\left(\frac{N_s}{N_{1km}}\right) = \ln\left(\frac{N_s}{N_s + \Delta N}\right). \quad \text{Eq. 3-5}$$

A partir de la informació mostrada en aquest capítol anteriorment relativa a la refractivitat superficial (Taula 3-3) i gradient vertical de refractivitat (Taula 3-5) pot calcular-se c_e . Concretament s'ha fet per les 00 Z, 12 Z i dades conjuntes per l'estrat d'aire

corresponent als primers 1000 m sobre la superfície, utilitzant en els dos casos les medianes de la refractivitat superficial i del gradient vertical.

Taula 3-10. Constants c_e mensuals, de les 00 Z i 12 Z i totals del model exponencial de perfil de refractivitat per Barcelona pels primers 1000 m d'altura.

MES	1	2	3	4	5	6	7
00Z	0,13944453	0,14528029	0,152063	0,15053404	0,15264579	0,18875621	0,1909053
12Z	0,13399085	0,13445348	0,13897112	0,13580154	0,14403937	0,14972263	0,15855921
MES	8	9	10	11	12	00 z/ 12 Z	TOTAL
00Z	0,22314355	0,18058394	0,17934093	0,13992119	0,14829181	0,16180183	0,14547051
12Z	0,16679061	0,13858616	0,13747099	0,13032112	0,13815034	0,13883644	

El resultat es mostra a la Taula 3-10. Amb aquests valors i els ja calculats de refractivitat superficial s'obtenen les expressions mensuals del perfil vertical de N fins el primer kilòmetre d'altura. Posteriorment, partint d'aquestes expressions, s'han representat els perfils mensuals per les 00 Z, 12 Z (Fig. 3-10) i els valors globals (Fig. 3-11).

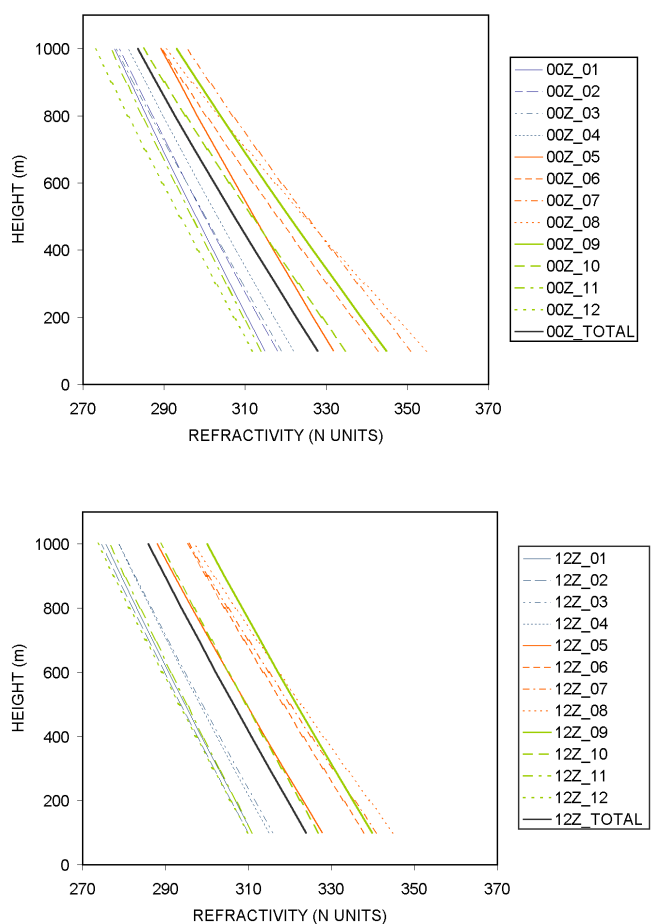


Fig. 3-10. Perfils verticals exponencials mensuals de refractivitat per Barcelona.

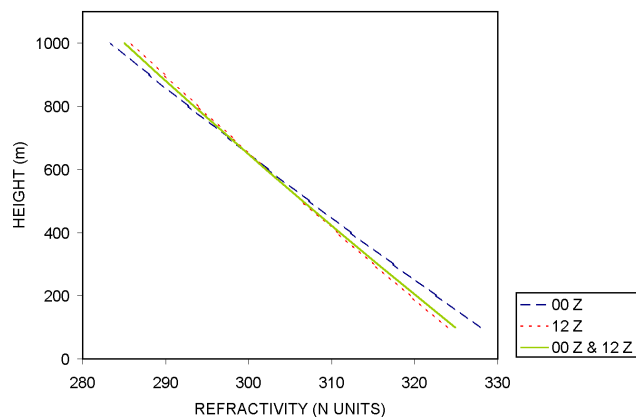


Fig. 3-11. Perfiles verticales exponenciales mensuales de refractivitat per Barcelona.

Pot observar-se com les variacions mensuals dels perfils són destacables i clarament superiors a la variació entre les 00 Z i les 12 Z d'un conjunt de dades mensual. En la figura 3-10 pot apreciar-se el recorregut que tenen els perfils mensuals: des dels mesos de desembre a gener en un extrem on N_s és mínima fins als d'agost i setembre, on N_s assoleix el seu màxim. De fet, tant a les 00 Z com a les 12 Z, el perfil promig separa clarament els grups dels mesos més càlids (5, 6, 7 i 8, en color vermell) dels aproximadament més freds (1, 2, 3 i 4, en color blau). En els perfils dels valors promig de les 00 Z i 12 Z, tot i que poden tenir major interès pràctic, les diferències són molt menors que les observades mensualment (per aquest motiu s'ha canviat el rang de refractivitats a l'hora de representar els perfils).

Les variacions del perfil vertical semblen influïdes fortament pels canvis en la refractivitat superficial que no es manifesten amb la mateixa intensitat en els nivells més alts. Això implica que la diferència entre N_s i N_{1km} canvia estacionalment; podria succeir que, tot i haver canvis en N_s , la diferència amb N_{1km} no fos significativament alterada, però aquest no és el cas.

D'altra banda sembla lògic que els canvis a la superfície al llarg de l'any siguin més destacables que a 1 km d'altura; per exemple la temperatura superficial variarà més que la mesurada a 1 km durant els diferents mesos, ja que a prop del terra s'assoliran temperatures més elevades a l'estiu. Cal recordar que la temperatura aporta la major variabilitat al terme sec de la refractivitat (veure Capítol 2) i que aquest terme contribueix de forma superior al terme humit al valor total de la refractivitat.

3.4 Ocurrencia i descripció de PA

En el capítol 2 hem vist com la propagació anòmala pot definir-se en termes del gradient vertical de refractivitat de l'aire. En aquesta secció s'avaluaran els dos llindars considerats a la bibliografia per la superrefracció (-40 unitats N / km i -79 N unitats $/ km$) en els primers 1000 m d'altura. De fet, els altres llindars significatius, 0 unitats N / km per la subrefracció i -156 unitats N / km per l'existència de capes conductores, no s'han trobat en aquesta capa a Barcelona.

3.4.1. Ocurrencia i descripció de PA mensual i anual

Anteriorment s'han examinat les distribucions del gradient vertical de refractivitat. D'aquestes es deduïa que efectivament el valor de -40 unitats N / km era aproximadament el valor més probable, si bé el valor mitjà, i en general la distribució, estava més decantada cap a un caràcter superrefractiu.

Considerant els dos llindars de -40 unitats N / km i -79 N unitats $/ km$ s'ha calculat la probabilitat mensual que es doni un valor inferior a cadascun d'ells. Això s'ha fet tant per les dades de les 00, 12 Z i el total conjunt de dades. La figura 3-12 en mostra els resultats.

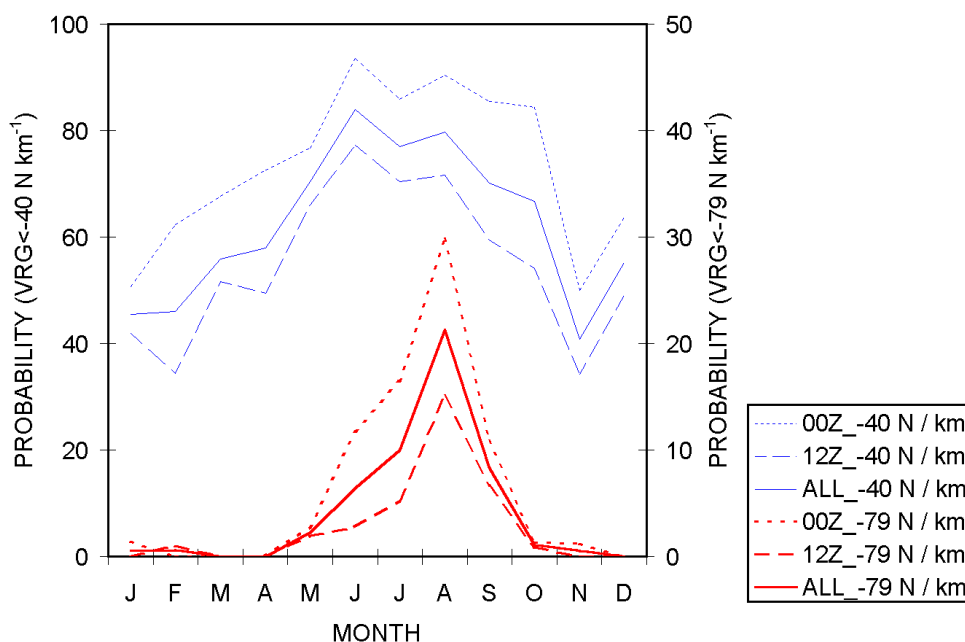


Fig. 3-12. Probabilitat mensual (%) de superació de dos llindars de propagació anòmala. L'escala de l'esquerra s'aplica a les corbes de probabilitat de gradient igual o inferior a -40 unitats N / km (blaves).

L'escala de la dreta a les corbes de probabilitat de gradient igual o inferior a -79 unitats N / km (vermelles).

S'aprecia com el llindar de -40 unitats N / km es supera a les nits de forma permanent al llarg de l'any, mentre que pel global de les dades aquesta situació es dona des del març fins al novembre. Pel conjunt global de les dades es dona un primer màxim de 94%, que és el màxim absolut, el mes de juny, decaient suaument el valor durant el juliol i tornant a ascendir el mes d'agost lleugerament fins el 90%.

En el cas del llindar de -79 unitats N / km l'evolució mensual presenta un comportament similar a l'anterior amb un màxim estival i mínim hivernal. No obstant, el valor més alt s'assoleix lleugerament més tard que en el cas anterior, el mes d'agost en lloc del juny, amb una probabilitat del 30% pel cas dels gradients nocturns i del 15% dels diürns. Si bé, com és lògic, els valors absoluts de la probabilitat són inferiors per aquest llindar més exigent, destaca el fet que del juliol al setembre el 10% de les dades totals presenten gradients inferiors a aquest llindar i si ens fixem en les dades nocturnes el valor per aquest període supera el 20%.

3.4.2. N_s i gradient vertical de N

La relació entre la refractivitat superficial i el gradient de refractivitat del primer kilòmetre s'ha estudiat anteriorment a d'altres llocs del món. Per exemple, Lane (1961) i Bean i Dutton (1968) van obtenir correlacions elevades entre aquestes dues variables al Regne Unit i als EUA, respectivament. Concretament entre els seus respectius valors mitjans mensuals.

L'interès per aquesta relació és doble. D'una banda la refractivitat en superfície és molt més fàcil d'obtenir (tan sols cal un observatori convencional amb mesures de temperatura, pressió i humitat) mentre que per obtenir el gradient vertical cal un radiosondatge. A més, les variables de superfície es disposen de forma continuada mentre que les mesures de gradient tan sols dos cops al dia.

Per tot això, si es confirma la correlació entre el gradient i N_s , es pot estimar el gradient en zones properes on no hi ha radiosondatge i també a la pròpia zona en les hores que les observacions de radiosondatge no estan disponibles.

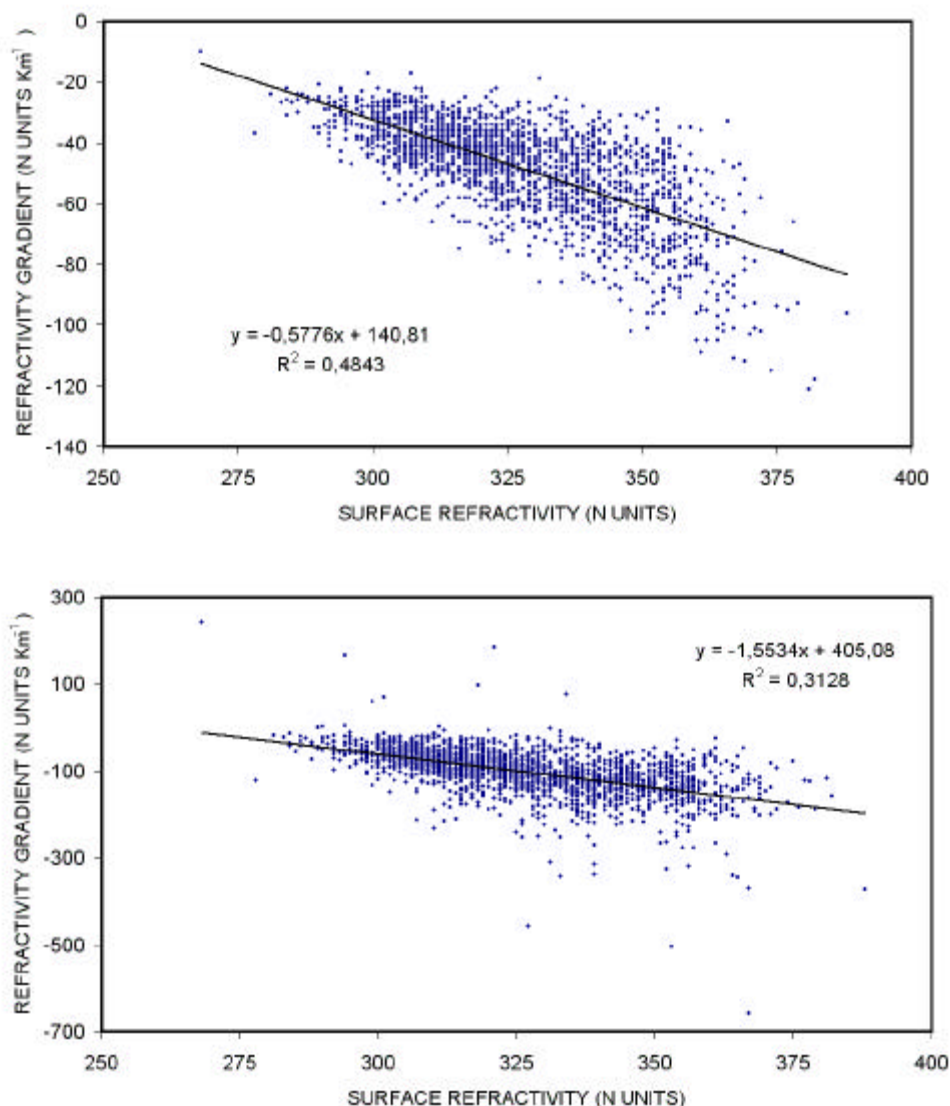


Fig. 3-13. Representació de refractivitat superficial vs. gradient vertical de refractivitat pels primers 1000 m (superior) i 100 m (inferior) a Barcelona .

La figura 3-13 mostra les correlacions entre la refractivitat superficial i el gradient vertical del primer kilòmetre i hectòmetre per totes les dades disponibles pel període 1997 a 2002 (concretament 2140 parelles de punts per cada cas). Pot observar-se com la dispersió dels dos núvols de punts és gran de forma que la correlació és baixa (0.4843 i 0.3128 pel primer kilòmetre i hectòmetre respectivament).

La figura 3-14 s'ha construït amb els valors mitjans mensuals de les dades; per això tan sols apareixen dotze punts diferents. Ara la correlació entre el gradient vertical i la refractivitat superficial apareix de forma molt més nítida: 0.9745 i 0.9466 pel primer kilòmetre i hectòmetre, respectivament.

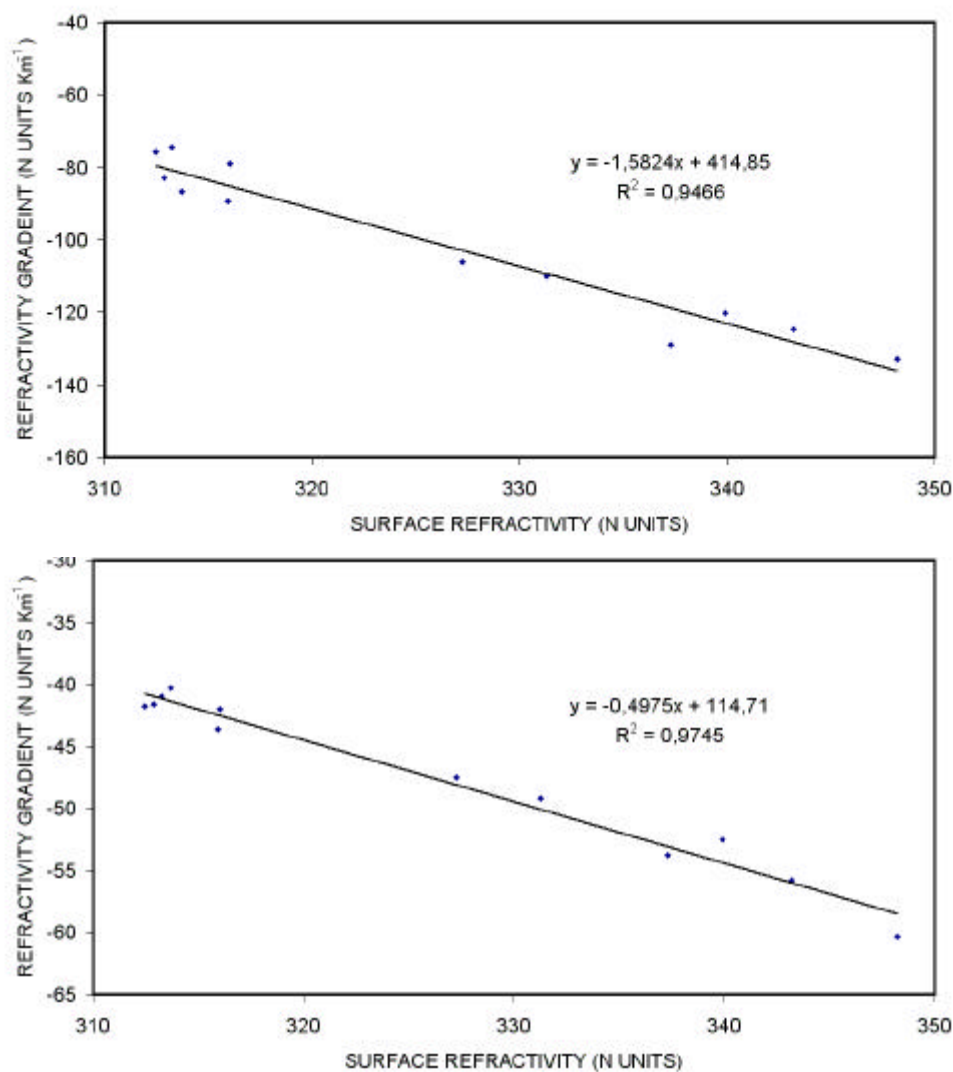


Fig. 3-14. Representació dels valors mitjans mensuals de la refractivitat superficial vs. gradient vertical de refractivitat pels primers 1000 m (superior) i 100 m (inferior) a Barcelona.

3.4.3. Relacions entre la refractivitat i altres variables

Vista la relació entre la refractivitat superficial i el gradient de refractivitat del primer kilòmetre analitzem a continuació si existeixen relacions amb d'altres variables meteorològiques de superfície. Amb aquesta finalitat s'ha avaluat la variació estacional de la

temperatura, la pressió i la humitat (les magnituds que s'utilitzen en el càlcul de la refractivitat). En aquest cas s'han considerat 861 observacions de les 12 Z registrades entre setembre de 1997 i octubre de 2000.

a. Variació estacional de P, T i HR superficials

Estacionalment, les magnituds que intervenen en el càlcul de la refractivitat, tenen un comportament diferent. Així, mentre la temperatura presenta un marcat cicle molt ben definit, la pressió i, sobretot, la humitat tenen un comportament molt més variable (Fig. 3-15).

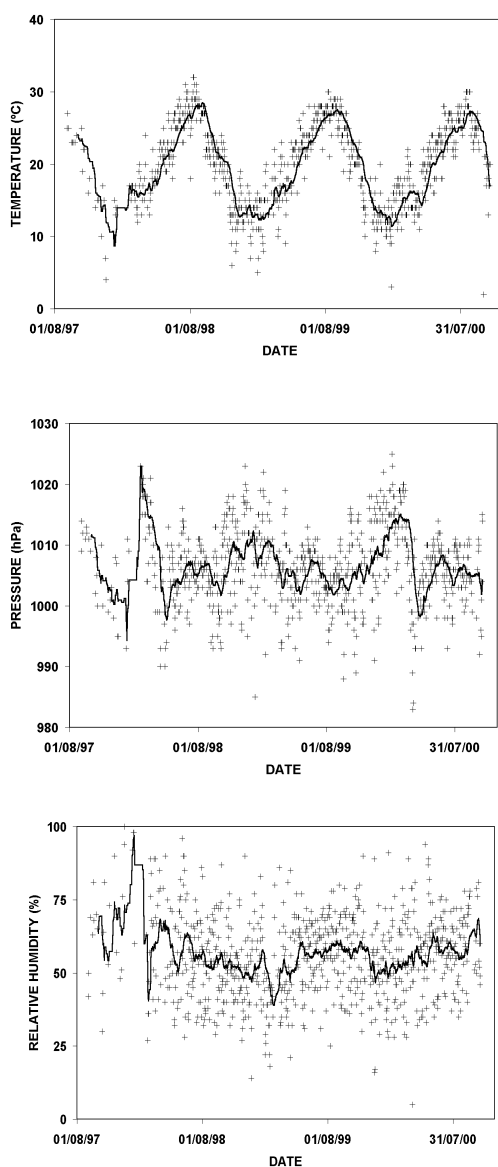


Fig. 3-15. Variació estacional de la temperatura (adalt), pressió (centre) i humitat relativa (abaix) a les 12 Z a Barcelona. La línia gruixuda indica la mitjana mòbil de trenta dies.

Queda ben patent el màxim estival a mitjans d'agost i mínim hivernal de la temperatura; menys aparent resulta el màxim hivernal de pressió (justament en fase amb el mínim tèrmic) i amb superior variabilitat que encara és més acusada en el cas de la humitat relativa.

b. Termes humit i sec de la refractivitat

Com s'ha vist al capítol anterior, la fórmula del càlcul de la refractivitat pot desglossar-se en un terme humit (N_w) i un terme sec (N_d). Per la forma de cadascun d'aquests sumands ja es veu que la contribució de N_d a la refractivitat global N serà superior que la de N_w .

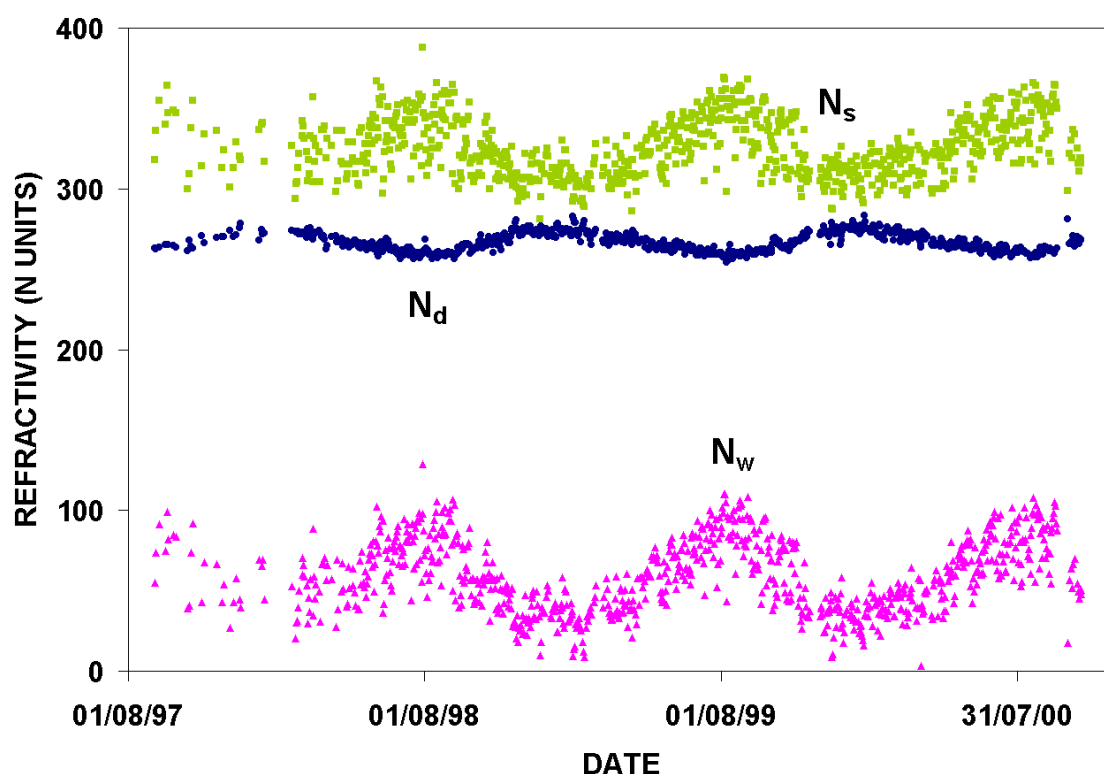


Fig. 3-16. Evolució del terme sec (N_d) i humit (N_w) de la refractivitat superficial (N_s) a Barcelona a les 12 Z.

A la figura adjunta s'aprecia que N_w , tot i representar aproximadament un 30% del valor de N_s , aporta la major variabilitat de la refractivitat superficial. De fet, N_d també presenta una lleugera variació estacional amb màxims hivernals i mínims estivals, just a l'inrevés que N_w . La suma dels dos termes compensa parcialment les seves variacions contraposades si bé finalment predomina clarament el màxim estival de N_w .

c. Refractivitat superficial i a 1 km

Pel mateix conjunt de dades vist en aquesta secció corresponent a les 12 Z, es mostra l'evolució temporal de la refractivitat superficial N_s i la refractivitat a 1 km per sobre la superfície de Barcelona.

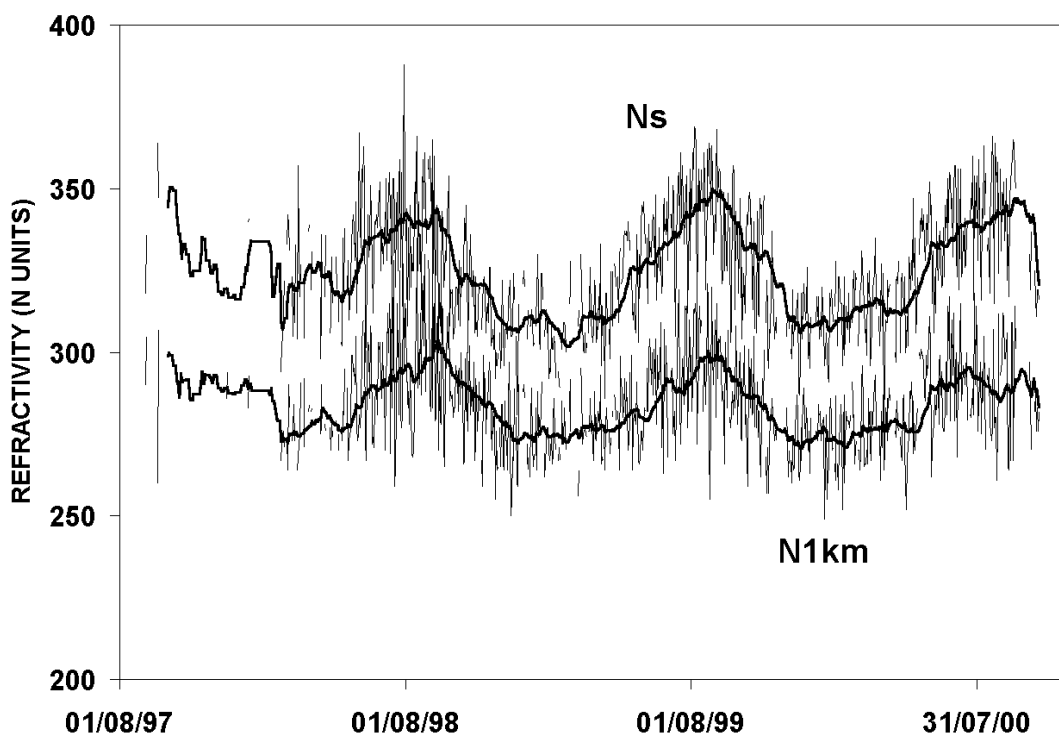


Fig. 3-17. Evolució de la refractivitat superficial i a 1 km d'altura sobre la superfície de Barcelona a les 12 Z. La línia gruixuda indica la mitjana de trenta dies.

En la figura adjunta s'observa que si bé els valors puntuals de les dues magnituds presenten una elevada variabilitat, els valors mitjans estan clarament relacionats ja que, a 1 km d'altura, continua apareixen un màxim estival i un mínim hivernal molt possiblement relacionats amb l'evolució tèrmica anual tal com succeïa amb N_s . Aquest fet està relacionat amb el vist anteriorment en obtenir correlacions significatives entre els valors mitjans mensuals de la refractivitat superficial i el gradient vertical de la refractivitat a 1 km (diferència entre N_s i N_{1km}). De fet els mínims estivals del gradient poden interpretar-se com

casos en que la temperatura superficial és molt superior a la de 1 km (o les corresponents refractivitats).

d. Correlacions bivariades

Tal com s'ha fet anteriorment en buscar correlacions entre *Ns* i el gradient vertical de refractivitat del primer kilòmetre, a continuació es calculen les correlacions bivariades entre diverses magnituds. Concretament s'han triat la temperatura (*TSUP*), pressió (*PSUP*), humitat relativa (*HSUP*) i força del vent superficial (*VVSUP*), refractivitat superficial (*NSUP*), refractivitat a 1 kilòmetre (*N1KM*), gradient vertical de refractivitat del primer kilòmetre (*GN1KM*) i el gradient mínim observat en tota la capa del primer kilòmetre (*GNMIN*). Per totes aquestes magnituds es mostra el coeficient de correlació (Pearson) i la significància:

Taula 3-11. Correlacions bivariades entre diverses magnituds obtingudes amb el radiosondatge de Barcelona.

		TSUP	PSUP	HSUP	VVSUP	GN1KM	NSUP	N1KM
PSUP	Pearson Correlation	-.171(**)						
	Significance(2-tailed)	.000						
HSUP	Pearson Correlation	-.031	-.187(**)					
	Significance(2-tailed)	.370	.000					
VVSUP	Pearson Correlation	.058	-.058	.011				
	Significance(2-tailed)	.088	.090	.743				
GN1KM	Pearson Correlation	-.365(**)	.025	-.444(**)	-.043			
	Significance(2-tailed)	.000	.462	.000	.209			
NSUP	Pearson Correlation	.615(**)	-.149(**)	.716(**)	.026	-.625(**)		
	Significance(2-tailed)	.000	.000	.000	.440	.000		
N1KM	Pearson Correlation	.396(**)	-.156(**)	.467(**)	-.008	.187(**)	.630(**)	
	Significance(2-tailed)	.000	.000	.000	.804	.000	.000	
GNMIN	Pearson Correlation	-.437(**)	.110(**)	-.402(**)	-.048	.603(**)	-.612(**)	-.117(**)
	Significance(2-tailed)	.000	.001	.000	.162	.000	.000	.001

** Correlation at 0.01(2-tailed):...

Com era d'esperar, queda ben patent que la correlació més important entre el gradient vertical de la refractivitat i les variables considerades és la refractivitat superficial (correlació de -0.625 pel conjunt d'observacions considerades). També es confirma el fet que la temperatura, i encara més la humitat, estan correlacionades linealment amb la refractivitat superficial tal com s'havia avançat examinant la representació de les sèries temporals d'aquestes magnituds. En canvi, la velocitat del vent no mostra relacions lineals significatives.

Un altre resultat interessant és el relatiu a *GNMIN*, el gradient mínim observat (que potencialment pot tenir efectes sobre les observacions del radar): està correlacionat significativament amb el gradient *GN1KM* i encara més amb la refractivitat superficial. Com aquesta està correlacionada amb la temperatura negativament, es pot concloure que els casos més superrefractius (els gradients negatius més elevats) es donen amb valors elevats de la refractivitat superficial els quals es produeixen amb les temperatures superfícials més altes. Aquest fet ja s'apreciava en les sèries temporals on els mínims anuals de *GN1KM* es donaven a mitjans d'agost.

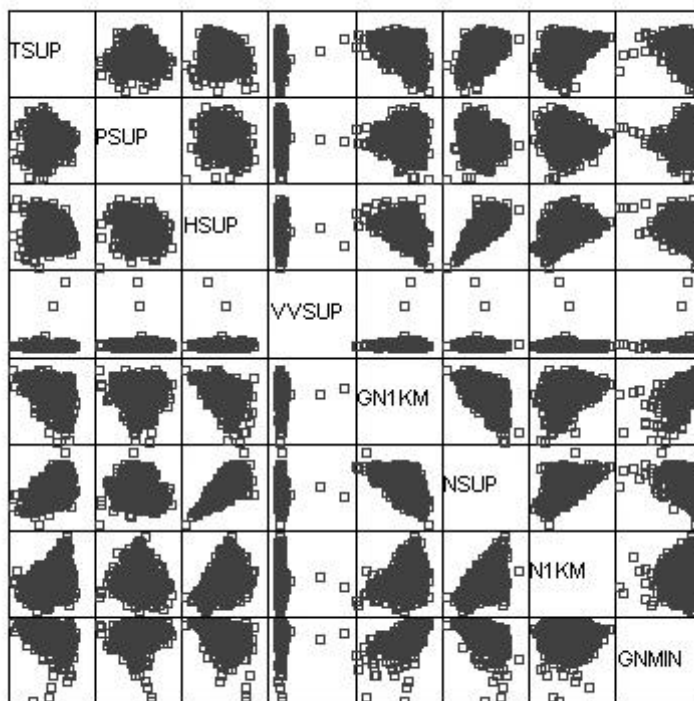


Fig. 3.18. Representació gràfica de les correlacions bivariades creuades entre les magnituds considerades obtingudes amb el radiosondatge de Barcelona.

e. Regressió múltiple

Per completar l'anàlisi de relacions lineals entre les diverses variables considerades s'han calculat una regressió múltiple pel gradient de refractivitat mínim observat. La regressió múltiple, a partir dels coeficients normalitzats beta (Sierra Bravo, 1994; Camacho Rosales, 2000), indiquen el grau de la varianza de la variable dependent explicat per cada variable independent. Concretament s'han considerat com a variables independents la temperatura, humitat i refractivitat superficial i la refractivitat a 1 km. La Taula 3-12 conté un resum de la regressió i dels coeficients obtinguts.

Taula 3-12. Regressió múltiple de GNMIN.

Resumen del modelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,710(a)	,504	,502	97,081

a Variables predictoras: (Constante), N1KM, TSUP, HSUP, NSUP

Coeficientes(a)

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	(Constante)	334,419	156,440		2,138	,033
	NSUP	-4,910	,646	-,651	-7,603	,000
	TSUP	-5,417	1,448	-,221	-3,740	,000
	HSUP	-1,472	,640	-,154	-2,302	,022
	N1KM	4,345	,298	,453	14,563	,000

a Variable dependiente: GNMIN

El valor de R quadrat indica que el 50% de la varianza de *GNMIN* pot explicar-se a partir de la resta de variables. Per tant la regressió té una aplicació pràctica relativament limitada (l'error típic de l'estimació s'acosta a les 100 unitats N/km). No obstant, l'anàlisi dels coeficients estandaritzats ens permet quantificar el pes de cada variable independent considerada. Així, sembla clar que *NSUP* i *N1KM*, per aquest ordre, tenen la influència més important sobre *GNMIN* mentre que *TSUP* i *HSUP* tenen menor relació (*TSUP* quasi el doble que *HSUP*). Tot i aquesta ordenació, la raó entre els coeficients estandaritzats no supera el factor 5 de forma que tots estan en el mateix ordre de magnitud.

3.5 Conductes

Com s'ha vist en el Capítol 2, els conductes radioelèctrics són les zones de l'atmosfera on el gradient vertical de la refractivitat és inferior a -156 unitats N/km. En aquestes condicions les trajectòries de les microones poden quedar capturades (segons el gruix del conducte, la seva freqüència i l'angle incident), propagant-se entre la base i el cim del conducte en lloc de guanyar altitud allunyant-se de la superfície terrestre tal com succeeix en condicions normals.

3.5.1. Conductes considerats

En l'estudi a partir de les observacions del radiosondatge de Barcelona, dels diferents tipus de conductes existents, es consideren els conductes superficials, els conductes de base superficial, i els conductes elevats. Tot i estar Barcelona en una zona costanera, d'entre els conductes superficials no es pot avaluar els conductes d'evaporació ja que aquests no poden observar-se directament a partir de radiosondatges (Patterson, 1998), a part que l'estació de radiosondatge no està arran de mar sinó una mica a l'interior i a una certa altitud (98 m).

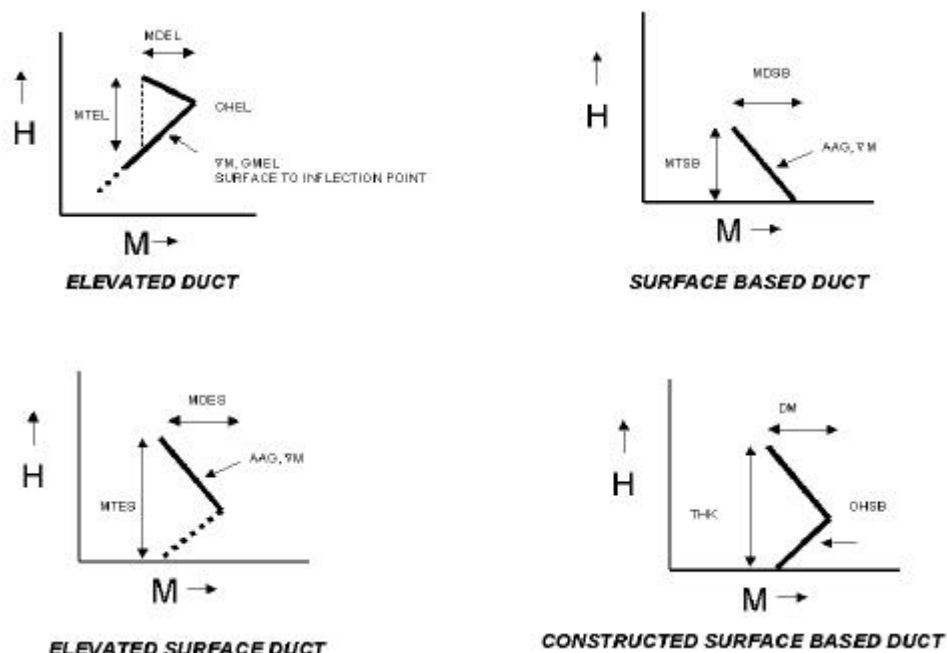


Fig. 3-19. Magnituds considerades per descriure els diferents conductes (d'alt a baix i esquerra a dreta): conducte elevat, conducte superficial, conducte de base superficial i conducte adaptat de base superficial. Segons Paterson (1987).

Els paràmetres avaluats dels tres tipus de conductes considerat són: la seva freqüència, la freqüència de captura dels conductes superficials (radiofreqüència a partir de la qual les ones queden confinades al conducte); i pels conductes elevats: el gruix de la capa i variació de refractivitat, així com la radiofreqüència de captura. En total són set variables descrites a la *Historical Electromagnetic Propagation Condition Database* (Patterson, 1987), una compilació de característiques de propagació electromagnètica d'abast mundial. La figura 3-19 mostra aquestes magnituds i la Taula 3-13 les descriu resumidament.

Taula 3-13. Descripció d'algunes magnituds característiques dels conductes (Patterson, 1987).

NAME	DESCRIPTION	UNITS
MFSB	sfc-base duct trapping freq	MHz
MTEL	elev duct median thickness	Meters
MDEL	elev duct M-unit deficit	M units
MFEL	elev duct trapping frequency	MHz

3.5.2. Estadística d'ocurrència de conductes

La Taula 3-14 conté la freqüència mensual i anual amb que s'han detectat els tres tipus de conductes considerats. Pels conductes superficials, de base superficial i elevat, s'especifica la freqüència tant per les 00 Z com per les 12 Z. S'aprecia com el percentatge de conductes superficials és significatiu (proper al 60%) i superior al de conductes elevats (50%). Els conductes de base superficial són marginals en relació a la resta. Torna a destacar-se el màxim estival superrefractiu que ja apareixia en d'altres magnituds ja descrites anteriorment.

Taula 3-14. Ocurrència dels diferents tipus de conductes a Barcelona.

	00Z	12Z	00Z	12Z	00Z	12Z
TIPUS	SUPERFICIAL		BASE SUPERFICIAL		ELEVAT	
MES	%	%	%	%	%	%
1	42	25	0	0	23	21
2	49	29	0	0	20	22
3	68	49	0	0	24	33
4	49	45	0	0	35	39
5	67	73	1	0	53	59
6	84	80	5	0	70	73
7	88	76	0	1	88	78
8	88	71	4	0	83	87
9	78	76	1	0	64	70
10	87	60	1	0	57	49
11	50	37	1	1	16	24
12	48	29	0	0	16	22
Total	68	55	1	0	48	49

La Taula 3-15 mostra els valors de les magnituds descrites anteriorment a la Taula 3-13. S'han calculat com a medianes a partir del conjunt de radiosondatges especificat en les dues primeres columnes.

Taula 3-15. Diverses magnituds mensuals característiques dels conductes observats a Barcelona.

MAGNITUD	#12Z	#00Z	MFSB	MTEL	MDEL	MFEL
Gener	62	46	2486	104	4	399
Febrer	62	39	1873	100	4	602
Març	74	28	1871	81	3	591
Abril	74	48	1844	94	3	514
Maig	96	85	1526	74	3	751
Juny	88	72	1239	104	5	358
Juliol	98	79	1119	115	4	387
Agost	112	81	1022	105	4	417
Setembre	115	79	1269	124	5	332
Octubre	101	71	1324	102	4	492
Novembre	85	60	1974	88	4	470
Desembre	72	52	1732	99	3	532

3.6 Condicions de Propagació a la Mediterrània Occidental

Com va explicar-se al Capítol 2, la Mediterrània és una zona favorable a les condicions de propagació anòmala. Això pot observar-se fàcilment en la seqüència de mapes que es mostren a continuació. Representen el gradient vertical de refractivitat pels mesos de febrer i maig (Fig. 3-20) i agost i novembre (Fig. 3-21) elaborats per la Unió Internacional de Comunicacions (ITU, 1997b).

Al mapa d'agost es veu com al llevant peninsular arriba una zona de màxim (70 unitats N de variació respecte N_s) que s'estén pel nord d'Àfrica. El mateix valor s'observa a la costa

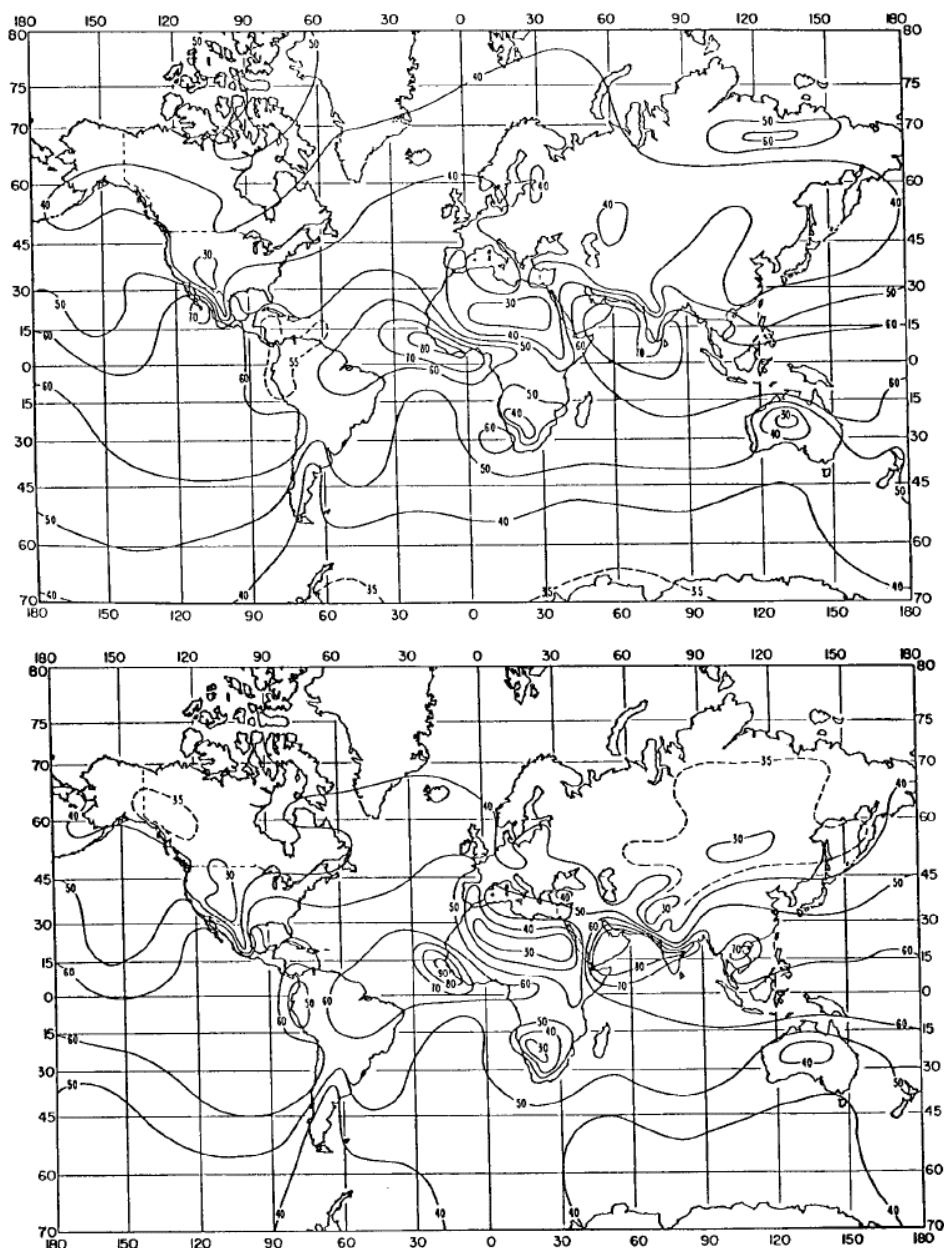


Fig. 3-20. Mapes del gradient vertical de refractivitat de l'aire del primer kilòmetre per febrer (mapa superior) i maig (mapa inferior) (ITU, 1997b).

oest dels EUA i Mèxic. De fet aquestes zones tan sols són superades en intensitat per l'interior de la Península Aràbig. Aquest màxim superrefractiu estival és el que s'ha observat en seccions anteriors amb les dades del radiosondatge de Barcelona.

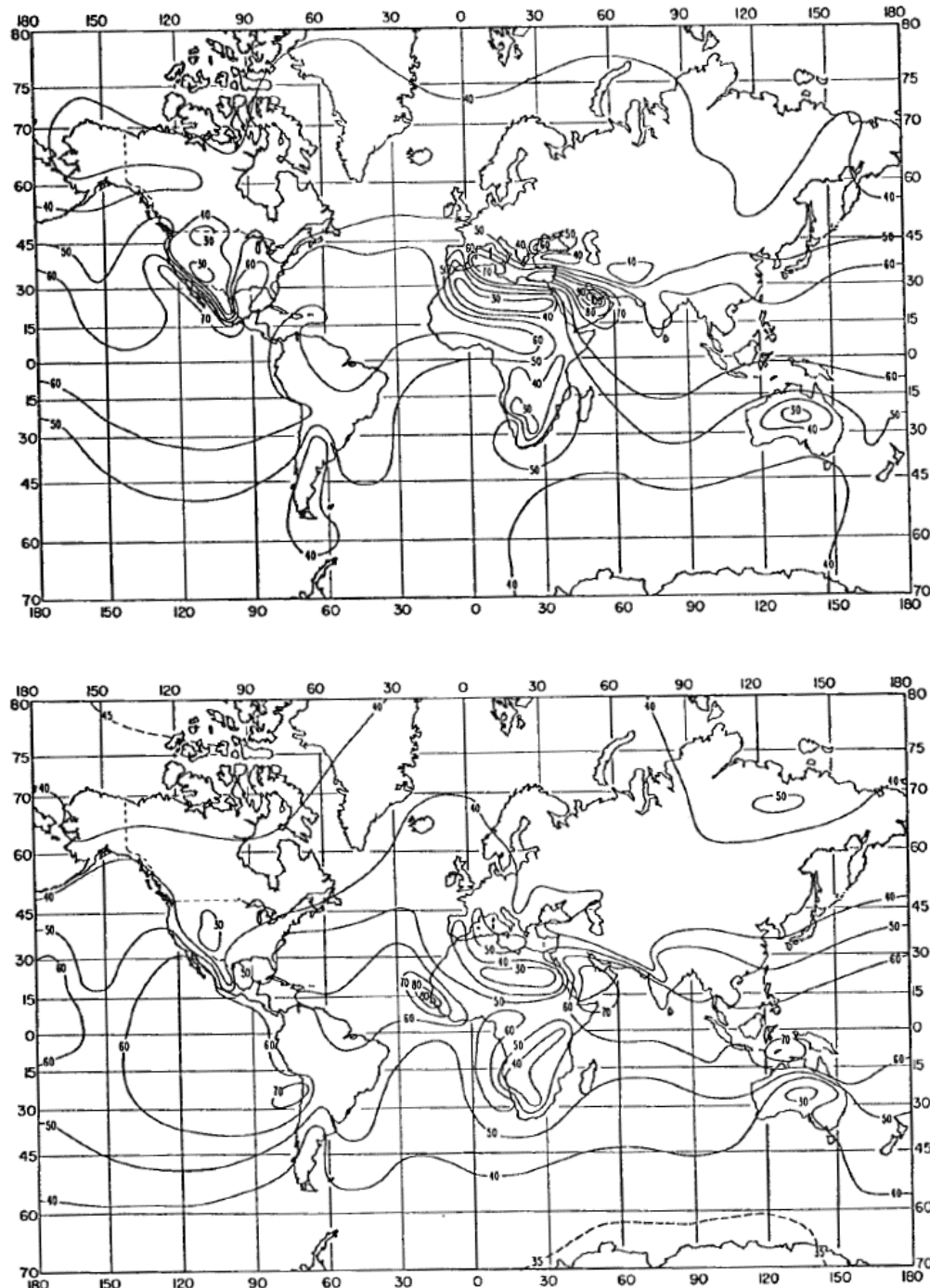


Fig. 3-21. Mapes del gradient vertical de refractivitat de l'aire del primer kilòmetre per agost (mapa superior) i novembre (mapa inferior) (ITU, 1997b).

Per tal de comparar detalladament els resultats obtinguts a Barcelona amb d'altres estacions properes de la zona, s'ha triat utilitzar la base de dades HPCDB. Aquesta conté característiques de propagació electromagnètica d'abast mundial.

3.6.1. La base de dades HPCDB

La base de dades *Historical Electromagnetic Propagation Condition Database* (HPCDB) fou elaborada pel Naval Systems Ocean Center de la Marina dels EUA (Paterson, 1987) per tal de donar suport a les operacions dels radars de la seva flota operant arreu del món.

La base conté una vintena de paràmetres per un total de 921 estacions de radiosondatges d'arreu del món, incloent el nombre de radiosondatges considerats per les 00 i les 12 UTC, refractivitat superficial, gradient del primer hectòmetre i kilòmetre, etc.

S'han seleccionat deu estacions properes a Barcelona per tal de comparar diverses magnituds (Taula 3-16). Algunes de les estacions queden fora de l'àmbit mediterrani i són de caràcter marcadament continental (com Madrid o Bordeaux) o de clima atlàntic (com A Coruña o Lisboa) i permeten una comparació més àmplia i contrastada.

Taula 3-16. Coordenades de les estacions de radiosondatge considerades en la comparació.

Radiosonde Station	Area	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
Ajaccio/Campo Del Oro	France	41.92	-8.8	9
Alger/Dar El Beida	Algeria	36.72	-3.25	23
Barcelona	Spain	41.4	2.1	98
Bordeaux/Merignac	France	44.83	0.7	51
Cagliari/Elmas	Italy	39.25	-9.05	4
LaCoruna	Spain	43.37	8.42	67
Lisboa/Portela	Portugal	38.77	9.13	81
Madrid/Barajas	Spain	40.47	3.57	629
Nimes/Coubessac	France	43.87	-4.4	62
North Front	Gibraltar	36.15	5.33	4
Palma/Son Bonet	Spain	39.6	-2.7	45

3.6.2. Comparació geogràfica de diverses magnituds

En la figura 3-22 es mostra el nombre de radiosondatges utilitzats en cada estació per calcular les magnituds comparades. En el cas de Barcelona, es tracta de dades corresponents al període 1997-2000. El nombre de radiosondatges nocturns de Barcelona és relativament limitat respecte a la resta d'ubicacions, tret d'alguns mesos, i per aquest motiu la comparació

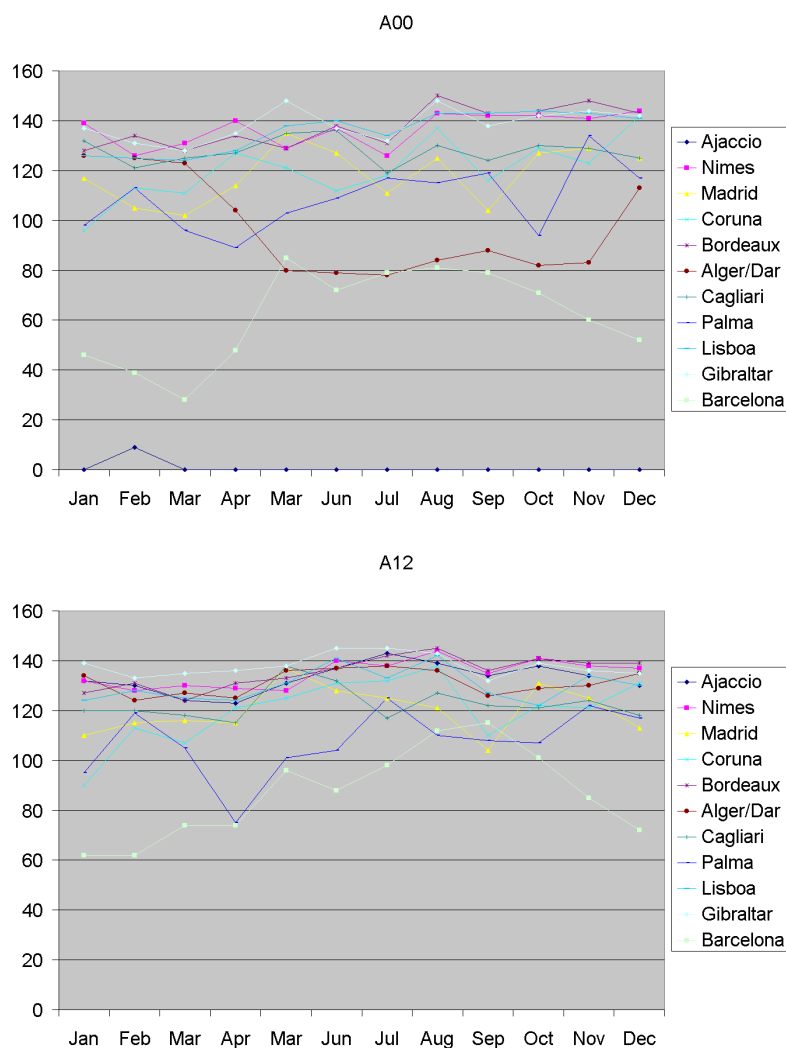


Fig. 3-22. Nombre de radiosondatges disponibles per estació per les 00 (A00) i les 12 (A12) UTC.

ha de fer-se amb un cert caràcter preliminar. En el cas de les dades corresponents al migdia, el nombre de radiosondatges de Barcelona segueix essent inferior al de la mitjana tot i que en diversos mesos hi ha d'altres ubicacions amb menys dades (com ara Palma o Madrid durant l'estiu).

f. Refractivitat superficial

L'evolució mensual de la refractivitat superficial de les estacions considerades es mostra a la Figura 3-23. D'entrada cal aclarir que es representa la refractivitat superficial, N_s , i no la refractivitat reduïda a nivell del mar N_0 . Això queda ben patent amb els valors, molt inferiors a la resta, que presenta Madrid, fet que cal interpretar tenint present la seva altitud superior (629 m mentre la resta estan totes per sota de 100 m). Aquesta major altitud influeix en la seva pressió, lògicament inferior, que condiciona valors també menors de refractivitat.

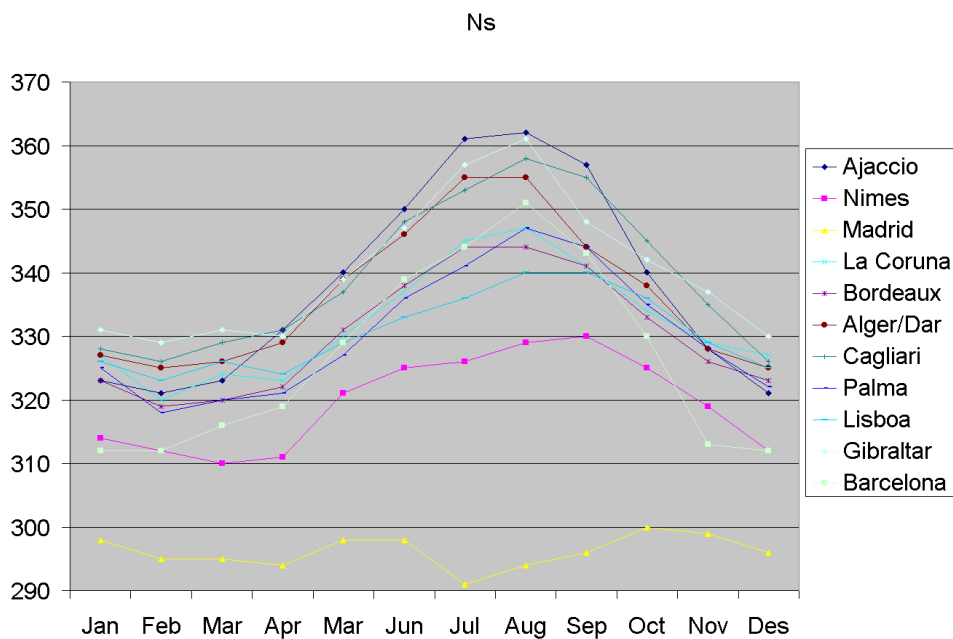


Fig. 3-23. Mediana mensual de la refractivitat superficial expressada en unitats N.

D'altra banda destaca el fet que el cicle anual observat anteriorment per Barcelona, amb un màxim destacat a l'estació càlida, és una característica general que s'observa igualment a la resta d'ubicacions, tret de Madrid, on justament hi ha un mínim.

Els valors de desembre i gener a Barcelona són molt semblants a Nîmes, estació propera a Barcelona, si bé l'amplitud del màxim de la localitat francesa és molt inferior. La ciutat italiana de Ajaccio presenta el valor màxim absolut, superant tant el juliol com l'agost les 360 unitats N.

g. Gradient vertical del primer km

La figura 3-24 mostra l'evolució de les medianes mensuals del gradient vertical de refractivitat modificada de l'aire en el primer km d'altura. Cal recordar que per la refractivitat modificada, el valor normal de -40 unitats N correspon a 118 unitats M.

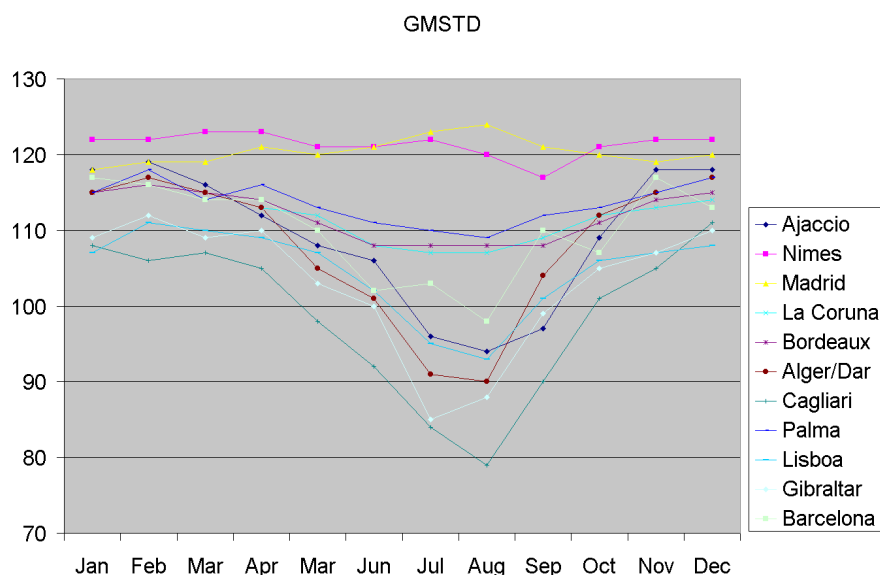


Fig. 3-24. Mediana mensual del gradient vertical de refractivitat expressat en unitats M.

Es pot observar com el valor mínim anual en el període estival és una característica general, tret dels casos de Madrid i Nimes que, a més, presenten una variació anual total molt inferior a la resta. El màxim estival s'observa igualment en localitats atlàntiques com són Lisboa o A Coruña.

En general, doncs, s'aprecia una tendència al caràcter superrefractiu durant l'estiu que es normalitza amb la baixada de temperatures de la tardor. Ja de cara a l'hivern s'assoleixen valors plenament dins del rang de les condicions de propagació normal que novament s'alteren amb l'arribada de la primavera, camí del màxim estival.

h. Gruix i dèficit de refractivitat modificada d'un conducte elevat

Tal com s'ha comentat anteriorment existeixen diversos factors que condicionen que una ona electromagnètica quedi capturada en un conducte. D'una banda cal que l'angle d'incidència sigui petit, proper a 0° o 1° d'elevació respecte l'horitzontal. Per angles superiors a un cert valor crític, les ones no queden atrapades. Per exemple, pel cas simple d'un perfil de refractivitat amb gradient normal sobre un conducte superficial, l'angle crític α màxim per sota del qual l'ona quedarà atrapada ve donat per (ITU, 1997c):

$$\alpha = (2 \cdot 10^{-6} |dM/dh| Dh)^{1/2}$$

on dM/dh és el gradient vertical de refractivitat modificada ($dM/dh < 0$ en un conducte) i Dh és el gruix del conducte (veure Fig. 3-25 per diferents casos). Aquest gruix s'ha d'entendre com l'altura del conducte per sobre de l'antena del transmissor, de forma que dependrà en cada cas d'on està ubicada la font emissora.

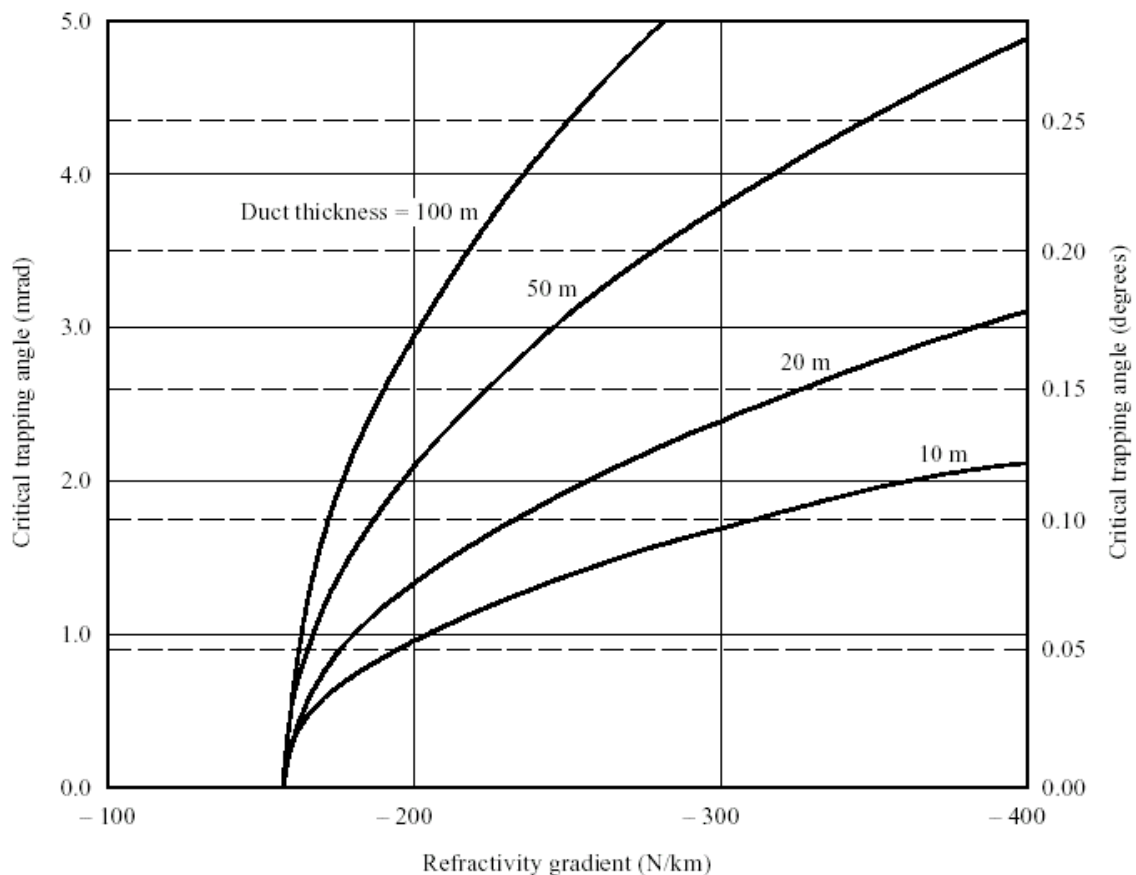


Fig. 3-25. Angle màxim de captura per un conducte superficial de gradient refractiu constant considerant la terra esfèrica (ITU, 1997c).

Un paràmetre relacionat serà el gruix total d'un conducte elevat així com la variació del seu valor de refractivitat modificada. Aquestes dues magnituds es mostren en la figura 3-26 i 3-27 respectivament.

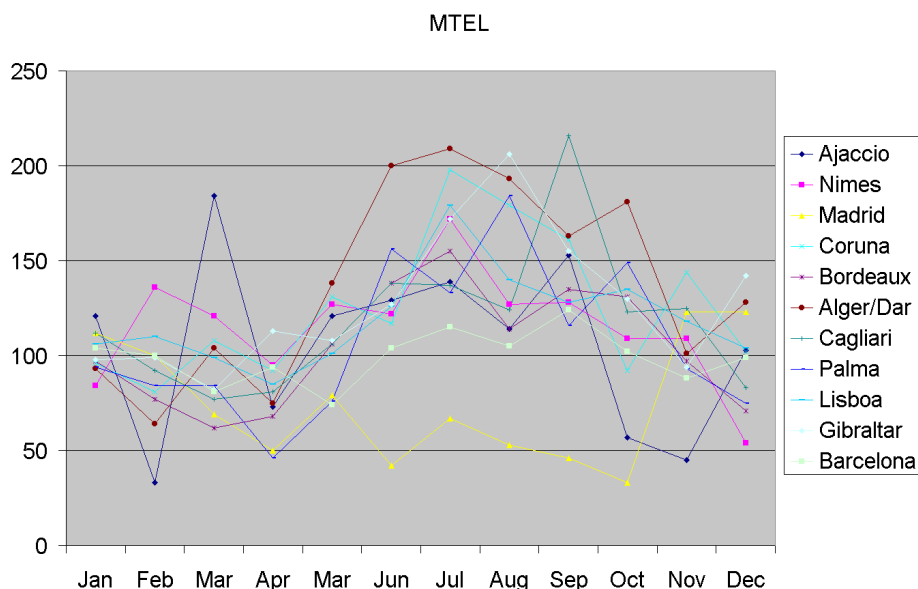


Fig. 3-26. Mediana mensual del gruix (m) del conducte elevat.

En aquest cas, el gruix del conducte elevat mensual cal interpretar-lo com la mediana dels gruixos dels conductes observats durant aquell mes. Pot apreciar-se com els valors oscil·len entre 50 i 200 m i existeix una variabilitat elevada. Novament s'observa una tendència cap als valors màxims durant els mesos més càlids (juliol i agost). Tal com passava amb d'altres magnituds l'estació de Madrid presenta un comportament diferent.

Els descensos de refractivitat dels conductes elevats es mostren en la figura adjunta. Els valors observats màxims arriben fins a 10 unitats M en el cas de Nimes a l'abril si bé en la majoria de casos no es superen les 6 ó 7 unitats M. S'aprecien valors relativament més baixos en el període hivernal, si bé el màxim estival, tan destacat en altres magnituds, en aquest cas no apareix tan nítidament definit. Fins i tot en diverses estacions els valors màxims s'assoleixen en d'altres períodes de l'any.

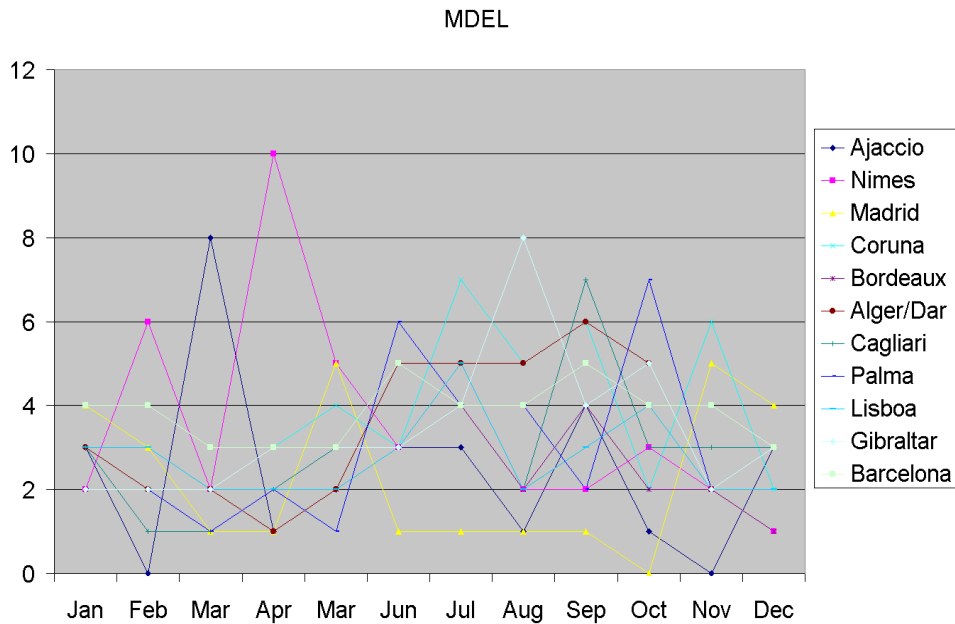


Fig. 3-27. Mediana mensual del descens de refractivitat (en unitats M) dins del conducte elevat.

i. Freqüències de captura

L'existència d'un conducte, fins i tot si la geometria de la seva disposició respecte la font emissora és favorable, no implica necessàriament que les ones radioelèctriques hi quedin capturades. A més de satisfer la condició ja explicada de l'angle mínim d'elevació, la freqüència de l'ona ha de ser superior a un cert valor mínim crític determinat pel gruix del conducte i el perfil de refractivitat. Per sota d'aquesta freqüència mínima de captura l'energia escaparà dels límits del conducte.

Com a exemple, a la Figura 3-28 (ITU, 1997c) mostra la freqüència mínima per conductes superficials (línies contínues) i per conductes elevats (línies discontinúes). S'ha considerat un gradient constant normal per sobre els conductes superficials i, anàlogament, un gradient constant normal per sota dels conductes elevats. Per les freqüències habituals en els sistemes de comunicacions terrestres (típicament de 8 a 16 GHz) les capes conductores tenen gruixos mínims de 5 m a 15 m.

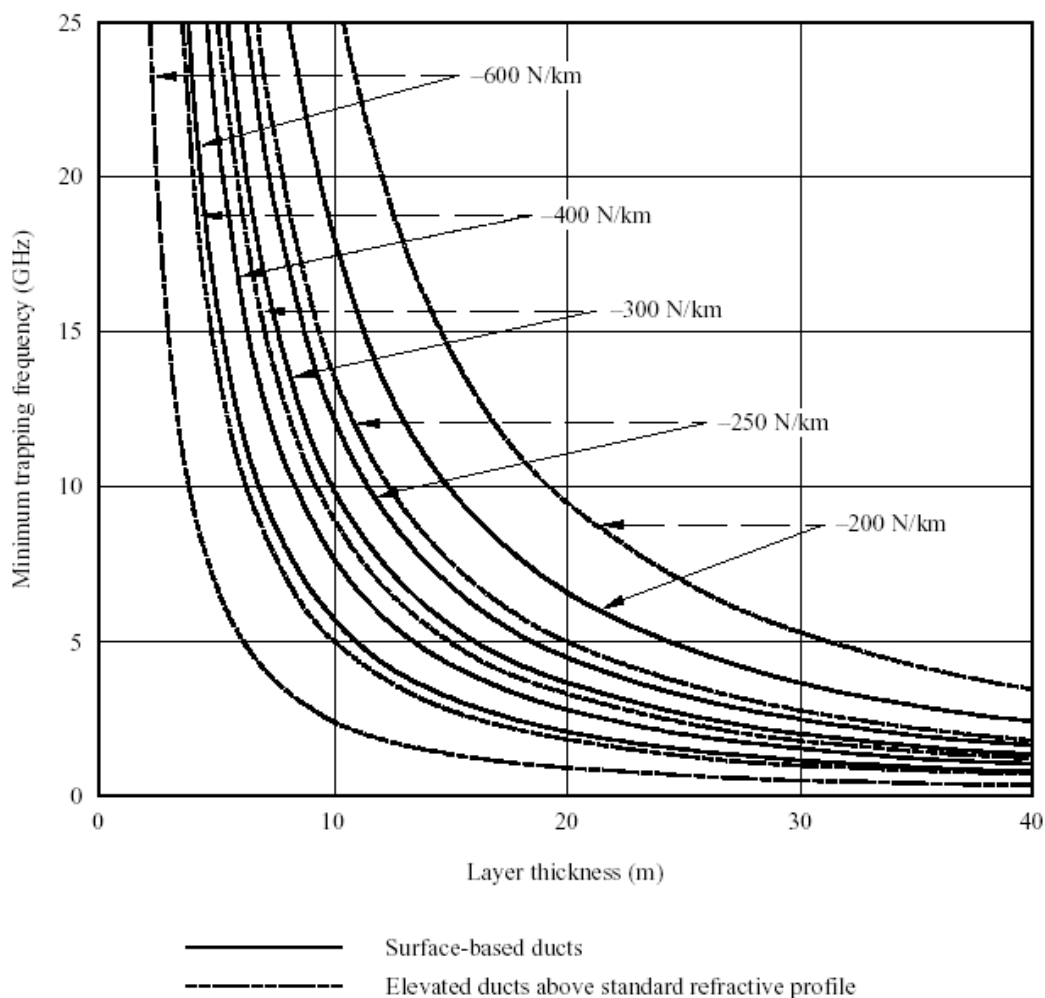


Fig. 3-28. Freqüències mínimes de captura en conductes atmosfèrics de gradient refractiu constant (ITU, 1997c).

Les Figures 3-29 i 3-30 mostren les freqüències de captura dels conductes superficials i elevats, respectivament, de les localitats considerades. En els dos casos les freqüències estan expressades en MHz. S'observa com pel cas dels conductes superficials la variabilitat és superior, tendint a augmentar les freqüències en els mesos més freds. Pel cas dels conductes elevats s'observa una tendència similar, però en els mesos càlids, les freqüències no superen els 500 MHz tret del cas de Madrid. Aquesta estació, tot i també experimentar un mínim, supera els 1500 MHz.

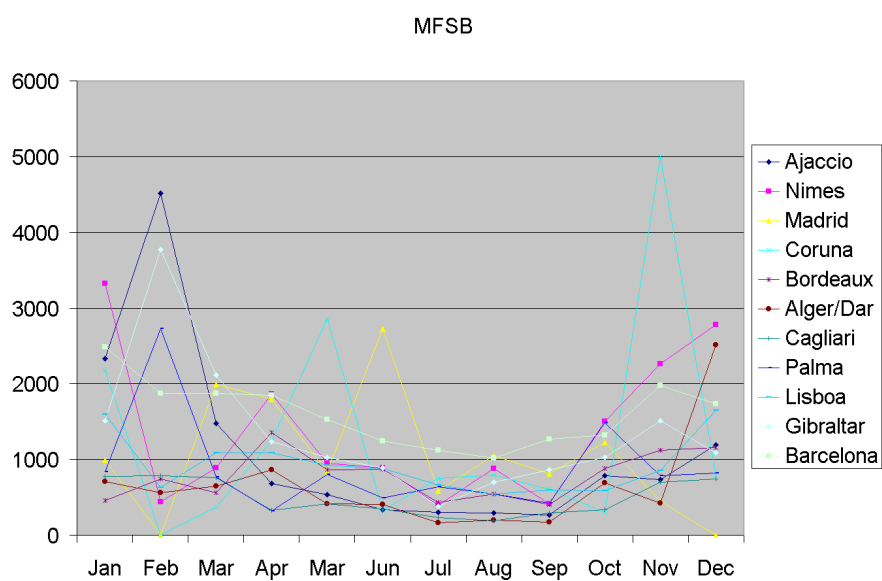


Fig. 3-29. Mediana mensual de la freqüència de captura (MHz) dels conductes de base superficial.

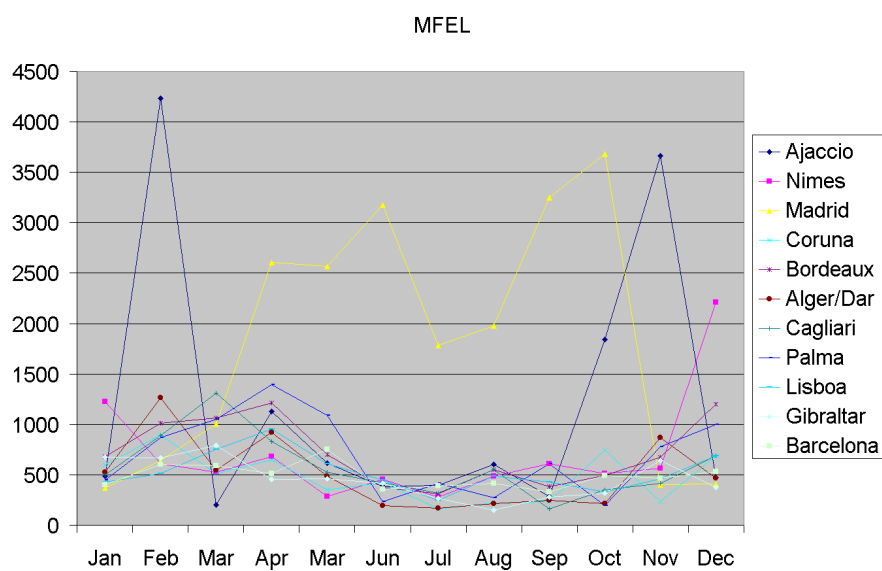


Fig. 3-30. Mediana mensual de la freqüència de captura (MHz) del conducte elevat.

3.7 Propagació anòmla i observacions radar a la zona de Barcelona

En aquesta secció s'han seleccionat diversos episodis de propagació anòmla i s'han il·lustrat amb observacions de radar meteorològic. Les condicions de propagació anòmla s'han determinat a partir dels radiosondatges de Barcelona i les observacions radar s'han obtingut amb el radar meteorològic de Puig Bernat (Vallirana). El període temporal considerat va des de primers de juny a finals de juliol de 2003. S'han triat aquestes dates perquè a primers de juny de 2003 el radar meteorològic de Vallirana fou millorat en diversos aspectes i des d'aleshores proporciona observacions més fiables i adequades per a aplicacions quantitatives. Entre d'altres canvis, el controlador de l'antena fou actualitzat amb un model RCP-08 i el processador fou substituït per un model RVP-8, tots dos de Sigmet Inc. (Sigmet, 2002). Això ha suposat disposar de major precisió mecànica en la capacitat d'apuntar l'antena del radar (O'Hara, 2003) la qual cosa és essencial a l'hora d'avaluar els efectes de la propagació anòmla, tal com es discuteix en detall en el Capítol 4.

3.7.1. Període seleccionat

El període seleccionat va del 1 de juny al 27 de juliol de 2003. Les dades de radiosondatge són les corresponents a les 00 i 12 Z. La refractivitat superficial (N_s) i el gradient vertical de refractivitat del primer kilòmetre (VRG) per aquest període es mostren en la Figura 3-31.

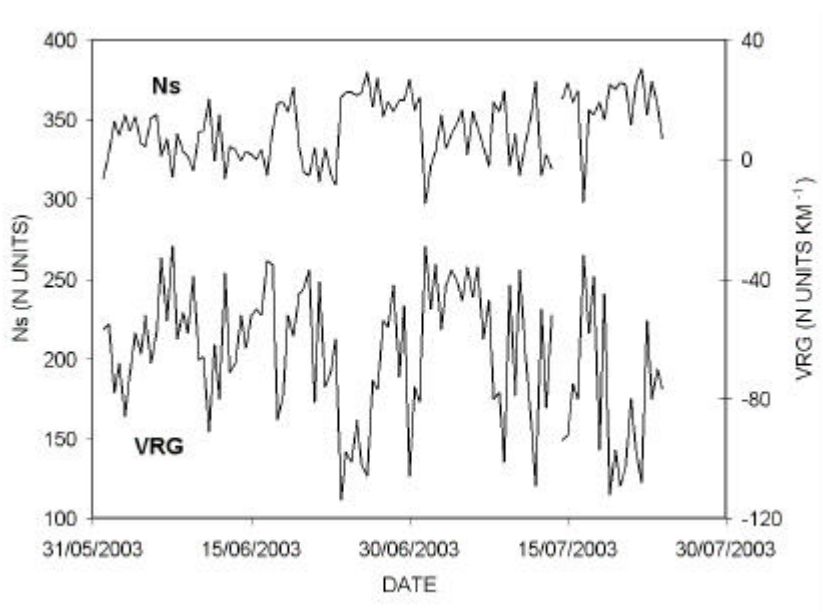


Fig. 3-31. Evolució de la refractivitat superficial (N_s) i el gradient vertical de refractivitat del primer kilòmetre (VRG) pel període seleccionat.

De les 107 observacions de radiosondatge possibles tan sols una no va estar disponible. Del total d'observacions, la mediana del conjunt era de -63 unitats N / km i un total de 11 presentaven un VRG inferior a -100 unitats N / km. Per tant, el caràcter del període ha estat predominantment super refractiu, tal com s'apreciava en el gràfic anterior.

Les imatges del radar de Vallirana amb que s'il·lustren els episodis corresponen al PPI més baix (angle d'elevació d'antena de 0.6°). S'ha seleccionat la imatge de reflectivitat sense corregir (o reflectivitat total observada pel radar) per tal d'apreciar millor els ecos de terra. De fet la imatge de reflectivitat corregida amb el processador digital RVP-8 elimina bona part dels ecos de terra o en disminueix la intensitat gràcies a les correccions que efectua. No obstant, els ecos espuris sí arriben a tenir un efecte significatiu en el producte de precipitació acumulada (ja que s'afegeixen els ecos d'una sèrie d'imatges, per exemple d'una hora).

Aquest fet s'exemplifica en les Figures 3-32 i 3-33. En la primera apareix la imatge de reflectivitat total (sense corregir) de les 21:06 Z del dia 17 de juny de 2003. Com s'indica, en aquest exemple coexisteixen ecos de diversos orígens: ecos de precipitació, ecos de blancs espuris de terra (*ground clutter*), ecos de blancs espuris al mar (*sea clutter*) i fins i tot interferències causades per un altre transmissor proper al radar que també opera en banda C.

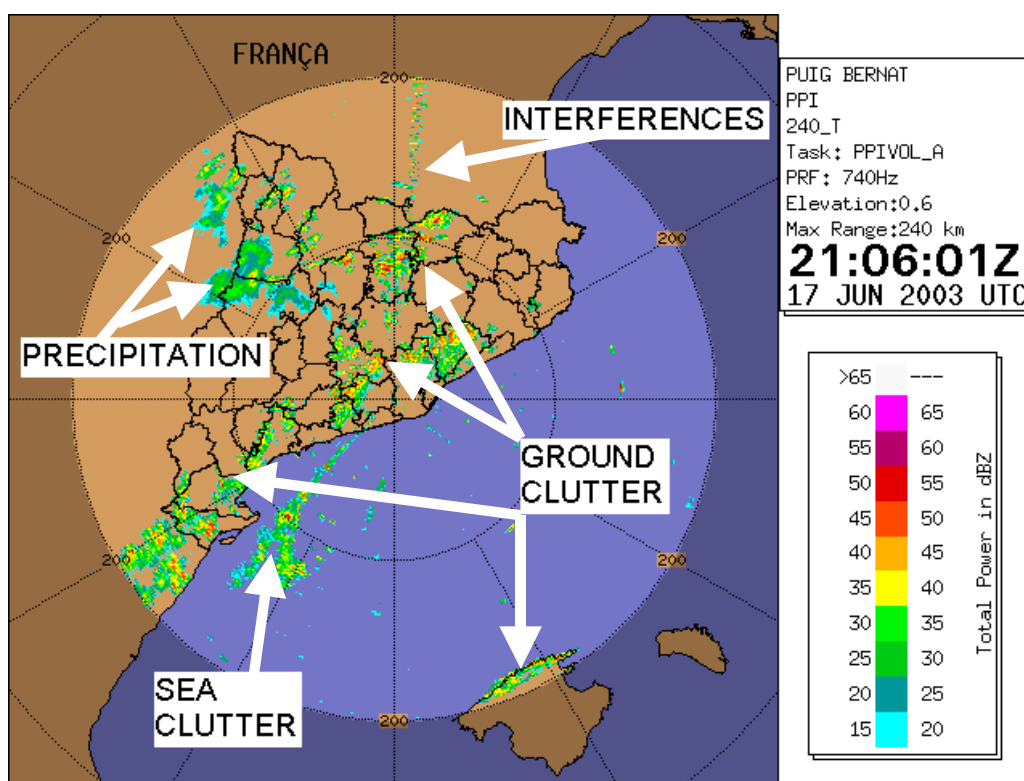


Fig. 3-32. Imatge PPI de reflectivitat total (sense corregir) de les 21:06Z del 17 de juny de 2003 observada amb el radar meteorològic de Vallirana.

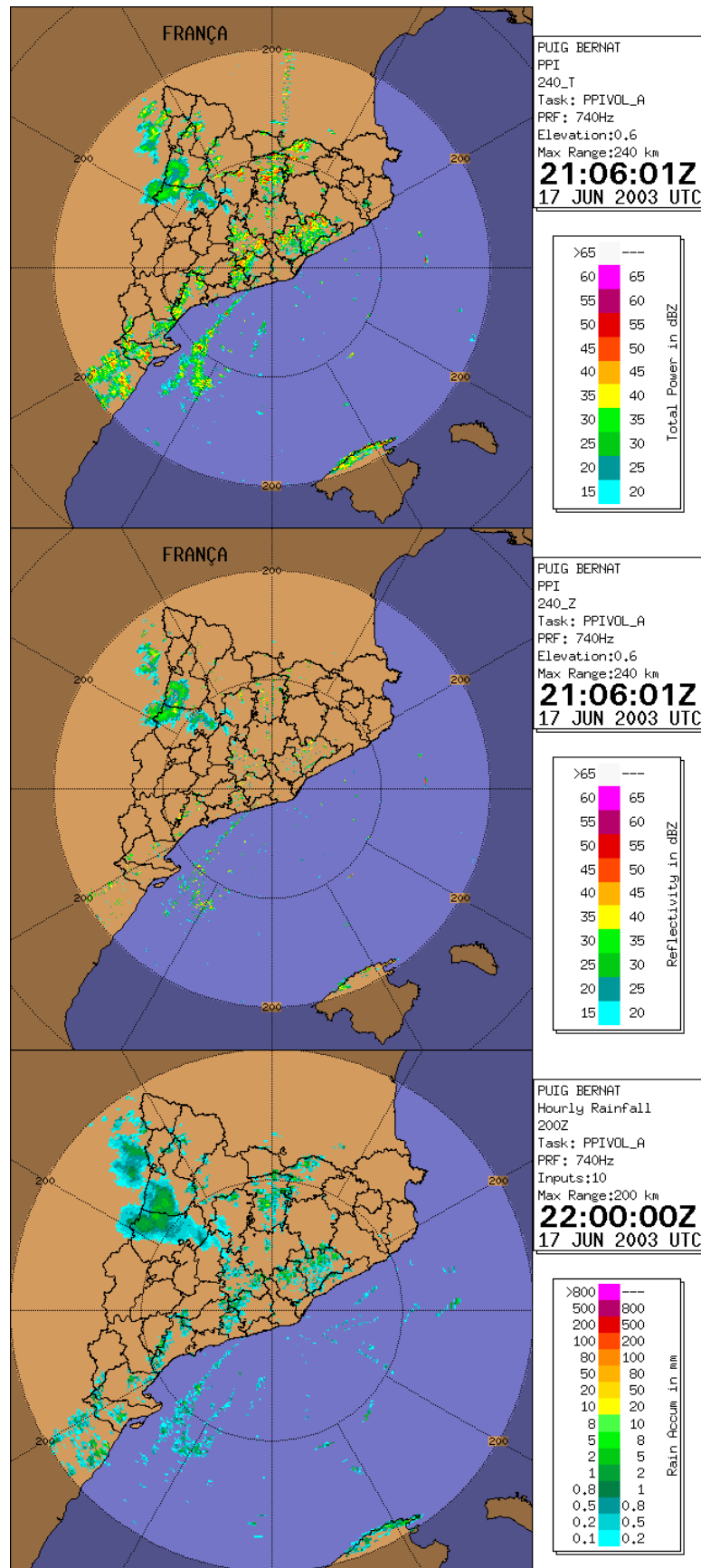


Fig. 3-33. PPI de reflectivitat total (superior) i corregida (centre) de les 21:06 Z del 17 de juny de 2003 i precipitació acumulada de 21 a 22 Z (inferior) observada amb el radar meteorològic de Vallirana.

A la imatge de reflectivitat corregida de la Figura 3-33 s'aprecia com el processador digital RVP-8 fa una bona feina eliminant o disminuint considerablement la intensitat de molts dels ecos espuris que apareixen a la imatge sense corregir. Cal tenir present que aquestes correccions efectuades pel processador es fan de forma dinàmica, a partir de mesures de velocitat Doppler i també variant la fase dels polsos enviats de pols a pols (randomitzant la fase). Això els dona major robustesa per eliminar els ecos de terra de la que es pot obtenir amb el mètode tradicional d'utilització d'una màscara estàtica d'ecos fixes. Per exemple, en utilitzar una màscara d'aquest tipus s'assumeixen unes certes condicions de propagació que per un cas de propagació anòmala com el presentat no són reals i els ecos de terra són més nombrosos i extensos que els donats per una màscara. Tot i així, es pot observar en la precipitació acumulada com apareixen reflectides zones de precipitació espúries (d'ecos causats per la propagació anòmala, tant en terra, com especialment en mar, on són més difícils d'eliminar amb els filtres Doppler). D'altra banda les interferències causades pel transmissor proper s'eliminen de forma molt efectiva.

Per tant, tot i disposar de processador de senyal dotats amb sistemes sofisticats per a l'eliminació d'ecos de terra (que proliferen en extensió i intensitat en casos de superrefracció) i que encara poden millorar-se amb processament addicional dels volums d'ecos (veure discussió en el Capítol 4), en algunes situacions els ecos espuris persisteixen, especialment en els casos que apareixen simultàniament amb precipitació real que lògicament són els de major interès.

Aquests ecos són fàcilment reconeixibles per una persona realitzant tasques de vigilància meteorològica que estigui familiaritzada amb les zones on solen aparèixer els falsos ecos de precipitació, especialment en visualitzar una animació que permet veure que són aproximadament estacionaris a diferència del cas habitual de la precipitació real. No obstant, per un sistema automàtic que utilitza les observacions radar, com ara un model numèric o un model hidrològic, la falsedat dels ecos no resulta tan evident.

3.7.2. Situacions de superrefracció

En aquesta secció es llisten alguns episodis de superrefracció observats en el període temporal abans mencionat. En total s'han avaluat 20 situacions de 12 h d'observacions radar, començant per aquelles amb gradients de refractivitat inferiors d'acord amb les observacions de radiosondatge (Taula 3-17). Concretament s'han avaluat els 11 casos que presentaven

gradients verticals de refractivitat del primer kilòmetre inferiors a -100 unitats N / km i 10 casos amb gradients iguals o inferiors a -80 unitats N / km. De fet cinc dels períodes no disposaven de prou observacions radar (en alguns casos degut a tasques de l'actualització del sistema o a errors del radar).

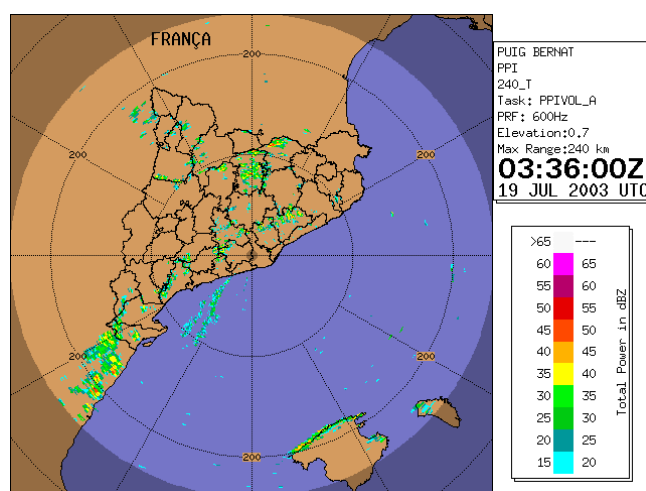
Els 15 casos amb observacions radar disponibles s'han classificat en clutter feble, moderat i intens per inspecció visual subjectiva. També s'ha inspeccionat si hi havia o no precipitació, o si aquesta era dubtosa. El resultat d'aquesta classificació és que d'entre els quinze casos s'han donat gairebé totes les possibles combinacions d'intensitat de clutter i existència de precipitació.

Taula 3-17. Resum de situacions de superrefracció.

Data Any/mes/dia hora	VRG Unitats N/km	Comentari observacions radar
2003/06/23 12	-114	<i>Observacions radar no disponibles.</i>
2003/07/19 00	-112	Clutter intens. Sense precipitació.
2003/07/12 00	-109	Clutter feble. Sense precipitació.
2003/07/20 00	-109	<i>Observacions parcialment disponibles.</i> Clutter feble. Precipitació.
2003/07/22 00	-108	<i>Observacions radar no disponibles.</i>
2003/06/26 00	-106	Clutter intens. Precipitació.
2003/06/30 00	-106	Clutter intens. Precipitació al mar?
2003/07/20 12	-103	Clutter feble. Precipitació?
2003/06/25 12	-102	Molt clutter. Precipitació (convecció destacada).
2003/06/24 12	-101	<i>Observacions radar no disponibles.</i>
2003/07/09 00	-101	Disponibles des de les 2. Molt clutter.
2003/06/24 00	-98	<i>Observacions radar no disponibles.</i>
2003/07/18 00	-97	Clutter moderat. Sense precipitació.
2003/07/19 12	-97	Clutter feble. Sense precipitació.
2003/07/21 12	-97	Clutter moderat. Amb precipitació.
2003/07/14 12	-94	<i>Observacions radar no disponibles.</i>
2003/07/15 00	-92	Clutter moderat. Precipitació al vespre.
2003/06/17 12	-87	<i>Observacions parcialment disponibles.</i> Clutter intens. Precipitació.
2003/06/25 00	-87	Molt clutter. Precipitació.
2003/07/21 00	-80	Clutter moderat. Precipitació.

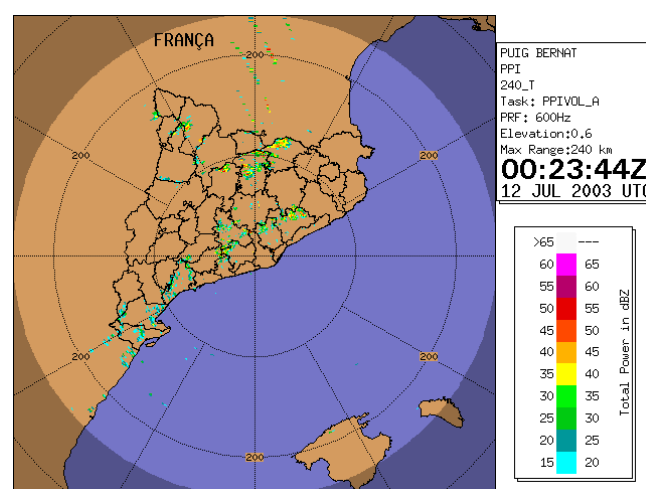
A continuació es descriuen amb major detall els diversos episodis. En alguns casos s'han agrupat els episodis corresponents al mateix dia. La majoria de PPIs tenen un abast de 240 km tret de l'episodi ja mencionat del 25 de juny on l'abast és de 200 km.

a. 2003/07/19 **VRG a les 00: -112 unitats N/km, a les 12: -97 unitats N/km**

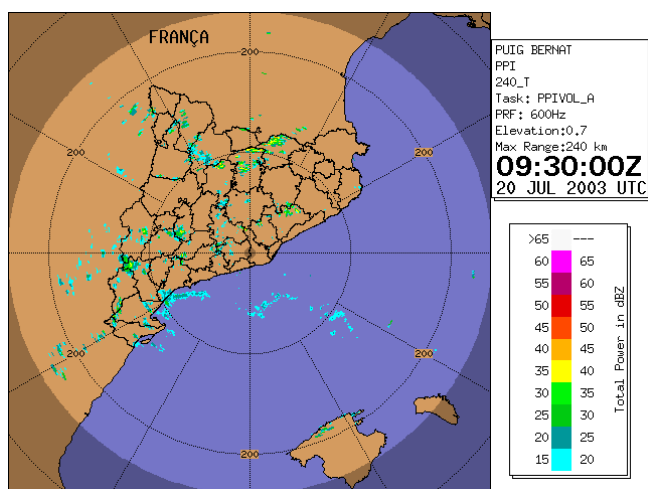


En aquesta imatge s'aprecien molts ecos tant a Mallorca (serra de Tramuntana i interior), Menorca, costa davant de Tarragona i també més al sud al litoral de Castelló. No hi havia precipitació. Els ecos causats per propagació anòmla minven força cap a les 6Z i disminueixen cap a les 12Z tendint a desaparèixer a les 18Z.

b. 2003/07/12 **VRG a les 00: -109 unitats N/km**

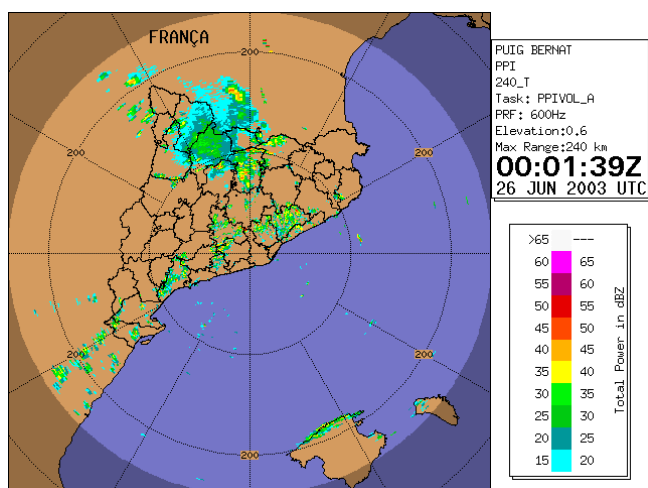


Clutter relativament feble: n'apareix al litoral de Tarragona i nord de Castelló però de baixa intensitat; no n'hi ha a les Balears. No hi ha precipitació durant aquest període. Hi ha interferències en direcció nord.

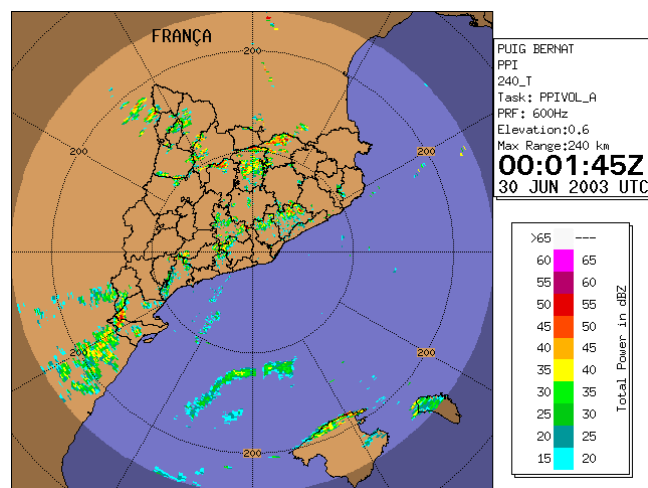
c. 2003/07/20**VRG a les 00: -109 unitats N/km, a les 12: -103 unitats N/km**

Les primeres hores del dia no estan disponibles per problemes tècnics amb el radar. La imatge de les 9:30 mostra precipitació feble, procedent del SW, coincidint amb ecos a la serra de Tramontana de Mallorca -on no hi ha precipitació. El clutter va minvant en avançar el dia i les precipitacions, procedents del W, s'incrementen amb

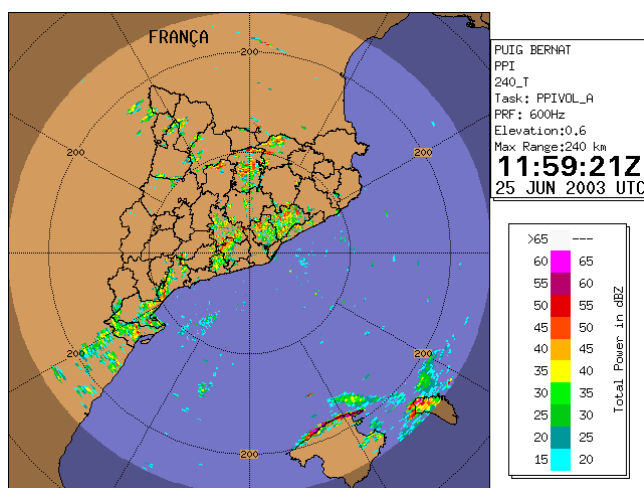
activitat tempestuosa intensa a la tarda a la meitat oest del Principat.

d. 2003/06/26**VRG a les 00: -106 unitats N/km**

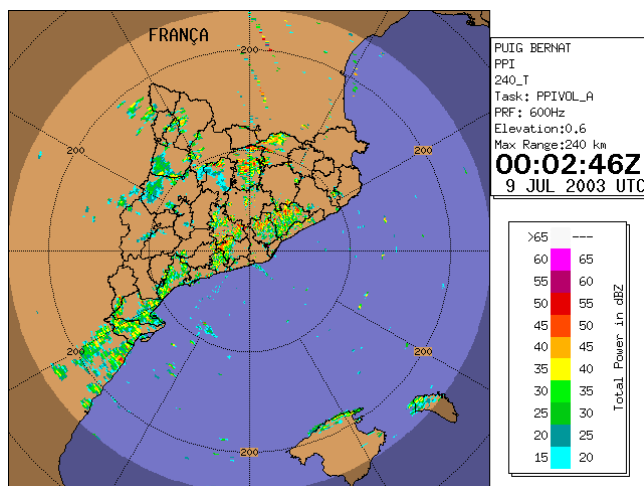
Clutter a les Balears (Mallorca i Menorca) així com a la costa de Tarragona i Castelló. Precipitacions destacades de 00 a 01; més tard desapareixen.

e. 2003/06/30**VRG a les 00: -106 unitats N/km**

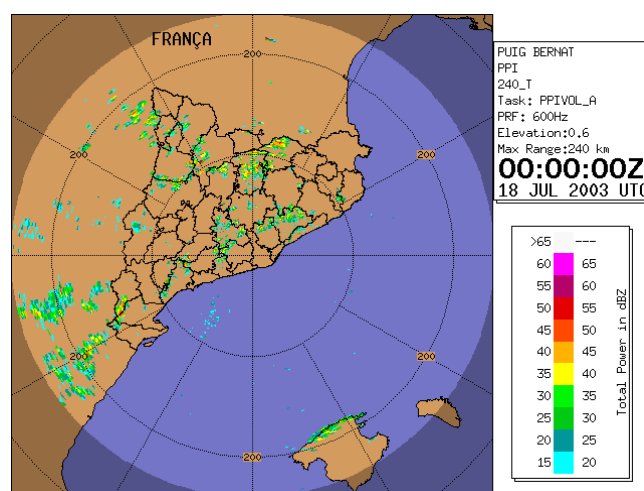
Clutter present des de les 00 que s'intensifica cap a la 1Z (imatge mostrada on el clutter fort arriba a la costa valenciana, a part de les Balears) mantenint-se durant la matinada i matí i desapareixent cap a les 12 Z. Hi ha precipitacions al Mar Balear.

f. 2003/06/25**VRG a les 00: -87 unitats N/km, a les 12: -102 unitats N/km**

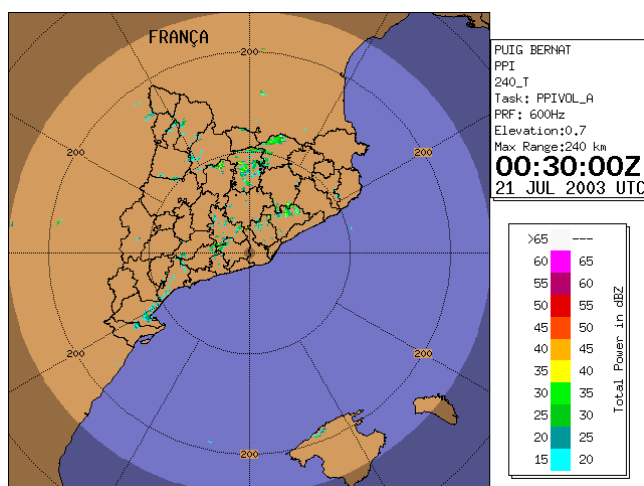
Clutter intens ja des de les 00 augmentant a molt intens (valors molt elevats a les zones habituals: Balears, Tarragona i Castelló i ecos a llocs no habituals com tota Menorca o interior de Mallorca). Ruixats i convecció destacada, per exemple prop de les Balears (però no a sobre de Mallorca a la imatge mostrada) desplaçant-se de SW cap a NE.

g. 2003/07/09**VRG a les 00: -101 unitats N/km**

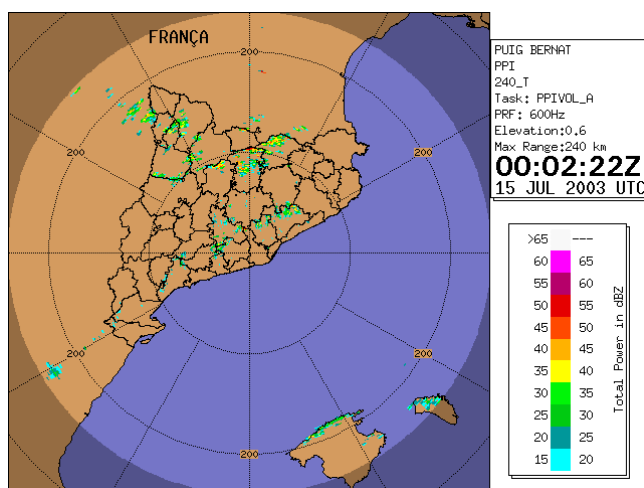
Primeres imatges del dia no disponibles. Clutter molt intens a Tarragona i Castelló i moderat però extens a les Balears (pràcticament tota la part de Menorca dins l'abast del radar apareix amb clutter, tot i les seves altures relativament modestes). Precipitacions febles al quadrant nord-oest de Catalunya.

h. 2003/07/18**VRG a les 00: -97 unitats N/km**

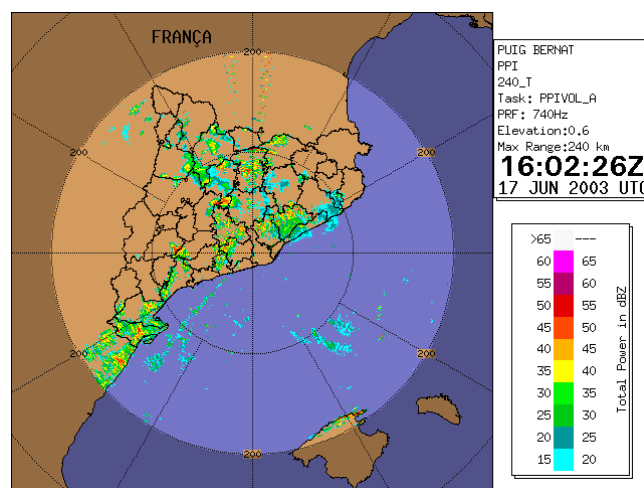
Clutter intens a l'interior del País Valencià i Serralada Ibèrica així com al sud de Tarragona; també visible però moderat davant la costa de Tarragona, a Mallorca i inexistent a Menorca. Cap a les 6 Z desapareix completament. Sense precipitacions aparents.

i. 2003/07/21**VRG a les 00: -80 unitats N/km, a les 12: -97 unitats N/km**

En general hi ha poc clutter: al litoral de Tarragona, feble però relativament extens, més que a la serra de Tramontana on apareix amb baixa intensitat i extensió. Durant el dia alguns ruixats al Mar Balear desplaçant-se de SW a NE.

j. 2003/07/15**VRG a les 00: -92 unitats N/km**

Clutter inexistent al litoral de Tarragona i davant la costa però en canvi destacable a les Balears en extensió (nord i interior de Mallorca i tota la part coberta de Menorca) però no en intensitat. El clutter augmenta lleugerament al llarg del dia. Cap a les 21 hi ha precipitacions.

k. 2003/06/17**VRG a les 12: -87 unitats N/km**

Algunes hores no disponibles a causa de problemes tècnics. Molt clutter i intens, especialment a Tarragona i Castelló així com davant d'aquestes costes i altres punts del Mar Balear. Apareix també el nord de Mallorca (en aquesta PPI de 200 km Menorca queda fora de cobertura). Ruixats i tempestes generalitzats.

3.8 Referències

- Bean, B. R., and E. J. Dutton, 1968: *Radio meteorology*. Dover Publications, 435 pp.
- Bech, J., A. Sairouni, B. Codina, J. Lorente, and D. Bebbington, 2000: Weather radar anaprop conditions at a Mediterranean coastal site. *Phys. Chem. of the Earth (B)*, **25**, 829-832.
- Bech, J., B. Codina, J. Lorente, and D. Bebbington, 2002: Monthly and daily variations of radar anomalous propagation conditions: How "normal" is normal propagation? 2nd European Meteorological Radar Conference, Delft, Netherlands, 35-39.
- Bech, J., D. Bebbington, B. Codina, A. Sairouni, J. Lorente, 1998: Evaluation of atmospheric anomalous propagation conditions: an application for weather radars. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology*, SPIE, **3499**, 111-115
- Camacho Rosales, J., 2000: Estadística con SPSS. Ed. RA-MA, Madrid, ISBN: 84-7897-405-9, 394 pp.
- Codina, B., A. Sairouni, J. Bech, A. Redaño, 1997: Operational Application of a nested mesoscale numerical model in Catalonia (Meteo'96 Project). *INM/WMO International Symposium of Cyclones and Hazardous Weather in the Mediterranean*, ISBN 84-7632-329-8, 657-667
- Connel, B. H. and D. R. Miller, 1995: Interpretation of radiosonde errors in the atmospheric boundary layer. *J. Appl. Meteor.* **34**, 1070-1081
- Doviak, R. J., and D. S. Zrnic, 1993: *Doppler radar and weather observations*. Academic Press, 562 pp.
- Elliot, W. P. and D. J. Gaffen, 1991: On the utility of radiosonde humidity archives for climate studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **72**, 1507-1520
- Fontserè, E., 1914: Treballs de l'Estació Aerològica de Barcelona. Vol I.

- Free, M., I. Durre, E. Aguilar, D. Seidel, T. C. Peterson, R. E. Eskridge, J. K. Luers, D. Parker, M. Gordon, J. Lanzante, S. Klein, J. Christy, S. Schroeder, B. Soden, L. M. McMillin, E. Weatherhead, 2002: Creating Climate Reference Datasets: CARDS Workshop on Adjusting Radiosonde Temperature Data for Climate Monitoring. *B. American Meteorol. Soc.*, **83**, 891–899
- Gibergans, J., 2001: Aplicación de métodos hidrometeorológicos para la predicción de la precipitación diaria. Memoria de Tesi Doctoral.
- ITU, 1997a: *The Radio Refractive Index: its Formula and Refractivity data*. Recommendation ITU-R P.453-6, Int. Telecom. Union, 9 pp.
- ITU, 1997b: *Definitions of terms relating to propagation in non-ionized media*. Recommendation ITU-R PN.310-9, Int. Telecom. Union, 4 pp.
- ITU, 1997c: *Effects of tropospheric refraction on radiowave propagation*. Recommendation ITU-R P.834-2, Int. Telecom. Union, 9 pp.
- Lane, J.A, 1961: The radio refractive index gradient over the British Isles, *J. Atmosph. and Terrest. Phys.*, 21, 157-166.
- Llasat, M. C., J. Gibergans-Báguena, D. Sempere, J. Y. Rodríguez, 1996: The use of radiosounding data to classify the heavy rain events. Application to remote sensing. *Annales Geophysicae*, European Geophysical Society, supplement II, 14, C369.
- Lorente, J. and S. Alonso, 1987: Primeros resultados de la estimación del índice de refractividad del aire en Barcelona. *V Spanish National Geophysics Assembly*, Madrid, 805-808
- Luers, J. K. and R. E. Eskridge, 1995: Temperature correction for the VIZ and Vaisala radiosondes. *J. Appl. Meteor.*, 34, 1241-1253
- Melissa F., I. Durre, E. Aguilar, D. Seidel, T. C. Peterson, R. E. Eskridge, Robert E., J. K. Luers, D. Parker, M. Gordon, J. Lanzante, S. Klein, J. Christy, S. Schroeder, B. Soden,

- L. M. McMillin, E. Weatherhead, 2002: Creating Climate Reference Datasets: CARDS Workshop on Adjusting Radiosonde Temperature Data for Climate Monitoring. *Bull. of the American Meteorol. Soc.* Vol. 83, No. 6, pp. 891–899.
- Météo-France, 1997: Quality control on GTS data at Météo-France. Météo-France, Service Centrale d'Exploitation de la Météorologie. 42, Av. Coriolis, 31057 Toulouse Cedex 1, France
- Miloshevich, L. M., H. Völmel, A. Paukuunen, A. Heymsfield, S. Oltmans, 2001: Characterization and correction of relative humidity measurements from Vaisala RS-80A radiosondes at cold temperatures. *J. Oceanic and Atmosp. Technol.*, 18, 135-156
- Newsome, D.H., 1992: *Weather Radar Networking COST Project 73 Final Report*, Kluwer Academic Publishers, 254 pp.
- O'Hara, F., 2003: comunicació personal.
- Parlange, M. B. and Brutsaert, 1990: Are radiosonde time scales appropriate to characterize boundary layer wind profiles? *J. Appl. Meteor.*, 29, 249-255
- Patterson, W. L., 1987: Historical Electromagnetic Propagation Condition Database Description. Technical Document 1149, ADA-A189 157, NOSC 1149, US NAVY, 71 pp.
- Patterson, W.L., 1998: Advanced Refractive Effects Prediction System AREPS. Technical Document 3028, Space and Naval Warfare Systems Center, San Diego, CA 92152-5001, 150 pp.
- Press W. H., B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, 1993: Numerical Recipes in C : The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press; 2nd edition, 994 pp.
- Redaño, A., J. Cruz and J.Lorente, 1991: Main features of sea breeze in Barcelona, *Meteorol. Atmos. Phys.*, **46**, 175-179

- Rinehart, R., 1991: *Radar for Meteorologists*, Univ. North Dakota, P.O. Box 6124, Grand Forks, ND, 58206-6124, US, 334 pp.
- Sairouni A., J. Aymamí, J. Vidal, B. Codina, A. Redaño, 2000: Hacia un nuevo índice de estabilidad en el Mediterráneo Occidental: primeros resultados, II Spanish-Portuguese General Assembly, pp. 387-388
- Segala, S., A. Sairouni, J. Bech, 2002: Hail forecasts with NWP derived instability indexes. European Geophysical Society. 4th Plinius Conference on Mediterranean Storms, Mallorca, Spain. Abstracts book, p. 26
- Sierra Bravo, R., 1994: *Análisis Estadístico Multivariable*. Edit. Paraninfo, Madrid, 257 pp.
- Sigmet, 2002: RVP User's Manual. Sigmet, Inc. Westford, Boston, USA.
- Thayer, D. M., 1974: An improved equation for the radio refractive index of air. *Radio Sci.*, 9, 803-807
- Vaisala, 1997: RS-80 Radisondes. Technical Information. A571en 1997-08 (disponible a <http://www.vaisala.com>)
- Vaisala, 1999: RS-80 Series GPS Radisondes. B330en 1999-03 (disponible a <http://www.vaisala.com>)
- Zhai, P. and R. Eskridge, 1996: Analyses of inhomogeneities in radiosonde temperature and humidity time series. *J. Climate*, 9, 884-896

CAPÍTOL 3. ANÀLISI OBSERVACIONAL DE LES CONDICIONS DE PROPAGACIÓ DE RADAR METEOROLÒGIC.....	3-1
3.1 DADES DE RADIOSONDATGE.....	3-1
3.1.1. <i>L'estació de radiosondatge de Barcelona</i>	3-1
3.1.2. <i>La sonda Vaisala RS-80</i>	3-2
3.1.3. <i>Dades TEMP i dades d'alta resolució</i>	3-4
3.1.4. <i>Control de qualitat</i>	3-4
3.2 REFRACTIVITAT SUPERFICIAL.....	3-7
3.2.1. <i>Refractivitat</i>	3-7
3.2.2. <i>Estadística de N superficial</i>	3-7
3.2.3. <i>Distribució acumulada de freqüències</i>	3-9
3.3 GRADIENT VERTICAL DE REFRACTIVITAT.....	3-10
3.3.1. <i>Càlcul del gradient de N</i>	3-11
3.3.2. <i>Estadística del gradient de N</i>	3-13
3.3.3. <i>Distribució acumulada de freqüències</i>	3-19
3.3.4. <i>Modelització del radi equivalent</i>	3-21
3.3.5. <i>Modelització del perfil de N amb la funció exponencial</i>	3-24
3.4 OCURRÈNCIA I DESCRIPCIÓ DE PA.....	3-27
3.4.1. <i>Occurrència i descripció de PA mensual i anual</i>	3-27
3.4.2. <i>N_s i gradient vertical de N</i>	3-28
3.4.3. <i>Relacions entre la refractivitat i altres variables</i>	3-30
3.5 CONDUCTES	3-37
3.5.1. <i>Conductes considerats</i>	3-37
3.5.2. <i>Estadística d'ocurrència de conductes</i>	3-38
3.6 CONDICIONS DE PROPAGACIÓ A LA MEDITERRÀNIA OCCIDENTAL.....	3-40
3.6.1. <i>La base de dades HPCDB</i>	3-42
3.6.2. <i>Comparació geogràfica de diverses magnituds</i>	3-43
3.7 PROPAGACIÓ ANÒMALA I OBSERVACIONS RADAR A LA ZONA DE BARCELONA.....	3-51
3.7.1. <i>Període seleccionat</i>	3-51
3.7.2. <i>Situacions de superrefracció</i>	3-54
3.8 REFERÈNCIES	3-60