

QUALIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA RADIAÇÃO DIRETA, DIFUSA E GLOBAL EM DIFERENTES LOCALIDADES DO BRASIL E ARGENTINA

¹Olga de Castro Vilela, ^{1,2}Manoel H. O. Pedrosa Filho, ³João F. Escobedo, ³Alexandre Dal Pai, ⁴Germán Salazar, ⁵Carlos Raichjk, ⁵Raul Righini, ⁵Hugo Grossi, ¹Naum Fraidenraich

¹Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE Brasil.

²Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Pesqueira, Pesqueira-PE, Brasil.

³Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Campus Botucatu, Botucatu-SP, Brasil.

⁴Universidad Nacional de Salta, Salta-ARG.

⁵Universidad Nacional de Luján, Luján-ARG.

RESUMEN: Este trabajo se describe el desarrollo de un software que permite aplicar filtros físicos y estadísticos a un conjunto de datos iniciales obtenidos en dos localidades de Argentina y dos de Brasil. A partir de esto tratamientos, fueron calculadas correlaciones entre los valores de la radiación difusa, directa y global en esas localidades. Las correlaciones fueron obtenidas para las relaciones k_d vs k_t y k_n vs k_t . Los indicadores estadísticos elegidos muestran que esas relaciones presentan buena calidad pudiendo ser utilizadas para representar el comportamiento de las variables medidas. Comparando las relaciones entre sí se obtuvieron diferencias pequeñas, lo que indica que las diferencias climáticas entre las localidades no las afectan.

Palabras-clave: Calidad, Radiación Solar, Correlación, difusa, directa, global.

NOMENCLATURA

I_d – irradiância difusa, medida com um piranômetro sombreado, em W/m^2 .

I_b – irradiância direta no plano horizontal, em W/m^2 .

I_{bn} – irradiância direta, medida com um pireliômetro, em W/m^2 .

I_h – irradiância global, medida com um piranômetro, em W/m^2 .

I_{hc} – irradiância global estimada para a condição de céu claro, em W/m^2 , (Rigollier et al. 2000).

I_{dc} – irradiância difusa estimada para a condição de céu claro, em W/m^2 , (Rigollier et al. 2000).

I_{dov} – irradiância difusa estimada para a condição de céu completamente encoberto, em W/m^2 , calculada com a expressão $I_{dov} = 572 \cdot \alpha$ (Page 1997), α é a altitude solar em radianos.

k_t – índice de claridade instantâneo. $k_t = I_b/I_{oh}$

k_d – fração da radiação difusa contida na radiação global. $k_d = I_d/I_h$

k_n – transmitância da radiação direta, calculada com a expressão $k_n = I_{bn}/I_h$

k_b – fração da radiação direta contida na radiação global. $k_b = I_b/I_h$

INTRODUÇÃO

A determinação da intensidade da radiação solar incidente em um coletor na superfície terrestre depende de fatores determinísticos, decorrentes da geometria Sol - Terra e estocásticos, provenientes das condições atmosféricas, traduzidas por meio do índice de claridade k_t . A complexidade dos fenômenos que afetam a radiação em sua passagem através da atmosfera constitui o principal problema para uma quantificação realística da energia disponível para utilização.

A utilização de distintos modelos para a avaliação da disponibilidade energética representa o elevado grau da necessidade de considerações empíricas acerca do problema. Esses modelos estão inseridos em algumas categorias, ou em uma combinação delas, dependendo de sua utilização como, por exemplo, modelos baseados nas condições de transmissão atmosférica e modelos para estimar a

intensidade das radiações direta e difusa a partir da intensidade da radiação total incidente no plano horizontal (Duffie e Beckman 1991).

As correlações mais importantes utilizadas com radiação solar são: a de Ångström-Prescott a qual relaciona a fração da radiação global que atinge a superfície terrestre k_t (razão entre radiação global e a do topo da atmosfera) com a razão de insolação (número de horas de brilho e fotoperíodo) e utiliza a medida do número de horas de brilho solar para estimar a radiação global; a de Liu e Jordan relaciona a razão das radiações difusa e global ou a direta na horizontal e a global por meio dos índices radiométricos K_d e K_{dh} em função de K_t e utiliza a medida da radiação global para estimar as radiações difusa ou a direta na horizontal (Escobedo et al. 2007).

Neste sentido, o presente estudo teve como objetivo avaliar a aplicação de filtros de qualidade da radiação solar, utilizando dados coletados na Área de Testes do grupo de Fontes Alternativas de Energia – FAE, da Universidade Federal de Pernambuco e comparar resultados experimentais através da relação entre os valores medidos de irradiância difusa (I_d), irradiância direta (I_b) e total horizontal (I_h) obtidos em diferentes localidades a saber: Recife-PE, Botucatu-SP, Luján e Salta (Argentina). Isto possibilitou a elaboração de equações do comportamento instantâneo e horário das relações (I_d/I_h) e (I_b/I_h) em função do índice de claridade K_t calculado.

METODOLOGIA

As medições foram realizadas, utilizando-se a instrumentação e durante os períodos descritos na Tabela 1.

Localidade	Período	Instrumentação
Recife-PE	2010 – 2014	1 Eppley PSP para global, 1 Eppley NIP para direta, 1 Rastreador Eppley, datalogger CR-1000
Botucatu-SP	2011 – 2014	1 Eppley PSP para global, 1 Eppley PSP com banda de sombra para difusa
Salta – ARG	2012 – 2014	1 Eppley PSP para global, 1 Eppley NIP para direta, 1 Rastreador Eppley, datalogger CR-1000
Luján-ARG	2011 – 2012	1 Kipp & Zonen CMP11 para global, 1 Eppley “Black and White” com “shadow ball” para difusa, 1 Eppley NIP para direta, 1 Rastreador Kipp & Zonen SOLYS 2, datalogger CR-1000

Tabela 1. Sítios, períodos temporais e tipo de instrumentação utilizada em cada sítio.

Um software foi desenvolvido com o objetivo de tratar os dados brutos coletados pelo data-logger. Este consiste inicialmente em uma rotina que faz a varredura dos arquivos originais “.dat” identificando campos de dados como: data, hora, temperatura, umidade, radiação global, radiação difusa, radiação direta, radiação UV. A partir desta identificação preliminar, uma segunda rotina realiza os cálculos referentes à geometria solar com o objetivo de permitir a determinação do k_t , k_d , k_b e k_n . Uma terceira rotina foi implementada para a obtenção dos valores de radiação de céu claro utilizando o modelo ESRA (Rigollier et al. 2000) com o objetivo de permitir a realização de filtros físicos nos dados brutos.

O resultado final do processamento deste software consiste em uma tabela de dados a cada minuto, que contém, além dos valores de radiação, informações que permitem a realização de filtros físicos

para a qualificação dos dados, possibilitando também a sua inserção em sistemas de bancos de dados, o que permite a realização de cruzamento de informações com, por exemplo, medidas espectrais e a obtenção mais rápida de dados integrados horários, diários e mensais.

O programa computacional elaborado com o objetivo de verificar a qualidade dos dados de irradiância global, direta e difusa por meio da aplicação de filtros de dados utiliza dois tipos de filtros: filtros físicos, que consideram os valores possíveis das variáveis analisadas; filtros estatísticos, baseados no desvio padrão dos dados em todas as faixas de k_t (índice de claridade). Os filtros utilizados foram baseados nos trabalhos de (Raichijk 2012) e (Maxwell et al. 1993).

Alguns filtros foram adicionados posteriormente durante a análise dos dados:

- $I_b > 0$ - Evitar valores negativos da radiação direta.
- $95\% [I_h - I_{bn} \cdot \cos(\theta_z)] < I_d < 105\% [I_h - I_{bn} \cdot \cos(\theta_z)]$, verificar a consistência entre as medidas da radiação difusa, global e direta.
- $I_{bn} > 10 \text{ W/m}^2$, evitar erros de medida da radiação direta provocados pela parada do rastreador (ainda está sendo avaliada se esta solução é realmente eficaz na detecção deste evento).
- $95\% (k_b + k_d) < k_t < 105\% (k_b + k_d)$, verificar a consistência entre os valores k_t , k_b e k_d (Maxwell et al. 1993).

RESULTADOS DA APLICAÇÃO DOS FILTROS PARA A CIDADE DE RECIFE

Uma avaliação preliminar das medições realizadas é obtida através da comparação entre a irradiância difusa medida com piranômetro e sombreador, e a difusa obtida como a diferença entre a irradiância global (medida com piranômetro) e a direta (medida com pireliômetro). Para esta última, considera-se a componente incidente no plano horizontal (Figura 1).

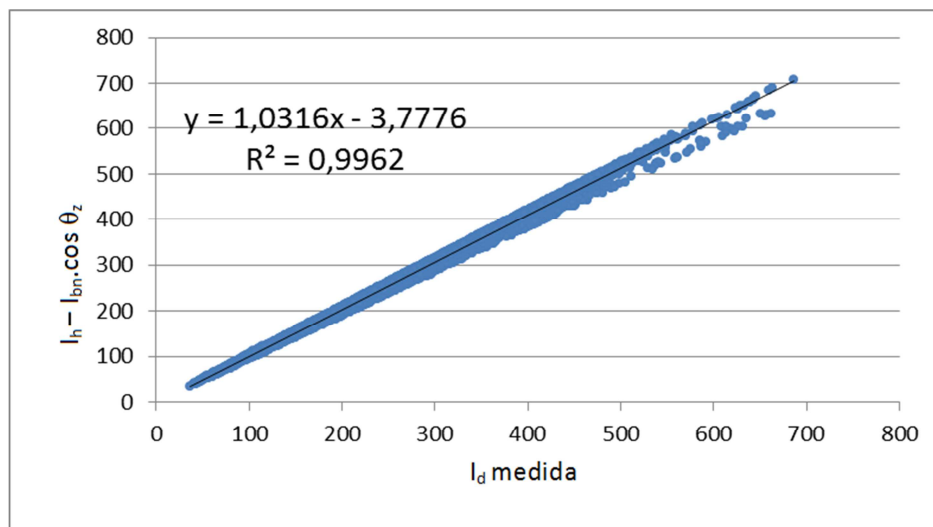


Figura 1. Relação entre I_d medida e I_d calculada.

Observa-se que o coeficiente angular da equação apresentada na Figura 1 (1,031) próximo da unidade indica a coerência da relação entre as radiações global, direta e difusa do conjunto de dados analisado.

As correlações entre valores da fração k_d e k_t foram obtidas utilizando-se valores medidos de minuto a minuto das radiações direta, difusa e global e extraterrestre. As primeiras correlações apresentavam uma dispersão considerável. Após a aplicação dos filtros, é possível obter a relação entre as variáveis conforme esperado (Figura 2).

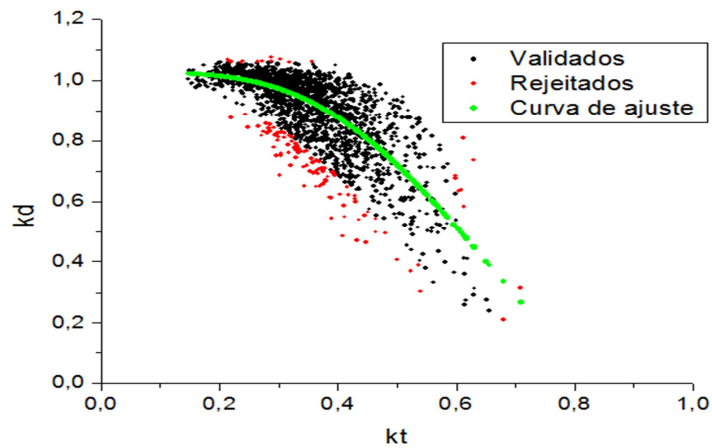


Figura 2. Relação entre k_d e k_t para Recife (valores de minuto em minuto).

Verifica-se, após a aplicação dos filtros, uma redução na dispersão dos dados instantâneos na curva k_d vs. k_t . Os filtros físicos foram aplicados preliminarmente de forma a eliminar erros de medição como, por exemplo, valores obtidos em períodos em que o rastreador ficou inoperante.

Os pontos marcados em vermelho foram eliminados após a aplicação dos filtros estatísticos. A curva de tendência proposta para a relação entre k_d e k_t ($k_d = 1,027 - 1,833e^{-(2,27-3,378k_t)}$) apresenta um coeficiente de determinação (R^2) da ordem de 64,5%.

Os indicadores RMSE (8,3%) (Erro médio quadrático), MBE (-0,01%) (Erro médio), estatística t (0,037), teste de Willmot (d) (0,98) e de Eficiência (0,993) foram calculados para a curva de tendência obtida com relação aos dados experimentais, apresentando resultados aceitáveis para a correlação, ou seja, baixos valores de RMSE e de MBE, estatística t próxima de zero, teste de Willmot (d) e eficiência próximos de 1 (0,98 e 0,993).

Com relação ao comportamento da transmitância da irradiância direta, k_n , uma primeira análise foi realizada, verificando que todos os pontos da curva k_n vs. k_t encontram-se abaixo da reta diagonal que representa ($k_n = k_t$), indicando que os dados medidos obedecem à relação ($k_n < k_t$), segundo (Maxwell et al. 1993).

O mesmo procedimento de filtros foi aplicado à variável k_n . O comportamento de k_n com relação a k_t é mostrado na Figura 3.

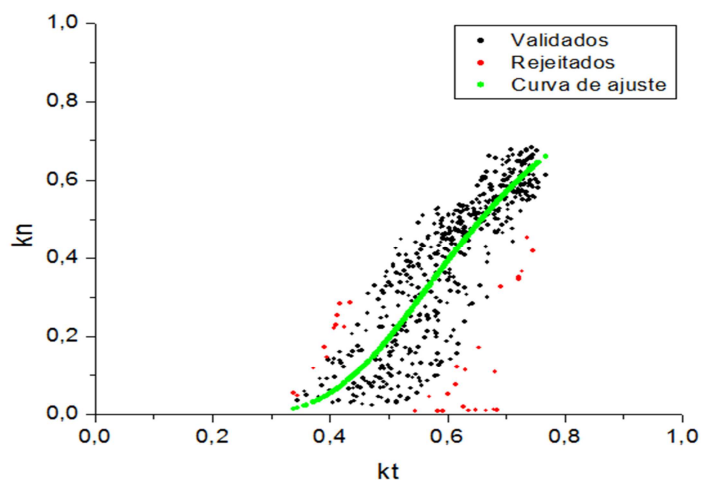


Figura 3. Relação entre k_n e k_t para Recife.

A curva de tendência proposta para a relação entre k_n e k_t ($k_n = 0,878.0,0018^{5,325.0,0018^{0,9828k_t}}$) apresenta um coeficiente de determinação da ordem de 75,9%.

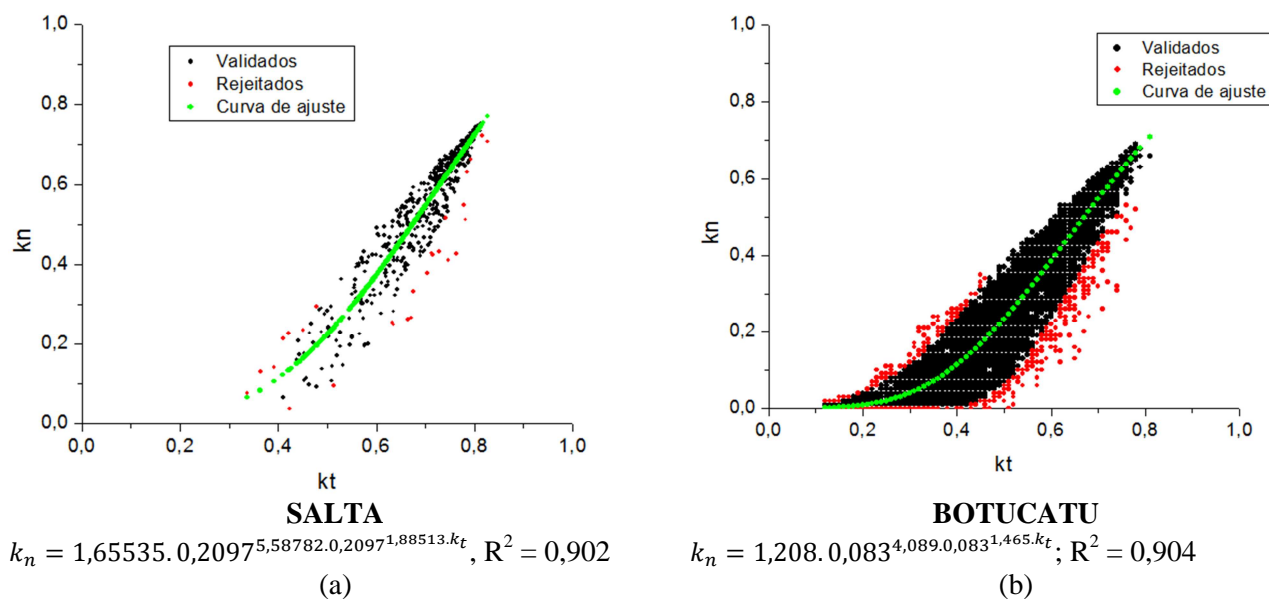
Os indicadores RMSE (24,4%), MBE (-0,07%), estatística t (0,062), teste de Willmot (d) (0,988) e de Eficiência (0,952) apresentaram resultados aceitáveis para a correlação. Embora o desvio RMSE seja da ordem de 24%, os demais indicadores mostram uma boa representatividade da curva de tendência com relação aos resultados experimentais, com teste de Willmot (d) e eficiência próximos de 1.0 (0,988 e 0,952).

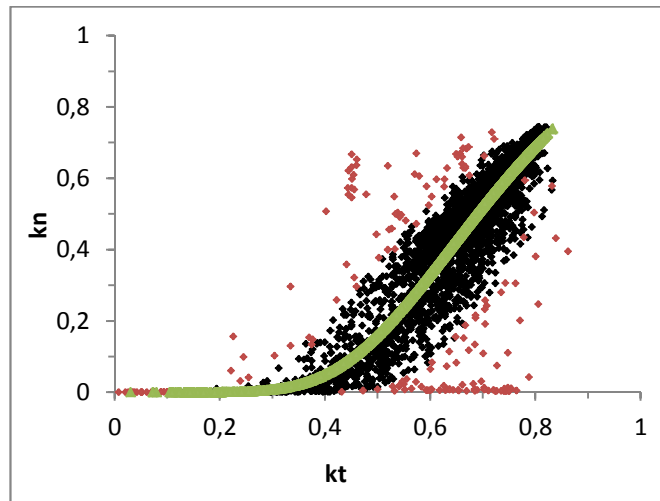
RESULTADOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE AS COMPONENTES DA RADIAÇÃO SOLAR

Utilizando-se a metodologia descrita, foram criados bancos de dados (um para cada localidade) compostos pelos valores obtidos das componentes direta e difusa, e a radiação global. São apresentados os resultados das medições, filtragem e correlações dos dados obtidos para Botucatu, Salta e Luján. Ao final, são apresentadas todas as correlações no mesmo gráfico junto às obtidas para Recife, como forma de comparar o comportamento das variáveis para as diferentes localidades. A Tabela 2 mostra as características das localidades estudadas.

Recife-PE - Brasil	Botucatu-SP- Brasil
Região Nordeste do Brasil Latitude: 08° 03' 14" S Longitude: 34° 52' 52" W Altitude: 4m	Região Sudeste do Brasil Latitude: 22° 53' 09" S Longitude: 48° 26' 42" W Altitude: 804m
Salta - Argentina	Luján - Argentina
Região Norte da Argentina Latitude: 24°47'09" S Longitude: 65°24'41" W Altitude: 1183 m	Região Leste da Argentina Latitude: 34°34'13" S Longitude: 59°06'17" W Altitude: 27 m

Tabela 2. Coordenadas e informações sobre as localidades analisadas com relação à irradiância direta e difusa.





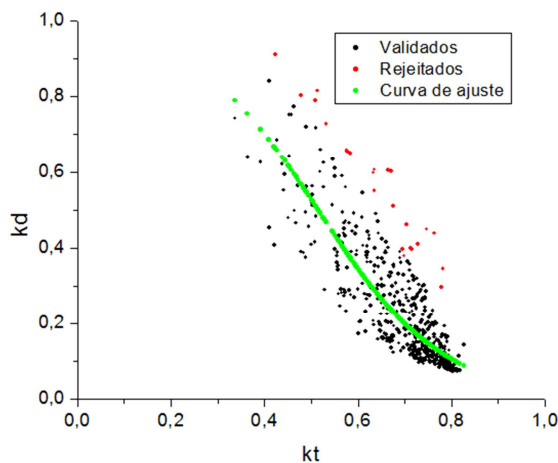
LUJAN
 $k_n = 1,095 \cdot 0,069^{7,734 \cdot 0,069^{1,780 \cdot k_t}}$, $R^2 = 0,936$
 (c)

Figura 4. Relação k_n vs. k_t para (a) Salta (Argentina); (b) Botucatu-SP (Brasil); (c) Luján (Argentina).

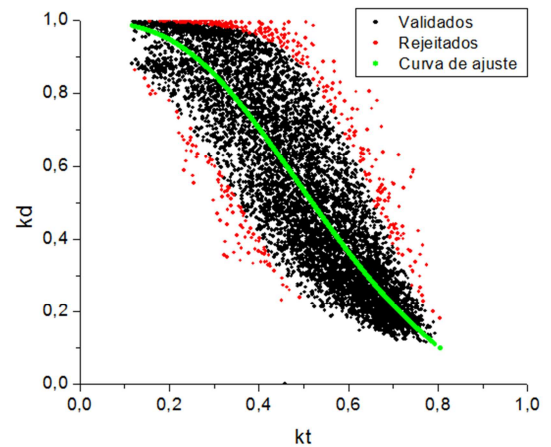
As curvas de ajuste e as correlações são apresentadas na Figura 4, abaixo de cada gráfico.

Verifica-se que Salta apresenta um conjunto menor de medições quando comparado a Botucatu e Luján. Entretanto, os indicadores estatísticos, que serão mostrados posteriormente, indicam que as correlações apresentam uma boa representatividade dos pontos medidos.

As correlações para irradiância difusa ($k_d = I_d/I_h$) também foram obtidas para Salta e Botucatu em função do índice de claridade k_t (Figura 5).



SALTA
 $k_d = \frac{1}{1 + e^{-3,841 + 7,465 \cdot k_t}}$; $R^2 = 0,862$
 (a)



BOTUCATU
 $k_d = 1 - 1,184e^{-e^{(1,938 - 4,018 \cdot k_t)}}$; $R^2 = 0,794$
 (b)

Figura 5. Relação k_d vs k_t para (a) Salta (Argentina); (b) Botucatu-SP (Brasil).

Os indicadores estatísticos das relações obtidas para k_d e k_n para as localidades de Salta, Botucatu e Recife são mostrados na Tabela 3.

Indicadores	Relação $k_t \times k_d$			Relação $k_t \times k_n$		
	Botucatu	Recife	Salta	Botucatu	Recife	Salta
R ²	79,40%	64,50%	86,20%	90,40%	75,90%	90,20%
RMSE	21,81%	8,30%	32,22%	20,90%	24,41%	9,13%
MBE	-0,29%	-0,01%	2,71%	0,21%	-0,07%	-0,01%
estatística t	1,105	0,037	1,842	0,833	0,062	0,019
Willmot (d)	0,941	0,998	0,980	0,992	0,988	0,998
Eficiência E	0,795	0,993	0,926	0,970	0,952	0,992

*Valor crítico para significância do teste t 1.96 para todos os casos

Tabela 3. Indicadores estatísticos das curvas de regressão (k_n vs. k_t) e (k_d vs. k_t)

Verificam-se, em todos os casos, valores elevados de R² (próximos de 1) e eficiências acima de 80% para as relações.

A Figura 6 mostra uma comparação do comportamento da irradiância direta (por meio de k_n) e da irradiância difusa (por meio de k_d) para todas as localidades analisadas. As curvas de Luján foram obtidas a partir do trabalho de Raichijk (2012).

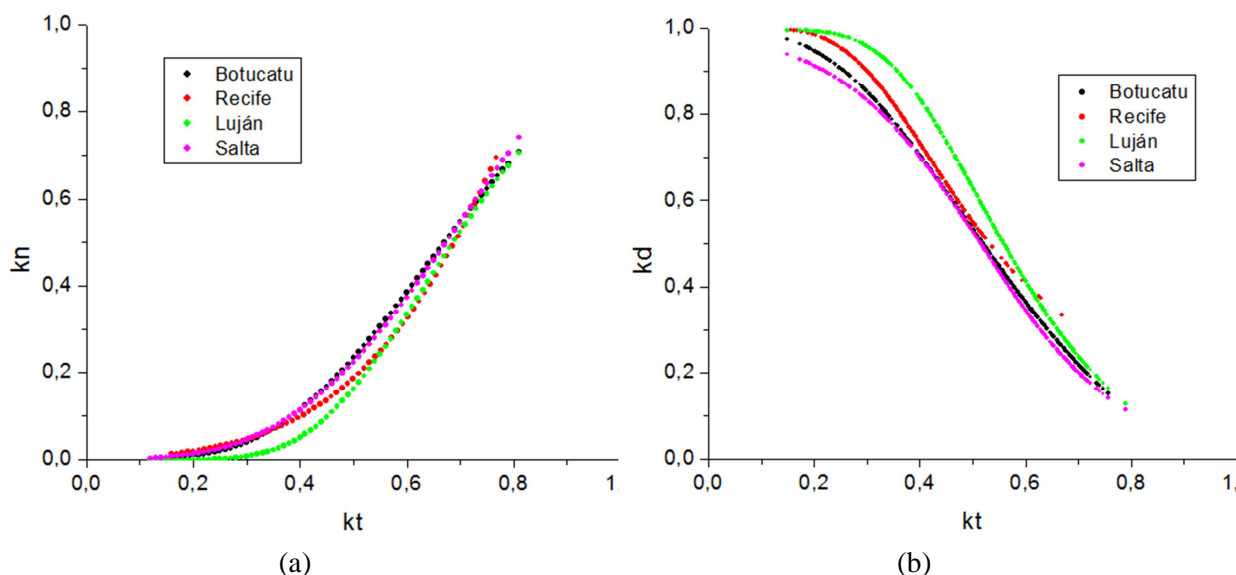


Figura 6. (a) relação k_n vs. k_t ; (b) k_d vs. k_t para as localidades de Botucatu, Recife, Luján e Salta.

Para comparação das correlações mostradas na Fig. 6, a cidade de Botucatu, com maior número de dados medidos, foi utilizada como padrão. Assim, os desvios foram calculados entre as demais localidades e a cidade de Botucatu. Como resultado, a curva para Recife apresentou um desvio de 3,4%, a de Salta 0,9% e a de Luján, 5,2% com relação à curva de Botucatu. Os resultados mostram que as curvas são bastante próximas, mesmo considerando as diferenças dos climas das localidades analisadas.

Para as curvas de k_d em função de k_t , a comparação realizada mostra desvios de 14,4% para Recife, 1,7% para Salta e 8,8% para Luján. Como pode ser verificado na Figura 6, os maiores desvios encontram-se na região de baixos valores de k_t . Uma análise para valores de k_t menores que 0,5 e maiores que 0,5 mostram para Recife, Salta e Luján, desvios respectivos de 15,0%, 17,7% e 11% ($k_t < 0,5$) e 13,6%, 1,7% e 5,2% ($k_t > 0,5$).

CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram apresentados os resultados das correlações entre as relações (I_d/I_h) e (I_b/I_h) em função do índice de claridade k_t , para quatro localidades, a partir do desenvolvimento de um programa que permite a aplicação de filtros de qualidade dos dados de radiação solar.

As correlações obtidas apontam que as equações obtidas apresentam uma boa representatividade dos dados medidos, considerando seis indicadores estatísticos diferentes.

Os resultados foram comparados entre si, indicando que, embora as localidades apresentem condições climáticas diversas, as relações k_d vs. k_t e k_n vs. k_t se apresentaram próximas, o que indica que não foram afetadas pela diversidade de climas entre as localidades estudadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e ao CONICET pelo apoio dado durante a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Duffie, J. A. e W. A. Beckman (1991). Solar engineering of thermal processes. New York, Wiley-Interscience.
- Escobedo, J. F., E. N. Gomes, C. R. Furlan Júnior, A. P. Oliveira e J. Soares (2007). Estimación das radiações global, direta e difusa em função do índice de claridade (K_t) e razão de insolação (n/N). I Congresso Brasileiro de Energia Solar. Fortaleza.
- Maxwell, G., S. Wilcox e M. Rymes (1993). Users Manual for SERI QC Software. Assessing the Quality of Solar Radiation Data. Golden, Colorado-USA.
- Page, J. (1997). Proposed quality control procedures for the Meteorological Office data tapes relating to global solar radiation, diffuse solar radiation, sunshine and cloud in the UK. Londres, Chartered Institute of Building Services Engineers.
- Raichijk, C. (2012). "Control de calidad de mediciones de radiación solar." Avances en Energía Renovables y Medio Ambiente 16.
- Rigollier, C., O. Bauer e L. Wald (2000). "On the clear sky model of the ESRA - European Solar Radiation Atlas - With respect to the Heliosat method." Solar Energy 68(1): 33-48.

ABSTRACT

QUALIFICATION AND CHARACTERIZATION OF BEAN, DIFUSE AND GLOBAL RADIATION IN DIFFERENT PLACES IN BRAZIL AND ARGENTINA

This paper describes the development of a software that allows a physic and statistical filtering of a solar radiation raw dataset obtained at two sites in Argentina and two in Brazil. From this treatment, it were calculated correlations between the values of diffuse, direct and global radiation at these locations. Correlations were obtained for relations between k_b vs. k_t and k_n vs. k_t . The selected statistical indicators show that these relations have good quality and can be used to represent the measured data. Comparing those relationships between themselves shows a small differences, indicating that the climatic differences between the sites towns do not affect it.

Key words: Quality, solar radiation, correlation, diffuse, direct, global.