



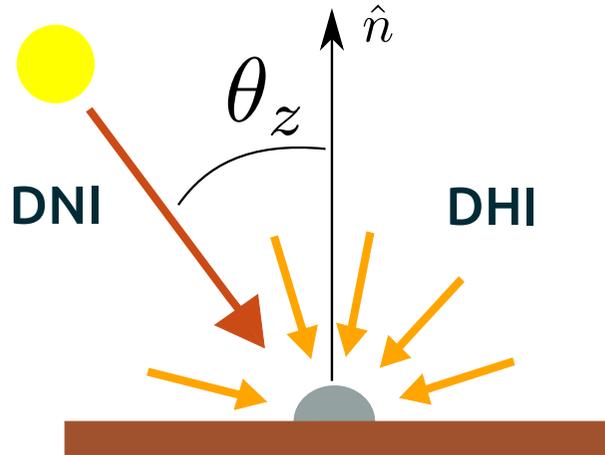
Unidad 3: Separación radiación directa y difusa

A: Variables adimensionadas

B: Modelos de separación



La irradiancia global sobre plano horizontal es la suma de las dos componentes (directa y difusa):



global horizontal

difusa horizontal

$$G_h = G_{bh} + G_{dh} = G_b \cos \theta_z + G_{dh} \quad \text{ecuación de clausura}$$

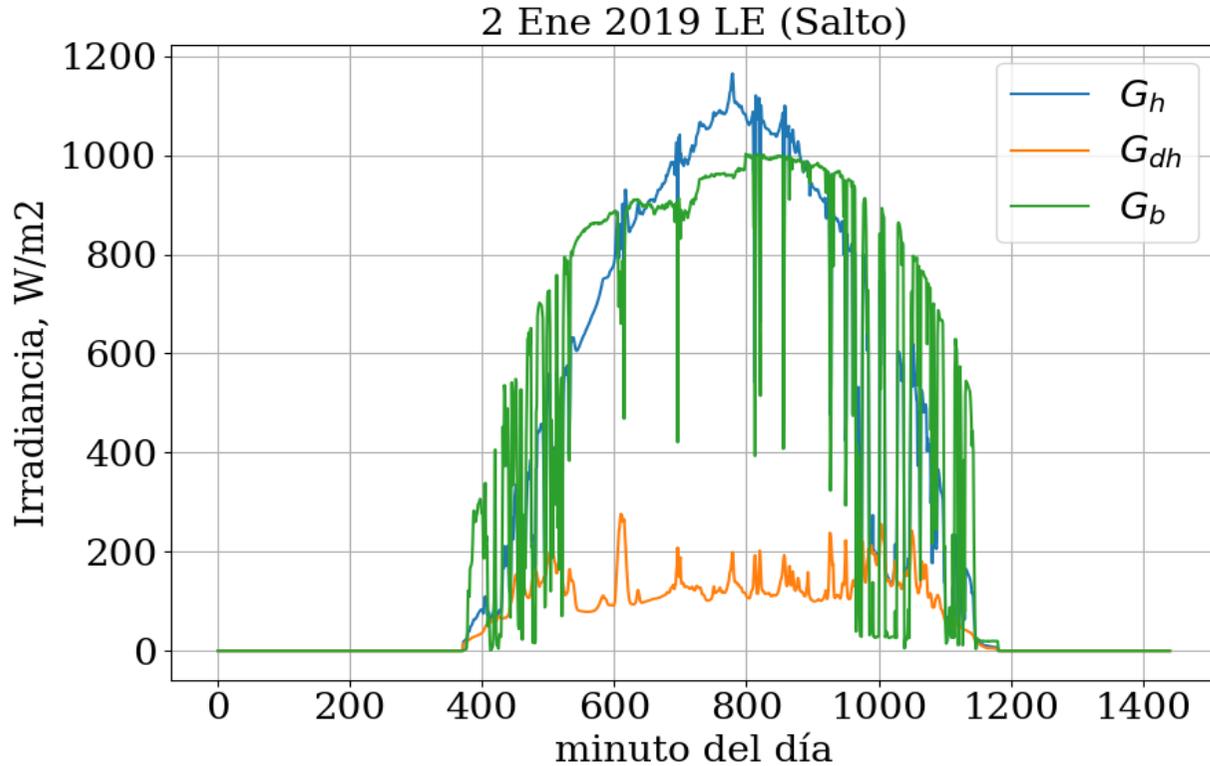
directa en
plano horizontal

directa en
incidencia normal



Variables adimensionadas

Las variables dimensionadas tienen fuerte dependencia temporal, parte de la cual es debida a la variación del ángulo cenital a lo largo del día





Las normalizamos, dividiendo entre la correspondiente variable a nivel TOA

$$k_t = \frac{G_h}{G_s F_n \cos \theta_z}$$

índice de claridad

$$k_d = \frac{G_{dh}}{G_s F_n \cos \theta_z}$$

índice de claridad
difuso

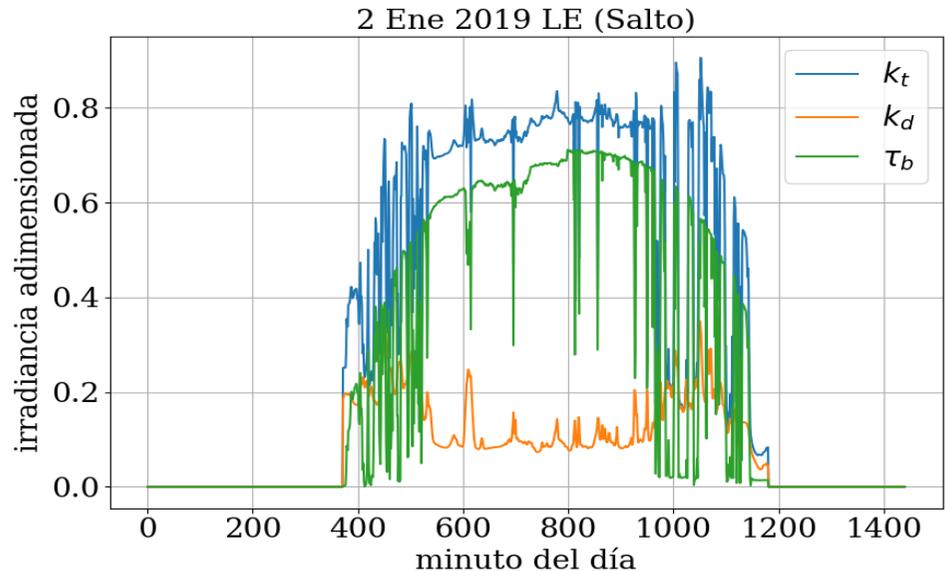
$$\tau_b = \frac{G_b}{G_s F_n}$$

transmitancia directa

clausura:

$$k_t = \tau_b + k_d$$

normalización
válida a nivel
horario o subhorario



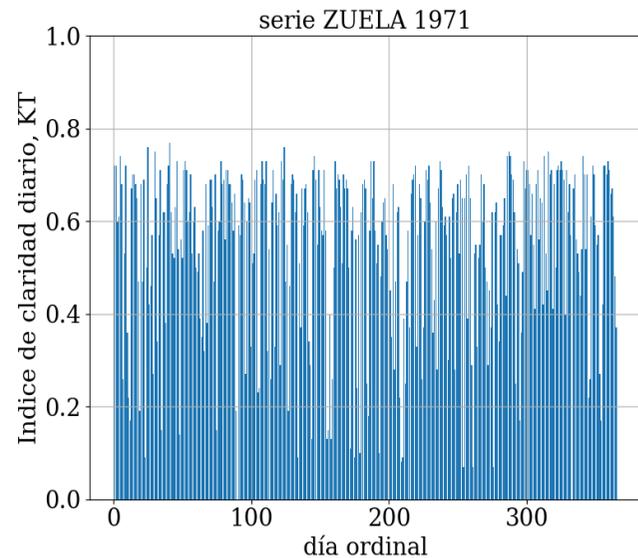
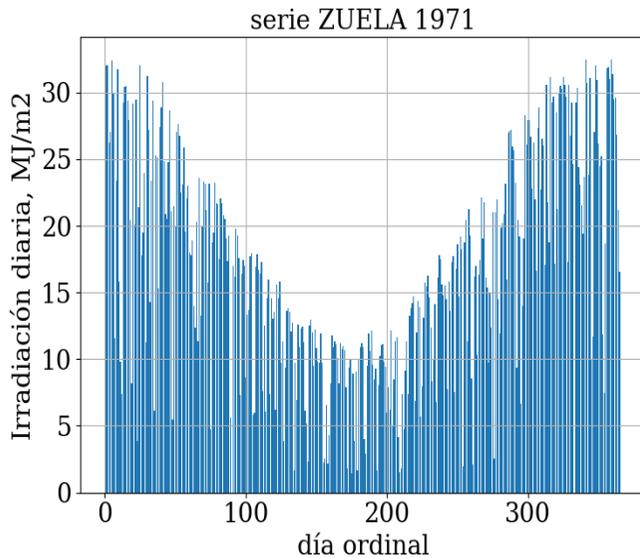


$$K_T = \frac{H_h}{H_{0h}}$$

H_{0h} es la irradiación diaria TOA en P.H.:

$$H_{0h} = \frac{24}{\pi} I_s F_n (\cos \delta \cos \phi \sin \omega_s + \omega_s \sin \delta \sin \phi)$$

en la serie adimensionada se reduce apreciablemente la dependencia estacional de una serie diaria



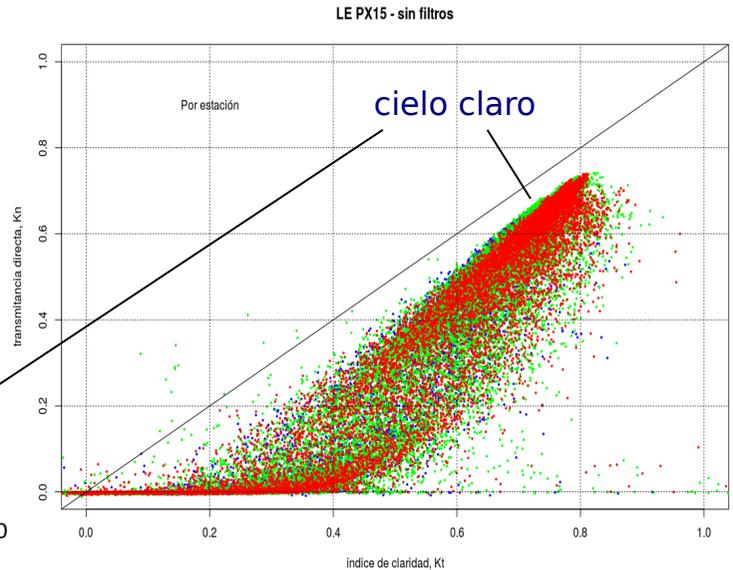
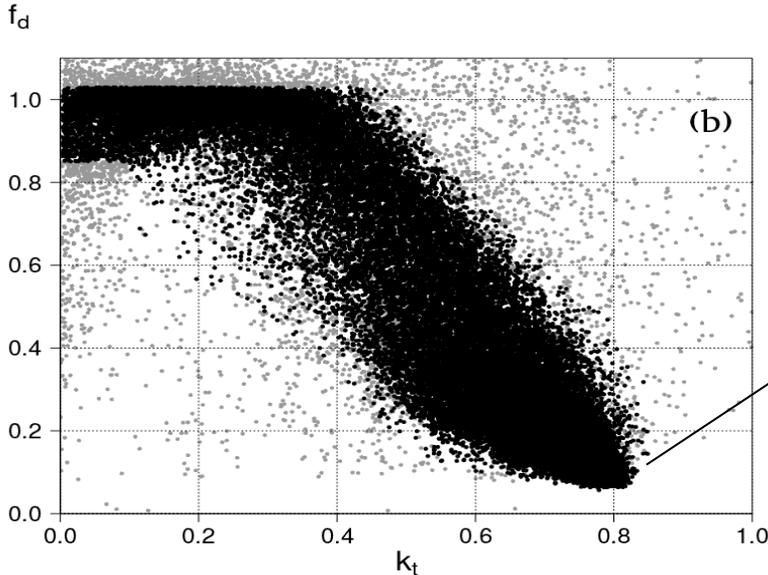
datos de serie histórica de La Estanzuela (INIA - Colonia)



La fracción difusa es la fracción de irradiancia (o irradiación) global que es difusa

fracción difusa horaria o subhoraria $f_d \equiv \frac{G_{dh}}{G_h}$

También se puede definir a nivel diario:
 $F_d \equiv \frac{H_{dh}}{H_h}$ fracción difusa diaria





Unidad 3: Separación radiación directa y difusa

A: Variables adimensionadas

B: Modelos de separación



Sirven para estimar G_{dh} y G_b a partir de información de G_h y otras variables. En general son el paso previo al transporte a plano inclinado. Contribuyen a la incertidumbre de la estimación del recurso sobre un plano inclinado.

- **Modelos de separación:** vinculan en forma fenomenológica la fracción difusa (f_d) con la radiación global y otras variables disponibles.

$$\begin{array}{ccc} G_h, f_d & \xrightarrow{f_d = \frac{G_{dh}}{G_h}} & G_{dh} = f_d G_h \quad G_b = \frac{1 - f_d}{\cos \theta_z} G_h \\ \text{medido o} & & \\ \text{estimado satelital} & & \\ \text{modelo de} & & \\ \text{separación} & & \\ G_h = G_b \cos \theta_z + G_{dh} & & \end{array}$$

- Son **modelos de carácter local**, no existen modelos "universales".
- La **escala temporal** (minutal, horaria, diaria, media mensual), es parte relevante del modelo.
- **Caracterización** de cientos de modelos (a nivel minutal) para varias zonas climáticas mundiales: C. A. Gueymard, J.A. Ruiz-Arias, Solar Energy 128, 2016, 1-30 preprint disponible en http://les.edu.uy/FRS/extras/Gueymard_RA_Difusa_SE2015.pdf
- **Caracterización** de 10 modelos (a nivel horario) y dos a nivel diario y mensual para Uruguay y la región vecina: G. Abal et al, Solar Energy 141 (2017) 166-181. Preprint disponible en http://les.edu.uy/papers/SE2016_diffuse-fraction-models.pdf

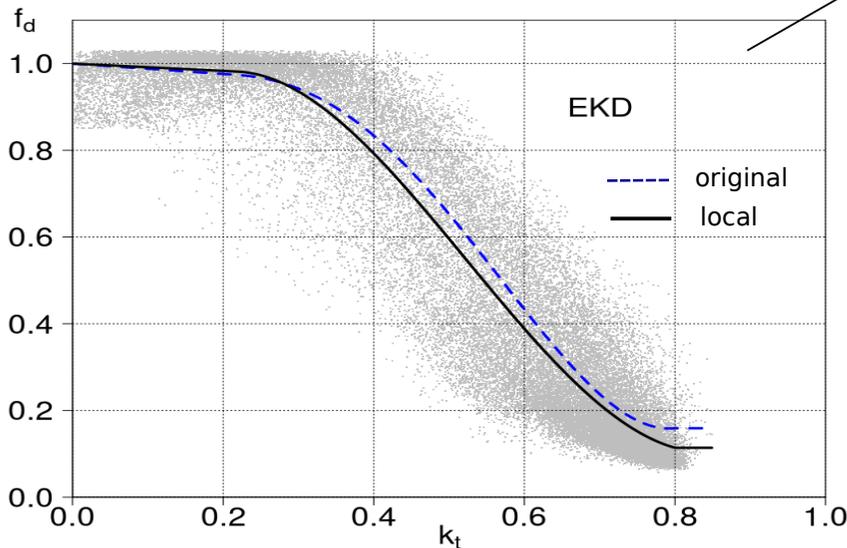
Describiremos parte de este último trabajo, presentando algunos modelos de separación (horaria, diaria y media mensual) para Uruguay y caracterizando su desempeño.



Erbs, Klein y Duffie, Solar Energy, 28 (1982), p. 293 (polinómico, a intervalos)

$$f_d = \begin{cases} 1 + a_1 k_t & k_t < k_a & k_a = 0.22 \\ b_0 + b_1 k_t + b_2 k_t^2 + b_3 k_t^3 + b_4 k_t^4 & k_a \leq k_t \leq k_b & k_b = 0.80 \\ c_0 & k_t > k_b. \end{cases}$$

depende solo del índice de claridad



Abal et al. SE141 2017, 166

EKD	Original	local
a_1	-0.09	-0.09
b_0	0.95	0.60
b_1	-0.16	3.97
b_2	4.39	-11.74
b_3	-16.64	7.76
b_4	12.34	-0.28
c_0	0.17	0.11

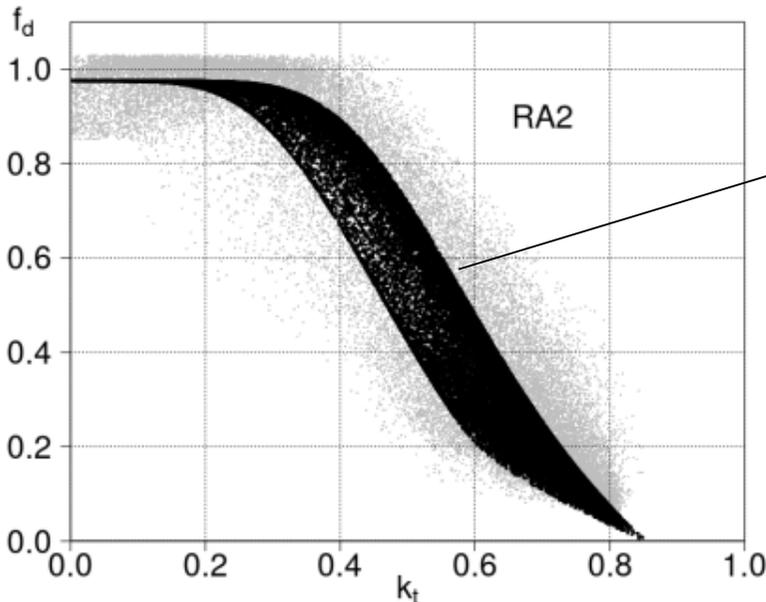


Ruiz-Arias et al. Energy Conversion and Management, 51:881-893, 2010

función doble exponencial o Gompertz:

depende del índice de claridad y de la masa de aire (RA2 y RA2s)

$$\begin{aligned}
 \text{(RA1)} \quad f_d &= a_0 - a_1 \exp \left[- \exp (a_2 + a_3 k_t) \right] \\
 \text{(RA2s)} \quad f_d &= a_0 - a_1 \exp \left[- \exp (a_2 + a_3 k_t + a_4 m) \right] \\
 \text{(RA2)} \quad f_d &= a_0 - a_1 \exp \left[- \exp (a_2 + a_3 k_t + a_4 m \right. \\
 &\quad \left. + a_5 k_t^2 + a_6 m^2) \right],
 \end{aligned}$$



cubre una zona en el diagrama

Coefficientes:
Abal et al. SE141 2017, 166

modelo	tipo	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
RA1	original	0.95	-1.04	2.30	-4.70	-	-	-
RA2s	original	0.98	-1.02	2.88	-5.59	-0.11	-	-
RA2	original	0.94	-1.54	2.81	-5.76	2.28	-0.13	0.01
RA1	local	0.97	-1.01	3.07	-6.17	-	-	-
RA2s	local	0.97	-1.11	3.38	-5.84	-0.13	-	-
RA2	local	0.98	-1.24	3.47	-5.71	0.32	-0.25	0.02





Ridley, Boland, Lauret (RBL), Renewable Energy, 35:478-483, 2010.

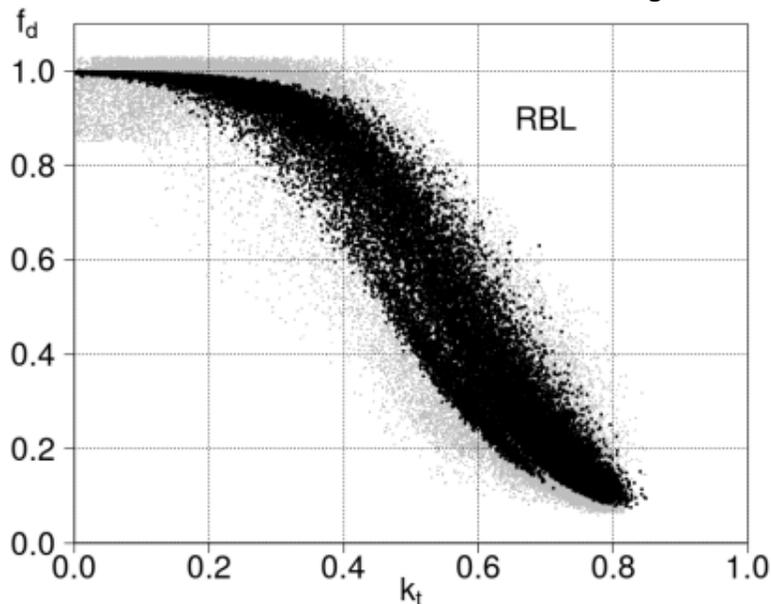
Modelo multivariable, de mejor desempeño, no operacional (incluye información futura).

$$f_d = \frac{1}{1 + \exp(a_0 + a_1 k_t + a_2 T_s + a_3 \alpha_s + a_4 K_t + a_5 \psi)}$$

tiempo solar, horas
altura solar, grados
índice de claridad diario

función logística o sigmoide

persistencia: $\psi(j) = \frac{1}{2} (k_t(j-1) + k_t(j+1))$



modelo	tipo	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
RBL	original	-5.38	6.63	0.01	-0.01	1.75	1.31
RBL	local	-5.60	7.63	0.01	-0.01	1.12	2.06

Abal et al. SE141 2017, 166

modelo mas complejo de implementar, mejora marginalmente a RA2s





modelo	original		localmente ajustado	
	rMBD (%)	rRMSD (%)	rMBD (%)	rRMSD (%)
EKD	7.9	23.6	1.2	21.9
RA1	-2.2	23.2	0.5	21.8
RA2s	-3.2	21.0	0.7	19.5
RA2	-4.5	21.8	-2.2	19.5
RBL	7.6	20.7	1.3	18.1

indicadores sobre 40995 datos horarios (post filtrado) para Uruguay y la región (Abal et al. SE141 2017, 166). Relativos a la media $\langle f_d \rangle = 0.47$

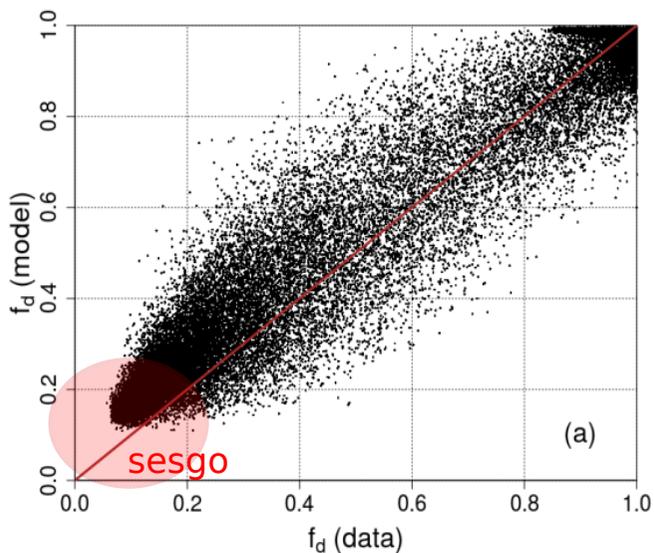
- ajuste local disminuye el sesgo (bias) apreciablemente
- incerteza típica en torno a 20% (localmente ajustado)
- mejor modelo: RBL con 1% sesgo y 18% rRMSD

mejor balance entre simplicidad y desempeño: modelo RA2s con <1% sesgo y <20% rRMSD.

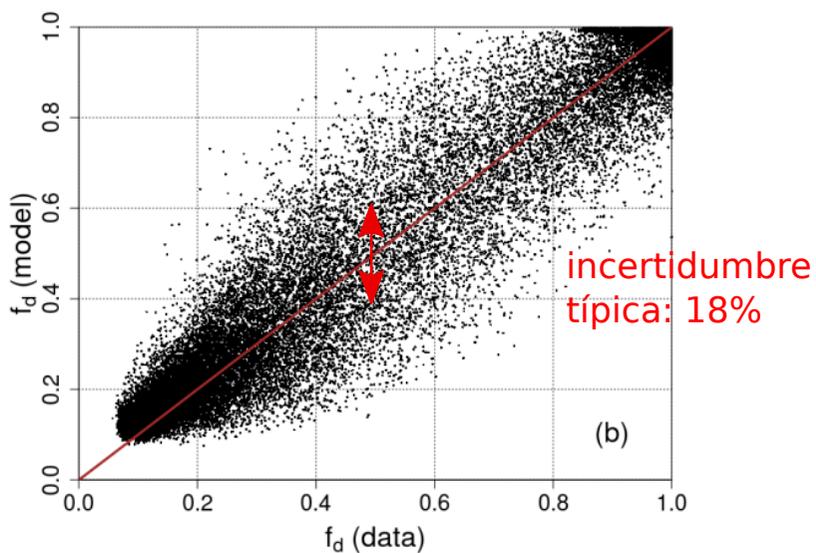


Diagramas de dispersión: f_d modelada vs medida para modelo RBL

original



localmente ajustado

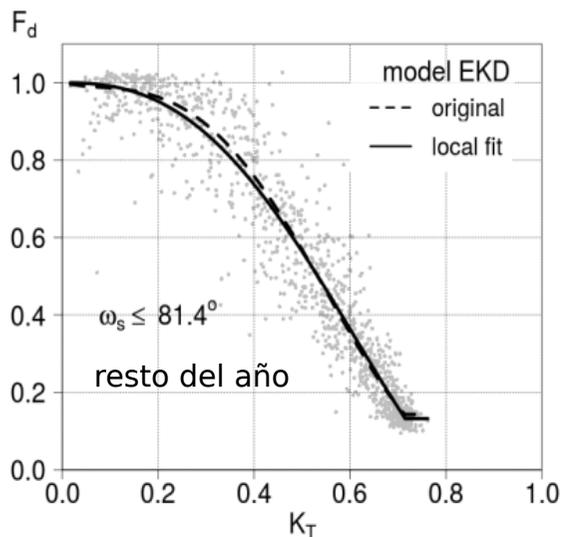


Abal et al. SE141 2017, 166

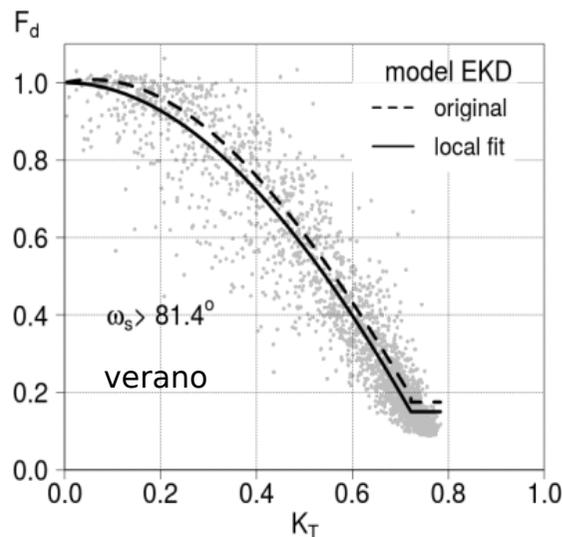


Se relaciona el índice de claridad diario con la fracción difusa diaria:

$$F_d = \begin{cases} 1 + A_1 K_T + A_2 K_T^2 + A_3 K_T^3 + A_4 K_T^4 & K_T < 0,715 \\ B_0 & K_T \geq 0,715 \end{cases} \quad F_d = \frac{H_{dh}}{H_h}$$



(a) Para $\omega_s \leq 81,4^\circ$.



(b) Para $\omega_s > 81,4^\circ$.

Para 3385 días en UY y la región, con $\langle F_d \rangle = 0.46$ (Abal et al., SE 141, 2017, 166).



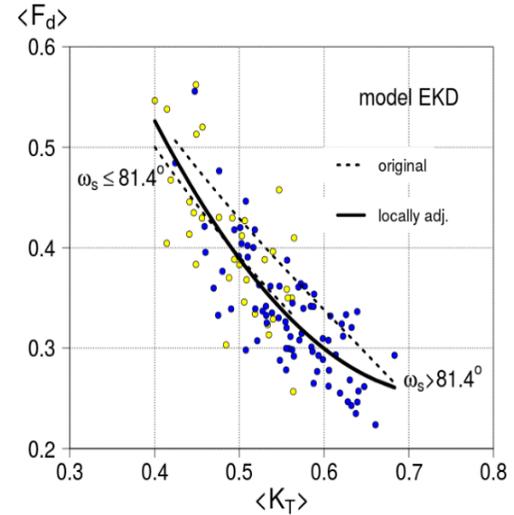
Para el promedio mensual diario,

$$\bar{F}_d = A_0 + A_1 \bar{K}_T + A_2 \bar{K}_T^2 + A_3 \bar{K}_T^3$$

con

$$\bar{F}_d = \frac{\bar{H}_{dh}}{\bar{H}_h} \quad \bar{K}_T = \frac{\bar{H}_h}{\bar{H}_{0h}}$$

siendo \bar{H}_h , \bar{H}_{dh} y \bar{H}_{0h} los promedios diarios para cada mes.



sobre 112 meses
con $\langle F_d \rangle = 0.36$

Coefficientes (Abal et al., SE 141, 2017, 166)

restricción	modelo	tipo	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	B_0
$\omega_s \leq 81,4^\circ$	original	diario	1	-0.27	2.45	-11.95	9.39	0.14
	ajustado	diario	1	0	-0.46	-4.50	3.89	0.13
	original	mensual	1.39	-3.56	4.19	-2.14	-	-
$\omega_s > 81,4^\circ$	original	diario	1	0.28	-2.56	0.85	0	0.18
	ajustado	diario	1	0	-1.88	0.34	0	0.15
	original	mensual	1.31	-3.02	3.43	-1.82	-	-
no hay	ajustado	mensual	1.58	-3.67	2.68	-0.19	-	-

el modelo local
promedio diario
no tiene dependencia
estacional..





tipo	rMBD (%)		rRMSD (%)	
	original	ajustado	original	ajustado
diario	5.5	0.4	20.6	19.7
mensual	7.0	0.0	16.1	12.8

- el ajuste local reduce el sesgo significativamente
- la incertidumbre a nivel diario es similar a la de nivel horario: 20 %
- la incertidumbre a nivel de promedios mensuales (ajustados) cae a 13 %

por más detalles: Notas del curso o Abal et al., SE 141, 2017, 166.

Fin de la unidad 3

A continuación:
Unidad 4 - Modelos de transporte de
irradiancia a plano inclinado.