



Efectes de l'altura solar, la nuvolositat i la temperatura en les mesures dels piranòmetres de silici

A. Raïch, J. A. González i J. Calbó

Grup de Física Ambiental, Departament de Física i Institut de Medi Ambient, Universitat de Girona, Campus Montilivi, EPS-II, 17071 Girona

Rebut: 24-I-2007 – Acceptat: 20-VII-2007 – **Versió Original**

Correspondència a: jose.gonzalez@udg.es

Resum

La mesura de la irradiància solar en superfície es fa mitjançant piranòmetres amb sensor termoelèctric o amb sensor de silici. Aquests darrers presenten una resposta espectral no uniforme i limitada a la banda de 400 a 1100 nm, i, a més, la seva sensibilitat depèn fortament de la temperatura. Els piranòmetres termoelèctrics, en canvi, presenten una resposta espectral uniforme en la banda solar, i un coeficient de temperatura reduït. L'objectiu de l'estudi que es presenta ha estat millorar l'acord entre les mesures d'irradiància global preses amb un piranòmetre termoelèctric CM11 de Kipp & Zonen, i diversos piranòmetres fotovoltaics o de silici Li200SA de Li-Cor. Com que la resposta angular dels sensors s'aparta en general de la resposta cosinus ideal, es proposen unes correccions a tal efecte. S'han analitzat les dades minutals corresponents a un cicle anual de mesures d'irradiància preses pels dos tipus de piranòmetres a l'estació radiomètrica de la Universitat de Girona. Les correccions proposades per la resposta angular dels instruments es basen en bibliografia prèvia, i també en simulacions realitzades amb un model espectral de transferència radiativa multicapa. La simulació ha permès obtenir correccions per compensar les diferents respostes angulars i espectrals dels dos tipus d'instruments. Per a cels serens, les correccions angulars i espectrals milloren notablement l'acord entre les mesures dels dos tipus de piranòmetres. També es proposa una correcció de l'efecte de la temperatura sobre la mesura dels piranòmetres de silici, obtinguda empíricament. Malgrat que les correccions s'han obtingut per a cels serens, han estat també aplicades a condicions de cel ennuvolat, caracteritzades objectivament mitjançant un algorisme basat en mesures d'irradiància global i difusa. Finalment s'ha comprovat que les correccions també milloren l'acord entre les mesures dels dos tipus de sensors independentment de l'extensió de la coberta de núvols.

1 Introducció

La radiació solar d'ona curta (de 280 a 4000 nm) representa la font d'energia més important del nostre planeta. Aquesta energia arriba al conjunt format per l'atmosfera, la hidrosfera i la biosfera, produint una llarga sèrie de fenòmens que l'afecten. Els comportaments dels sistemes climàtic i ecològic es troben impulsats i modulats a totes les escales, des de la més local a la més global, per l'entrada d'energia lligada a la radiació.

En conseqüència, el coneixement precís dels nivells radiatius solars en ona curta, en qualsevol punt del sistema atmosfera-oceà-superfície, és vital. La validació dels models de transferència radiativa en l'atmosfera (tant dels més rigo-

rosos, com d'aquells parametritzats o els que s'incorporen als models climàtics) amb les mesures experimentals, requereix d'una informació extensa i acurada.

Per tant, s'ha anat estenent, de manera inicialment descoordinada entre els diferents països, una xarxa global de sensors de radiació solar destinats preferentment a la quantificació d'aquest recurs energètic. Com a exemple d'això, des dels anys 80 a Catalunya es disposa d'una xarxa radiomètrica pertanyent a l'Institut Català d'Energia, que actualitza periòdicament l'Atlas Solar de Catalunya (ICAEN, 2001). L'interès creixent per millorar el coneixement del paper de la radiació en el sistema natural també ha portat al desenvolupament de grans projectes per la seva mesura, sigui en estacions en superfície, o amb instruments en satèl·lits, o,



rarament, en avions, vaixells o per altres mitjans.

Com a exemples més divulgats d'aquests esforços hi ha el projecte ARM (Atmospheric Radiation Measurement; Ackerman i Stokes, 2003) dedicat a la mesura acurada dels nivells radiatius a la superfície terrestre, crucial per determinar la validesa i precisió dels models de transferència radiativa aplicats a les diferents situacions atmosfèriques reals: núvols, terbolesa, vapor d'aigua, etc. Un altre exemple el constitueix la xarxa BSRN (Baseline Surface Radiation Network, proposada pel World Climate Research Program; Ohmura et al., 1998) per la realització de mesures precises en superfície, per la validació de les mesures de satèl·lit, dels codis de radiació en els models climàtics, i per la monitorització dels possibles canvis a llarg termini en la irradiància (Perez et al., 2001).

En els darrers anys, la confecció de bases de dades radiatives de qualitat ha estat un objectiu global i prioritari, al mateix temps que s'ha intentat anar coordinant les diverses xarxes de mesura. Per altra banda, essent la radiació solar un fenomen deslocalitzat i d'una alta variabilitat espacial i temporal, cal que la xarxa de sensors sigui el més extensa possible, sobretot per cobrir aquelles regions que presenten una més alta diversitat geogràfica i climàtica. El cost dels sensors de qualitat i del manteniment de les estacions ha estat històricament una limitació per a la consecució d'una major extensió de la xarxa.

La magnitud radiomètrica més rellevant a la pràctica en la quantificació de la radiació solar és la irradiància global en superfície horitzontal (E_g). Aquesta es considera, en la superfície terrestre, com la composició de dues irradiàncies: la directa (E_b) que prové directament del disc solar, i la difusa (E_d), procedent de la resta de direccions de la volta celeste. Ambdues es relacionen segons l'expressió:

$$E_g = E_b \cos(SZA) + E_d \quad (1)$$

on SZA és l'angle zenital solar.

El BSRN estima que la millor mesura de la irradiància global horitzontal s'obté sumant la component directa mesurada amb un radiòmetre de cavitat i la component difusa mesurada amb un piranòmetre de primera classe amb un disc ombrejador. Amb aquest mètode, la repetibilitat de la mesura es troba al voltant dels 10 W m^{-2} , millor que la que es pot obtenir mesurant la irradiància global amb un sol piranòmetre (Perez et al., 2001). No obstant, a les estacions radiomètriques és més habitual la utilització de piranòmetres per a la mesura de la irradiància global, donades les dificultats inherents del primer mètode, com ara el cost dels instruments, els calibratges, i la necessitat d'un sistema de seguiment solar. Entre altres característiques, el piranòmetre ideal hauria de presentar una resposta angular que reproduís correctament l'efecte de la projecció del feix en la superfície horitzontal (resposta cosinus). Com que els instruments reals només aproximen aquesta resposta, cal caracteritzar-los acuradament per tal d'obtenir mesures de qualitat.

Els piranòmetres poden ser classificats en termopiles i

cel·les solars. Els primers aprofiten l'efecte termoelèctric per a generar tensions d'acord amb la diferència de temperatures entre dues superfícies amb diferent capacitat d'absorció de la radiació. Com a exemples de piranòmetres termoelèctrics trobem l'Eppley PSP i el CM11 de Kipp & Zonen, que estan classificats com de primera classe segons els criteris de l'Organització Meteorològica Mundial. En el segon cas s'utilitza l'efecte fotovoltaic en els semiconductors (normalment, silici) per obtenir un corrent tant més fort com més intensa sigui la radiació. Aquests piranòmetres de sensor de silici són utilitzats àmpliament en estacions meteorològiques, donat el seu preu més econòmic, fins al punt que un dels seus fabricants, Li-Cor, va produir més de 31000 unitats el 1997 (King et al., 1998). La utilització de les cel·les solars com a piranòmetres va ser proposada per Kerr et al. (1967), que també proposava la incorporació d'un difusor acrílic amb un perfil convenient per millorar la seva resposta angular. Els inconvenients principals d'aquests instruments són la resposta espectral (molt menys uniforme i més limitada que la dels termoelèctrics) i la dependència de la seva resposta amb la temperatura.

Respecte el primer inconvenient, cal dir que l'espectre de la radiació depèn bàsicament de les condicions atmosfèriques, de l'altura solar i de les propietats òptiques de les superfícies que envolten el lloc de mesura (l'albedo, en particular). L'estructura espectral de la irradiància global no pateix canvis tan importants (per exemple entre condicions de cels serens i de cels ennuvolats) en la banda visible com els que es donen en la banda infraroja. No obstant, el mateix fabricant de piranòmetres de silici Li-Cor, fonamentant-se en els estudis de Federer i Tanner (1965) i Kerr et al. (1967), reconeix que la resposta en condicions ennuvolades pot ser un 10% superior a la resposta per cels serens, degut a les diferències entre els espectres de la radiació dels dos casos.

Es presenten aquí els resultats principals d'un estudi (Raïch, 2006) que s'ha proposat comparar les mesures de la irradiància global solar preses amb sensors fotovoltaics o de silici amb les mesurades amb piranòmetres termoelèctrics, que s'han pres com a referència. S'han proposat i aplicat unes correccions que redueixen l'efecte de les diferències entre les respostes angulars i espectrals dels instruments. Finalment, s'han estudiat els efectes de la temperatura i de la nuvolositat sobre la raó entre ambdues mesures ja corregides:

$$r = \frac{E_g^{PV}}{E_g^{TP}} \quad (2)$$

on E_g^{PV} i E_g^{TP} representen les irradiàncies globals mesurades respectivament pel piranòmetre fotovoltaic i pel termoelèctric, i r el seu quocient o ratio.

2 Metodologia

2.1 Preparació de la base de dades

Per aquest estudi s'ha disposat de dos piranòmetres termoelèctrics del model CM11 de la casa Kipp & Zonen (un per la mesura de la irradiància global i un altre amb banda para-sol per la mesura de la irradiància difusa), i de tres piranòmetres fotovoltaics del model Li-200SA de la casa Li-Cor, dos dels quals duïen incorporat sengles termoparells per a la monitorització de la temperatura del sensor. Aquests instruments es troben al terrat de l'edifici PII de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona (41° 58' 18.19" N, 2° 49' 3.57" E, 100 m s.n.m). Les mesures es fan cada segon, de manera automatitzada, mitjançant la connexió dels sensors a uns dispositius d'adquisició de dades (*datalogger* Campbell CR10). A l'interior de la caixa dels dataloggers es troba la resistència *shunt* (amb un coeficient de temperatura mesurat al laboratori inferior a $1.4 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ per sota dels 50°C) que transforma les intensitats proporcionades pels piranòmetres fotovoltaics en voltatges mesurables. Les mesures es promitgen o s'integren en diferents intervals (pel cas de les irradiàncies i temperatures cada minut), i periòdicament es bolquen a un sistema informàtic, en el qual es va construint una base de dades. Algunes dades es presenten en temps real a la Web (<http://copernic.udg.es/cat/meteorologica.php>).

La base de dades estudiada s'inicia a l'agost de l'any 2000 (data en què començà l'enregistrament cada minut) i es clou el juliol del 2001 (data en què es retiraren de l'estació els dos piranòmetres fotovoltaics que incorporaven els sensors de temperatura). Les mesures incloses en la base de dades corresponen a registres d'irradiàncies globals (com s'ha dit, una obtinguda d'un CM11 i tres, de sengles Li200SA), difusa, i les seves respectives desviacions estàndard dins l'interval d'enregistrament. La irradiància difusa es mesurava amb un CM11 amb banda parasol tipus Eppley que s'ajustava entre 1 i 3 cops per setmana. La incertesa associada a la irradiància difusa mesurada d'aquesta manera és de l'ordre del 5% (Drummond, 1964). Altres variables incloses en la base de dades són les temperatures dels dos sensors fotovoltaics i la temperatura interior de la caixa on es troben els dataloggers (totes aquestes temperatures es mesuraven amb una precisió de $\pm 0.1^\circ\text{C}$), així com la temperatura i humitat relativa ambiental entre altres dades meteorològiques.

Pel que fa al processament de les dades, primer de tot es va procedir a corregir les mesures d'irradiància difusa mitjançant un mètode de correcció per la part del cel apanallada per la banda para-sol. El mètode escollit va ser el de LeBaron et al. (1990), que proposa una correcció que a més de la geometria de la banda para-sol, té en compte l'altura solar i les condicions del cel.

La dificultat d'establir un criteri objectiu per triar els períodes de cel serè a partir de la inspecció visual de les gràfiques de la irradiància en funció del temps és ben

coneguda. Per altra banda, el fet de no disposar d'un registre complet de la coberta de núvols (*cloud fraction*, *cf*), ja sigui a partir d'observacions visuals o mitjançant la càmera fotogràfica hemisfèrica que posteriorment es va instal·lar a l'estació (Long et al., 2006), limitava seriosament la projecció de l'estudi per a cels ennuvolats. Per resoldre aquesta limitació, es va aplicar a la base de dades el mètode proposat per Long i Ackerman (2000) (abreujadament LA d'ara en endavant). Amb aquest mètode, a partir de les mesures d'irradiància global i difusa minutals i aplicant una sèrie de 4 tests s'obtenen registres de 15 minuts amb valors mitjans d'irradiància global i difusa i de la resta de variables incloses en els arxius, i el que és més important, una estimació de la coberta de núvols. Això sí, el mètode està limitat als períodes amb $SZA \leq 80^\circ$.

El valor de l'angle zenital utilitzat en cada registre de 15 min és el central del període, calculat a partir de les fórmules descrites en Iqbal (1983), i és aquest el que s'ha utilitzat en totes les correccions posteriors. El valor de *SZA* obtingut en aplicar LA (mitjana dels cosinus dels *SZA* de les dades minutals de l'interval) no és suficientment precís en determinats períodes del dia ni per determinades estacions de l'any en què el *SZA* canvia ràpidament.

Finalment es van compactar els arxius diaris en un d'anyal i es va aplicar un filtrat final per eliminar alguns valors de la ratio clarament anòmals. Aquests valors anòmals corresponien majoritàriament a mesures excepcionalment baixes d'algun dels piranòmetres (circumstàncies produïdes per ombres ocasionals provocades pel manteniment de l'estació o per la presència d'algun ocell). Aquest filtrat va afectar només un 0.4% del total de valors analitzats.

2.2 Obtenció de les correccions angulars i espectral

Les diferències entre els instruments, que es volen corregir, provenen de la seva resposta angular (resposta cosinus) i de la seva resposta espectral (diferent sensibilitat a cadascuna de les longituds d'ona de la radiació rebuda). En primer lloc s'aborden les correccions angulars per cadascun dels piranòmetres.

Per això, primer de tot es va considerar la resposta dels instruments en dues condicions ideals: suposant que només rebessin radiació directa o solament radiació difusa. Els factors de correcció a aplicar en cada cas es van poder determinar a partir de la informació publicada per Michalsky et al. (1995). Concretament, pel cas de l'instrument termoelèctric CM11 i el fotovoltaic Li200SA sotmesos a radiació directa pura, les expressions analítiques que descriuen respectivament la seva resposta en funció de l'angle zenital (*CbTP* i *CbPV*) es van extreure dels gràfics de la Figura 1. Pels mateixos instruments, però sotmesos a irradiància difusa isòtropa pura, el factor de correcció que cal aplicar és constant (respectivament $CdTP = 0.9789$ i $CdPV = 0.9900$).

Paral·lelament, es van simular numèricament les

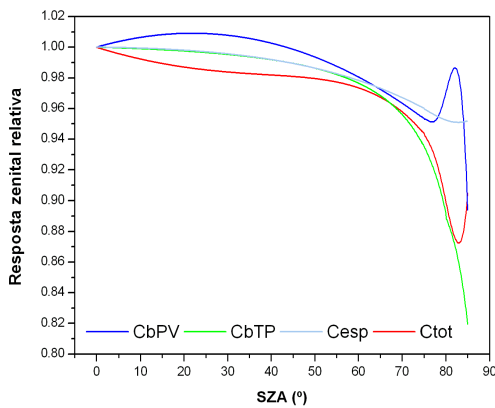


Figura 1. Respostes angulars, relatives a la incidència normal, de la component directa dels piranòmetres CM11 i Li200SA (*CbTP*, en verd i *CbPV*, en blau marí), a partir de les dades de Michalsky et al. (1995). En blau cel, la correcció espectral pel Li200SA, relativa a la del CM11, obtinguda a partir de les simulacions amb un model de transferència radiativa. En vermell la correcció total (*Ctot*) que s'aplica a la ratio entre les mesures del Li200SA i del CM11. *SZA* és l'angle zenital solar.

mesures efectuades pels piranòmetres de manera que fossin comparables entre elles, utilitzant un model de transferència radiativa espectral i multicapa, concretament el SBDART versió 1.5 (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer) desenvolupat per Ricchiazzi et al. (1998), que resol l'equació de transferència radiativa integrant-la numèricament amb l'algorisme DISORT, i considerant cada capa atmosfèrica horitzontalment homogènia. Algunes de les variables d'entrada d'aquest model es van mantenir constants en totes les simulacions: model d'atmosfera (s'ha emprat l'atmosfera US62), altitud (0 m), humitat relativa (50%), aerosol (rural), perfil de núvols (cel serè), funcions de filtre per simular respostes espectrals dels instruments (n'hem introduït un que correspon a la resposta del Li200SA, mentre que no s'aplica cap filtre pel CM11), longituds d'ona (pel CM11 des de 300 nm fins a 2800 nm i pel Li200SA des de 400 nm fins a 1100 nm, ambdós amb increments de 4 nm). Altres condicions s'han anat variant: albedo (des de 0 fins a 0.30, en increments de 0.05), columna d'ozó (des de 0.25 fins a 0.45 atm-cm, en increments de 0.05 atm-cm), columna d'aigua precipitable (des de 0.5 fins a 4 cm, en increments de 0.5 cm), opacitat dels aerosols a 550 nm (des de 0 fins a 0.6, en increments de 0.1) i angle zenital (des de 0 fins a 85°, en increments de 5°).

Per obtenir les correccions globals dels dos piranòmetres s'han de combinar els dos factors anteriors. Per això es va considerar la redistribució de Hay-Davies, veure Duffie i Beckman (1991) de la radiació difusa, és a dir, que una part, la circumsolar, de la difusa rep la mateixa correcció angular que la directa, mentre que la resta es tracta com

isòtropa.

Aleshores, es calculen les irradiancies globals corregides, sempre en base a les simulacions, de la manera següent:

$$E_{global,corregida}^{PV} = (E_{directa}^{PV} + A_i \cdot E_{difusa}^{PV}) CbPV + (1 - A_i) E_{difusa}^{PV} \cdot CdPV$$

$$E_{global,corregida}^{TP} = (E_{directa}^{TP} + A_i \cdot E_{difusa}^{TP}) CbTP + (1 - A_i) E_{difusa}^{TP} \cdot CdTP \quad (3)$$

on A_i és l'índex d'anisotropia definit per Hay-Davies, $A_i = \frac{E_{directa}^{TP}}{E_{sc} \cos(SZA)}$ i $E_{dir,dif}^{PV,TP}$ són els valors simulats d'irradiancia directa i difusa. La constant solar, E_{sc} , agafa el valor 1367 W m^{-2} . Finalment els coeficients de correcció angular de les irradiancies globals dels dos instruments ($CgTP$ i $CgPV$ respectivament) s'obtenen dividint els valors simulats d'irradiancia global pels valors corregits obtinguts de l'expressió (3). Aquests són els coeficients que s'utilitzaren per corregir les mesures reals d'irradiancia global.

Corregides les respostes angulars dels instruments cal passar a considerar la seva diferent resposta espectral. Considerant el CM11 com a referència i utilitzant les simulacions anteriors amb SBDART, es determina el factor de correcció espectral (*Cesp*), que dependrà del *SZA*, que cal aplicar a les mesures del Li200SA perquè reproduïxin les del CM11 (veure Fig. 1). Combinant les correccions presentades es pot trobar la correcció total ($Ctot = \frac{CgTP \cdot Cesp}{CgPV}$), de manera que dividint la ratio r (veure Eq. 2) per $Ctot$, s'obté la ratio corregida per a les diferents respostes cosinus i espectrals. Aquesta correcció total es presenta també a la Figura 1, on es manifesta la dependència amb l'angle zenital. En aplicar-la, la ratio hauria de valer 1, per al cas de tenir tots els piranòmetres calibrats correctament, i suposant que no hi hagués variacions atribuïbles a d'altres factors que puguin afectar la ratio (com ara la temperatura dels sensors o la nuvolositat).

3 Resultats

Es presenten a continuació els resultats d'aplicar la correcció total de la ratio (*Ctot*) a la base de dades, per després esbrinar els efectes de la temperatura i de la nuvolositat en la ratio entre les mesures dels dos tipus de piranòmetres.

3.1 Anàlisi per a cels serens

Per tal d'obtenir els casos corresponents a cels serens a partir de la base de dades de registres del cicle anual 2000-2001 de Girona (formada per 13792 registres de 15 min que s'havia obtingut a l'aplicar a les dades minutals

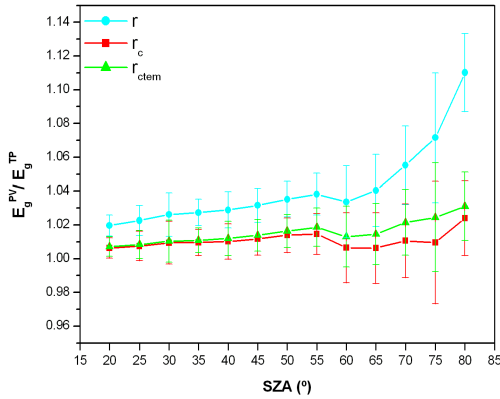


Figura 2. Efecte sobre les ratios originals en condicions de cel serè (blau cel) de les correccions angular i espectral (vermell) i de la correcció de la temperatura (verd). Les barres representen les desviacions estàndard dins de cada interval de SZA. Es presenten els efectes pel piranòmetre 3.

Taula 1. Desviació estàndard de les ratios dels registres de cels serens (r_c és la ratio corregida angularment i espectralment, r_{ctem} incorpora la correcció de temperatura).

Li200SA	r	r_c	r_{ctem}
1	0.034	0.029	0.028
2	0.023	0.020	0.019
3	0.022	0.018	0.016

l'algorisme LA) s'ha establert un llinar sobre la coberta de núvols de $cf \leq 0.02$. Així s'ha obtingut un subconjunt de 2659 registres, als quals s'ha aplicat la C_{tot} a la ratio de les irradiàncies globals dels dos instruments.

La repercussió d'aquesta correcció angular i espectral (C_{tot}) sobre les dades originals es pot observar en la Figura 2, on es manifesta que a partir de 60° la seva contribució és significativa. A la Fig. 2 es presenten els resultats per un sol piranòmetre fotovoltaic, però el resultat d'aplicar les correccions és similar en els altres dos casos. Quantitativament, per mitjà de la desviació estàndard (SD) de les ratios, en la Taula 1 es pot valorar la disminució en aquest índex, després d'aplicar la correcció, que resulta ser de l'ordre del 17% (en promig per als tres piranòmetres fotovoltaics), tot i que com s'observa a la Fig. 2, la millora relativa és més notable per angles zenitals grans.

En la Figura 3 s'observa la dependència de la ratio (després que s'ha aplicat la correcció angular i espectral C_{tot} a les dades de cels serens) respecte la temperatura mesurada en els propis Li200SA. Aquesta dependència és atribuïble als piranòmetres de silici, atès que s'ha considerat la mesura del CM11 com a referència ja que té un mecanisme compensatori de la temperatura molt eficaç, discrepàncies

<1% entre -10 i $+40^\circ\text{C}$, Manual CM11 Kipp i Zonen (2006). S'observa per als tres piranòmetres de silici una dependència amb la temperatura no lineal i que el coeficient de temperatura depèn fortament de l'interval de temperatura escollit. Així, per a temperatures menors a 20°C , la ratio presenta forts increments de fins a $3.0 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; de 20 a 30°C els increments són cada cop més moderats; i per a temperatures superiors a 35°C s'ateny una saturació. El Manual Li-Cor (2006) especifica un coeficient de temperatura màxim per al Li200SA de $1.5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, mentre que per a la nostra base de dades si es fa un promig dels coeficients entre 10°C i 45°C s'obté un coeficient de temperatura de $1.3 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, molt d'acord amb les especificacions si es pressuposa una dependència lineal. King et al. (1998) donen un valor de $0.82 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ pel coeficient del Li200SA i Michalsky et al. (1987) de $0.6 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, sempre a partir de mesures en laboratori. Aquestes discrepàncies no tenen res d'estrany tenint en compte el comportament del Li200SA amb la temperatura: creixement lineal per temperatures baixes i estabilització per sobre dels 30°C . Cal també apuntar que aquest comportament s'ha confirmat amb les evolucions diàries de les ratios i en d'altres cicles anuals.

Per tal d'obtenir una correcció empírica dels efectes de la temperatura del sensor Li200SA es normalitzen els valors de les ratios corregides angularment i espectralment presentats en la Figura 3, dividint-los pel valor corresponent a l'interval de 35°C (on la temperatura ja té un efecte negligible). Després, aquesta ratio normalitzada s'ajusta a una funció del tipus: $1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{t_1}}$, on t és la temperatura del sensor, i t_0 i t_1 dos paràmetres de la funció. Una funció d'aquest tipus descriu adequadament el comportament, ja comentat, de la ratio en funció de la temperatura. La funció ajustada es presenta també en la Figura 3, i l'efecte de l'aplicació d'aquesta correcció de temperatura, per un dels sensors, es presenta a la Figura 2. Després d'aplicar-la, la SD de les ratios prèviament corregides angularment i espectralment millora addicionalment un 7% de mitjana (veure Taula 1).

Pel cas més general que només es disposi de registres de temperatura ambiental, s'ha ajustat una expressió empírica que relaciona la temperatura del sensor (t) amb la temperatura del aire (t_{aire}) i la irradiància mesurada pel Li200SA (E_g^{PV}):

$$t = 0.99327 t_{aire} - 0.00001 (E_g^{PV})^2 + 0.02041 E_g^{PV} + 1.45113 \quad (4)$$

3.2 Anàlisi per a cels ennuvolats

La mateixa anàlisi explicada en l'apartat anterior s'ha repetit per totes les dades, independentment de l'estat del cel, és a dir, de la coberta de núvols. Els resultats, per a un dels piranòmetres, es presenten en la Figura 4. Com era

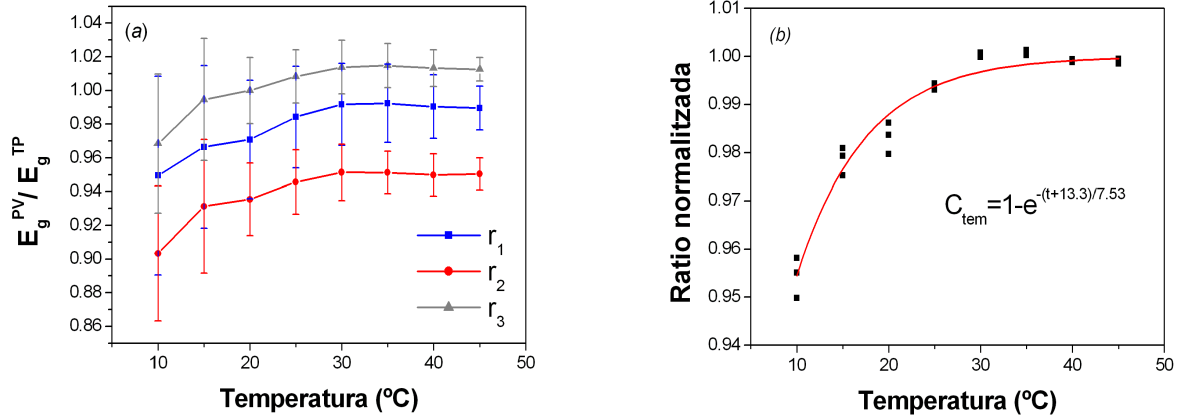


Figura 3. (a) Per a cels serens, dependència amb la temperatura de la resposta (havent aplicat la correcció angular i espectral) dels piranòmetres Li200SA i les respectives desviacions estàndard; (b) funció ajustada a partir de les ratios normalitzades, C_{tem} , on t és la temperatura mesurada en el mateix sensor.

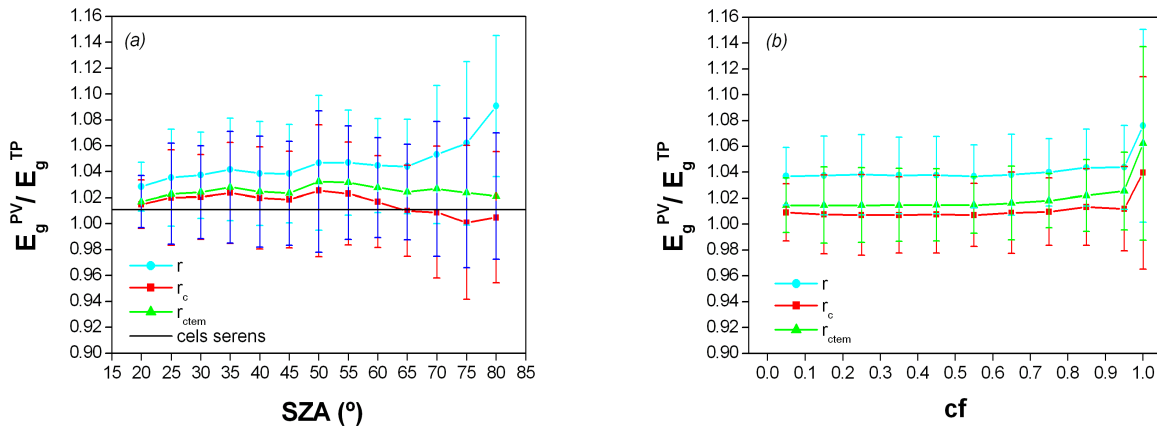


Figura 4. (a) Comportament de les correccions en funció de l'angle zenital per a cels amb tot tipus de nuvolositat. Es posa de manifest el paper més destacat de la correcció de la temperatura per a angles zenitals grans). La línia horitzontal representa la ratio mitjana per a cels serens; (b) Ídem però en funció de la coberta de núvols (cf). Destaca l'increment d'un 4% en la ratio i la duplicació de la desviació estàndard per al cas de cf estrictament igual a 1, és a dir, per cels totalment coberts. En ambdós casos es presenten els resultats pel piranòmetre 3.

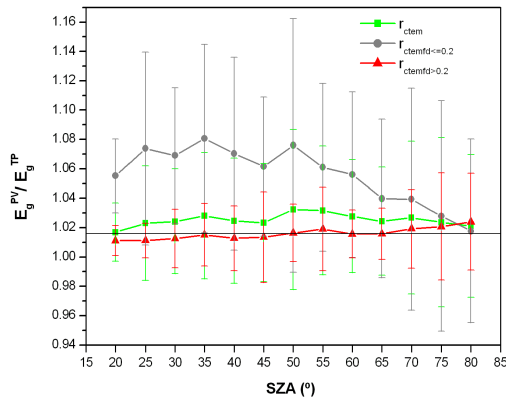


Figura 5. Ratio corregida en funció de *SZA*. En color gris fosc, els valors per a condicions de fracció directa $f_d \leq 0.2$ (sol tapat); en vermell, els valors per $f_d > 0.2$; en verd, els valors que inclouen totes les condicions. La línia horitzontal representa la ratio mitjana per a cels serens. Els resultats es presenten pel piranòmetre 3.

d'esperar donat el comportament del Li200SA (coeficients de temperatura més alts per a temperatures més baixes), l'efecte de la correcció de la temperatura és més manifest per angles zenitals grans (que correspon als moments de sol ixent i ponent, i a les situacions hivernals en general, que és quan la temperatura habitualment és menor). La SD no millora, donat que l'increment de dispersió que introdueixen els núvols supera en molt la millora global introduïda pel conjunt de correccions per a cels serens (que com hem dit més amunt, és d'un 24%).

Finalment, per veure com es comporten les correccions angular i espectral en funció de la coberta de núvols s'ha fet un estudi per intervals de *cf* (amb increments de 0.1 i separant els estrictament iguals a 1). Els resultats es presenten també en la Figura 4 i es pot constatar que la correcció total es manté inalterable en tot el rang de valors de *cf* excepte en els estrictament iguals a 1 (cels totalment coberts) on les ratios augmenten de l'ordre d'un 4% i la dispersió és duplica respecte els anteriors intervals (característiques que ja eren presents en les dades originals abans d'aplicar cap tipus de correcció). Aquesta discrepància s'atribueix a una contribució important de la irradiància difusa que no s'ha tingut en compte en la modelització (que era per cels serens) i que en aquestes circumstàncies, de cel totalment cobert, es manifesta molt més clarament que per cels parcialment ennuvolats.

Així, en la Figura 5, s'observa que per a registres amb una fracció directa menor o igual que 0.2 (situació en què la component difusa és gairebé l'única existent) la irradiància mesurada pel Li200SA s'incrementa en més d'un 4% respecte els valors mesurats per a la totalitat de les dades de cels variables, en angles zenitals menors a 60° , per anar disminuint per a angles zenitals superiors. Per a

reforçar aquesta afirmació s'ha representat també el conjunt complementari (dades amb la fracció directa superior a 0.2) que en conjunt es comporten com els registres de cels serens, malgrat que inclouen condicions del cel àmpliament heterogènies (però sempre amb el sol visible, és a dir, amb presència del feix directe).

4 Conclusions

S'han presentat unes expressions que corregeixen les respostes angular i espectral, així com l'efecte de la temperatura, del sensor fotovoltaic Li200SA respecte del sensor termoelectrònic CM11, per condicions de cel serè. Les correccions de les respostes angular i espectral dels dos instruments són funcions analítiques respecte l'angle zenital solar. L'aplicació d'aquestes ha permès posar al descobert la dependència amb la temperatura de la resposta del Li200SA: per sota de 20°C tendeix a un comportament asimptòtic lineal i per sobre dels 35°C s'estabilitza. Aquest comportament tan lligat a l'interval de temperatures estudiat explica la gran variabilitat dels coeficients de temperatura del Li200SA presents a la literatura científica. Una possible aplicació tecnològica per a contrarestar la característica irradiància globaltemperatura seria mantenir els sensors Li200SA i en general tots els sensors fotovoltaics a una temperatura constant de 35°C , sobretot en climes més freds que el mediterrani.

La repercussió de les dues correccions (angular i espectral) i la de la temperatura del Li200SA és una clara millora en les mesures, concretament, la SD de la ratio disminueix un 24% per a les situacions de cel serè. Per a cels ennuvolats la correcció angular i espectral es comporta molt bé per a totes les situacions de coberta de núvols, a excepció del cas de cel totalment cobert, en què, fins i tot després d'aplicar les correccions, la irradiància global mesurada pel Li200SA és un 4% més alta que la mesurada pel CM11. Aquest comportament particular pels cels totalment coberts va associat també una duplicació de la dispersió. La repercussió de la correcció de la temperatura sembla ser més gran en cels ennuvolats però aquest increment en la millora només es posa de manifest en mesures relatives i queda emmascarat per l'augment de dispersió introduït per la nuvolositat, sobretot per a situacions amb angles zenitals grans (per això no es reflecteix en la SD de les dades corresponents a tot tipus de cel).

Seria interessant per a treballs posteriors estudiar l'efecte de la integració temporal sobre els resultats, donat que les respostes temporals de les dues famílies d'instruments són ben diferents (20 s per al CM11 i 10 μs per al Li200SA). L'estudi present s'ha fonamentat en períodes de 15 min, en els quals es podria perdre algunes característiques de la radiació, especialment en condicions de cels parcialment ennuvolats. També quedaria pendent una justificació a partir de models físics de la característica irradiància-temperatura del Li200SA que permetria gene-

ralitzar els resultats a tots els piranòmetres fotovoltaics. Finalment, caldria establir com es tradueix la millora en l'acord entre valors quasiinstantanis, introduïda en aquest estudi, en la millora de l'acord entre irradiacions diàries (integracions temporals de la irradiància), que constitueixen una informació molt rellevant en aplicacions energètiques.

Agraïments. Aquest article és un resum del Treball de Recerca que el primer autor va defensar el Juliol del 2006 en el marc del Programa de Doctorat de Medi Ambient de la Universitat de Girona. Aquesta recerca ha estat possible gràcies a l'ajut i col·laboració dels dos directors d'aquest treball: Dr. Josep A. González i Dr. Josep Calbó, i s'ha desenvolupat a dins del Grup de Física Ambiental de la UdG en el marc del projecte NUCLIER, MEC CGL 2004-02325 (<http://copernic.udg.es/gfa/nuclier/nuclier.htm>).

Referències

- Ackerman, T. i Stokes, G. M., 2003: *The Atmospheric Radiation Measurement program*, Phys Today, **56**, 38–4.
- Drummond, A. J., 1964: *Comments on "Sky radiation measurement and corrections"*, J Appl Meteorol, **3**, 810–811.
- Duffie, J. A. i Beckman, W. A., 1991: *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Federer, C. A. i Tanner, C. B., 1965: *A simple integrating pyranometer for measuring daily solar radiation*, Journal of Geophysics, **70**, 2301–2306.
- ICAEN, 2001: *Atles de radiació solar de Catalunya.*, Edició 2000, Generalitat de Catalunya, Barcelona.
- Icqb, M., 1983: *An introduction to solar radiation*, Academic, New York.
- Kerr, J. P., Thurtell, C. B., i Tanner, C. B., 1967: *An integrating pyranometer for climatological observer stations and mesoscale networks*, J Appl Meteorol, **6**, 688–694.
- King, D. L., Boyson, W. E., i Hansen, B. R., 1998: *Improved accuracy for low-cost solar irradiance sensors.*, Sandia National Laboratories.
- Kipp i Zonen, 2006: *Manual CM 11*, www.kippzonen.com/pages.
- LeBaron, B. A., Michalsky, J. J., i Perez, R., 1990: *A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions.*, Sol Energy, **44**, 249–256.
- Li-Cor, 2006: *Manual Li-200SA*, www.licor.com/env/Products/Sensors/200/li200\description.jsp.
- Long, C. N. i Ackerman, T. P., 2000: *Identification of clear skies from broadband pyranometer measurements and calculation of downwelling shortwave cloud effects.*, Journal of Geophysics, **105**, 15 609–15 626.
- Long, C. N., Sabburg, J. M., Calbó, J., i Pagès, D., 2006: *Retrieving Cloud Characteristics from Ground-Based Daytime Color All-Sky Images*, J Atmos Ocean Tech, **23**, 633–652.
- Michalsky, J. J., Harrison, L., i LeBaron, B. A., 1987: *Empirical radiometric correction of a silicon photodiode rotating shadowband pyranometer.*, Sol Energy, **39**, 87–96.
- Michalsky, J. J., Harrison, L. C., i Berkheiser, W. E., 1995: *Cosine response characteristics of some radiometric and photometric sensors.*, Sol Energy, **54**, 397–402.
- Ohmura, A., Gilgen, H., Hegner, H., Müller, G., Wild, M., Dutton, E. G., Forgan, B., Fröhlich, C., Philipona, R., Heimo, A., König-Langlo, G., McArthur, B., Pinker, R., Whitlock, C. H., i Dehne, K., 1998: *Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WCRP): New Precision Radiometry for Climate Research*, B Am Meteorol Soc, **79**, 2115–2136.
- Perez, R., Aguiar, R., Collares-Pereira, M., Dumortier, D., Estrada-Cajigal, V., Gueymard, C., Ineichen, P., Littlefair, P., Lund, H., Michalsky, J., Olseth, J., Renne, D., Rymes, M., Skartveit, A., Vignola, F., i Zelenka, A., 2001: *Solar resource assessment: A review*. In: *Solar Energy - The state of the art*. (ISES Position Papers), James & James Science Publishers, London, pp. 497–562.
- Raïch, A., 2006: *Comparació de les mesures d'irradiància de piranòmetres termoelectrics i de silici. Efectes de l'altura solar, de la nuvolositat i de la temperatura.*, Treball de Recerca del Doctorat de Medi Ambient, Universitat de Girona.
- Ricchiazzi, P., Yang, S., Gautier, G., i Sowle, D., 1998: *SBDART: A Research and Teaching Software Tool for Plano-Parallel Radiative Transfer in the Earth's Atmosphere.*, B Am Meteorol Soc, **79**, 2101–2114.