

Capítol 7

Conclusions i futures línies de recerca

En aquest treball s'han extret diferents conclusions sobre els models de simulació de la irradiància UV, la determinació de les variables que hi intervenen i la seva aplicació en la predicció de l'índex UV.

7.1 Obtenció dels paràmetres usats en els models

En els treballs de modelització resulta molt important, en la línia senyalada per diversos autors (vegeu per exemple Schwander et al., 1997 i Weihs and Webb, 1997), acotar les incerteses en la modelització de la irradiància espectral UV associades a les variables d'entrada que utilitzen els models. D'aquí la importància de disposar de determinacions precises d'aquests paràmetres. En aquest sentit, la primera conclusió general d'aquest treball és la idoneïtat de la utilització de valors extrets de mesures instrumentals per a la columna total d'ozó, l'espessor òptic d'aerosols i la massa d'aigua precipitable.

Determinació de la columna total d'ozó

- La determinació acurada de la columna total d'ozó seria un dels principals objectius en la correcta aplicació dels models de transferència

radiativa. Tot i que no es disposa d'un espectrofotòmetre Brewer, el Departament d'Astronomia i Meteorologia de la Universitat de Barcelona utilitza diferents mètodes per determinar la columna total d'ozó: l'espectroradiòmetre Bentham, l'heliòfotòmetre Microtops i les mesures realitzades des de satèl·lit pel TOMS i el GOME. Kerr and McElroy (1995) varen determinar que la incertesa en la mesura de la columna total d'ozó d'un espectrofotòmetre Brewer és de mitjana $\pm 2.5\%$. Schwander et al. (1997) assenyalen que un error de $\pm 2.5\%$ en la determinació de la columna total d'ozó pot suposar unes diferències de $\pm 50\%$ en la irradiància UV en longituds d'ona properes a 290 nm (aquest valor ha estat determinat amb una diferència de la columna total d'ozó de 330 a 321.75 UD).

- En comparar totes aquestes determinacions de la columna total d'ozó a Barcelona, s'ha remarcat que s'obtenen els millors acords quan es comparen els resultats d'igual metodologia. Així, s'obté un error quadràtic mitjà de l'ordre del 3% en la comparació entre el TOMS i el GOME i de l'ordre del 9% en la comparació entre l'espectroradiòmetre Bentham i el fotòmetre Microtops. D'aquí es podria concloure que si s'utilitza la columna total d'ozó proporcionada pel TOMS en la predicció de l'índex UV, s'arriba a una incertesa propera a la de l'espectrofotòmetre Brewer. Això és parcialment cert, en tant que Bramstedt et al. (2002) assenyalen la necessitat de disposar de mesures realitzades des del terra per tal de comparar-les amb mesures de teledetecció a fi de validar les mesures remotes, detectar possibles derives dels instruments a llarg termini i comprovar-ne la qualitat. En aquest sentit, s'han confrontat diferents metodologies, comparant mesures de teledetecció amb terrestres.
- En el cas de la comparació entre les mesures del fotòmetre Microtops i les dades obtingudes des de satèl·lit (TOMS i GOME), els errors no sobrepassen el 5%, mentre que en el cas de l'espectroradiòmetre Bentham i les dades de teledetecció s'obtenen uns resultats amb un error quadràtic mitjà del 9%. Per tant, la columna total d'ozó obtinguda mitjançant les mesures del fotòmetre Microtops és la millor determinació des del terra

de què es disposa. Això és deu al fet que, tot i que l'espectroradiòmetre Bentham té una amplada de banda més petita (1.1 nm respecte als 2 nm del fotòmetre Microtops), l'heliotòmetre Microtops està dissenyat per a mesurar la columna total d'ozó, .

Determinació de l'espessor òptic d'aerosols

- Alguns autors com Koepke et al. (1998) qüestionen l'avantatge que els models de transferència radiativa incorporin paràmetres relacionats amb les propietats dels aerosols, pel fet que en pocs casos es disposi d'una predicció d'aquestes propietats. Altres, com Backer de et al. (2001) suggereixen l'ús de valors mitjans adaptats a les localitzacions on s'executi el model. Tot i així, Schwander et al. (1997) recomanen l'ús d'heliotòmetres per determinar l'espessor òptic d'aerosols a fi d'obtenir modelitzacions d'irradiància solar UV acurades. En aquest sentit, el model SBDART, utilitzat en la previsió de l'índex UV a Catalunya, té com a variables d'entrada: l'albedo de dispersió simple, el paràmetre d'asimetria, el paràmetre α d'Angström i l'espessor òptic d'aerosols a 550 nm i per tant, és de gran utilitat disposar dels espessors òptics d'aerosols proporcionats pel fotòmetre CIMEL (i de l' α obtinguda en aplicar la llei d'Angström).
- El fet de disposar únicament de les mesures de l'heliotòmetre CIMEL per a determinar l'espessor òptic d'aerosols (el fotòmetre Microtops proporciona l'espessor òptic a 1020 nm resultant de la suma de les dispersions d'aerosols i de Rayleigh i de les absorcions de l'ozó i el nitrogen) fa que no es pugui comparar aquesta determinació amb altres metodologies. Tot i així, els espessors òptics d'aerosols obtinguts per a Barcelona durant l'any 2003 amb l'heliotòmetre CIMEL mostren un bon acord entre els diversos canals centrats a diferents longituds d'ona i obtenen uns valors acotats dins dels rangs habituals.

Determinació de la massa d'aigua precipitable El vapor d'aigua, tot i que presenta fortes bandes d'absorció en l'infraroig proper, té un paper important en l'estudi de l'atenuació de la irradiància solar espectral UV en estar directament relacionat amb el creixement higroscòpic dels aerosols, i per tant, amb les propietats òptiques d'aquests. A més, proporciona informació sobre l'evolució de les masses d'aire. Una prova de la importància d'aquest paràmetre, és el fet que la majoria de models de transferència radiativa inclouen com a variable d'entrada la massa d'aigua precipitable. El Departament d'Astronomia i Meteorologia disposa de dos heliofotòmetres (Microtops i CIMEL) i de les dades del radiosondatge per determinar aquest paràmetre.

- Diversos autors com Richner and Phillips (1982) i Bruegge et al. (1992) han estudiat les incerteses associades a la determinació de la massa d'aigua precipitable a partir de dades de radiosondatge, per diferents causes: 8% de sobreestimació en la humitat relativa propiciat per l'alliberament de calor latent en congelar-se el sensor de la radiosonda a partir d'assolir una certa alçada, 6% d'incertesa en totes les mesures a causa d'un desfasament entre el termòmetre sec i humit i el sensor de pressió i un 8% de subestimació en el total pel fet que la sonda només arriba fins a una alçada límit i no computa una part de la columna total de vapor d'aigua. Aquestes incerteses condueixen a una sobreestimació del 13% en la integració de la massa d'aigua precipitable (Bruegge et al., 1992). Aquesta diferència s'ha confirmat en comparar la massa d'aigua precipitable entre el radiosondatge i el fotòmetre CIMEL mesurats des de Barcelona durant l'any 2003, obtenint un error quadràtic mitjà del 12.3%.
- En quant a la comparació entre els dos heliofotòmetres, s'ha constatat que el fotòmetre Microtops obté una massa d'aigua precipitable un 15% menor de mitjana que la de l'heliofotòmetre CIMEL. El fet que el fotòmetre CIMEL disposi d'un sistema d'enfocament al Sol més precís que el de l'heliofotòmetre Microtops i que les diferències entre el Microtops i les mesures del radiosondatge encara siguin més acusades que en el cas del CIMEL i el radiosondatge, condueix a la conclusió que la millor

determinació de la massa d'aigua precipitable de que es disposa és la de l'heliograf CIMEL.

7.2 Modelització de la radiació solar UV

La modelització de la radiació solar UV, com s'ha vist, és de gran importància a l'hora de proveir de dades representatives per a diferents llocs i condicions atmosfèriques en què no es disposa de l'instrumental adequat. També és útil per determinar les dosis eritemàtiques a les que s'exposa la població i realitzar-ne una predicció. En aquest sentit, un estudi comparatiu entre models de transferència radiativa és de gran utilitat a l'hora d'escollir el model més adequat per tal de realitzar la predicció de l'índex UV.

Dins del marc de l'acció COST 713, diversos grups, entre els quals hi havia el Departament d'Astronomia i Meteorologia (Koepke et al., 1998), varen realitzar un estudi comparatiu entre 18 models de transferència radiativa diferents (models de dispersió múltiple, models espectral ràpids i models empírics) sense confrontar-los amb mesures instrumentals. Posteriorment, Backer et al. (2001), també juntament amb el Departament d'Astronomia i Meteorologia, varen comparar 13 models de simulació d'irradiància solar amb mesures d'espectrofotòmetres Brewer a diferents localitzacions. Per últim, en aquest treball, s'han comparat dos models de dispersió simple (SMARTS2 i UVAGO) amb dos models de dispersió múltiple (SBDART i STAR) i amb mesures instrumentals de dos espectralradiòmetres Bentham 150. Les conclusions a les quals s'ha arribat són les següents:

Comparacions entre models en l'índex UV

- En la comparació entre models, s'ha constatat que els models de dispersió simple obtenen un bon acord en l'índex UV, amb unes diferències relatives d'un 2-4% per a angles zenitals menors de 60° i del 20% per a angles majors de 60°. Aquests valors són notòriament millors que els obtinguts per Koepke et al. (1998) que parlaven de diferències d'un mínim de ± 1 unitats d'índex UV, arribant a ser de 10 unitats en alguns

casos, entre models de dispersió simple. El fet que s'hagin obtingut uns resultats més ajustats és deu al fet que en el citat treball es comparaven fins a 8 models molt diferents entre ells, mentre que en el present estudi només s'han comparat 2 models de dispersió simple.

- Els models de dispersió múltiple obtenen un millor ajust encara, ja que mostren una diferència relativa del 2-3% en l'índex UV per angles zenitals menors de 60° i una diferència de només un 12% pel cas d'angles majors de 60°. Aquests resultats coincideixen amb els presentats per Koepke et al. (1998) que obtenien acords de ± 0.5 unitats d'índex UV en el 80% de les comparacions entre models de dispersió múltiple. És per aquest motiu que es va decidir utilitzar per a la predicció de l'índex UV models de dispersió múltiple en lloc de dispersió simple.
- En quant a la comparació entre models de dispersió simple i dispersió múltiple els resultats no són tan satisfactoris i s'arriba a diferències d'entre el 14 i 20% en la determinació de l'índex UV per a angles zenitals petits ($<60^\circ$) i majors del 20% pel cas d'angles majors de 60°.

Comparacions entre models i mesures en l'índex UV

- Pel que fa a la comparació entre l'índex UV modelitzat i el calculat a partir de la integració dels espectres dels instruments Bentham 150, s'ha establert que els models de dispersió múltiple tendeixen a sobreestimar l'índex UV, com ja apuntaven Backer de et al. (2001). A més a més, ara s'ha constatat que els models de dispersió simple mostren l'efecte contrari i proporcionen valors de l'índex UV menors que les mesures. Més concretament, prop del migdia, els models de dispersió múltiple obtenen unes diferències respecte les mesures d'entre un +5% i +15%, mentre que els models de dispersió simple obtenen entre un -2% i un -12% de diferència respecte de les mesures.
- La sobreestimació dels models de dispersió múltiple respecte de les mesures instrumentals pot ser explicada pel fet que les condicions ideals per a les quals està dissenyat un model no es donen mai a la realitat

(horitzó lliure d'obstacles, error de cosinus nul, inexistència de superfícies properes reflectants diferents del terra, etc.), i per tant, un model sempre proporcionarà un valor major que la mesura que s'obtindrà amb un instrument. Això no passa, però, en els models de dispersió simple que presenten una subestimació respecte de les mesures. Una possible explicació és que tot i que en aquests models també és produeix una sobreestimació degut a que en la realitat no es donen mai les condicions ideals esmentades, és major encara la subestimació deguda al fet que aquests models no consideren les múltiples dispersions presents a l'atmosfera.

- Pel que fa a angles zenitals majors de 60° , les diferències entre l'índex UV modelitzat i el mesurat són considerables, sobretot en els models de dispersió simple, però corresponen a valors petits de l'índex UV i per tant no es tradueixen en efectes biològics importants. Aquest resultat es deu a que per a angles zenitals grans, la llum travessa una espessor major d'atmosfera i per tant la contribució de la dispersió atmosfèrica és més important i s'ha de tenir en compte d'una manera acurada (com fan els models de dispersió múltiple).

Comparacions entre models i mesures en l'UVA i l'UVB

- Les diferències entre els valors de l'UVA integrat a partir dels espectres obtinguts pels models, tant de dispersió simple com de múltiple, i les mesures dels espectralradiòmetres Bentham 150 són semblants a les de l'índex UV, amb uns valors d'un $\pm 10\%$ per a angles zenitals menors de 60° . Aquestes diferències, tenint en compte que les mesures tenen un error associat al voltant d'un 5 o un 10% en el cas d'espectralradiòmetres ben calibrats (Backer de et al., 2001), es poden considerar acceptables.
- Pel que fa als valors integrats de l'UVB, les diferències entre models i mesures són lleugerament més altes però sempre per sota del 16% per angles zenitals menors de 60° i tant pels models de dispersió múltiple com pels de simple.

7.3 Predicció de l'índex UV

Durant el període comprès entre els anys 2000 i 2003 es va dur a terme la predicció de l'índex UV a Catalunya. A partir de l'anàlisi de les diferents modelitzacions realitzades i de la comparació amb mesures instrumentals de banda ampla, s'arriba a les següents conclusions:

- L'aplicació de la hipòtesi de persistència de la columna total d'ozó en la modelització de la radiació solar UV és una bona aproximació a l'estiu, ja que s'obté una mitjana de diferències relatives d'un 6% respecte de la irradiància eritemàtica calculada a partir de l'ozó corresponent d'aquell dia. Aquestes diferències suposen un error menor d'una unitat (de mitjana) en l'índex UV a l'estiu. A la primavera, a causa del fet que el valor de la columna total d'ozó varia més d'un dia a l'altre, aquesta hipòtesi suposa un error relatiu d'un 11% de mitjana.
- La previsió de la columna total d'ozó realitzada pel Deutscher Wetterdienst (DWD) a 36 hores millora lleugerament el valor obtingut de la columna total d'ozó en aplicar la hipòtesi de persistència en les mesures del sensor TOMS a 2 dies durant l'any 2003 a Barcelona. Per arribar a aquesta conclusió s'han comparat a posteriori les dues previsions amb la mesura del dia corresponent realitzada per l'instrument TOMS.
- La incorporació de la previsió d'ozó del DWD en la previsió de l'índex UV a l'any 2003 millora l'acord entre les previsions i les mesures, passant d'un error quadràtic mitjà del 20%, obtingut a partir de l'aplicació de la hipòtesi de persistència, a un error del 16%. Tot i així, durant els anys 2000-2002, quan no es disposava d'aquesta previsió d'ozó, s'obtenen uns bons resultats. En valors absoluts, les mitjanes dels errors entre les previsions i les mesures, no superen mai la unitat d'índex UV arribant a un mínim de 0.52 pel cas de la previsió de l'índex UV al 2003. A causa del fet que la difusió que es fa al públic d'aquesta previsió és un valor enter, es pot concloure que, en la majoria dels casos, la predicció és totalment encertada.

7.4 Futures línies de recerca

Pel que fa a les futures línies d'investigació en aquest camp, cal remarcar la conveniència de disposar d'un coneixement més acurat de les variables d'entrada que intervenen en la modelització de la irradiància solar, especialment dels paràmetres relacionats amb les propietats dels aerosols, tals com l'albedo de dispersió simple, el paràmetre d'asimetria i els coeficients α i β d'Angström, obtinguts a partir de les mesures de l'heliotòmetre CIMEL.

Per altra banda, la incorporació de l'ús de models de mesoescala per a la predicció de la nuvolositat (quantitat i tipus) en la previsió de l'índex UV, permetria fer un estudi de la modelització de la irradiància UV més ampli, sense limitar-se, únicament, a dies en condicions de cel serè.

Un altre punt d'estudi interessant seria determinar la influència dels valors de la irradiància solar extraterrestre que incorporen els models de transferència radiativa, a partir de les diferents simulacions corresponents als diversos espectres d'irradiància solar extraterrestre existents.

Per últim, la determinació de l'efecte d'altitud en l'índex UV seria de gran utilitat a l'hora d'aplicar correctament els models per a previsions d'irradiància UV en alçada. En aquest sentit, la campanya de mesures realitzada a Sierra Nevada durant el juliol de 2002, serà una font d'informació importantíssima.

