

Capítol 3: Modelització de la radiació directa i difusa.

Resum

La majoria de models matemàtics que expliquen la radiació solar –en les seves components directa i difusa- calculen la mitjana diària d'aquesta radiació. La naturalesa del programa, constituïda per la totalitat dels mòduls requereix la necessitat d'establir quina és la distribució de la radiació solar en qualsevol moment del dia, no tan sols la mitjana diària.

A més, la majoria de models –per no dir tots- presenten d'una manera idèntica els mapes solars: la representació de les dues radiacions en base a l'hora solar. Aquesta representació pot semblar lògica i útil, malauradament, aquest tipus de representació només caracteritza el tipus de radiació que es dona en una latitud donada i en un mes determinat, ja que a una certa hora solar fixada, per a diferents latituds la posició del sol respecte l'horitzó serà diferent,. Per tant, sembla més lògic establir un model on la radiació prevista depengui directament de l'altura solar. La posició zenital del Sol a la vegada es trobarà a partir de les dades de latitud, dia de l'any i hora.

Per aquest motiu vaig implementar un model de radiació a partir de dades instantànies de radiació. Les dades les anava recopilant al llarg del dia gràcies a l'observatori de la Universitat de Barcelona que té a la Diagonal. Amb les dades recollides el model hauria de ser capaç de predir la distribució de la radiació en qualsevol punt del planeta, tant sols tenint el zènit solar i l'índex de nuvolositat.

Quin és el paràmetre a partir del qual s'hauria de poder determinar la radiació solar ? La intuïció diu la variable que té més a veure amb la intensitat amb que rebem el sol és precisament l'alçada a que es troba el Sol. Independentment de la orientació azimutal en què aquest es trobi. Sembla ser que l'altura solar és una bona candidata per tant per ser la variable principal per a modelitzar la radiació solar. A vegades l'altura solar s'anomena també zenit¹.

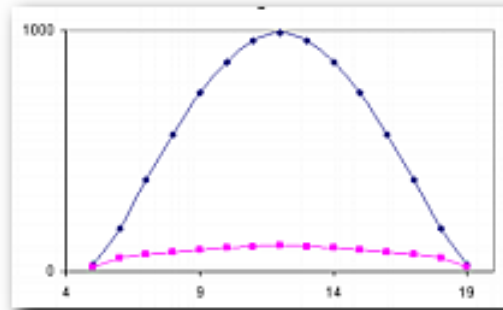
Les dades que es recullen a nivell solar normalment són la radiació directa i difusa² en el pla horitzontal.

Si no es tingués nuvolositat el càlcul de les radiacions solars directes i difuses serien quasi del tipus determinístic i serien funció quasi tan sols de l'altura solar i a més serien fàcilment calculables a partir d'una funció purament analítica. No obstant s'ha de tenir en compte que tant l'altura com la humitat també afecten sensiblement a la radiació.

¹ aquest terme s'utilitza per denominar l'altura màxima a que arriba el Sol en un dia determinat (a les 12 hores solars).

² Físicament es recullen la radiació directa i global. La difusa s'extreu a partir de la diferència.

El gràfic horari de les radiacions directa i difusa per a un dia determinat sense nuvolositat tindria un aspecte com ara el següent:



graf 1. Radiació global i difusa al llarg d'un dia clar. En aquest cas pel solstici d'estiu a 40 graus de latitud.

On la corba superior seria la radiació global i la corba inferior la difusa. Ambdues recollides en el pla horitzontal.

El fet més freqüent però, és que la distribució d'elements d'interferència a l'atmosfera (núvols, contaminació, etc) és de caràcter aleatori. Això implica que la gràfica anterior no es pugui determinar amb exactitud.

Una conseqüència, d'aquesta aleatorietat és que per a una posició fixada del sol (altura solar constant), es poden obtenir diferents distribucions de lluminositat en la volta celeste, i per tant diferents lectures de la radiació solar en el pla horitzontal. Per dies no clars, la distribució de lluminositat és no determinística. No obstant es pot modelitzar i treure'n models estadístics.

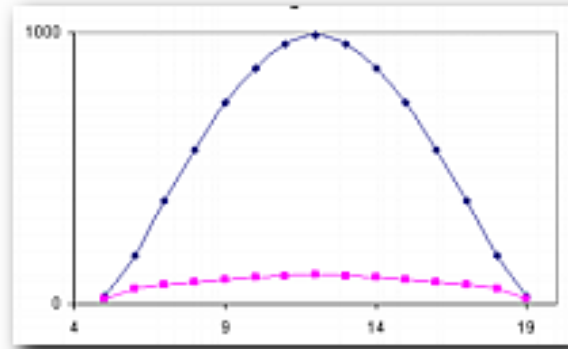
De manera evident la gràfica és simètrica per que a un determinat interval de temps, tant per davant com darrera de les 12 hores solars, l'altura solar és idèntica, i per tant la radiació directa i difusa recollides en el pla horitzontal (no pas en qualsevol orientació, compte).

Tot i deixant de banda l'efecte aleatori de la nuvolositat i pensant ara només en dies clars, la gràfica anterior és representativa de la radiació rebuda en un pla horitzontal per uns dies concrets. Aquest fet es deu a que l'altura solar varia amb el dia de l'any i per tant la intensitat de les dues radiacions a una hora determinada, tant la directa com la difusa.

A partir d'aquest moment s'estarà parlant únicament de dies clars, per tant, aquest model només és útil en aquestes condicions. Posteriorment es desenvoluparà per qualsevol tipus de dia, nuvolós o no.

Donat doncs que una gràfica com l'anterior només serveix per un interval més o menys reduït de dies, sembla lògic buscar una gràfica de caràcter universal (per a qualsevol dia de l'any i latitud). De moment per a dies clars, més endavant s'introduirà a una metodologia (físico-estadística) per trobar la radiació en dies amb núvols.

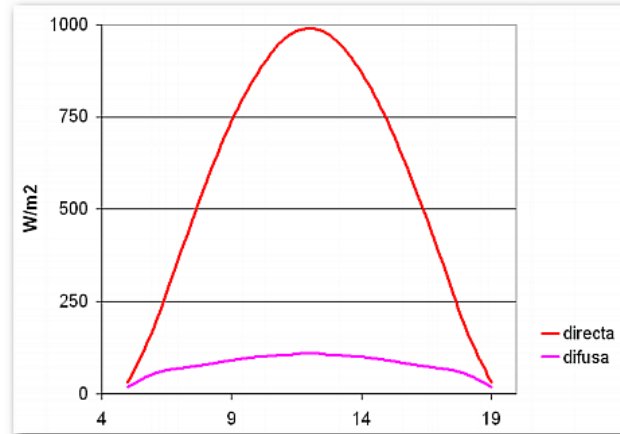
Per a dies clars el tipus de gràfic que s'obténdria per a la radiacions directes i difuses en el pla horitzontal serien com ara:



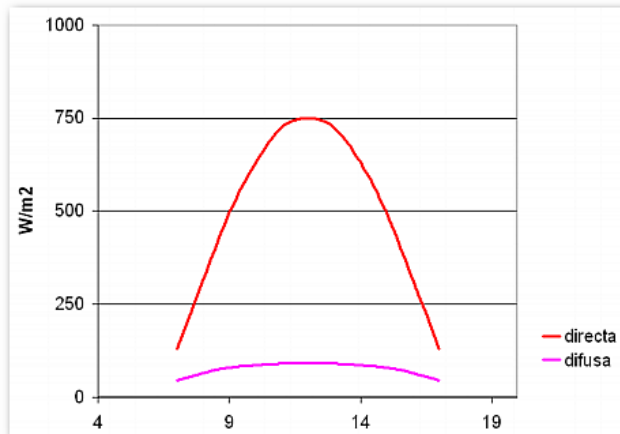
graf 1. Radiació global i difusa al llarg d'un dia clar. En aquest cas pel solstici d'estiu a 40 graus de latitud.

Ara bé, aquest gràfic, com s'ha dit anteriorment, només és útil per una franja de dies no massa extensa (unes setmanes). Aquest fet és així perquè a cada hora, el que determina la quantitat de radiació directa i difusa que es rep en el pla horitzontal depèn bàsicament de l'altura solar. Per a un cert període de temps relativament curt (unes setmanes) l'altura solar a la mateixa hora és similar i en conseqüència es té un gràfic de radiació horària semblant. Ara bé, entre un dia d'estiu i un dia d'hivern a la mateixa hora, les altures solars són molt diferents, i per tant, també ho són les radiacions solars captades en el pla horitzontal.

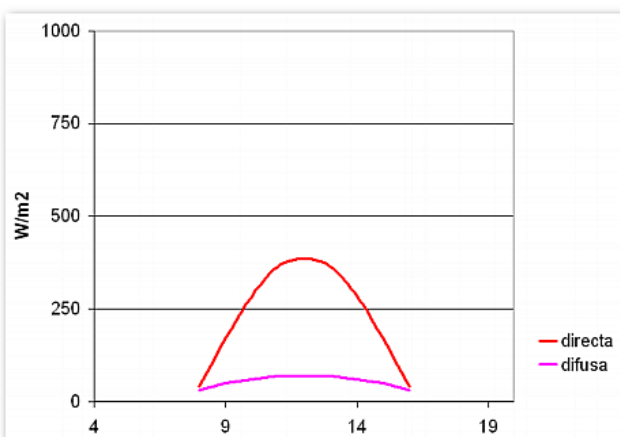
Les següents gràfiques representen les radiacions rebudes en un pla horitzontal a 40° latitud Nord per dies lliures de nuvolositat i contaminacions en diferents mesos de l'any:



Graf 2. Radiacions en el pla horitzontal el 21 juny a una latitud de 40° N.



Graf 3. Radiacions en el pla horitzontal el 22 de setembre i el 22 de març a una latitud de 40° N.



Graf 4. Radiacions en el pla el 21 de desembre a una latitud de 40° N.

En el conjunt de les tres gràfiques s'evidencia com a cada estació l'altura solar afecta a la radiació rebuda.

Donat que l'altura solar és la variable que determina la radiació rebuda en el pla horitzontal –en el cas de dies clars- sembla lògic realitzar un mètode universal per a determinar la radiació a qualsevol hora i dia de l'any. Com? Senzillament determinant a quina altura solar es troba el sol a aquella hora i dia de l'any per cercar posteriorment en una funció analítica quines radiacions directes i difuses li corresponen. Aquesta funció analítica es pot extreure a partir de dades estadístiques.

De l'exemple de les tres gràfiques anteriors (mitjanes estadístiques per a dies molt clars) s'han extret les mateixes dades incorporant l'altura solar a què es donaven:

HORA SOLAR	ALTURA SOL (°)	DIRECTA (W/m2)	DIFUSA (W/m2)
5	4	30	20
6	15	180	55
7	26	380	70
8	37	570	80
9	49	740	90
10	60	870	100
11	69	960	105
12	73	990	110
8	5	40	30
9	14	170	50
10	21	285	60
11	25	365	70
12	27	385	70
7	12	130	45
8	23	315	65
9	33	495	80
10	42	630	85
11	48	725	90
12	50	750	90

Graf 5. Incorporació de l'altura solar.

A partir d'aquesta nova taula, ara es graficarà no en funció de la hora solar, sinó en funció de l'altura solar, que pretén ser la variable realment important.

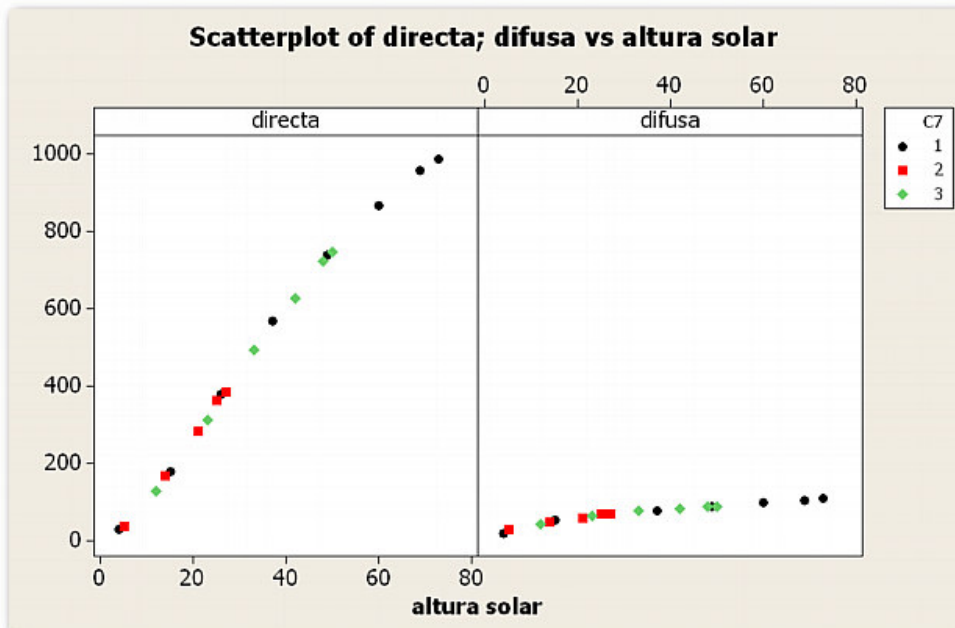
HORA SOLAR	ALTURA SOL (°)	DIRECTA (W/m2)	DIFUSA (W/m2)
5	4	30	20
6	15	180	55
7	26	380	70
8	37	570	80
9	49	740	90
10	60	870	100
11	69	960	105
12	73	990	110
8	5	40	30
9	14	170	50
10	21	285	60
11	25	365	70
12	27	385	70
7	12	130	45
8	23	315	65
9	33	495	80
10	42	630	85
11	48	725	90
12	50	750	90

Graf 6. L'altura solar com a abscissa pren el relleu a la hora solar.

Segons la hipòtesi que s'ha plantejat de que la radiació depèn únicament de l'altura solar es pot comprovar a partir de les dades de la taula anterior. Tant sols s'ha de comprovar si els punts dels diferents mesos en una gràfica (radiació-altura solar) pertanyen a una mateixa família. És a dir, graficant els següents valors amb l'altura solar com a abscissa.

HORA SOLAR	ALTURA SOL (°)	DIRECTA (W/m2)	DIFUSA (W/m2)
5	4	30	20
6	15	180	55
7	26	380	70
8	37	570	80
9	49	740	90
10	60	870	100
11	69	960	105
12	73	990	110
8	5	40	30
9	14	170	50
10	21	285	60
11	25	365	70
12	27	385	70
7	12	130	45
8	23	315	65
9	33	495	80
10	42	630	85
11	48	725	90
12	50	750	90

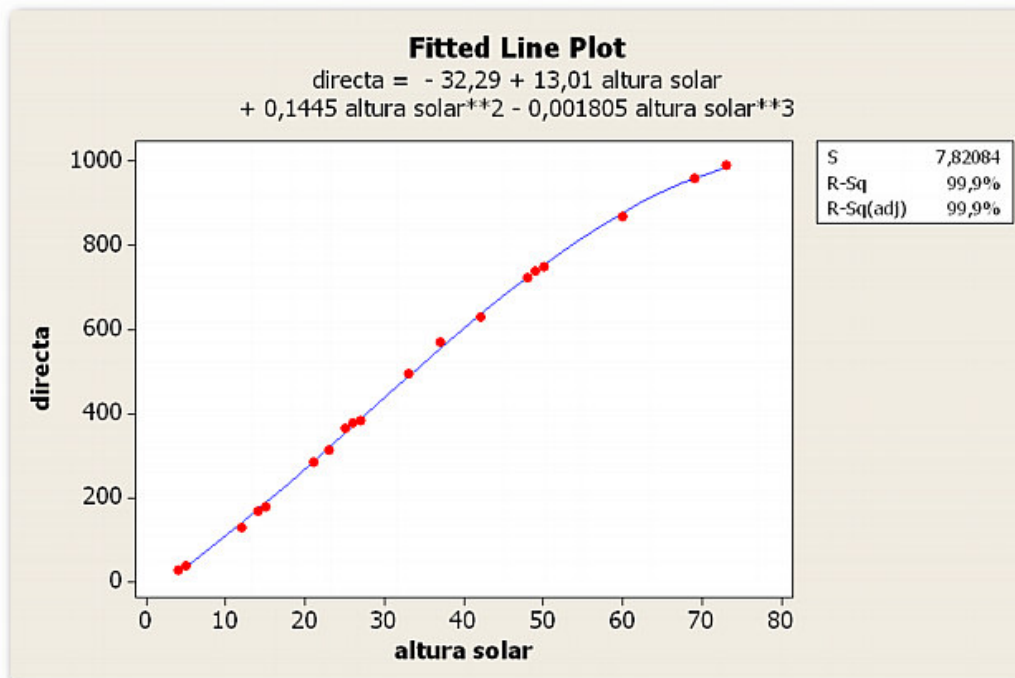
Graf 7. L'altura solar com a abscissa pren el relleu a la hora solar.



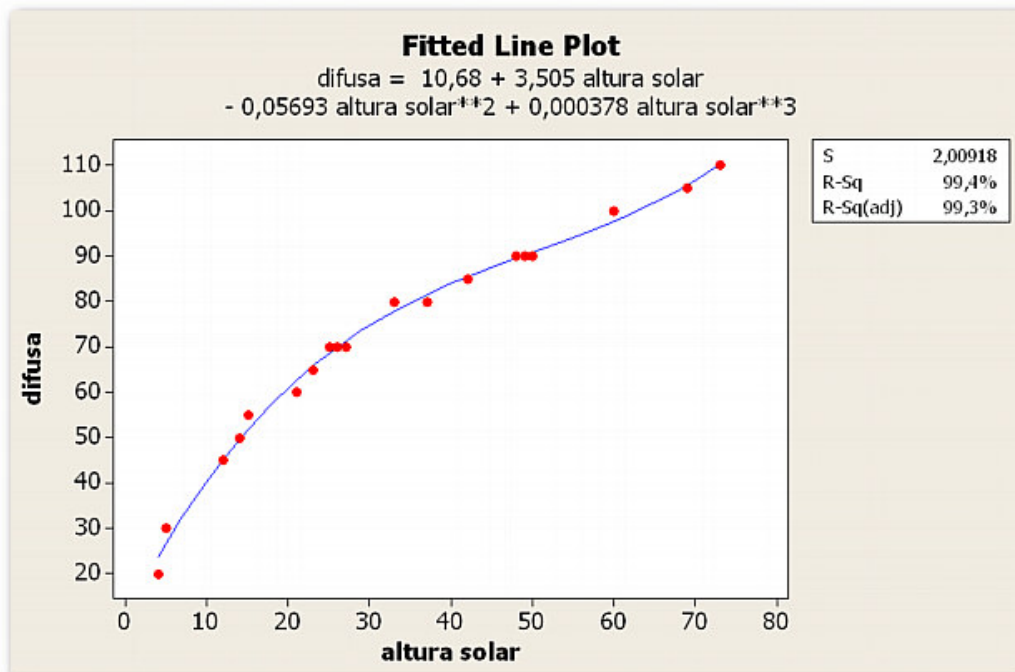
Graf 8.

Efectivament, en aquest gràfic es comprova perfectament com tan la radiació directa com la difusa es pot explicar només a partir de l'altura solar. Tots els punts dels diferents mesos(\diamond = setembre i març; \bullet = desembre, \circ = juny) pertanyen de manera evident al mateix grup de famílies, és a dir a la mateixes dues corbes que poden explicar la quantitat de radiació rebuda en el pla horitzontal coneixent tan sols l'altura solar.

Les equacions de regressió per a aquestes dues gràfiques són,
 Per la radiació directa (realment la global)

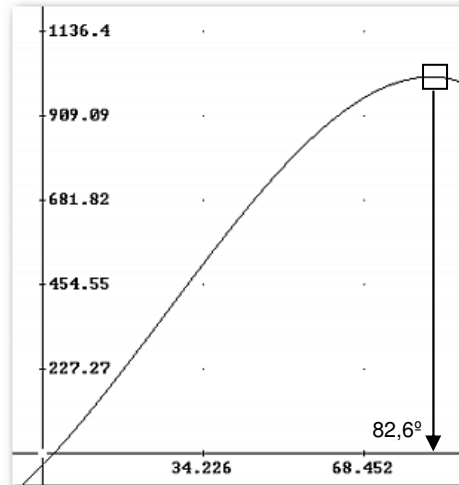


Per la radiació difusa



A partir d'aquestes equacions (radiació directa-altura solar) i radiació difusa-altura solar) ja és possible conèixer per a qualsevol dia de l'any quina radiació es té a qualsevol hora. Només cal determinar l'altura solar que li correspon a aquella hora i entrar les dues gràfiques.

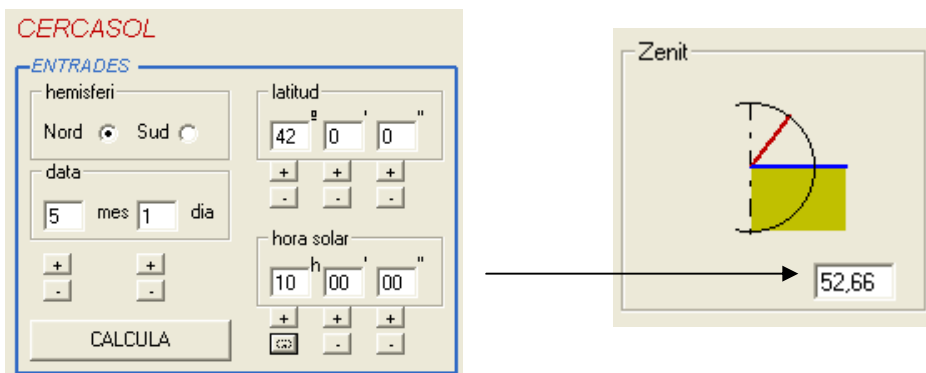
Ara bé, els resultats anteriors encara no són del tot complerts –tot i que s’acosten molt a l’objectiu- ja que per ser una bona regressió s’haurien de tenir punts fins a altures solars de 90° i tot just s’arriba als 75°. Aquesta mancança es reflexa en que la corba regressora per a la radiació directa presenta un màxim abans dels 90° (als 82,6°), fet que experimentalment se sap que no és cert i el màxim ha d’estar situat als 90°, quan el sol es troba a la màxima altura solar possible. Aquest és un exemple sobre els perills de l’extrapolació.



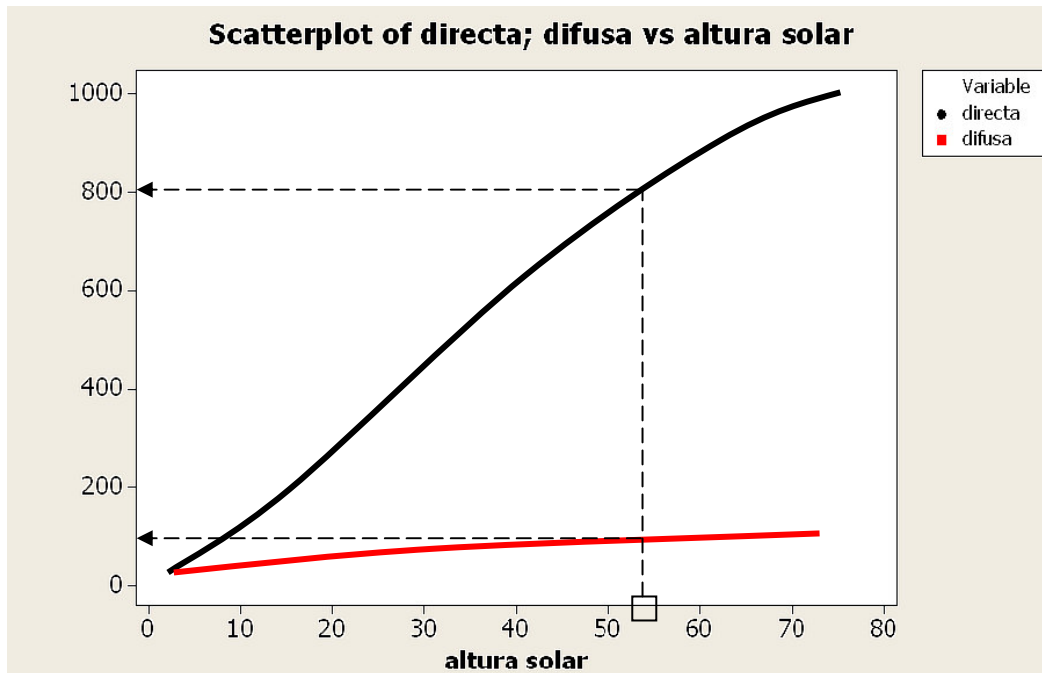
El que s’ha obtingut amb aquestes accions és una metodologia per conèixer la radiació en el pla horitzontal coneixent la situació geogràfica, hora i dia. La metodologia es recolza en que la radiació rebuda en el pla horitzontal en una dia clar depèn únicament de l’altura solar, tan pel que fa a la radiació directa com la difusa.

Recapitulant, els passos a seguir són els següents:

1.- Fixant la situació geogràfica, dia de l’any i hora solar, es busca l’altura solar (programa CERCASOL):



2.- Es busca a les gràfiques de regressió els valors de radiació solar directa i difusa introduint el valor de l'altura solar (zenit).



Aquest model permet avaluar les radiacions global i difusa en qualsevol instant sabent només l'altura solar, és a dir:

$$\begin{aligned} \text{rad directa} &= \text{rad directa (alt solar)} \\ \text{rad difusa} &= \text{rad difusa (alt solar)} \end{aligned}$$

Aquest model, però, avalua tan sols la radiació disponible en dies clars. Cal tenir un model capaç d'extreure les radiacions directa i difusa en dies ennuvolats. És a dir:

$$\begin{aligned} \text{rad directa} &= \text{rad directa (alt solar, nuvolositat)} \\ \text{rad difusa} &= \text{rad difusa (alt solar, nuvolositat)} \end{aligned}$$

Ara bé, com que és molt més pràctic treballar amb la radiació global en cada moment del dia que amb la nuvolositat (bàsicament per què és una dada disponible), l'objectiu final és obtenir:

$$\begin{aligned} \text{rad directa} &= \text{rad directa (alt solar, rad global)} \\ \text{rad difusa} &= \text{rad difusa (alt solar, rad global)} \end{aligned}$$

i que evidentment ha de complir:

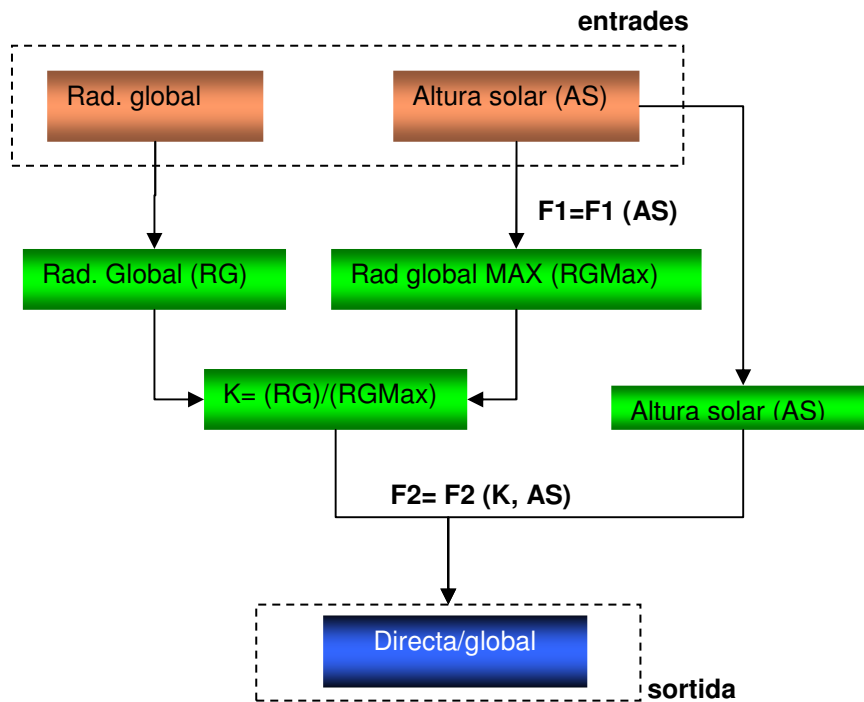
$$\text{rad global} = \text{rad directa} + \text{rad difusa}$$

Com a hipòtesis de treball per a aquest model es pren una nuvolositat homogènia a tot el cel, per tant no hi hauran “clarianes”.

La metodologia de treball és prendre com a valors d'un estat particular de radiació en un determinat moment del dia els següents paràmetres:

- altura solar
- radiació global en el pla horitzontal.

A partir d'aquestes dues dades es vol conèixer com es desglossa la radiació global en radiació directa i difusa.



Rad. Global ó **RG** és la radiació real que s’obté al pla horitzontal. Juntament amb RG s’ha de prendre nota de l’altura solar (AS).

Rad global MAX ó **RGMax** és la radiació màxima que es pot obtenir en el pla horitzontal amb la mateixa altura solar (AS) amb que s’ha mesurat la radiació **RG** però en un dia clar. Existeixen expressions analítiques que donen el valor d’aquesta radiació màxima teòrica en funció de l’altura solar. Algunes d’aquestes:

$$RGMax = 1130 \cdot (\sin AS)^{1,15} \text{ per a cels molt clars}$$

$$RGMax = 995 \cdot (\sin AS)^{1,25} \text{ per a cels industrials}$$

$$RGMax = 1080 \cdot (\sin AS)^{1,2} \text{ per a cels normals}$$

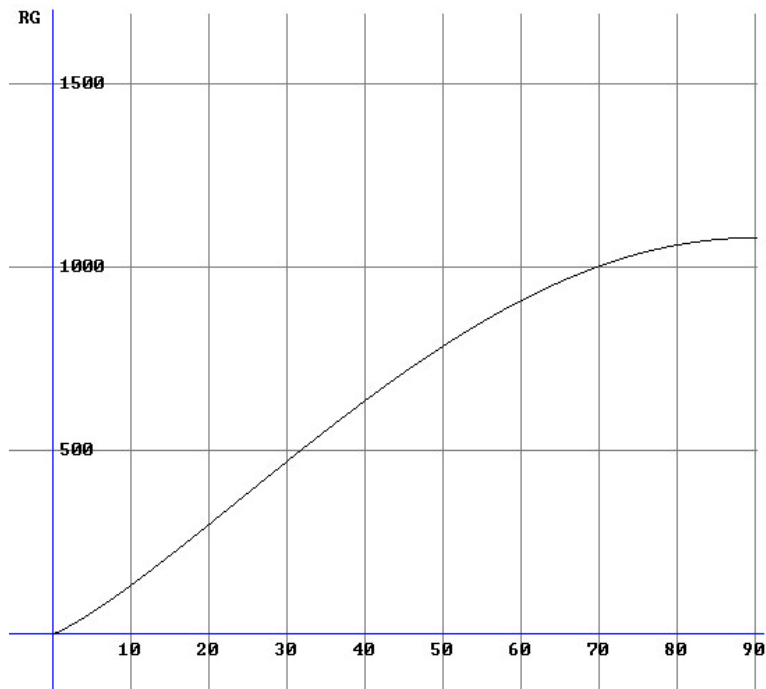
Font: Fernández Díez P. Universidad de Cantabria.

L’expressió escollida és la tercera (cels normalment clars).

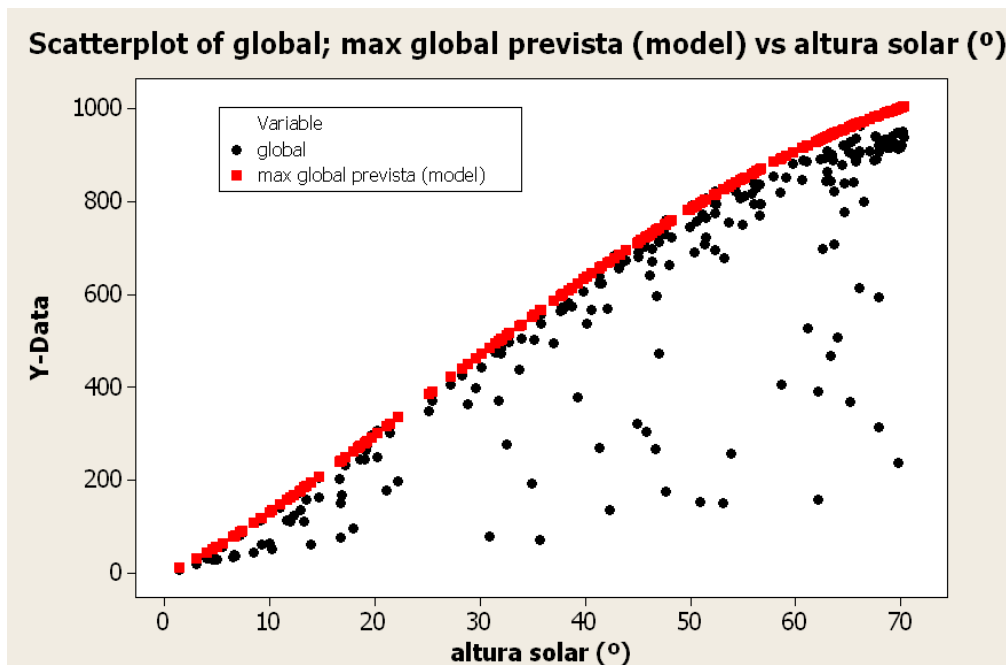
$$RGMax = 1080 \cdot (\sin AS)^{1,2}$$

Equ. 1. Previsió de la radiació en un dia clar. Font: Fernandez Díez P.

La representació d'aquesta expressió és la següent:



Si es grafiquen els valors reals de radiació mesurada en l'estació conjuntament amb els màxims previstos pel model en funció de l'altura solar, el resultat és el següent:

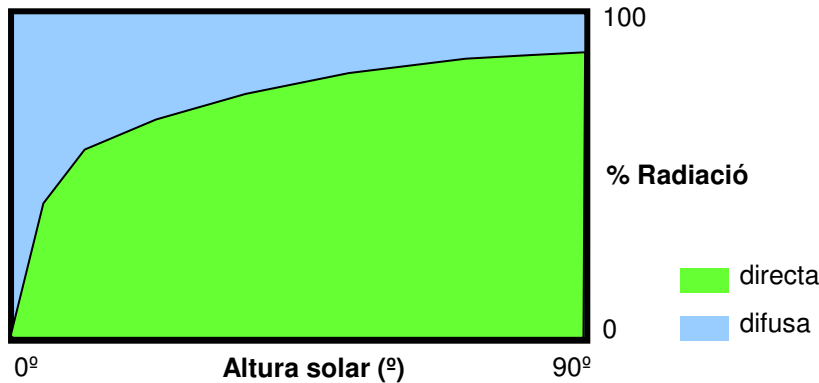


Sembla ser doncs, que el model de previsió de radiació màxima s'ajusta fidelment als valors màxims mesurats experimentalment.

Els valors màxims de radiació global se situen de forma molt aproximada als valors predits per la equació 1. Per sota de la previsió teòrica (punts vermells) se situen diferents radiacions mesurades que son inferiors ja que estan afectats de la nubolositat. El rang experimental, com es pot observar se situa entre una altura solar de 0° a 72° , el màxim zènit que el sol assoleix en les nostres latituds.

Anem a veure ara quina forma hauria de prendre la funció F2 per a diferents intensitats de núvols. Cal recordar que F2 és la funció que defineix la relació entre el quocient (radiació directa/ radiació global) a partir del coneixement de la radiació global i la altura solar. És a dir, F2 desglossa la radiació global captada en les radiacions directa i difusa.

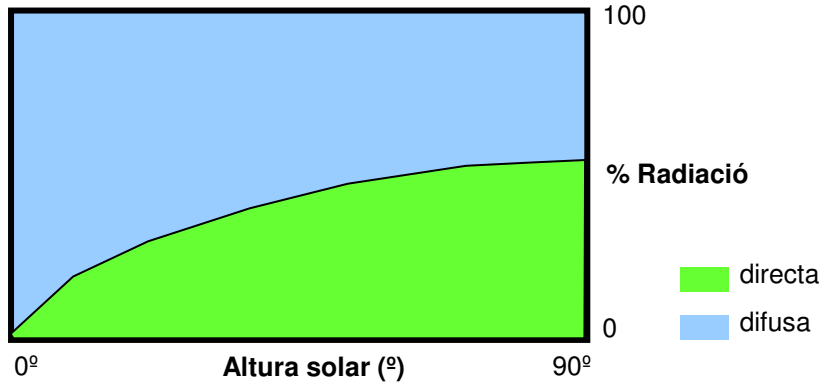
Anem a suposar ara que es té un dia totalment clar (graf 8). Quan el Sol està baix (altures solars properes a 0°) és previsible que la radiació difusa sigui preponderant sobre la radiació directa, ja que tot i ser un dia clar, els raigs de llum incideixen molt obliquament sobre una superfície horitzontal. A mesura que es va creixent en altura solar, els raigs de sol cauen de forma més directe sobre la superfície horitzontal i la radiació directa pren importància i la seva aportació en el percentatge de radiació va en augment.



Graf 8. . Per a una radiació que és el 100 % respecte el MAX que es pot donar amb el Sol en aquella posició:

En el (Graf 8) es pot apreciar com la radiació directa (exceptuant les altures solars molt baixes, té un paper preponderant, aportant la major part de la radiació.

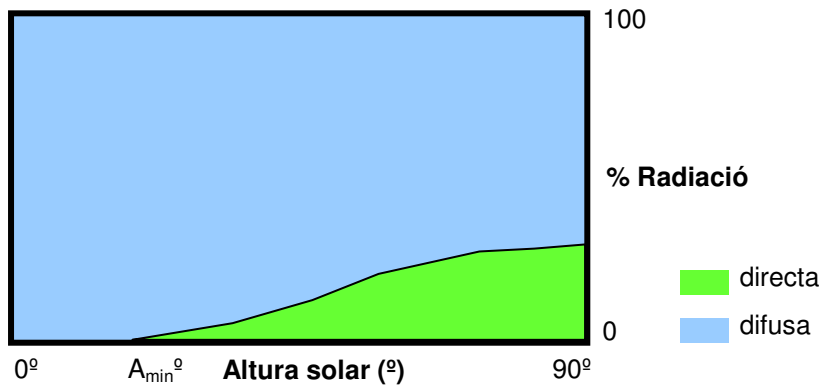
Anem a suposar ara un dia en que hi ha nubolositat i que la radiació que és rep a qualsevol hora del dia és exactament el 60 % de la que es podria rebre en condicions màximes, és a dir, en les condicions d'un dia clar. La distribució de repartiment de radiacions directa i difusa haurà variat respecte el Graf. 8 i es tindria el següent Graf.9.



Graf 9. Per a una radiació que és el **60 % respecte el MAX** que es pot donar amb el Sol en aquella posició:

El primer que es pot observar és una disminució de l'aportació de la radiació directa a qualsevol altura solar respecte a un dia totalment clar (Graf. 8). La corba continua tenint el mateix aspecte: a baixes altures solars la radiació difusa té un percentatge de participació més elevat. A mesura que creix la altura solar va augmentant la participació de la radiació directa.

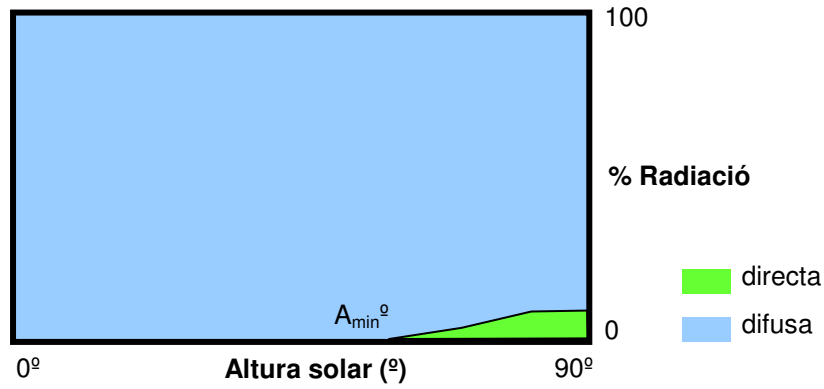
Similarment, suposem ara un dia en que a qualsevol hora la radiació que es rep és el 40 % de la radiació solar màxima de dia clar. El resultat de composició de les radiacions directa i difusa vindrien a ser un gràfic com ara el següent:



Graf 10. Per a una radiació que és el **40 % respecte el MAX** que es pot donar amb el Sol en aquella posició:

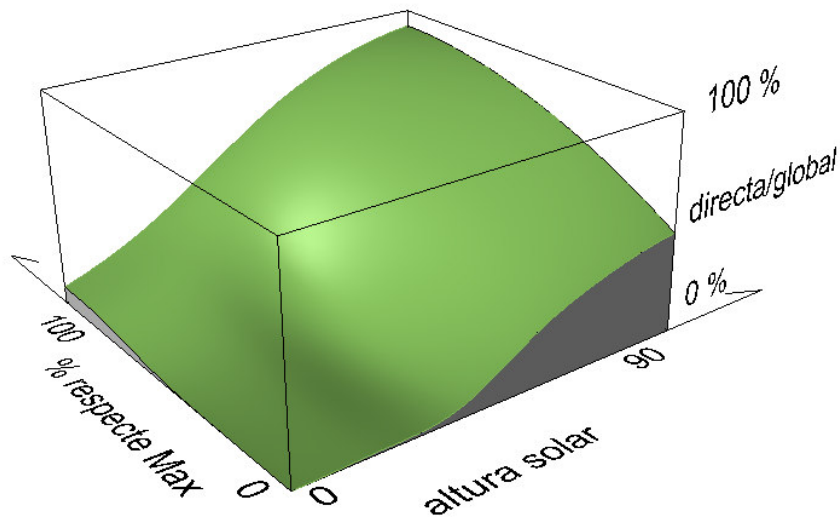
Com es pot comprovar, la radiació difusa encara ha guanyat més protagonisme i a qualsevol altura solar el seu grau de participació és més gran que el de la radiació solar directa. És més, partint des de l'altura solar zero (el Sol a l'horitzó) fins arribar a una altura solar mínima (A_{min}) no es té quasi aportació de radiació solar directa.

Si es prenguéss un dia en que la radiació solar fos tan sols el 20 % de la màxima radiació possible, s'obtidria un gràfic com el següent.



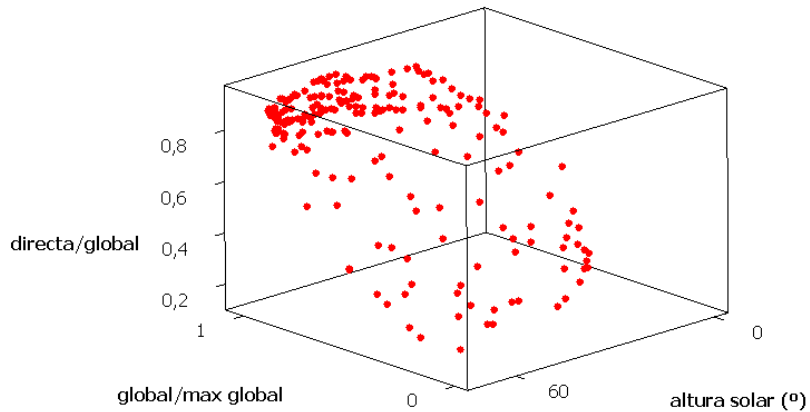
Graf 11. Per a una radiació que és el 20 % respecte el MAX que es pot donar amb el Sol en aquella posició:

La radiació difusa és quasi a qualsevol altura solar el 100 % de la radiació rebuda. L'altura solar mínima (A_{min}) a partir de la qual comença a contribuir la radiació directa se situa a una altura solar molt elevada.



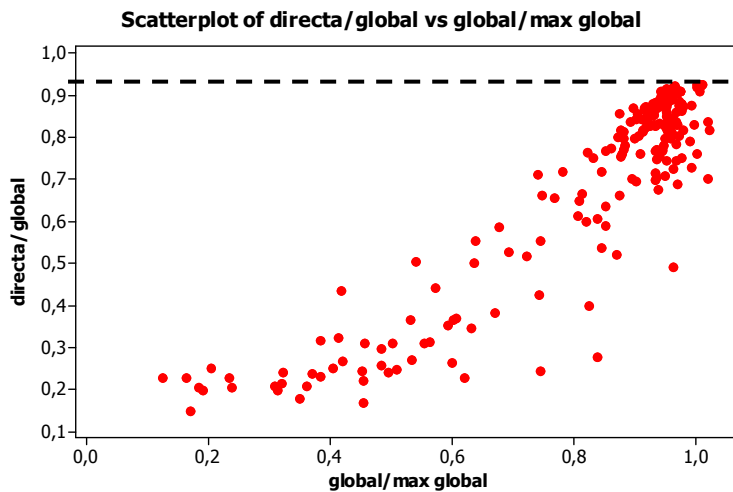
Graf 12. Superfície hipotètica explicativa de la radiació directa/global en funció de l'altura solar i global/globalmax.

Els punts reals mesurats donen una gràfica 3D:

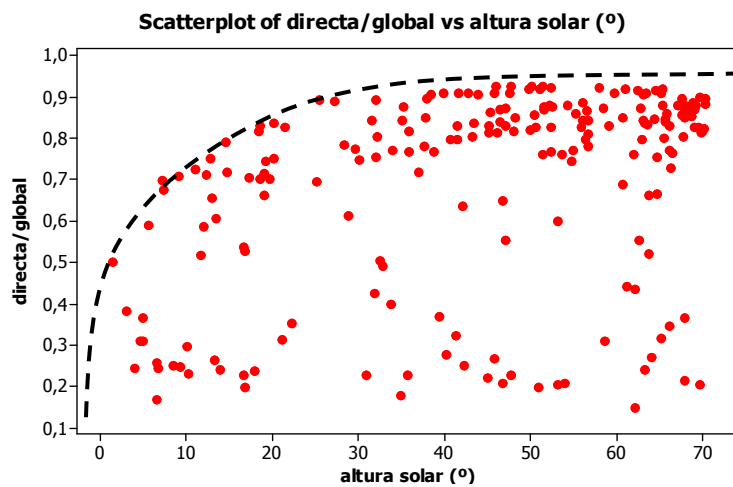


Graf 13. Punts experimentals de la radiacion directa/global en funció de l'altura solar i global/globalmax

I les seves projeccions:



Graf 14. Punts experimentals de la radiacion directa/global en funció de global/globalmax.



Graf 14. Punts experimentals de la radiacion directa/global en funció de l'altura solar.

Les superfícies (F2) que millor interpolen aquest núvol de punts són:

$$\frac{\text{direct}}{\text{global}} = 0,0734 + 0,00191 \times AS(\text{graus}) + 0,737 \times \left(\frac{\text{global}}{RGMax(AS)} \right)^2$$

R-Sq = 89,5%

$$\frac{\text{direct}}{\text{global}} = -0,191 + 0,00228 \times AS(\text{graus}) + 0,950 \times \left(\frac{\text{global}}{RGMax(AS)} \right)$$

R-Sq = 87,7%

On AS és l'altura solar i RGMax la radiació global màxima prevista a aquella altura solar on el seu valor expressat de forma analítica era,

$$RGMax = 1080 \cdot (\sin AS)^{1,2}$$

La millor equació regressora és la quadràtica amb un 89,5 % de R-Sq. Per tan escollim aquesta com a equació de previsió.

$$\frac{\text{direct}}{\text{global}} = 0,0734 + 0,00191 \cdot AS(^{\circ}) + 0,737 \times \left(\frac{\text{global}}{RGMax(AS)} \right)^2$$

Equació que pot ser útil expressar-la en funció del percentatge de radiació sobre la prevista:

$$\frac{\text{direct}}{\text{global}} = 0,0734 + 0,00191 \cdot AS(^{\circ}) + 0,737 \times \left(\frac{\% \text{ de RGMax}}{100} \right)^2$$

O també pot ser desenvolupada

$$\frac{\text{direct}}{\text{global}} = 0,0734 + 0,00191 \cdot AS(^{\circ}) + 0,737 \times \left(\frac{\text{global}}{1080 \cdot (\sin AS)^{1,2}} \right)^2$$

I simplificant.

$$\frac{\text{direct}}{\text{global}} = 0,0734 + 0,00191 \cdot AS(^{\circ}) + \frac{0,737}{1080^2 \cdot (\sin AS)^{2,4}} \cdot \text{global}^2$$

Eq XX. Equació regressora que explica la relació entre directa/global en funció de l'altura solar i de global/globalmax.

Per tant, i de manera definitiva, el valor més probable de la relació de la radiació (directa/global) correspon a l'equació XX. A més, s'haurà de tenir en compte els següents estats excepcionals on no s'usarà la eq. XX.

1) Si $AS \leq 0$ llavors es prescindeix de la eq XX i $(\text{direct/global}) = 0$ i difusa = global (condició per no tenir denominador = 0).

2) Si $(\text{direct/global}) > 0,92$ llavors $(\text{direct/global}) = 0,92$ (valors màxims assolible)

Una vegada obtingut el valor de F2, és a dir, de direct/global, és immediat trobar els valors previstos de radiació directa i difusa.

