

# Introducción a solaR

Oscar Perpiñán Lamigueiro

10 de Febrero de 2010

## 1. Introducción

El paquete `solaR` incluye un conjunto de funciones destinadas al cálculo de la radiación solar incidente en sistemas fotovoltaicos y a la simulación del funcionamiento de diferentes aplicaciones de esta tecnología energética. En la versión actual de este paquete se incluyen funciones que permiten realizar todas las etapas de cálculo desde la radiación global en el plano horizontal hasta la productividad final de sistemas fotovoltaicos de conexión a red y de bombeo. En futuras versiones se incorporarán funciones adicionales que permitan la simulación de sistemas autónomos de electrificación.

## 2. Geometría solar

Las ecuaciones que determinan el movimiento aparente solar están incluidas en las funciones `fSolD` y `fSolI`. La primera de ellas realiza el cálculo de los parámetros que pueden considerarse constantes en un día (por ejemplo, la declinación) y la segunda incluye el conjunto de valores que evolucionan a lo largo del día (por ejemplo, los ángulos cenital y azimutal). Estas funciones también proporcionan el valor de la radiación solar disponible fuera de la atmósfera: `fSolD` entrega valores de irradiación mientras que `fSolI` ofrece la evolución de la irradiancia.

Es posible realizar los cálculos para un día concreto:

```
> lat = 37.2
> Nm = 1
> SolD <- fSolD(lat, dn = 100)
> print(SolD)
```

	IDd	DiaAño	lat	decl	eo	ws	Bo0d
1	1.271e+09	100	0.6493	0.1315	0.995	-1.671	9541

```
> SolI <- fSolI(SolD, Nm = Nm)
> print(SolI[7:18, 8:12])
```

	Min	Hora	IDi	rg	rd
7	0	6	1.271e+09	0.007935	0.01130
8	0	7	1.271e+09	0.032395	0.04044
9	0	8	1.271e+09	0.060379	0.06759
10	0	9	1.271e+09	0.088405	0.09091
11	0	10	1.271e+09	0.112414	0.10880
12	0	11	1.271e+09	0.128619	0.12005
13	0	12	1.271e+09	0.134343	0.12388
14	0	13	1.271e+09	0.128619	0.12005
15	0	14	1.271e+09	0.112414	0.10880
16	0	15	1.271e+09	0.088405	0.09091
17	0	16	1.271e+09	0.060379	0.06759
18	0	17	1.271e+09	0.032395	0.04044

o para un conjunto de días:

```
> SolD <- fSolD(lat, dn = c(10, 50, 100))
> print(SolD)
```

	IDd	DiaAño	lat	decl	eo	ws	Bo0d
1	1.263e+09	10	0.6493	-0.3847	1.033	-1.258	4497
2	1.267e+09	50	0.6493	-0.2082	1.022	-1.410	6327
3	1.271e+09	100	0.6493	0.1315	0.995	-1.671	9541

Mediante la función `fBTd` es posible crear bases temporales con diferente estructura. Así, para realizar el cálculo en los denominados días promedio empleamos el siguiente código:

```
> SolD <- fSolD(lat, BTd = fBTd(Modo = "DiasProm"))
> SolI <- fSolI(SolD, Nm = 6)
> print(SolD)
```

	IDd	Ano	DiaAno	Mes	DiaMes	lat	decl	eo	ws	BoOd
1	1.264e+09	2010	17	1	17	0.6493	-0.36507	1.0316	-1.276	4703
2	1.266e+09	2010	45	2	14	0.6493	-0.23771	1.0236	-1.386	6025
3	1.269e+09	2010	74	3	15	0.6493	-0.04920	1.0097	-1.533	7902
4	1.271e+09	2010	105	4	15	0.6493	0.16432	0.9923	-1.697	9817
5	1.274e+09	2010	135	5	15	0.6493	0.32798	0.9774	-1.832	11078
6	1.276e+09	2010	161	6	10	0.6493	0.40163	0.9692	-1.899	11568
7	1.279e+09	2010	199	7	18	0.6493	0.36665	0.9683	-1.867	11284
8	1.282e+09	2010	230	8	18	0.6493	0.22316	0.9774	-1.744	10192
9	1.285e+09	2010	261	9	18	0.6493	0.01761	0.9928	-1.584	8431
10	1.287e+09	2010	292	10	19	0.6493	-0.19284	1.0102	-1.422	6418
11	1.290e+09	2010	322	11	18	0.6493	-0.34594	1.0244	-1.294	4873
12	1.292e+09	2010	347	12	13	0.6493	-0.40564	1.0314	-1.239	4269

y podemos obtener la figura 1.

También podemos extender los cálculos a todos los días de un año:

```
> BTd = fBTd(Modo = "Serie")
> SolD <- fSolD(lat, BTd = BTd)
> summary(SolD)
```

IDd	Ano	DiaAno	Mes	DiaMes
Min. :1.26e+09	Min. :2010	Min. : 1	Min. : 1.00	Min. : 1.0
1st Qu.:1.27e+09	1st Qu.:2010	1st Qu.: 92	1st Qu.: 4.00	1st Qu.: 8.0
Median :1.28e+09	Median :2010	Median :183	Median : 7.00	Median :16.0
Mean :1.28e+09	Mean :2010	Mean :183	Mean : 6.53	Mean :15.7
3rd Qu.:1.29e+09	3rd Qu.:2010	3rd Qu.:274	3rd Qu.:10.00	3rd Qu.:23.0
Max. :1.29e+09	Max. :2010	Max. :365	Max. :12.00	Max. :31.0

lat	decl	eo	ws
Min. :0.649	Min. :-4.09e-01	Min. :0.967	Min. :-1.91
1st Qu.:0.649	1st Qu.: -2.89e-01	1st Qu.:0.977	1st Qu.: -1.80
Median :0.649	Median : 2.63e-16	Median :1.000	Median : -1.57
Mean :0.649	Mean : 9.25e-18	Mean :1.000	Mean : -1.57
3rd Qu.:0.649	3rd Qu.: 2.89e-01	3rd Qu.:1.023	3rd Qu.: -1.34
Max. :0.649	Max. : 4.09e-01	Max. :1.033	Max. : -1.24

BoOd
Min. : 4235
1st Qu.: 5472
Median : 8302
Mean : 8116
3rd Qu.:10742
Max. :11607

para obtener la figura 2.

### 3. Radiación solar

Es de uso común disponer de valores de radiación global en el plano horizontal, ya sea en forma de promedios mensuales o de una serie más o menos completa de valores diarios a lo largo de uno o varios años. Para estudiar el funcionamiento de un sistema fotovoltaico es necesario transformar esta información a valores de irradiancia global, difusa y directa en el plano horizontal para transformarlos posteriormente a valores en el plano de la superficie del generador.

#### 3.1. Irradiación e irradiancia en el plano horizontal

La extracción de las componentes de la irradiación difusa y directa se realiza con la función `fCompD`. Esta función necesita los resultados obtenidos con `fSolD`, la radiación global en el plano horizontal (en  $W_h/m^2$ ) y la correlación entre la fracción de difusa y el índice de claridad. En la versión actual de `solR`, esta función incorpora las correlaciones de Collares Pereira y Rabl, y la de Page. Además, permite al usuario elaborar su propia correlación y entregarla a través del argumento `f`. Repetamos de nuevo los cálculos para un día concreto:

```
> SolD <- fSolD(lat, dn = 100)
> G0d = 5000
> CompD <- fCompD(SolD, G0d, corr = "Page")
> dif = !(names(CompD) %in% names(SolD))
> print(CompD[dif])
```

	G0d	B0d	D0d	Fd	Ktd
1	5000	2961	2039	0.4078	0.5241

y para los días promedio:

```

> NombreMes = format(ISOdate(2000, 1:12, 1), "%b")
> p <- xyplot(AzS * 180/pi ~ AzS * 180/pi, groups = factor(NombreMes[Mes]),
+   data = SolI, col = "black", type = "l", xlab = expression(psi[s]),
+   ylab = expression(gamma[s]))
> print(direct.label(p, method = "top.points"))

```

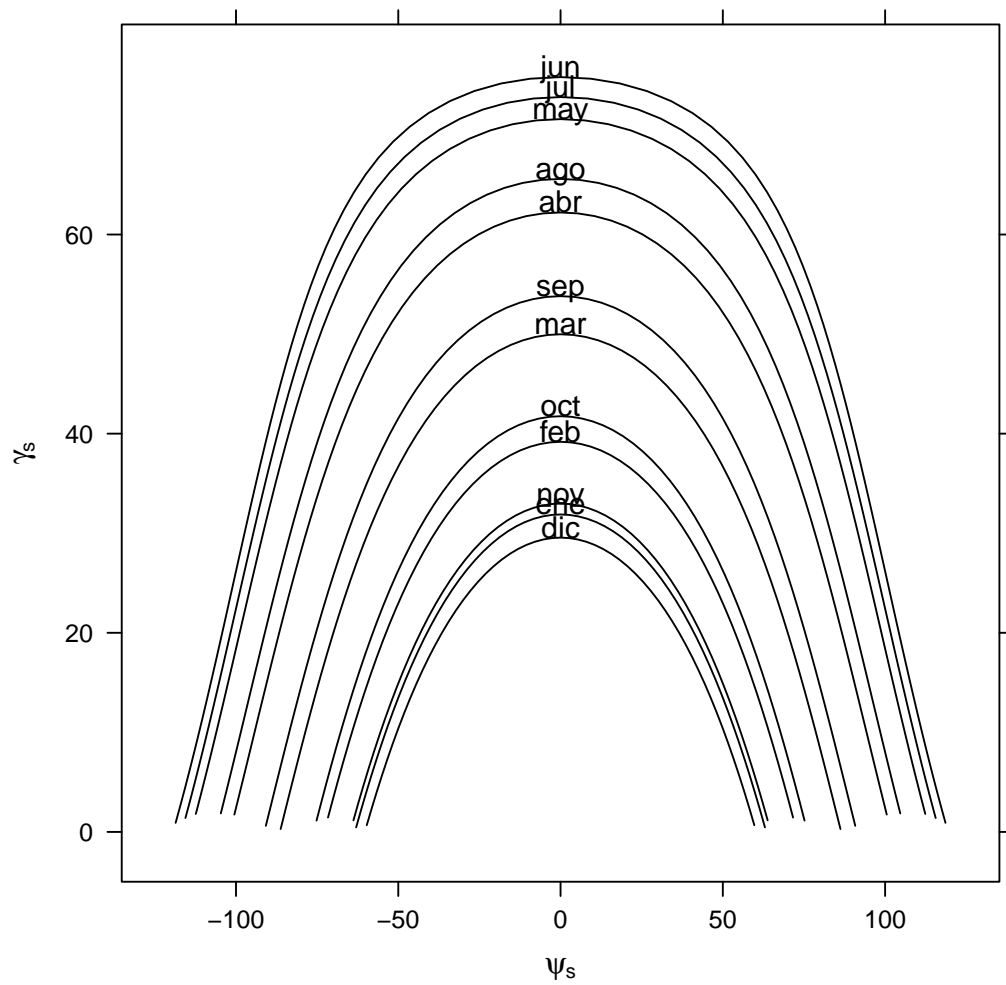


Figura 1: Azimut y altura solar en los doce días promedio

```
> p <- xyplot(decl ~ DiaAño, data = Sold, type = "l")  
> print(p)
```

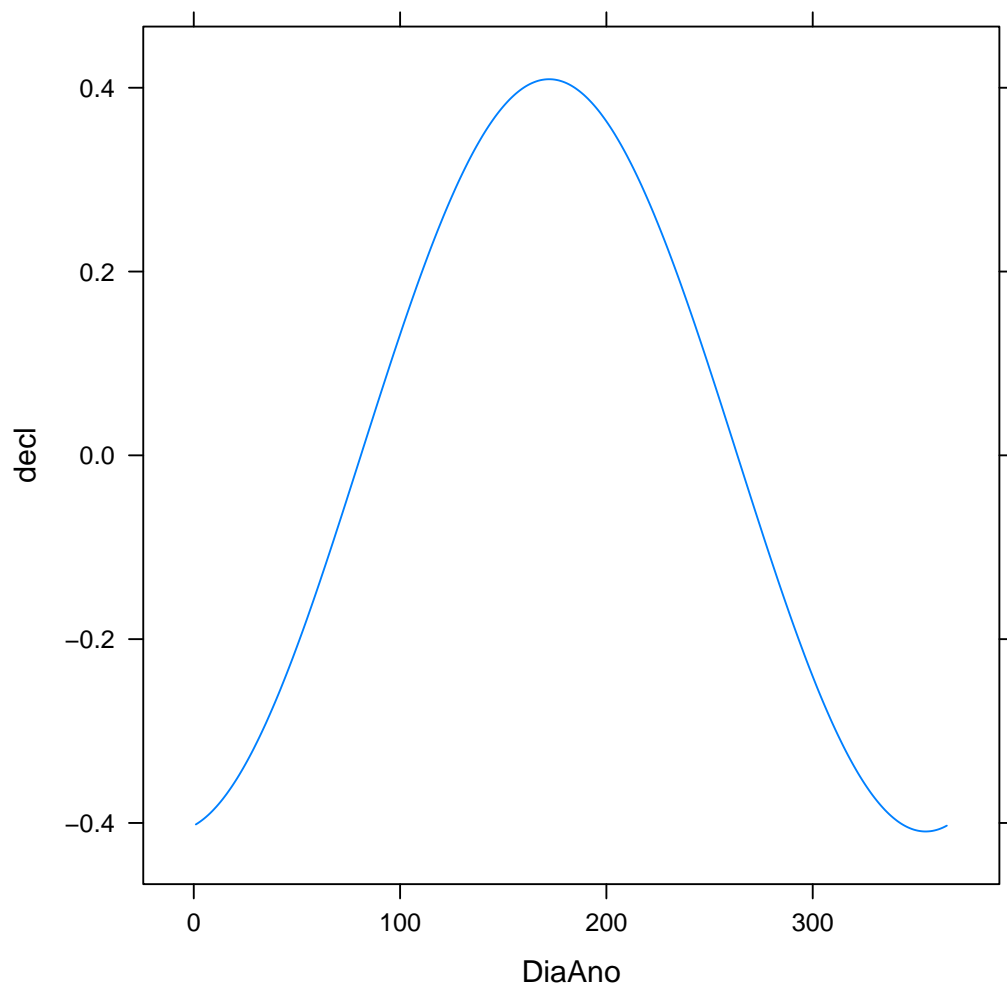


Figura 2: Declinación a lo largo del año

```

> G0dm = c(2.766, 3.491, 4.494, 5.912, 6.989, 7.742, 7.919, 7.027,
+ 5.369, 3.562, 2.814, 2.179) * 1000
> SolD <- fSolD(lat, BTd = fBTd(Modo = "DiasProm"))
> CompD <- fCompD(SolD, G0d = G0dm, corr = "Page")
> dif = !(names(CompD) %in% names(SolD))
> summary(CompD[dif])

```

G0d		B0d		D0d		Fd		Ktd	
Min.	:2179	Min.	:1257	Min.	: 922	Min.	:0.207	Min.	:0.510
1st Qu.	:3322	1st Qu.	:2135	1st Qu.	:1148	1st Qu.	:0.271	1st Qu.	:0.575
Median	:4932	Median	:3376	Median	:1529	Median	:0.327	Median	:0.595
Mean	:5022	Mean	:3568	Mean	:1454	Mean	:0.312	Mean	:0.609
3rd Qu.	:6998	3rd Qu.	:5106	3rd Qu.	:1701	3rd Qu.	:0.350	3rd Qu.	:0.645
Max.	:7919	Max.	:6280	Max.	:2007	Max.	:0.423	Max.	:0.702

La construcción del perfil diario de irradiancias se realiza con la función `fCompI`. Esta función necesita la información proporcionada por `fCompD` y por `fSolI`. Por ejemplo, para los días promedio obtenemos:

```

> SolI <- fSolI(SolD, Nm = 6)
> CompI <- fCompI(CompD, SolI)
> dif = !(names(CompI) %in% names(SolI))
> summary(CompI[dif])

```

G0d		B0d		D0d		Fd		Ktd	
Min.	:2179	Min.	:1257	Min.	: 922	Min.	:0.207	Min.	:0.510
1st Qu.	:3322	1st Qu.	:2135	1st Qu.	:1148	1st Qu.	:0.271	1st Qu.	:0.575
Median	:4932	Median	:3376	Median	:1529	Median	:0.327	Median	:0.595
Mean	:5022	Mean	:3568	Mean	:1454	Mean	:0.312	Mean	:0.609
3rd Qu.	:6998	3rd Qu.	:5106	3rd Qu.	:1701	3rd Qu.	:0.350	3rd Qu.	:0.645
Max.	:7919	Max.	:6280	Max.	:2007	Max.	:0.423	Max.	:0.702

BO		GO		DO	
Min.	: 1.21	Min.	: 2.61	Min.	: 1.39
1st Qu.	:121.29	1st Qu.	:199.32	1st Qu.	: 70.96
Median	:272.51	Median	:399.45	Median	:131.16
Mean	:299.43	Mean	:421.43	Mean	:122.00
3rd Qu.	:440.43	3rd Qu.	:623.21	3rd Qu.	:173.70
Max.	:787.09	Max.	:971.71	Max.	:230.91
NA's	:870.00	NA's	:870.00	NA's	:870.00

resultado que recogemos en la figura 3.

### 3.1.1. Obtención de medidas meteorológicas

La versión actual de este paquete incorpora una función llamada `LeeMAPA` capaz de acceder a la información disponible en la página [www.mapa.es/siar](http://www.mapa.es/siar). En esta página se almacenan las medidas diarias de estaciones agroclimáticas repartidas en la mayor parte de la superficie de España. Esta función necesita el código de la estación y su provincia, y las fechas de inicio y final. Los códigos de las estaciones y provincias disponibles están almacenados en `RedEstaciones`. Por ejemplo, la provincia de Madrid cuenta con las siguientes estaciones:

```

> data(RedEstaciones)
> Madrid <- subset(RedEstaciones, NomProv == "Madrid")
> print(Madrid)

```

Provincia	Estacion	NomProv	NomEst
P209	28	1 Madrid	Center:_Finca_experimental
P210	28	2 Madrid	Arganda
P211	28	3 Madrid	Aranjuez
P212	28	4 Madrid	Fuentiduena_de_Tajo
P213	28	5 Madrid	San_Martin_de_la_Vega
P214	28	6 Madrid	Chinchon
P215	28	102 Madrid	Villa_del_Prado

Obtengamos la información del año 2009 disponible en la estación de Aranjuez. Es importante resaltar que las medidas de radiación disponibles tienen unidades de  $\text{MJ}/\text{m}^2$ , pero la función `LeeMAPA` realiza la conversión a  $\text{Wh}/\text{m}^2$ :

```

> p <- xyplot(G0 + B0 + D0 ~ w | Mes, data = CompI, type = "l",
+   auto.key = list(space = "right"))
> print(p)

```

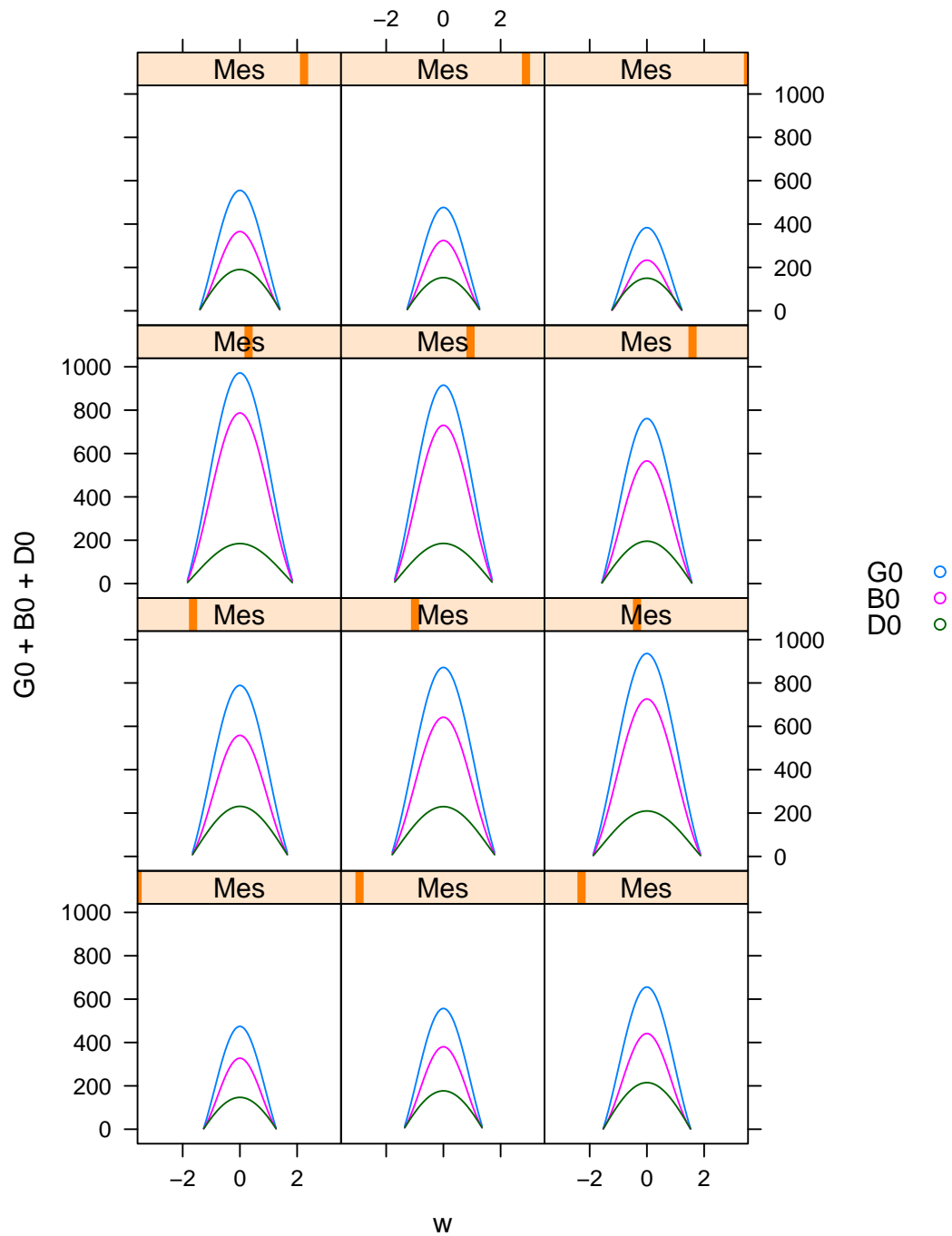


Figura 3: Irradiancia global, difusa y directa en los días promedio

```
> Aranjuez <- LeeMAPA(28, 3, "01/01/2009", "31/12/2009")

Downloading data from www.mapa.es/siar...

> summary(Aranjuez)

      Fecha      TempMedia      TempMax      HorMinTempMax
01/01/2009: 1   Min.    :-5.31   Min.    :-2.36   Min.    : 0
01/02/2009: 1   1st Qu.: 8.85   1st Qu.:14.92   1st Qu.:1350
01/03/2009: 1   Median :14.32   Median :23.72   Median :1440
01/04/2009: 1   Mean    :15.33   Mean    :23.35   Mean    :1432
01/05/2009: 1   3rd Qu.:23.67   3rd Qu.:32.61   3rd Qu.:1520
01/06/2009: 1   Max.    :30.68   Max.    :40.76   Max.    :2220
(Other)      :359

      TempMin      HorMinTempMin      HumedadMedia      HumedadMax      HorMinHumMax
Min.    :-11.30   Min.    : 0      Min.    : 22.2      Min.    : 49.1   Min.    : 0
1st Qu.: 2.07     1st Qu.: 440     1st Qu.: 42.4     1st Qu.: 79.1   1st Qu.: 420
Median : 7.40     Median : 530     Median : 60.3     Median : 92.1   Median : 530
Mean    : 7.48     Mean    : 711     Mean    : 59.8     Mean    : 96.7   Mean    : 679
3rd Qu.:13.26     3rd Qu.: 630     3rd Qu.: 74.7     3rd Qu.: 97.1   3rd Qu.: 640
Max.    :21.36     Max.    :2350     Max.    :100.0     Max.    :650.0   Max.    :2350

      HumedadMin      HorMinHumMin      VelViento      DirViento
Min.    : 0.0      Min.    : 0      Min.    : 0.272   Min.    : 1.12
1st Qu.:14.3      1st Qu.:1400     1st Qu.: 0.754   1st Qu.:43.89
Median :26.4      Median :1510     Median : 1.062   Median :108.90
Mean    :64.3      Mean    :1414     Mean    : 4.916   Mean    :144.07
3rd Qu.:47.8      3rd Qu.:1600     3rd Qu.: 1.778   3rd Qu.:239.80
Max.    :1640.0     Max.    :2310     Max.    :359.600   Max.    :357.70

      VelVientoMax      DirVientoVelMax      HorMinVelMax      Precipitacion      EtPMon
Min.    : 1.57     Min.    : 0      Min.    : 0      Min.    : 0.00     Min.    :0.00
1st Qu.: 4.22     1st Qu.: 193     1st Qu.:1217     1st Qu.: 0.00     1st Qu.:1.38
Median : 5.82     Median : 250     Median :1358     Median : 0.00     Median :2.88
Mean    :10.28     Mean    : 244     Mean    :1330     Mean    : 1.19     Mean    :3.41
3rd Qu.: 7.66     3rd Qu.: 270     3rd Qu.:1523     3rd Qu.: 0.20     3rd Qu.:5.38
Max.    :338.20     Max.    :1834     Max.    :2356     Max.    :24.83     Max.    :8.56
NA's    :8.00

      G
Min.    : 77
1st Qu.:2639
Median :5147
Mean    :4845
3rd Qu.:7169
Max.    :8753
NA's    : 8
```

Esta base de datos incorpora información sobre los valores máximos y mínimos de temperatura. Con esta información la función `fTemp` genera un perfil intradiario de la temperatura ambiente (figura 4).

```
> lat = 41
> BTd = fBTd(Modo = "BaseDatos", FechaBaseDatos = Aranjuez$Fecha,
+           FormatoFecha = "%d/%m/%Y")
> BD <- cbind(BTd, Aranjuez)
> SolD <- fSolD(lat, BTd = BTd)
> SolI <- fSolI(SolD, Nm = 1)
> Temp <- fTemp(SolI, BD)
```

### 3.1.2. La función `calcG0`

Todo el proceso de cálculo en el plano horizontal, incluyendo la obtención de medidas con `LeeMAPA` y la generación de series de temperatura, está integrado dentro de la función `calcG0`. Por ejemplo, con las siguientes líneas:

```
> MAPA = list(Provincia = 28, Estacion = 3, FechaInicio = "01/01/2009",
+           FechaFinal = "31/12/2009")
> Rad0 <- calcG0(lat = 41, modoRad = "mapa", MAPA = MAPA)

Downloading data from www.mapa.es/siar...

> Rad0$param

$lat
[1] 41

$modoRad
[1] "mapa"

$Nm
[1] 1

$EstacionMAPA
[1] "Provincia 28 Estacion 3 Inicio: 01/01/2009 Fin: 31/12/2009"
```

```
> p <- bwplot(Ta ~ w | Mes, data = Temp, horizontal = FALSE, outline = FALSE)
> print(p)
```

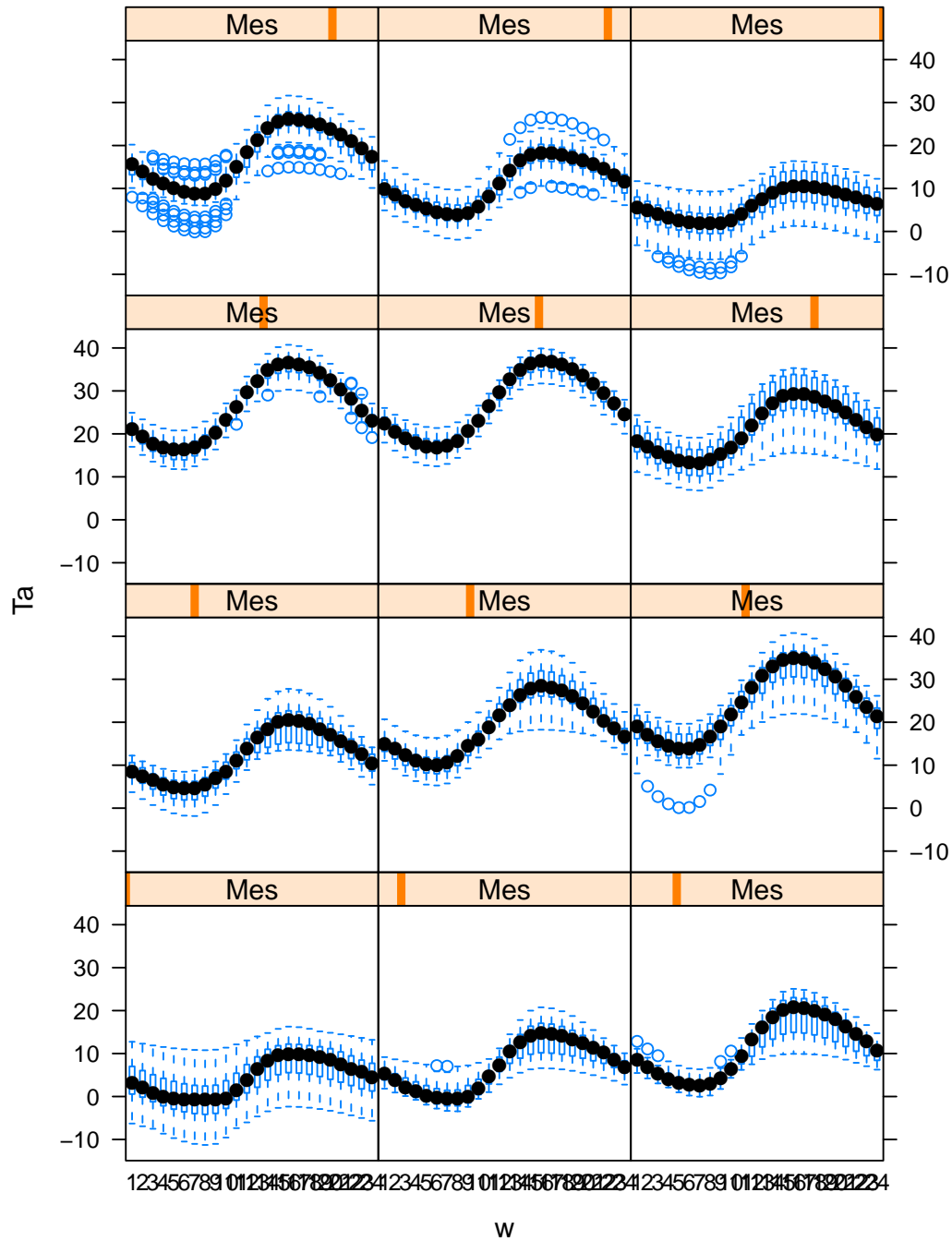


Figura 4: Evolución de la temperatura ambiente



obtenemos, a partir de las medidas de la estación meteorológica de Aranjuez, las componentes de irradiación en el plano horizontal:

```
> summary(RadO$D)
```

IDd	Ano	DiaAno	Mes	DiaMes
Min. :1.23e+09	Min. :2009	Min. : 1	Min. : 1.00	Min. : 1.0
1st Qu.:1.24e+09	1st Qu.:2009	1st Qu.: 92	1st Qu.: 4.00	1st Qu.: 8.0
Median :1.25e+09	Median :2009	Median :183	Median : 7.00	Median :16.0
Mean :1.25e+09	Mean :2009	Mean :183	Mean : 6.53	Mean :15.7
3rd Qu.:1.25e+09	3rd Qu.:2009	3rd Qu.:274	3rd Qu.:10.00	3rd Qu.:23.0
Max. :1.26e+09	Max. :2009	Max. :365	Max. :12.00	Max. :31.0

lat	decl	eo	ws
Min. :0.716	Min. :-4.09e-01	Min. :0.967	Min. :-1.96
1st Qu.:0.716	1st Qu.: -2.89e-01	1st Qu.:0.977	1st Qu.: -1.83
Median :0.716	Median : 2.63e-16	Median :1.000	Median :-1.57
Mean :0.716	Mean : 9.25e-18	Mean :1.000	Mean :-1.57
3rd Qu.:0.716	3rd Qu.: 2.89e-01	3rd Qu.:1.023	3rd Qu.: -1.31
Max. :0.716	Max. : 4.09e-01	Max. :1.033	Max. :-1.18

Bo0d	Go0d	B0d	D0d
Min. : 3581	Min. : 77	Min. : 0.77	Min. : 76.2
1st Qu.: 4845	1st Qu.:2639	1st Qu.:1395.67	1st Qu.:1109.5
Median : 7871	Median :5147	Median :3470.71	Median :1556.1
Mean : 7742	Mean :4845	Mean :3257.60	Mean :1587.0
3rd Qu.:10623	3rd Qu.:7169	3rd Qu.:5328.96	3rd Qu.:1979.9
Max. :11643	Max. :8753	Max. :6771.03	Max. :3547.9
	NA's : 8	NA's : 8.00	NA's : 8.0

Fd	Ktd	TempMax	TempMin
Min. :0.226	Min. :0.0134	Min. :-2.36	Min. :-11.30
1st Qu.:0.239	1st Qu.:0.5112	1st Qu.:14.92	1st Qu.: 2.07
Median :0.279	Median :0.6835	Median :23.72	Median : 7.40
Mean :0.429	Mean :0.5951	Mean :23.35	Mean : 7.48
3rd Qu.:0.583	3rd Qu.:0.7244	3rd Qu.:32.61	3rd Qu.: 13.26
Max. :0.990	Max. :0.8333	Max. :40.76	Max. : 21.36
NA's :8.000	NA's :8.0000		

e irradiancia en el plano horizontal:

```
> summary(RadO$I[18:30])
```

IDi	rg	rd	Bo0
Min. :1.23e+09	Min. :2.51e-17	Min. :3.80e-17	Min. :3.01e-13
1st Qu.:1.24e+09	1st Qu.:4.00e-02	1st Qu.:4.77e-02	1st Qu.:3.45e+02
Median :1.25e+09	Median :8.68e-02	Median :9.09e-02	Median :6.31e+02
Mean :1.25e+09	Mean :8.30e-02	Mean :8.34e-02	Mean :6.45e+02
3rd Qu.:1.25e+09	3rd Qu.:1.22e-01	3rd Qu.:1.15e-01	3rd Qu.:9.47e+02
Max. :1.26e+09	Max. :1.82e-01	Max. :1.70e-01	Max. :1.26e+03
	NA's :4.38e+03	NA's :4.38e+03	NA's :4.38e+03

AzS	AlS	cosThzS	aman
Min. : -2.05	Min. :2.19e-16	Min. :2.19e-16	Mode :logical
1st Qu.: -0.99	1st Qu.:2.59e-01	1st Qu.:2.56e-01	FALSE:4379
Median : 0.00	Median :4.72e-01	Median :4.55e-01	TRUE :4381
Mean : 0.00	Mean :5.29e-01	Mean :4.76e-01	NA's :0
3rd Qu.: 0.99	3rd Qu.:7.76e-01	3rd Qu.:7.01e-01	
Max. : 2.05	Max. :1.26e+00	Max. :9.53e-01	
NA's :4379.00	NA's :4.38e+03	NA's :4.38e+03	

w	BO	GO	DO
Min. :-3.142	Min. :9.50e-14	Min. :1.47e-13	Min. :5.19e-14
1st Qu.: -1.636	1st Qu.:7.04e+01	1st Qu.:1.85e+02	1st Qu.:8.24e+01
Median :-0.131	Median :2.45e+02	Median :3.76e+02	Median :1.40e+02
Mean :-0.131	Mean :2.87e+02	Mean :4.26e+02	Mean :1.40e+02
3rd Qu.: 1.374	3rd Qu.:4.77e+02	3rd Qu.:6.64e+02	3rd Qu.:1.92e+02
Max. : 2.880	Max. :8.15e+02	Max. :1.03e+03	Max. :3.94e+02
	NA's :4.70e+03	NA's :4.70e+03	NA's :4.70e+03

Ta
Min. :-11.28
1st Qu.: 7.71
Median :14.59
Mean :15.42
3rd Qu.:22.40
Max. :40.76

## 3.2. Irradiación y irradiancia en la superficie del generador

Estas componentes de irradiancia en el plano horizontal son transformadas al plano del generador mediante la función `fInclin`. Pero antes se debe realizar el cálculo de la geometría de la superficie del generador, tarea realizada por la función `fTheta`. Esta función necesita el resultado de `fSolI`, y también la información sobre el comportamiento de la superficie (estática, seguimiento a doble eje o con un eje horizontal N-S). En la versión actual de este paquete, esta función permite el cálculo del movimiento mediante *backtracking* sólo para seguidores de eje horizontal. En versiones posteriores se incorporará esta funcionalidad a los seguidores de doble eje. Así, en las siguientes líneas calculamos el movimiento de un seguidor de eje horizontal N-S con *backtracking* cuyo máximo ángulo de inclinación es 60°.

```
> SolD <- fSolD(lat = 41, BTd = fBTd(Modo = "DiasProm"))
> SolI <- fSolI(SolD, Nm = 6)
> AngGenHoriz <- fTheta(SolI, modoSeg = "horiz", BT = TRUE, distancias = data.frame(Leo = 10),
+   estruct = list(L = 4), BetaLim = 60)
```

y representamos la evolución del ángulo de inclinación a lo largo del día en la figura 5.

A partir de los resultados de `fTheta`, la función `fInclin` proporciona las componentes de irradiancia global, difusa y directa en el plano del generador, distinguiendo entre irradiancia incidente e irradiancia efectiva (aquella que incorpora las pérdidas por suciedad e incidencia no perpendicular). Por ejemplo, las siguientes líneas de código calculan la irradiancia incidente y efectiva en un generador estático inclinado  $35^\circ$  y orientado hacia el Sur.

```
> AngGen <- fTheta(SolI, beta = 35)
> Inclin <- fInclin(CompI, AngGen)
```

Como ejemplo, en la figura 6 mostramos la relación entre la radiación efectiva y la radiación incidente frente al coseno del ángulo de incidencia para este sistema estático.

## 4. Productividad de un Sistema Fotovoltaico de Conexión a Red

A partir de los cálculos de radiación descritos la función `fProd` simula el funcionamiento de un Sistema Fotovoltaico de Conexión a Red (SFCR) tomando en consideración ciertos parámetros de su configuración (características del módulo y del inversor, configuración eléctrica del módulo y pérdidas en el sistema). Por ejemplo, las siguientes instrucciones calculan los parámetros principales del sistema bajo determinadas condiciones de radiación y temperatura ambiente.

```
> Inclin = data.frame(Gef = c(200, 400, 600, 800, 1000), Ta = 25)
> modulo = list(Vocn = 57.6, Iscn = 4.7, Vmn = 46.08, Imn = 4.35,
+   Ncs = 96, Ncp = 1, CoefVT = 0.0023, TONC = 47)
> generador = list(Nms = 12, Nmp = 11)
> inversor = list(Ki = c(0.01, 0.025, 0.05), Pinv = 25000, Vmin = 420,
+   Vmax = 750, Gumb = 20)
> EffSys = list(ModQual = 3, ModDisp = 2, OhmDC = 1.5, OhmAC = 1.5,
+   MPP = 1, TrafoMT = 1, Disp = 0.5)
> Prod <- fProd(Inclin, modulo, generador, inversor, EffSys)
> print(Prod)
```

	Gef	Ta	Tc	Voc	Isc	Vmpp	Impp	Vdc	Idc	Pac	Pdc	EffI
1	200	25	31.75	673.3	10.34	533.1	9.586	533.1	9.586	4212	4737	0.9164
2	400	25	38.50	655.4	20.68	516.3	19.090	516.3	19.090	8275	9137	0.9334
3	600	25	45.25	637.5	31.02	499.6	28.506	499.6	28.506	11972	13202	0.9346
4	800	25	52.00	619.7	41.36	483.0	37.824	483.0	37.824	15323	16936	0.9325
5	1000	25	58.75	601.8	51.70	466.5	47.037	466.5	47.037	18342	20342	0.9293

En primer lugar `fProd` calcula el punto MPP del generador ( $V_{mpp}$  e  $I_{mpp}$ ) en las condiciones de irradiancia y temperatura marcadas en `Inclin`. A continuación, comprueba que este punto se encuentre dentro de la ventana de búsqueda del MPP del inversor (determinada por los valores `inversor$Vmin` e `inversor$Vmax`). En caso de que el punto MPP calculado se encuentre fuera de estos márgenes, la función asigna el valor límite de la ventana y calcula el valor de corriente correspondiente. En esta situación, la función activa un aviso. En todo caso, la tensión y corriente de entrada al inversor son  $V_{dc}$  e  $I_{dc}$ :

```
> Inclin = data.frame(Gef = 800, Ta = 30)
> generador = list(Nms = 10, Nmp = 11)
> Prod <- fProd(Inclin, generador = generador)
> print(Prod)
```

	Gef	Ta	Tc	Voc	Isc	Vmpp	Impp	Vdc	Idc	Pac	Pdc	EffI
1	800	30	57	505.3	41.36	392.3	37.68	420	33.83	11943	13169	0.9346

En este caso concreto, las pérdidas debidas a la limitación en tensión del inversor son:

```
> with(Prod, Vdc * Idc / (Vmpp * Impp))

[1] 0.961
```

La función `prodSFCR` integra todos los cálculos de radiación (en el plano horizontal y en el plano inclinado) y la simulación del SFCR haciendo uso de todas las funciones anteriormente descritas. La siguiente secuencia de instrucciones calcula la productividad del mismo SFCR funcionando como estático, doble eje y con eje horizontal. Para el módulo, generador, inversor y pérdidas del sistema se utilizan los valores por defecto que incorpora la función `prodSFCR`.

```
> p <- xyplot(Beta ~ w, data = AngGenHoriz, type = "l")  
> print(p)
```

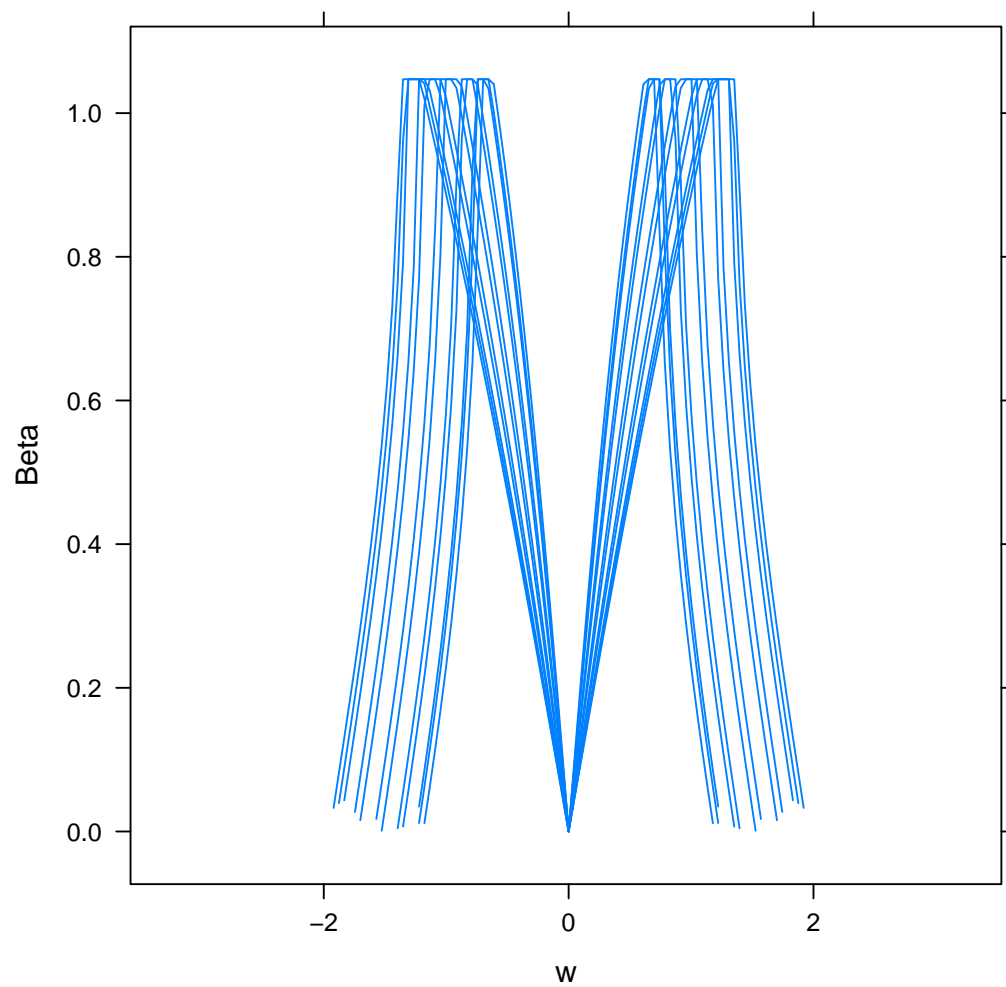


Figura 5: Evolución de la inclinación de un seguidor de eje horizontal con *backtracking* y limitación de ángulo.

```
> p <- xyplot(Gef/G ~ cosTheta, data = Inclín)  
> print(p)
```

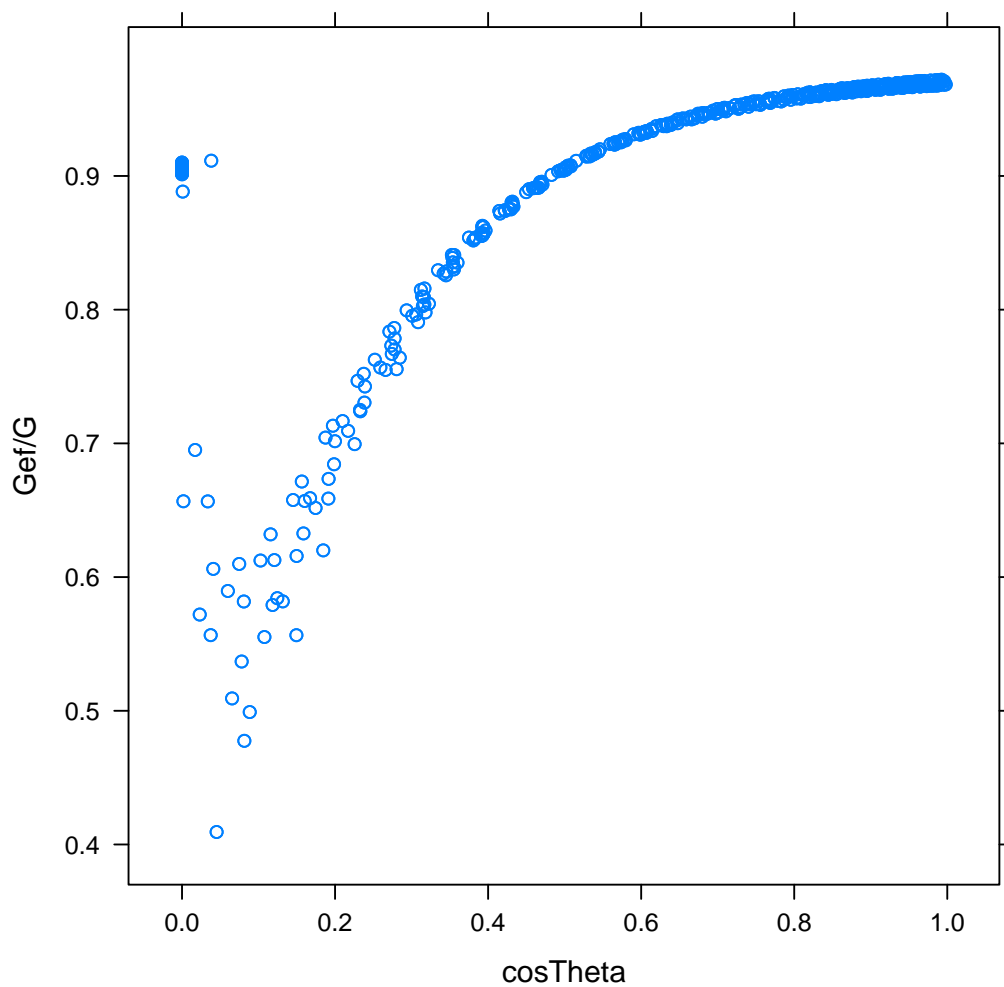


Figura 6: Relación entre la irradiancia efectiva y la incidente frente al coseno del ángulo de incidencia para un sistema estático.

```

> lat = 37.2
> G0dm = c(2766, 3491, 4494, 5912, 6989, 7742, 7919, 7027, 5369,
+ 3562, 2814, 2179)
> ProdEst <- prodSFCR(lat = lat, G0dm = G0dm)

  Eac Gef  GO  Yf  PR
1 38781 1970 1827 1466 0.7441

> Prod2x <- prodSFCR(lat = lat, G0dm = G0dm, modoSeg = "doble")

  Eac Gef  GO  Yf  PR
1 57561 2962 1827 2175 0.7346

> ProdHoriz <- prodSFCR(lat = lat, G0dm = G0dm, modoSeg = "horiz")

  Eac Gef  GO  Yf  PR
1 51255 2601 1827 1937 0.7448

```

La comparativa de funcionamiento se muestra en la figura 7.

#### 4.1. Influencia de las sombras

Uno de los factores a tener en cuenta en el funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos es el impacto de las sombras en los generadores. En este paquete se incluyen cinco funciones que calculan las sombras mutuas entre generadores pertenecientes a una misma planta. Estas funciones son `fSombra2X`, `fSombraHoriz`, `fSombraEst`, `fSombra6` y `fSombra`. Las tres primeras calculan las sombras en plantas de seguimiento a doble eje, eje horizontal y sistemas estáticos, respectivamente. La función `fSombra6` calcula las sombras en grupos de 6 seguidores de doble eje, permitiendo el cálculo de la sombra promedio de la planta. Finalmente, la función `fSombra` permite el uso de cualquiera de ellas de forma sencilla a través de su parámetro `modoSeg`. Por ejemplo, la siguiente secuencia calcula el sombreado en un seguidor de doble eje rodeado de otros cinco. Las dimensiones de la estructura del seguidor y la configuración en filas y columnas de la planta vienen recogidas en la lista `estruct`, mientras que las distancias entre seguidores están definidas en el `data.frame` `distancias`.

En este caso, dado que el `data.frame` `distancias` sólo contienen una fila, la función `fSombra6` construye una red simétrica de seguidores, situando en (0,0,0) el seguidor en estudio. Esta misma red se podría haber construido con:

```

> distancias = data.frame(Leo = c(-40, 0, 40, -40, 40), Lns = c(30,
+ 30, 30, 0, 0), H = 0)
> FactorSombra2 <- fSombra6(AngGen, distancias, estruct, prom = FALSE)
> identical(FactorSombra, FactorSombra2)

[1] TRUE

```

Además de este caso trivial, el `data.frame` `distancias` puede definir una cuadrícula irregular alrededor del seguidor problema. Dado que este seguidor está en (0,0,0) `distancias` debe tener 5 filas.

Cuando `prom=TRUE`, a partir de la distribución de seguidores en la planta (`Nfilas` y `Ncol`), se obtiene una media ponderada del sombreado en el conjunto completo.

El uso de estas funciones está integrado en la función `prodSFCR`, tal y como muestran los siguientes ejemplos:

```

> Prod2xSombra <- prodSFCR(lat = lat, G0dm = G0dm, modoSeg = "doble",
+ modoSombra = "area", distancias = data.frame(Leo = 40, Lns = 40,
+ H = 0))

  Eac Gef  GO  Yf  PR
1 55759 2871 1827 2107 0.734

> estruct = list(L = 4.83)
> distancias = data.frame(Leo = estruct$L * 4, H = 0)
> ProdHorizSombra <- prodSFCR(lat = lat, G0dm = G0dm, Nm = 6, modoSeg = "horiz",
+ modoSombra = "area", BetaLim = 60, distancias = distancias,
+ estruct = estruct)

  Eac Gef  GO  Yf  PR
1 48013 2442 1833 1815 0.7431

> ProdHorizBT <- prodSFCR(lat = lat, G0dm = G0dm, Nm = 6, modoSeg = "horiz",
+ modoSombra = "bt", BetaLim = 60, distancias = distancias,
+ estruct = estruct)

  Eac Gef  GO  Yf  PR
1 47770 2431 1833 1805 0.7428

```

```

> ComparePac <- data.frame(doble = Prod2x$I$Pac, horiz = ProdHoriz$I$Pac,
+   est = ProdEst$I$Pac, w = ProdEst$I$w, Mes = ProdEst$I$Mes)
> p <- xyplot(doble + horiz + est ~ w | Mes, data = ComparePac,
+   type = "l", auto.key = list(space = "right"), ylab = "Pac")
> print(p)

```

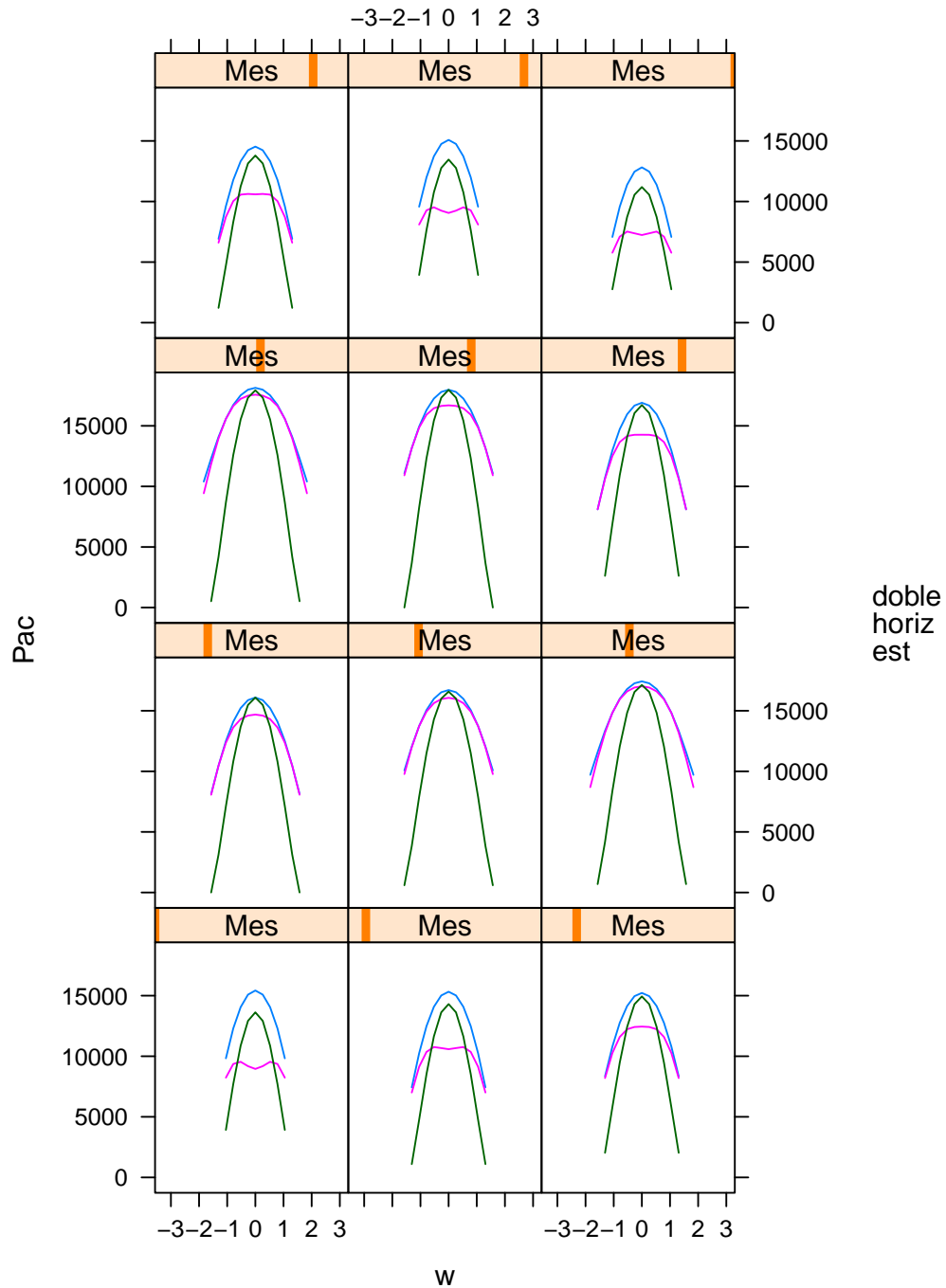


Figura 7: Comparativa de funcionamiento entre sistemas de seguimiento

```

> distancias = data.frame(Leo = 40, Lns = 30, H = 0)
> estruct = list(W = 23.11, L = 9.8, Nfilas = 2, Ncol = 8)
> FactorSombra <- fSombra6(AngGen, distancias, estruct, prom = FALSE)
> p <- xyplot(FS ~ w, groups = Mes, data = FactorSombra, type = "l",
+   auto.key = list(space = "right"))
> print(p)

```

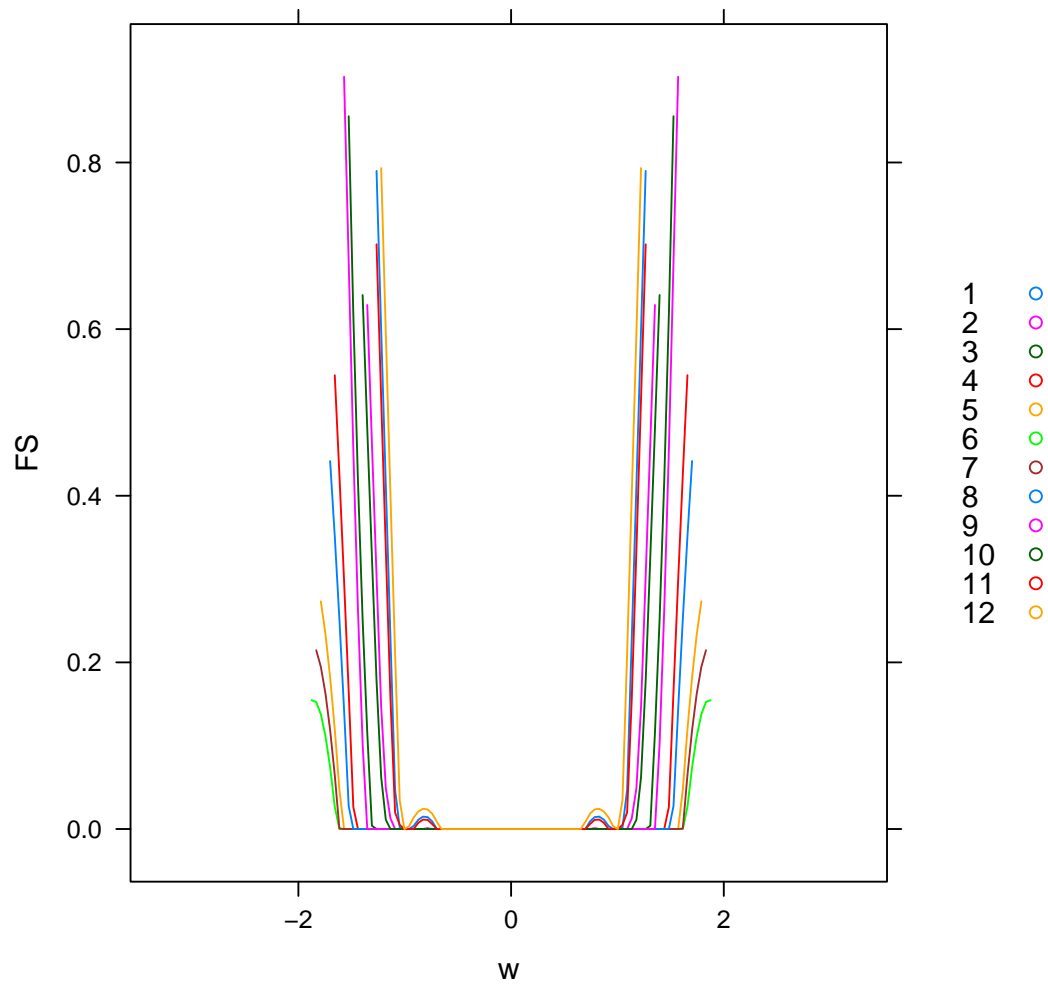


Figura 8: Sombreado en una planta de seguimiento a doble eje.

## 4.2. Ubicación de seguidores en una planta

El efecto de las sombras descrito en el apartado anterior exige separar los elementos que componen una planta fotovoltaica. Por una parte, una mayor separación disminuye las pérdidas por sombreado mutuo y aumenta la productividad del sistema. Pero por otra aumentan los costes relacionados con el área ocupada por unidad de potencia y aumentan los costes relacionados con los elementos de unión entre estructuras (cableado, canalizaciones, zanjas). Por tanto, la separación óptima entre elementos (seguidores o estructuras estáticas) es aquella que conduce al mínimo valor del coste de la energía producida por el sistema.

Este paquete incluye una función llamada `optimSombra` diseñada para calcular el efecto del sombreado mutuo en un conjunto de posibles separaciones entre elementos. El consiguiente conjunto de resultados combina la productividad (Yf) y la ocupación de terreno (ROT) para cada una de las posibles separaciones. El diseñador deberá tomar la decisión oportuna a partir de este conjunto de resultados efectuando las traducciones económicas que considere necesarias.

Supongamos un sistema de seguimiento de eje horizontal sin *backtracking* con un seguidor de 4,83 m de altura. Nos interesa estudiar las separaciones comprendidas entre 2 y 5 veces esta dimensión. Además, analizaremos el funcionamiento limitando el ángulo de inclinación del seguidor:

```
> estruct = list(L = 4.83)
> distancias = list(Leo = estruct$L * c(2, 5))
> Sombra12Horiz <- optimSombra(lat = lat, G0dm = G0dm, modoSeg = "horiz",
+   BetaLim = 60, distancias = distancias, res = 2, estruct = estruct,
+   modoSombra = "area", prog = FALSE)

  Eac Gef  GO  Yf  PR
1 50649 2569 1827 1914 0.7451
Sin Sombras
  Eac Gef  GO  Yf  PR
1 50649 2569 1827 1914 0.7451
Sombreado
  Leo H  ROT  FS  Yf
1  9.66 0 2.000 0.12760 1670
2 11.66 0 2.414 0.09938 1724
3 13.66 0 2.828 0.08324 1755
4 15.66 0 3.242 0.07024 1780
5 17.66 0 3.656 0.06057 1798
6 19.66 0 4.070 0.05224 1814
7 21.66 0 4.484 0.04537 1827
8 23.66 0 4.899 0.04077 1836

> class(Sombra12Horiz)

[1] "sombra"
```

Vemos que el resultado de `optimSombra` tiene clase “sombra”. Para esta clase `solaR` incorpora un método denominado `plot.sombra` que permite representar gráficamente los resultados (figura 9).

Realicemos los cálculos para un sistema estático (figura 10):

```
> estruct = list(L = 5)
> distancias = list(D = estruct$L * c(1, 3))
> Sombra12Est <- optimSombra(lat = lat, G0dm = G0dm, modoSeg = "est",
+   modoSombra = "area", distancias = distancias, res = 1, estruct = estruct,
+   prog = FALSE)

  Eac Gef  GO  Yf  PR
1 38781 1970 1827 1466 0.7441
Sin Sombras
  Eac Gef  GO  Yf  PR
1 38781 1970 1827 1466 0.7441
Sombreado
  D H ROT  FS  Yf
1  5 0 1.0 0.1255597 1282
2  6 0 1.2 0.0658792 1369
3  7 0 1.4 0.0325527 1418
4  8 0 1.6 0.0128210 1447
5  9 0 1.8 0.0048035 1459
6 10 0 2.0 0.0027450 1462
7 11 0 2.2 0.0017665 1463
8 12 0 2.4 0.0009584 1464
9 13 0 2.6 0.0005200 1465
10 14 0 2.8 0.0003195 1465
11 15 0 3.0 0.0001193 1466
```

Por último, supongamos que queremos ubicar un seguidor de 23,11 m de ancho y 9,8 m de alto en una planta. Nos interesa configurar esta planta en una red de 2 filas y 8 columnas.

```
> estruct = list(W = 23.11, L = 9.8, Nfilas = 2, Ncol = 8)
```

Probaremos las separaciones comprendidas entre 30 m y 50 m para la dirección E-O y entre 20 m y 50 m para la dirección N-S.



```
> plot(Sombra12Horiz)
```

```
NULL
```

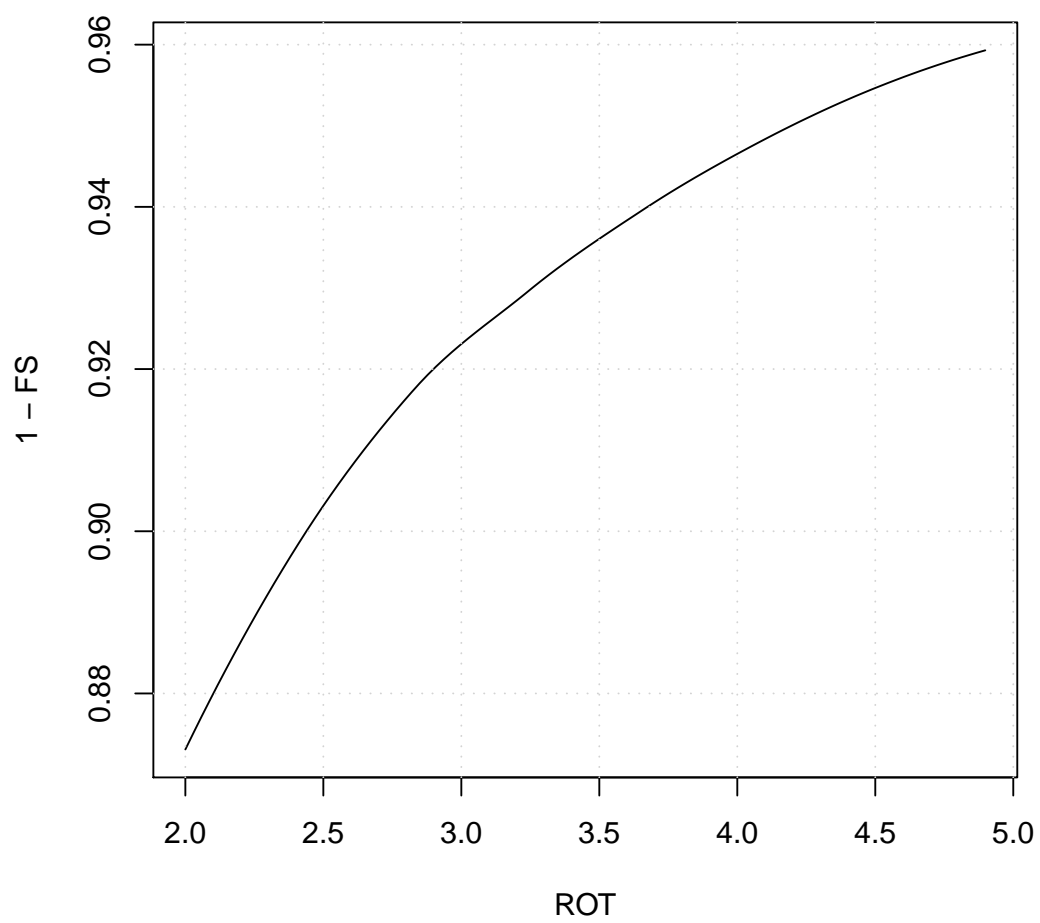


Figura 9: Sombreado mutuo en una planta de seguimiento de eje horizontal sin backtracking

```
> plot(Sombra12Est)
```

```
NULL
```

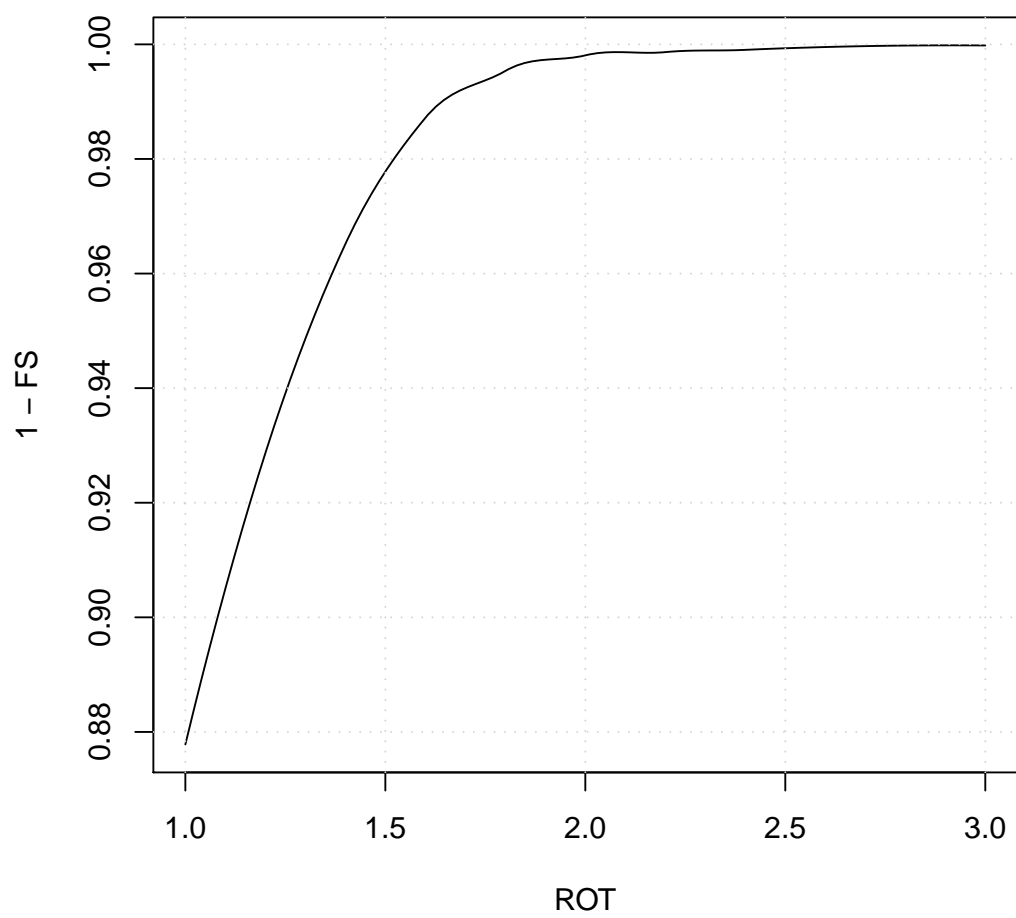


Figura 10: Sombreado mutuo en una planta con estructuras estáticas

```
> distancias = list(Leo = c(30, 50), Lns = c(20, 50))
```

Obtenemos los resultados con una resolución de 5 m con la siguiente instrucción:

```
> SombraM2x <- optimSombra(lat = lat, G0dm = G0dm, modoSeg = "doble",
+   modoSombra = c("area", "prom"), distancias = distancias,
+   res = 5, prog = FALSE)
```

```
      Eac Gef  GO  Yf  PR
1 57561 2962 1827 2175 0.7346
```

```
Sin Sombras
```

```
      Eac Gef  GO  Yf  PR
1 57561 2962 1827 2175 0.7346
```

```
Sombreado
```

```
      Leo Lns H  ROT  FS  Yf
1 30 20 0 2.649 0.09228 1975
2 35 20 0 3.091 0.07858 2005
3 40 20 0 3.532 0.06840 2027
4 45 20 0 3.974 0.06108 2043
5 50 20 0 4.415 0.05597 2054
6 30 25 0 3.312 0.05695 2052
7 35 25 0 3.864 0.04499 2078
8 40 25 0 4.415 0.03527 2099
9 45 25 0 4.967 0.02821 2114
10 50 25 0 5.519 0.02325 2125
11 30 30 0 3.974 0.05007 2067
12 35 30 0 4.636 0.03858 2092
13 40 30 0 5.299 0.02976 2111
14 45 30 0 5.961 0.02303 2125
15 50 30 0 6.623 0.01815 2136
16 30 35 0 4.636 0.04775 2072
17 35 35 0 5.409 0.03626 2097
18 40 35 0 6.182 0.02755 2116
19 45 35 0 6.954 0.02122 2129
20 50 35 0 7.727 0.01675 2139
21 30 40 0 5.299 0.04694 2073
22 35 40 0 6.182 0.03531 2099
23 40 40 0 7.065 0.02638 2118
24 45 40 0 7.948 0.02004 2132
25 50 40 0 8.831 0.01578 2141
26 30 45 0 5.961 0.04637 2075
27 35 45 0 6.954 0.03480 2100
28 40 45 0 7.948 0.02596 2119
29 45 45 0 8.941 0.01965 2133
30 50 45 0 9.935 0.01535 2142
31 30 50 0 6.623 0.04600 2075
32 35 50 0 7.727 0.03447 2100
33 40 50 0 8.831 0.02572 2120
34 45 50 0 9.935 0.01951 2133
35 50 50 0 11.039 0.01522 2142
```

```
> summary(SombraM2x$S)
```

```
      Leo      Lns      H      ROT      FS
Min.   :30  Min.   :20  Min.   :0  Min.   : 2.65  Min.   :0.0152
1st Qu.:35  1st Qu.:25  1st Qu.:0  1st Qu.: 4.53  1st Qu.:0.0221
Median :40  Median :35  Median :0  Median : 5.96  Median :0.0345
Mean   :40  Mean   :35  Mean   :0  Mean   : 6.18  Mean   :0.0366
3rd Qu.:45  3rd Qu.:45  3rd Qu.:0  3rd Qu.: 7.73  3rd Qu.:0.0467
Max.   :50  Max.   :50  Max.   :0  Max.   :11.04  Max.   :0.0923

      Yf
Min.   :1975
1st Qu.:2074
Median :2100
Mean   :2096
3rd Qu.:2127
Max.   :2142
```

## 5. Funcionamiento de sistemas fotovoltaicos de bombeo

### 5.1. Modelado de bombas centrífugas

El primer paso a dar para analizar el funcionamiento de un sistema fotovoltaico de bombeo es caracterizar la bomba centrífuga en unas condiciones de altura manométrica constante (suposición de funcionamiento en estos sistemas). Empleamos la función `fBomba` para analizar el funcionamiento de una bomba SP8A44 (<http://net.grundfos.com/App1/WebCAPS/InitCtrl?mode=1>) trabajando a una altura manométrica de  $H = 40$  m. La información sobre esta bomba la extraemos de `CoefBomba`:

```
> data(CoefBomba)
> CoefSP8A44 <- subset(CoefBomba, Qn == 8 & Etapas == 44)
> fSP8A44 <- fBomba(Bomba = CoefSP8A44, H = 40)
```

```
> plot(SombraM2x)
```

NULL

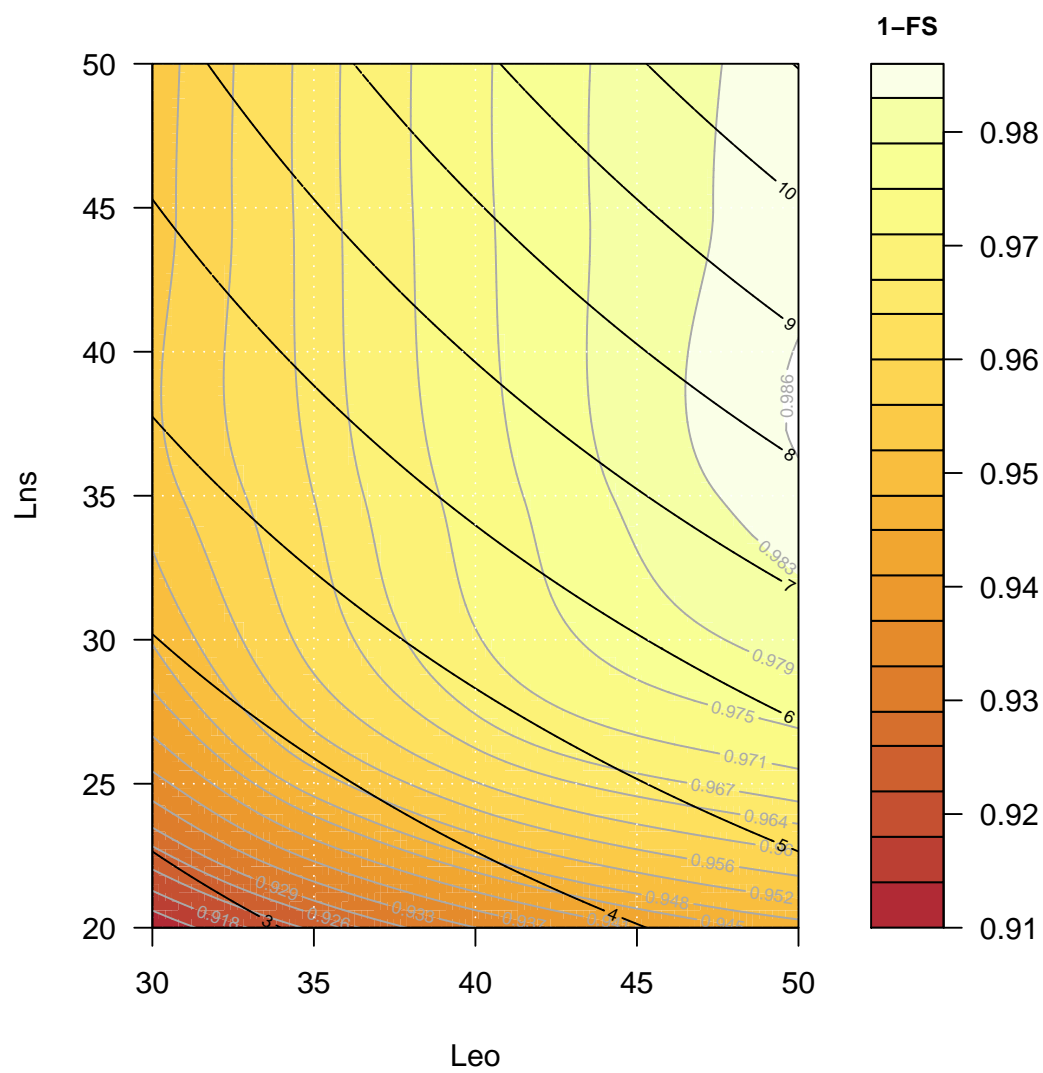


Figura 11: Sombreado mutuo en una planta de seguimiento a doble eje

El resultado de `fBomba` es un conjunto de funciones que relacionan, en un rango de funcionamiento determinado por la bomba, la potencia mecánica e hidráulica, el caudal y la frecuencia con la potencia eléctrica de entrada. Con estas funciones es posible calcular estos parámetros de funcionamiento para cualquier valor de potencia eléctrica que esté comprendido dentro del rango de funcionamiento (figuras 12 y 13):

```
> SP8A44 = with(fSP8A44, {
+   Pac = seq(lim[1], lim[2], by = 100)
+   Pb = fPb(Pac)
+   etam = Pb/Pac
+   Ph = fPh(Pac)
+   etab = Ph/Pb
+   f = fFrecuencia(Pac)
+   Caudal = fCaudal(Pac)
+   result = data.frame(Caudal, Pac, Pb, Ph, etam, etab, f)
+ })
> SP8A44$etamb = with(SP8A44, etab * etam)
```

## 5.2. Nomogramas de sistemas fotovoltaicos de bombeo

En las licitaciones públicas de esta aplicación es de uso común la norma internacional IEC 61725. Este texto define el perfil de irradiancia a partir de la duración del día, la irradiación diaria y el valor máximo de irradiancia. A partir de este perfil se puede calcular el funcionamiento de un sistema fotovoltaico de bombeo para diferentes alturas manométricas y un conjunto de potencias de generador fotovoltaico. Al representar las combinaciones posibles en un gráfico de doble entrada se obtiene una herramienta que ayuda a la selección de la mejor combinación de bomba y generador en unas condiciones de radiación y altura. Este tipo de gráficos se obtienen con la función `NmgSFB`. Por ejemplo, generemos un nomograma (figura 14) para la bomba SP8A44 trabajando en un rango de alturas desde 50 a 80 metros, alimentada por diferentes potencias de generador fotovoltaico.

Debe señalarse que los resultados obtenidos con este método son diferentes a los que resultan de procedimientos basados en otro tipo de perfiles de irradiancia, como los explicados anteriormente.

## 5.3. Productividad de sistemas fotovoltaicos de bombeo

Otro enfoque diferente consiste en simular el funcionamiento del sistema empleando el mismo itinerario de cálculo que hemos recorrido con los sistemas de conexión a red. Si allí empleamos la función `prodSFCR` ahora nos serviremos de la función `prodSFB`. Los parámetros de entrada de esta función son muy parecidos a aquella, salvo las pertinentes diferencias en la definición del inversor. En esta función no están habilitadas las opciones de seguimiento ni cálculo de sombra. Nuevamente con la bomba SP8A44, calculemos el caudal que proporcionará este sistema con un generador de 5500 Wp contra una altura manométrica de 50 metros.

```
> lat = 37.2
> G0dm = c(2766, 3491, 4494, 5912, 6989, 7742, 7919, 7027, 5369,
+ 3562, 2814, 2179)
> Bomba = list(Qn = 8, Etapas = 44)
> prodSP8A44 <- prodSFB(lat, G0dm, Bomba = Bomba, H = 50, Pg = 5500)

  Eac  Gef   G0      Q   Yf  Qn
1 8327 1970 1827 24087 1514 4379

> print(prodSP8A44$D)

$diario
NULL

$mensual
  Mes  Eac  Gef   G0      Q   Yf  Qn
1   1 18.20 4.195 2.766 54.01 3.310 9.820
2   2 19.72 4.685 3.491 58.40 3.586 10.618
3   3 22.22 5.176 4.494 64.45 4.041 11.718
4   4 25.18 5.955 5.912 72.37 4.578 13.157
5   5 26.74 6.383 6.989 76.69 4.862 13.944
6   6 27.94 6.721 7.742 79.73 5.081 14.496
7   7 29.15 7.038 7.919 82.35 5.301 14.972
8   8 28.60 6.876 7.027 80.56 5.201 14.646
9   9 25.50 6.028 5.369 72.56 4.636 13.192
10  10 19.11 4.537 3.562 56.92 3.474 10.349
11  11 18.04 4.152 2.814 53.62 3.279 9.748
12  12 14.44 3.277 2.179 43.32 2.625 7.877

$anual
  Eac  Gef   G0      Q   Yf  Qn
1 8327 1970 1827 24087 1514 4379
```

```
> p <- xyplot(etam + etab + etamb ~ Pac, data = SP8A44, type = "l")  
> print(direct.label(p, method = "top.points"))
```

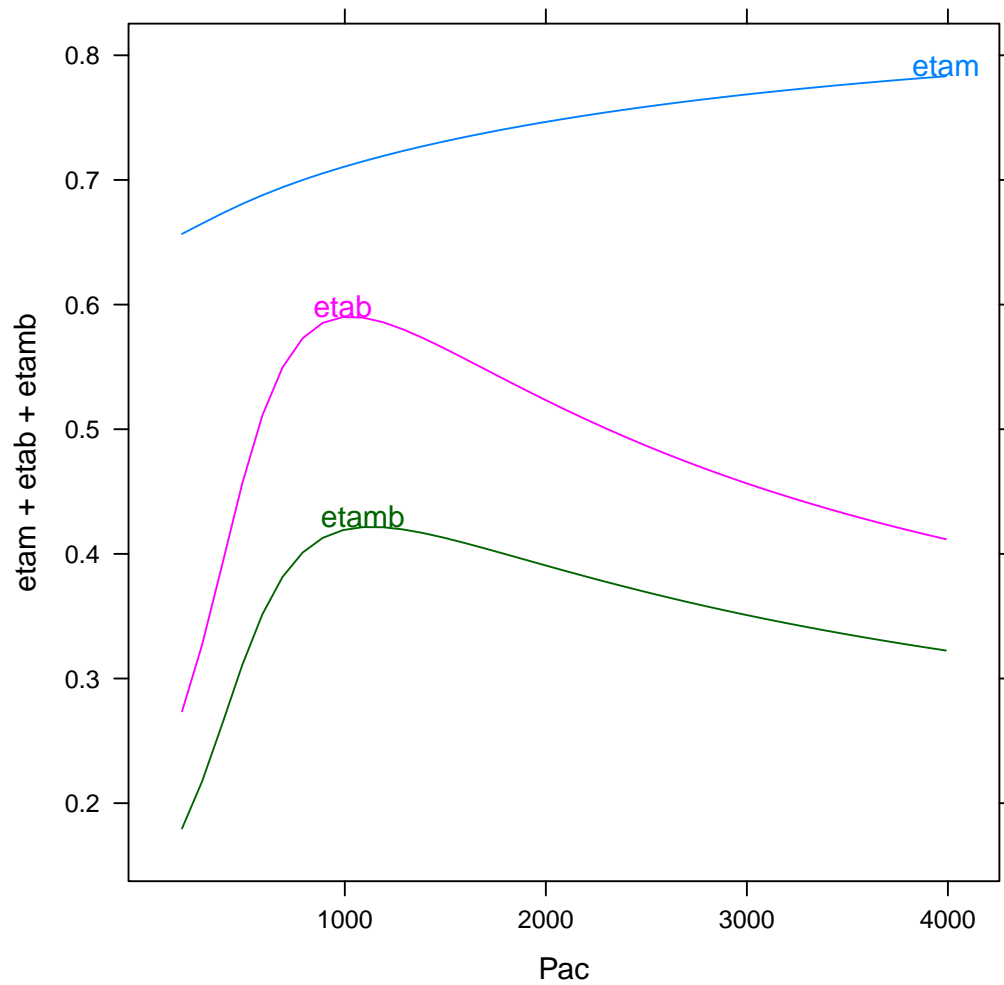


Figura 12: Eficiencia de motor, bomba y motobomba para diferentes valores de potencia eléctrica de una bomba SP8A44 trabajando a una altura manométrica de  $H = 40$  m

```
> p <- xyplot(Pb + Ph ~ Pac, data = SP8A44, type = "l")  
> print(direct.label(p))
```

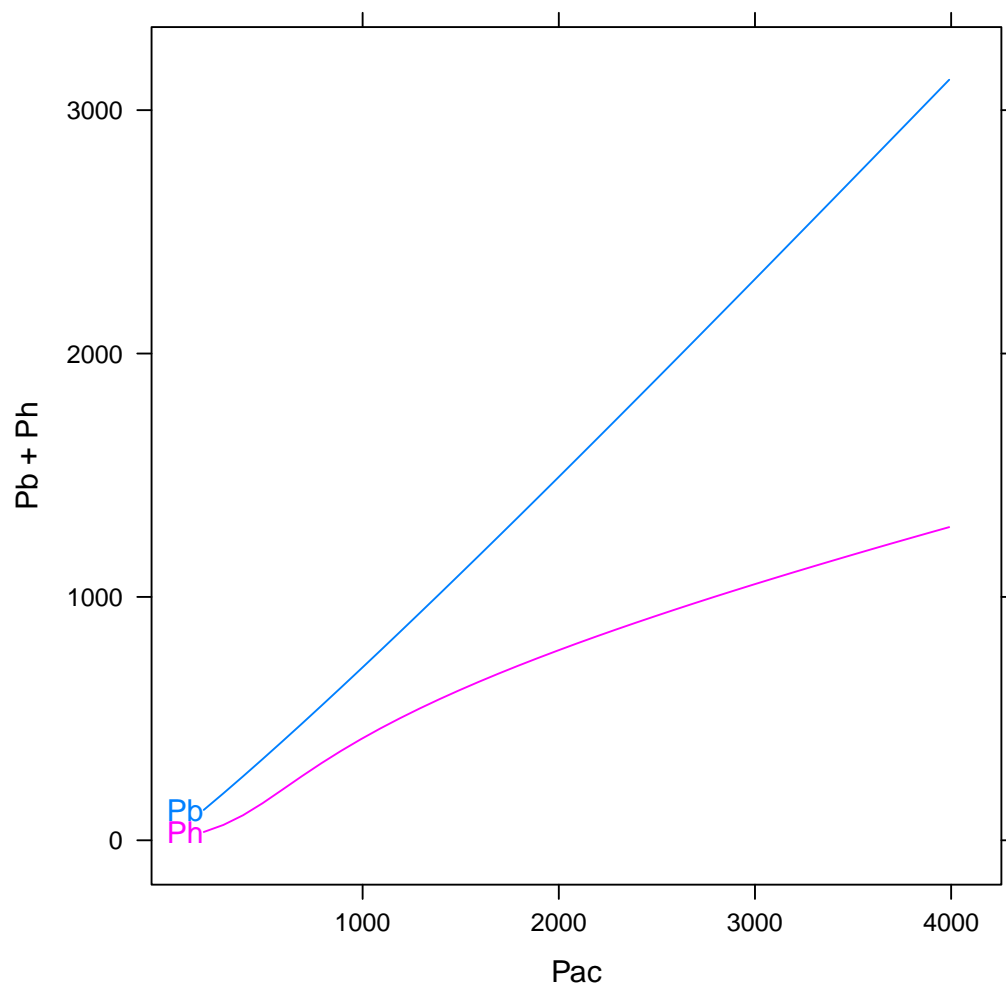


Figura 13: Potencia mecánica e hidráulica frente a la potencia eléctrica de una bomba SP8A44 trabajando a una altura manométrica de  $H = 40$  m

```

> Pg = seq(3000, 5500, by = 500)
> H = seq(60, 80, by = 5)
> Bomba = list(Qn = 8, Etapas = 44)
> NmgSP8A44 <- NmgSFB(Bomba = Bomba, Pg = Pg, H = H, Gd = 6000)
> print(NmgSP8A44$dibujos)

```

### ccion de Potencia de Generador para bomba SP8A44 y Gd 6 kWh

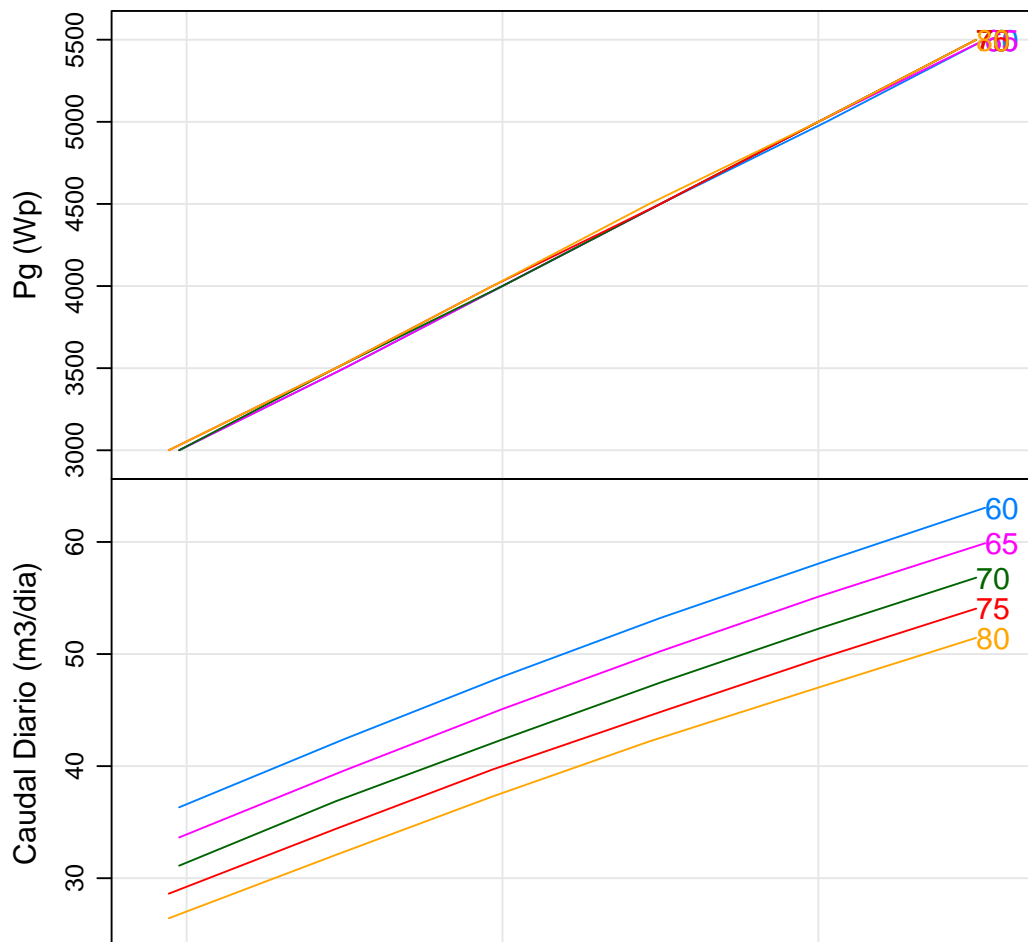


Figura 14: Nomograma para la bomba SP8A44 trabajando en un rango de alturas desde 50 a 80 metros, alimentada por diferentes potencias de generador fotovoltaico



La relación entre el caudal y la irradiancia efectiva queda recogido en la figura 15. Supongamos que deseamos extraer más caudal con esta bomba y ampliamos el generador fotovoltaico hasta una potencia de 7000 Wp. Podemos comprobar que, dado el rango de funcionamiento de la bomba, la decisión no es muy acertada. La productividad ( $Y_f$ ) y el caudal normalizado a la potencia ( $Q_n$ ) han descendido respecto de la otra configuración. Observando la gráfica correspondiente (figura 16) comprobamos que en los meses centrales del año, en los momentos de alta irradiancia la bomba alcanza su caudal y frecuencia máximas, y el variador de frecuencia ordena el paro del sistema.

```
> prodSP8A44Lim <- prodSFB(lat, G0dm, Bomba = Bomba, H = 50, Pg = 7000)
```

	Eac	Gef	G0	Q	Yf	Qn
1	9760	1970	1827	27176	1394	3882

## 6. Líneas futuras

En versiones posteriores este paquete incorporará funciones que permitan el análisis estadístico de plantas fotovoltaicas, en la línea de lo expuesto en mi artículo:

“Statistical analysis of the performance and simulation of a two-axis tracking PV system”, Solar Energy, 83 (11). pp. 2074-2085 ([http://oa.upm.es/1843/1/PERPINAN\\_ART2009\\_01.pdf](http://oa.upm.es/1843/1/PERPINAN_ART2009_01.pdf)).

```
> p <- xyplot(Q ~ Gef | Mes, type = "l", data = prodSP8A44$I)
> print(p)
```

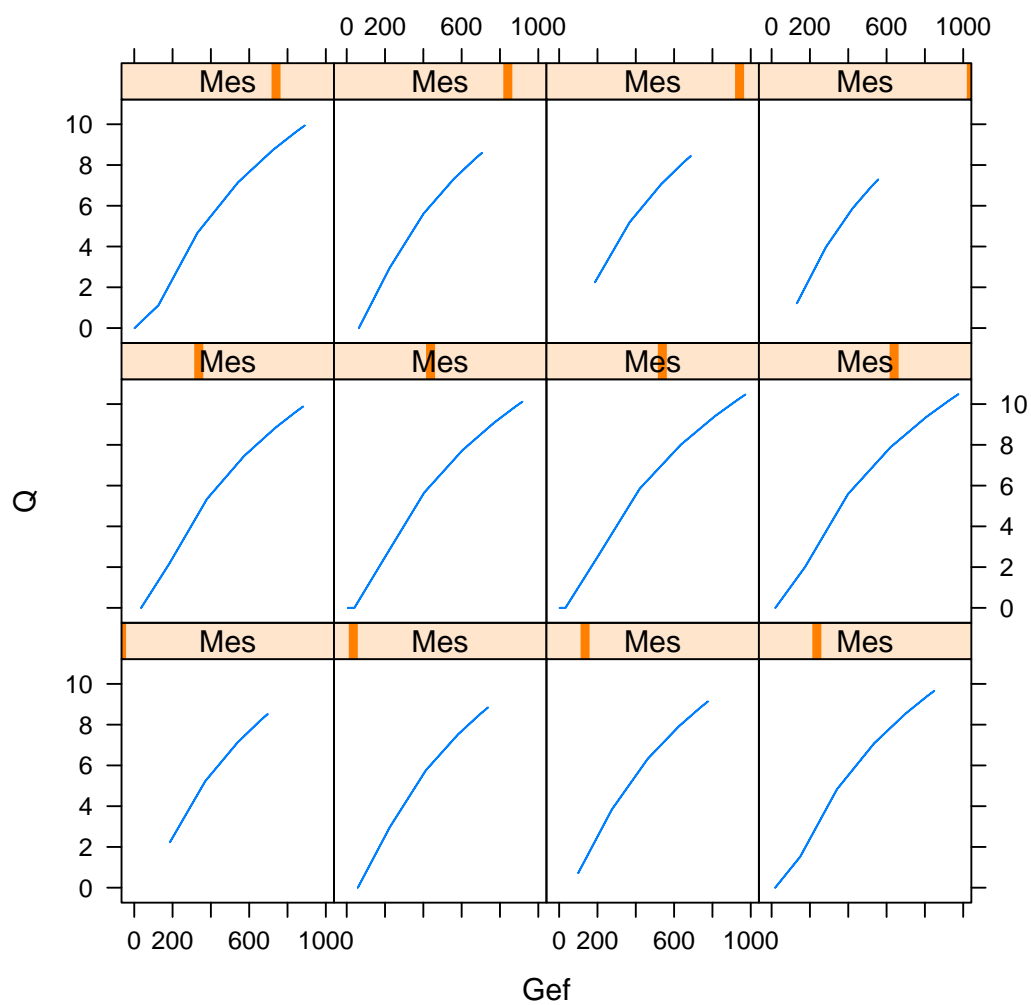


Figura 15: Caudal frente a irradiancia de un sistema basado en la bomba SP8A44 con un generador de 5500 Wp contra una altura manométrica de 50 metros

```
> p <- xyplot(Q ~ Gef | Mes, type = "l", data = prodSP8A44Lim$I)
> print(p)
```

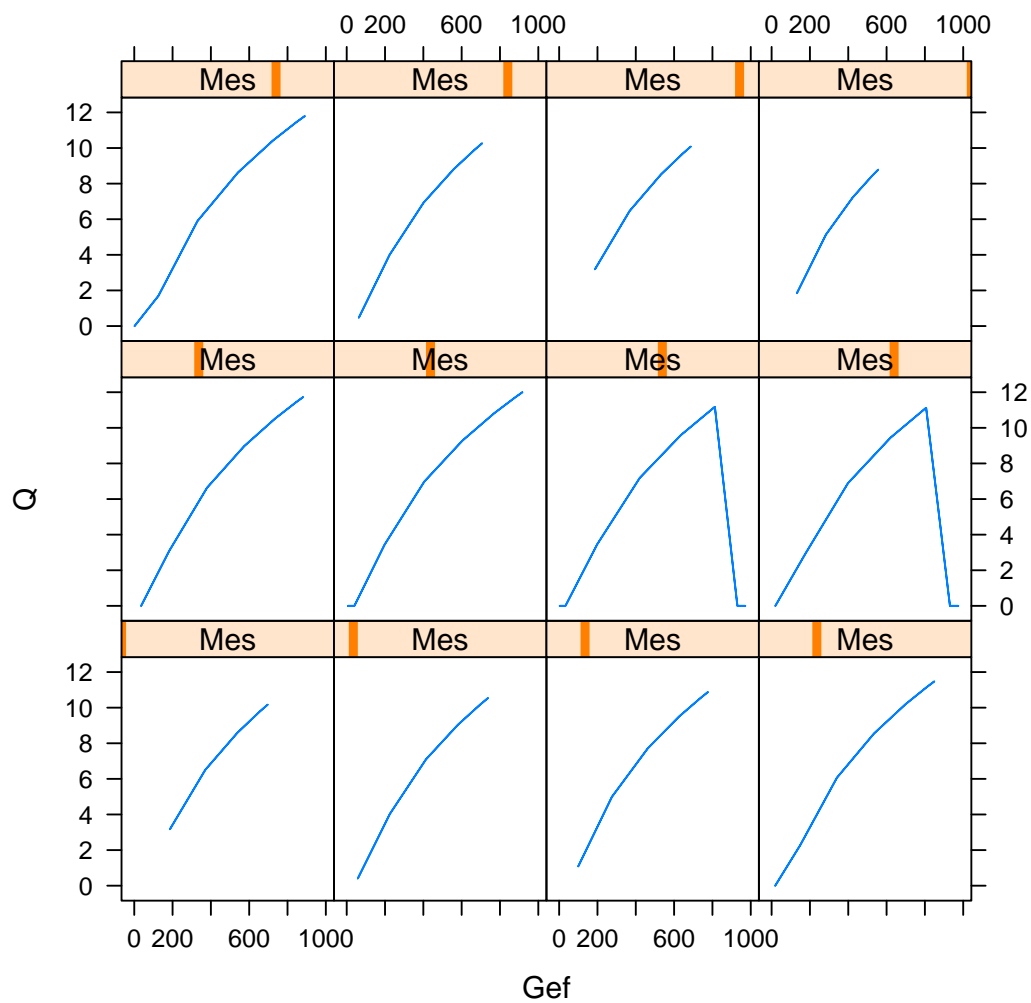


Figura 16: Caudal frente a irradiancia de un sistema basado en la bomba SP8A44 con un generador de 5500 Wp contra una altura manométrica de 50 metros