

DEPARTAMENT D'ASTRONOMIA I METEOROLOGIA

Bienni 1999 - 2001



UNIVERSITAT DE BARCELONA



Tesi doctoral

**Predicció de la radiació solar
espectral UV mitjançant
models de dispersió múltiple.
Aplicació a la predicció de
l'índex UV a Catalunya**

Elies Campmany Pons

Director: Jeroni Lorente

Barcelona, maig 2005

Aquesta tesi doctoral s'ha realitzat en el marc del projecte *REN2000-0903-C08CLI* del Ministerio de Ciencia y Tecnología i del *Programa de col·laboració científica per a la realització de radiosondatges i predicció de l'índex UV a Catalunya* del Servei Meteorològic de Catalunya.

Totes les gràfiques, esquemes i fotografies del present treball han estat realitzats per l'autor, excepte les gràfiques que apareixen als apèndixs i en els casos en què s'especifica el contrari a peu de figura. El document ha estat editat amb el programa *LyX V.1.3.4* i les gràfiques s'han generat amb el programa *GNUplot V3.4*.

Elies Campmany Pons. Barcelona, maig de 2005

Hi ha cada vegada més universitats i cada vegada més estudiants. Per tal de poder acabar les carreres, els estudiants han d'inventar els temes de les seves tesines. Hi ha un nombre infinit de temes perquè sobre qualsevol cosa es pot fer un estudi. Els fulls de paper escrit s'amunteguen en els arxius, que esdevenen més tristos que els cementiris perquè mai no hi entra ningú, ni tan sols el dia dels difunts. La cultura desapareix en el volum de la producció, en l'allau de lletres, en la bogeria de la quantitat.

Milan Kundera, *La insostenible lleugeresa del ser*.

Agraïments

Probablement, aquest sigui l'apartat que més gent es llegeix i per això, en redactarlo, espero no deixar-me ningú, ni ser injust en l'ordre o en l'extensió que dedico a cadascun. Confio en que els que hi apareixeu us sentiu ben tractats i els que us hi trobeu a faltar sapiguen perdonar-me i acceptar aquestes gràcies per endavant.

En primer lloc, vull agrair al director d'aquesta tesi, el Dr. Jeroni Lorente, no només les seves encertades esmenes i correccions sinó també el seu ajut, dedicació i suport constants.

També vull donar les gràcies al Dr. Xavier de Cabo per les seves útils aportacions, a la Yolanda Sola per haver resolt els meus dubtes sobre models de transferència radiativa i a en Javi Rodriguez pel seu ajut amb les dades del fotòmetre CIMEL.

Gràcies a tot el personal del Departament d'Astronomia i Meteorologia, i en concret, a tots aquells que al llarg d'aquests anys han fet dels meus dinars als menjadors universitaris més que un àpat frugal amb la seva presència i conversa. Gràcies a l'Alfons Callado, a en Toni Aniento, a en Joan Aymamí, a en Jose Vidal, a en Jordi Toda, a en Roger Veciana, a en Joan de Batlle, a en Jaume Soley, a en Nacho Gros, a en Pau Escribà, a en Tomeu Rigo, a en Jordi Beneito, a en Josep Manel Carrasco, a la Sara Ortega, a en Manu Bravo, a en Joaquim Pardos, a en Germán Delgado, a en Xavi Saenz, a en Manel Ceperuelo, a la Mercè Barnolas, a l'Adolfo Magaldi i a en Pau Casso. I especialment, gràcies a en Miquel Picanyol per haver convertit l'inhòspit despatx 732 en una llar confortable i acollidora amb la seva companyia i el seu bon gust pel jazz.

Finalment, gràcies als meus amics dels Jan and the Electric Poets, en especial al Joan, i a la meva família: a l'Albert, a l'Enric i, sobretot als meus pares, per ser uns autèntics mecenes de les ciències suportant-me tots aquests anys a casa i mostrant-se en tot moment contents de trobar-m'hi. I per últim, perquè si hagués començat amb ella ja hauria omplert tota la pàgina, a la Bàrbara.

Índex

1	Introducció i objectius	1
1.1	Introducció	1
1.2	Objectius	5
2	La radiació solar UV i l'atenuació al seu pas per l'atmosfera	7
2.1	L'espectre de la radiació solar extraterrestre	7
2.2	La radiació solar UV i l'índex UV	9
2.3	L'atenuació de la irradiància solar directa	12
2.4	L'absorció de la radiació solar al seu pas per l'atmosfera . . .	14
2.4.1	La contribució de l'ozó en l'absorció de la radiació solar	15
2.4.2	La contribució del vapor d'aigua en l'absorció de la radiació solar	18
2.4.3	Altres gasos que produeixen absorció	19
2.4.3.1	Nitrogen	19
2.4.3.2	Mescla de gasos	20
2.5	La dispersió de la radiació solar al seu pas per l'atmosfera . .	20
2.5.1	La dispersió de Rayleigh o molecular	21
2.5.2	La dispersió de Mie i de l'aerosol atmosfèric	22
3	Instrumentació i metodologia	25
3.1	Introducció	25
3.2	Instruments per a mesurar espectralment la irradiància solar .	26
3.2.1	Espectroradiòmetre Bentham 300	28
3.2.1.1	Calibratge i manteniment	29
3.3	Instruments de banda ampla per a mesurar la irradiància solar	30

3.3.1	Piranòmetre YES	31
3.3.2	Piranòmetre Solar Light	33
3.4	Instruments fotomètrics	35
3.4.1	Fotòmetre Microtops	36
3.4.2	Fotòmetre CIMEL	37
3.4.2.1	Característiques tècniques i òptiques de l'aparell	37
3.4.2.2	Calibratge: el mètode Langley	38
4	Modelització de la radiació solar UV	43
4.1	Introducció	43
4.2	Tipus de models de simulació de la radiació UV	46
4.3	Models de dispersió simple aplicats en el present treball	47
4.3.1	SMARTS2	47
4.3.2	UVAGOA	48
4.4	Models de dispersió múltiple utilitzats	49
4.4.1	SBDART	49
4.4.2	STAR	50
4.5	Anàlisi de sensibilitat i comparació dels models aplicats	51
4.5.1	Descripció de les mesures utilitzades en l'anàlisi	53
4.5.2	Comparacions entre models i mesures en l'índex UV	54
4.5.3	Comparacions entre les simulacions i les mesures en l'U- VA i l'UVB	56
4.5.4	Comparacions entre les simulacions de l'índex UV amb diferents models	58
5	Obtenció de les variables d'entrada i paràmetres dels models	61
5.1	Mètodes de determinació de la columna d'ozó en aquest treball	61
5.1.1	Introducció	61
5.1.2	Determinació a partir del fotòmetre Microtops	64
5.1.3	Determinació a partir de dades de l'espectroradiòmetre Bentham	66
5.1.4	Determinació de la columna d'ozó per teledetecció	67

5.1.4.1	Determinació de la columna d'ozó mitjançant el sensor TOMS	71
5.1.4.2	Determinació de la columna d'ozó a partir del sensor GOME	73
5.1.5	Comparació entre els mètodes de determinació de la columna total d'ozó	74
5.2	Determinació de l'espessor òptic d'aerosols a Barcelona	79
5.2.1	Càlcul de l'espessor òptic a partir de les mesures amb el fotòmetre CIMEL	79
5.2.2	Càlcul de l'espessor òptic amb el fotòmetre Microtops	82
5.3	Determinació de la massa d'aigua precipitable a Barcelona	83
5.3.1	Càlcul de la massa d'aigua precipitable amb les dades del fotòmetre CIMEL	83
5.3.2	Càlcul de la massa d'aigua precipitable realitzat pel fotòmetre Microtops	85
5.3.3	Càlcul de la massa d'aigua precipitable a partir de les dades del radiosondatge	86
5.3.4	Comparació entre les tres determinacions de la massa d'aigua precipitable	88
6	Aplicació del model SBDART a la predicció de l'índex UV a Catalunya	93
6.1	La predicció de l'índex UV a Catalunya (2000-2003)	93
6.1.1	Breu descripció de la campanya	93
6.1.2	Aplicació de la modificació de l'índex UV per nuvolositat	97
6.1.3	Aplicació de la hipòtesi de persistència de la columna total d'ozó (2000-2002)	98
6.1.4	Incorporació de la previsió d'ozó del DWD (2003)	101
6.1.5	Anàlisi i control de qualitat de la xarxa de piranòmetres de l'índex UV	104
6.2	Anàlisi de la millora introduïda per la predicció del DWD	106
6.2.1	Període 2000-2002 (hipòtesi de persistència de l'ozó)	107
6.2.2	Període 2003 (predicció d'ozó del DWD)	108

7	Conclusions i futures línies de recerca	113
7.1	Obtenció dels paràmetres usats en els models	113
7.2	Modelització de la radiació solar UV	117
7.3	Predicció de l'índex UV	120
7.4	Futures línies de recerca	121
	Bibliografia	123
A	Llista d'acrònims	133
B	Paràmetres estadístics utilitzats	137
C	Publicacions	139
C.1	Photochemistry and Photobiology. Vol. preprint, 2005	139
C.2	International Radiation Symposium. Proceedings, 2004	162
C.3	The first Iberian UV-Visible instruments intercomparison. Fi- nal report, 2004; Chapter 10, 101-108	166
C.4	Boletín del Grupo Español de Fotobiología, 2004; 22-26	174
C.5	3a Asamblea Hispano-Portuguesa de geodesia y geofísica. Pro- ceedings, 2002; TOMO III, 1394-1396	179

Índex de figures

2.1	Espectre MODTRAN-3 (Ricchiazzi et al., 1998) de radiació extraterrestre, radiació d'un cos negre a 5900 K i irradiància solar global incident a Barcelona a la superfície de la terra a partir del model SBDART.	8
2.2	Espectre d'acció CIE en escala lineal i logarítmica, proposat per (McKinley and Diffey, 1987).	10
2.3	Exposició màxima sense protecció en minuts en funció de l'índex UV per als quatre fototipus, segons els valors proposats per Vanicek et al. (2000).	12
2.4	Bandes d'absorció de l'ozó en l'UV proposats per WMO (1985).	17
2.5	Esquema de la dispersió de Rayleigh i de Mie, segons Iqbal (1983).	21
3.1	Fotografies del capçal de l'espectroradiòmetre Bentham 300 amb banda para-sol automàtica per a realitzar la mesura d'irradiància difusa (imatge inferior de la dreta) instal·lat al terrat de la Facultat de Física.	29
3.2	Espectre de la làmpada CL6-4375 i calibratge de l'espectroradiòmetre Bentham 300.	30
3.3	Fotografies del piranòmetre YES instal·lat al terrat de la Facultat de Física i esquema de funcionament de l'aparell basat en (Yankee Environmental System, Inc., 2004).	32
3.4	Fotografies i esquema de funcionament del piranòmetre Solar Light, basat en (Solar Light Co., 1991).	34
3.5	Espectre d'acció CIE (McKinley and Diffey, 1987) i espectres de resposta dels piranòmetres Solar Light i YES (Lantz et al., 1998).	35

3.6	Fotografies del fotòmetre Microtops al terrat de la Facultat de Física de la Universitat de Barcelona.	37
3.7	Fotografies del fotòmetre CIMEL instal·lat al terrat de la Facultat de Física.	38
3.8	Calibratge a partir del mètode Langley pels diferents canals, excepte pel canal de 936 nm del fotòmetre CIMEL instal·lat al terrat de la Facultat de Física de la Universitat de Barcelona a partir de les mesures del 10 de juliol de 2003.	40
3.9	Calibratge a partir del mètode Langley del canal de 936 nm del fotòmetre CIMEL pel 10 de juliol de 2003.	41
4.1	Evolució de l'índex UV a partir dels valors experimentals, dels models i de la seva mitjana durant els dos dies de mesures de la campanya a l'Arenosillo (Huelva, 246 i 247 de 1999).	55
4.2	Diferència absoluta en l'índex UV dels models respecte les mesures pels dos dies de mesures de la campanya a l'Arenosillo (Huelva, 246 i 247 de 1999).	55
4.3	Diferència relativa en l'índex UV (superior) i en l'UVA (inferior) dels models respecte als valors experimentals pel primer dia de mesures de la campanya a l'Arenosillo (Huelva, 246 de 1999).	56
4.4	Evolució de l'UVA a partir dels valors experimentals, dels models i de la seva mitjana pels dos dies de mesures de la campanya a l'Arenosillo (Huelva, 246 i 247 de 1999).	57
4.5	Evolució de l'UVB a partir dels valors experimentals, dels models i de la seva mitjana pels dos dies de mesures de la campanya a l'Arenosillo (Huelva, 246 i 247 de 1999).	57
4.6	Diferència relativa en l'índex UV entre els models pels dos dies de mesures de la campanya a l'Arenosillo (Huelva, 246 i 247 de 1999).	58
5.1	Exemples de mapes de la columna total d'ozó a l'hemisferi Sud a la primavera (esquerra) i a la tardor (dreta) antàrtiques a partir de les mesures de l'instrument TOMS (15 d'octubre de 2001 i 30 d'abril de 2002). <i>Copyright</i> © 1996 - 2005 National Aeronautics and Space Administration - Goddard Space Flight Center (NASA/GSFC).	62

5.2	Columna total d'ozó mesurada pel fotòmetre Microtops des del juliol de 2000 fins a finals de 2003, des del terrat de la Facultat de Física.	65
5.3	Columna total d'ozó a Barcelona calculada a partir de les mesures de l'espectroradiòmetre Bentham des de l'any 2000 fins al 2004. . .	67
5.4	Geometries d'observació de les quatre tècniques de teledetecció passiva, dispersió en l'ultraviolat (imatge superior esquerra), ocultació (inferior esquerra), emissió del limbe (superior dreta) i dispersió del limbe (inferior dreta). (Hilsenrath, 2000).	68
5.5	Mapa global de la columna total d'ozó a partir de les mesures del sensor TOMS pel dia 23 de juny de 2002. <i>Copyright</i> © 1996 - 2005 National Aeronautics and Space Administration - Goddard Space Flight Center (NASA/GSFC).	72
5.6	Columna total d'ozó a Barcelona determinada a partir de mesures del sensor TOMS.	72
5.7	Mapa global de la columna total d'ozó a partir de les mesures del sensor GOME pel dia 23 de juny de 2002. <i>Copyright</i> © 1997- 2003 German Aerospace Center (DLR).	73
5.8	Columna total d'ozó a Barcelona determinada a partir de les mesures del sensor GOME	74
5.9	Comparació entre la columna total d'ozó a Barcelona a partir de mesures del fotòmetre Microtops, l'espectroradiòmetre Bentham i els sensors dels satèl·lits TOMS i GOME.	75
5.10	Correlacions entre les columnes totals d'ozó a Barcelona calculades a partir dels diferents instruments.	76
5.11	Diferències absolutes i relatives entre les diferents mesures de la columna total d'ozó a Barcelona.	77
5.12	Espessor òptic d'aerosols (AOT) a Barcelona (terrat de la Facultat de Física) a partir de les mesures del fotòmetre CIMEL pels canals de 340, 380, 440, 675, 870 i 1020 nm, per a l'any 2003.	81
5.13	Espessor òptic a 1020nm a Barcelona (terrat de la Facultat de Física) mesurat pel fotòmetre Microtops des de l'any 2000 fins a finals de 2003.	82

5.14	Massa d'aigua precipitable a Barcelona calculada a partir de les mesures del fotòmetre CIMEL per a l'any 2003.	84
5.15	Mesures de la massa d'aigua precipitable a Barcelona amb el fotòmetre Microtops des de l'any 2000 fins al 2003.	86
5.16	Columna d'aigua precipitable calculada amb les dades del radiosondatge del migdia de Barcelona (Facultat de Física).	88
5.17	Comparació entre la columna d'aigua precipitable a Barcelona a partir de mesures del Microtops, CIMEL i radiosondatge.	89
5.18	Regressions entre la massa d'aigua precipitable a partir de mesures del Microtops, CIMEL i radiosondatge.	90
5.19	Diferències absolutes entre càlculs de la massa d'aigua precipitable a Barcelona durant el període 2001 - 2003.	91
6.1	Exemple de la predicció de l'índex UV publicada al web del Servei Meteorològic de Catalunya i informació relativa als temps d'exposició i factors de protecció. <i>Copyright</i> © UB i SMC.	95
6.2	Exemples de la predicció de l'índex UV a la Península Ibèrica de l'Institut Nacional de Meteorologia (superior) i de la previsió de l'índex UV a escala global del Deutscher Wetterdienst (inferior). <i>Copyright</i> © INM i DWD.	96
6.3	Simbologia emprada en la predicció de l'índex UV publicada al web del Servei Meteorològic de Catalunya.	98
6.4	Variació de la columna total d'ozó a Barcelona a la primavera i a l'estiu a partir de les dades del TOMS de l'any 2001.	98
6.5	Comparació entre la irradiància mesurada i la modelitzada a Barcelona durant la primavera i l'estiu de 2001.	99
6.6	Error relatiu entre les tres previsions i les mesures de la irradiància eritemàtica a Barcelona durant la primavera i l'estiu de 2001.	100
6.7	Mitjana dels errors relatius (esquerra) i error quadràtic mitjà (dreta) en les tres previsions de la irradiància eritemàtica a Barcelona durant la primavera i l'estiu de 2001.	100

6.8	Previsió de la columna total d'ozó a 36 hores (migdia de l'endemà) realitzada pel DWD (Majewski et al., 2002). <i>Copyright</i> © 1996-2005 Deutscher Wetterdienst (DWD).	102
6.9	Diferència absoluta (UD) i relativa (%) de la previsió d'ozó del DWD i de la hipòtesi de persistència respecte de la mesura del TOMS.	103
6.10	Mesures dels tres piranòmetres del SMC: Roses , Perelló , Molló i del piranòmetre de l'INM a Barcelona.	105
6.11	Comparació entre la predicció de l'índex UV i els màxims diaris dels piranòmetres al 2003.	106
6.12	Comparació entre la previsió de l'índex UV i les mesures del piranòmetre YES a Barcelona durant el període 2000-2002 per a tots els dies (superior) i només per a dies sense núvols (inferior).	108
6.13	Comparació entre la previsió de l'índex UV i les mesures del piranòmetre YES a Barcelona, durant l'any 2003 per a tots els dies (inferior) i només per a dies sense núvols (superior).	109
6.14	Diferències absolutes i relatives en la previsió de l'índex UV a Barcelona a partir de l'ozó del TOMS i la predicció d'ozó del DWD.	110

Índex de taules

2.1	Intervals espectrals de la radiació solar	9
2.2	Definició dels fototipus bàsics de la població europea (Vanicek et al., 2000).	11
2.3	Bandes d'absorció dels principals absorbents de l'atmosfera.	19
2.4	Exponents de la fórmula de transmissivitat per a la mescla de gasos segons Gueymard (1995).	20
3.1	Localització dels piranòmetres del Servei de Meteorologia de Catalunya (Solar Light) i de l'Instituto Nacional de Meteorologia (YES).	34
3.2	Pendent, ordenada a l'origen, correlació (r^2) i constants de calibratge per als diferents canals del fotòmetre CIMEL utilitzat en el present treball.	39
3.3	Coeficients k i b per a filtres de banda estreta i una atmosfera de latituds mitjanes, proposats per Halthore et al. (1997).	42
4.1	Característiques bàsiques dels 4 models utilitzats en aquest treball.	52
4.2	Mitjana de les diferències relatives entre models de dispersió múltiple, entre models de dispersió simple i entre els dos tipus de models per a angles zenitals menors de 60%.	59
5.1	Pendent (a), ordenada a l'origen (b) i correlació (r^2) de les gràfiques representades a la figura 5.10.	78
5.2	Biaix (MBE) i error quadràtic mitjà (RMSE) de les diferències relatives i absolutes entre les diferents determinacions de la columna total d'ozó.	78

5.3	Coeficients d'absorció de l'ozó, el diòxid de nitrogen i el vapor d'aigua pels diferents canals del fotòmetre CIMEL segons (Gueymard, 1995). S'ha considerat que la contribució de la mescla de gasos era menyspreable vers les altres.	80
5.4	Pendent (a), ordenada a l'origen (b) i correlació (r) entre les diferents masses d'aigua precipitable calculades a partir de mesures del Microtops, CIMEL i radiosondatge.	91
5.5	Biaix (MBE) i error quadràtic mitjà (RMSE) de les diferències relatives i absolutes entre les diferents determinacions de la massa d'aigua precipitable a Barcelona.	92
6.1	Factor de modificació per núvols (CMF) per a diferents tipus i quantitats de cobertura de núvols, proposat per Vanicek et al. (2000).	97
6.2	Mitjana dels errors relatius i error quadràtic mitjà (RMSE) en la predicció de la irradiància eritemàtica a Barcelona durant la primavera i l'estiu de 2001.	101
6.3	Biaix (MBE) i error quadràtic mitjà (RMSE) de les diferències relatives i absolutes entre la mesura de la columna total d'ozó del TOMS i la previsió del DWD de 36 hores abans, i la previsió prenent la mesura del TOMS de 2 dies anteriors (hipòtesi de persistència) per a l'any 2003.	103
6.4	Biaix (MBE) i error quadràtic mitjà (RMSE) de les diferències absolutes i relatives entre la predicció i la mesura de l'índex UV segons l'ozó utilitzat.	111