

# ESTUDO DA ILUMINÂNCIA NATURAL EM DIAS DE CÉU CLARO EM ESTAÇÕES DA REDE SONDA

*Fiorin, D. V.<sup>1,2</sup>; Pes, M. P.<sup>1,2</sup>; Guedes, M.<sup>1,2</sup>; Bertagnolli, R. F.<sup>1,2</sup>; Guarnieri, R. A.<sup>3</sup>; Martins, F. R.<sup>3</sup>; Pereira, E. B.<sup>3</sup>; Schuch, N. J.<sup>1</sup>.*

**RESUMO:** Devido aos comprovados impactos sobre o meio-ambiente e o possível comprometimento da qualidade de vida das gerações futuras, o consumo de energia é questão de grande importância na atualidade. As estações da rede SONDA possuem equipamentos para coletar dados de radiação solar e de variáveis atmosféricas com o objetivo de possibilitar o desenvolvimento, aperfeiçoamento e validação de modelos para o levantamento dos recursos de energias solar e eólica no Brasil. Este trabalho estuda o comportamento da iluminância natural em dias de céu claro em função do ângulo zenital solar, através de dados coletados em quatro estações SONDA. Assume-se que essas estações representam as diferenças climatológicas brasileiras, de maneira que, com o emprego dos dados desses locais possa ser desenvolvido um modelo empírico único de previsão da iluminância natural para o país. Modelos locais específicos para cada estação foram desenvolvidos e seus desvios estatísticos calculados. O modelo regional, desenvolvido para todo o território brasileiro, demonstrou boa concordância apenas com parte das estações analisadas, sendo necessários estudos com maior quantidade de dados para a avaliação de sua aplicabilidade.

**ABSTRACT:** The SONDA network aims at providing reliable ground data to be used in climate models validation and energy resource assessment. This work describes the cloudless natural illuminance behavior as a function of solar zenith angle, using ground data acquired at four SONDA sites located under different climate conditions. The main goal was to investigate if one empirical model can be used to provide reliable estimates of natural illuminance for any place in Brazilian territory. Five empirical models were developed: local models for each measurement site and one regional model for whole country. The estimates provided by each model were compared with ground data and its statistic deviations were calculated. All four local models have shown good agreement with ground data. The regional model has presented good agreement only with part of the ground data. One reason for that can be related to the large difference in data amount available for each SONDA sites. More data is necessary to improve regional model and then evaluate its reliability and applicability.

**Palavras Chaves:** Iluminância natural, Estações Sonda.

## INTRODUÇÃO

A otimização do consumo de energia é um dos atuais desafios enfrentados pela sociedade moderna, devido à crescente escassez dos recursos naturais que, muito provavelmente, trará impactos para as gerações futuras. O uso da energia pela sociedade moderna responde por uma série de impactos ambientais. Uma das formas de minimizar o consumo de energia elétrica e combustíveis é o melhor aproveitamento da iluminância natural. A iluminância natural é uma

<sup>1</sup> Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT - Caixa Postal 5021 - CEP 97110-970 – Santa Maria (RS), Brasil, (55)3220-8021, (danielfiorin, marcelo, guedes, rafaelb, njschuch)@lacesm.ufsm.br.

<sup>2</sup> Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM, cooperação INPE – UFSM.

<sup>3</sup> CPTEC/INPE – MCT, Av. Astronautas 1758, 12227-010, São José dos Campos (SP), (12)3945-6738, (ricardog, eniobp)@cptec.inpe.br, fernando@dge.inpe.br.

medida do fluxo fotométrico por unidade de área, consistindo numa grandeza física que fornece informações sobre o fluxo de energia eletromagnética na faixa espectral do visível[1]. Contudo, o olho humano não é igualmente sensível a todos os comprimentos de onda da radiação visível, de maneira que essa sensibilidade é levada em conta na curva de resposta de um medidor de iluminância. Desta forma, a iluminância, medida em Lux (lúmens por m<sup>2</sup>), representa a curva de resposta do olho humano á radiação solar incidente.

O estudo da iluminância tem aplicações em diversas áreas da atividade humana como, por exemplo, o desenvolvimento de projetos arquitetônicos mais eficientes e a otimização do sistema de iluminação pública através do correto estabelecimento dos instantes de acionamento e desligamento do sistema [2]. Este trabalho desenvolvido no Laboratório de Recursos de Energias Renováveis do CRSPE/INPE – MCT realiza um estudo do comportamento da iluminância natural em dias de céu claro como função do ângulo zenital solar utilizando dados coletados em quatro estações da rede SONDA, representativas de diferentes características geográficas. O objetivo principal do estudo é desenvolver um modelo matemático empírico válido para todo o Brasil e comparar com os modelos específicos para cada localidade. Numa segunda etapa, a ser desenvolvida futuramente, será investigada a contribuição da nebulosidade e dos aerossóis atmosféricos na redução da iluminância natural.

## **METODOLOGIA**

O SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) voltados ao setor de energia é um projeto executado pelo CPTEC/INPE-MCT e financiado pelo FINEP. Tem por finalidade principal a implantação de uma rede de estações coletoras de dados solarimétricos e atmosféricos em diferentes sítios no território brasileiro. Neste trabalho foram utilizados dados de quatro estações da rede SONDA localizadas em:

- a) São Martinho da Serra (RS) - Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE – MCT), Lat.:29,44°S Lon.: 53,82°O, identificada a partir daqui como SMS;
- b) Petrolina (BA), Lat.:9,07°S Lon.:40,32°O, identificada por PTR ;
- c) Brasília (DF); Lat.:15,60°S Lon.:47,71°O, identificada por BRB;
- d) Florianópolis (SC); Lat.:27,60°S Lon.:48,50°O, identificada por FLN;

As quatro estações cobrem uma faixa de latitudes bastante representativa do território brasileiro, desde 9°S ate 30°S. Além disso, elas representam diferentes características climatológicas, sendo uma localizada na região semi-árida do Nordeste brasileiro, a segunda localizada no planalto central do País, uma localizada em na área urbana de uma cidade de grande porte em região costeira e finalmente a quarta localizada em área rural ao sul do país sujeita ao clima mais temperado.

Todas as estações são equipadas com um piranômetro CM21 (Kipp&Zonen), para coleta de dados de irradiação solar global e um piranômetro CM22 (Kipp&Zonen) para medida de irradiação solar difusa. Dados de iluminância são medidos por um luxímetro LUX LITE (Kipp & Zonen). Todas as estações apresentam uma resolução temporal de 1 minuto para coleta de dados de iluminância e irradiação solar. Os dados das 4 estações foram submetidos a um rígido programa de controle de qualidade com o intuito de garantir a confiabilidade das medidas realizadas pelas estações da rede SONDA. Apenas a estação SMS dispõe ainda de um imageador Total Sky Imager TSI 1440 (YES) que adquire imagens do céu automaticamente a cada 15 minutos.

A seleção dos dias de céu claro foi realizada através da análise das curvas de irradiação global e difusa. Em condições de céu claro as curvas devem ser suaves, sem variações abruptas que indicam a presença e/ou passagens de nuvens. A determinação do índice  $K_t$ , razão entre as integrais diárias de radiação global e difusa, indica dias de céu claro para  $K_t > 0,7$  pois a presença de nuvens provoca uma maior atenuação da radiação solar [3]. No Observatório Espacial do Sul em São Martinho da Serra, as imagens do céu para os dias selecionados como céu claro foram observadas com a finalidade de confirmar a não ocorrência de nebulosidade. A Tabela 1 apresenta informações relativas ao tratamento de dados de cada uma das estações.

Tabela 1. Informações relativas a cada uma das estações de coleta de dados de iluminância em superfície utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

Estação	Período de dados analisados	Número de dias de céu claro
São Martinho da Serra	agosto/2004 a junho/2006	38
Florianópolis	agosto/2004 a dezembro/2005	13
Brasília	agosto/2004 a dezembro/2005	13
Petrolina	agosto/2004 a dezembro/2005	7

Os valores de iluminância selecionados foram relacionados aos valores do ângulo zenital solar (SZA) referentes ao horário de cada medida em cada estação. O SZA varia com a latitude do local, dia do ano e minuto das medidas sendo calculado através de equações matemáticas simples [3]. Modelos matemáticos para ajuste de curvas de iluminância natural foram desenvolvidos individualmente para cada estação através de regressões polinomiais de terceira ordem descritas em [1]:

$$\log_{10} I = I_0 + I_1x + I_2x^2 + I_3x^3 + I_4x^4 \quad (1)$$

sendo que os coeficientes  $I_0, I_1, I_2, I_3$  estão apresentados na Tabela 3.1,  $x = (90 - SZA)/90$  (SZA em graus),  $I$  é o valor da iluminância natural. Um modelo representativo de todo o território nacional, intitulado BR, foi desenvolvido abrangendo os dados de todas as estações.

Os modelos empíricos locais foram validados através da quantificação dos desvios estatísticos MBE ( Mean Bias Error ) e RMSE ( Root Mean Square Error) definidos em (2) e (3).

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{N} \quad (2)$$

$$RMSE = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{N} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

onde:  $x_i$  é o valor medido de iluminância,  $y_i$  é o valor estimado pelo modelo e  $N$  é o número de dados utilizados na análise.

## RESULTADOS

A dispersão das medidas de iluminância em cada estação é apresentada nas Figuras 1 a 4, juntamente com os seus respectivos modelos locais e o modelo BR. Todos os modelos possuem os seus coeficientes apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Coeficientes determinados para diferentes faixas de SZA no ajuste dos modelos matemáticos para as diferentes estações:

MODELO	SZA	$I_0$	$I_1$	$I_2$	$I_3$
BR	0° – 50°	3,9385	2,8905	-2,3068	0,549
	50° – 75°	3,5845	6,0929	-10,793	7,5171
	75° – 100°	2,9058	20,7646	-133,7664	374,9743
SMS	0° – 50°	4,0677	2,498	-1,9372	0,461
	50° – 75°	3,5668	6,5744	-12,5828	9,6129
	75° – 100°	2,9122	21,347	-142,1873	407,8016
FLN	0° – 50°	3,9956	2,188	-1,121	0,0481
	50° – 75°	3,4814	6,2721	-11,3974	8,3658
	75° – 100°	2,7891	20,4029	-125,6001	346,5539
BRB	0° – 50°	3,9853	3,2135	-3,4128	1,3226
	50° – 75°	3,5145	7,0705	-13,931	10,8594
	75° – 100°	2,9466	21,8962	-165,1788	529,6851
PTR	0° – 50°	4,1443	2,4364	-2,0874	0,5888
	50° – 75°	3,6742	5,7398	-10,0302	7,1032
	75° – 100°	3,1082	18,0395	-116,1149	334,3444

Os modelos empíricos locais descrevem com boa concordância o comportamento da iluminância natural medida pelas suas estações, apresentando baixos desvios estatísticos, conforme mostra a Tabela 3, causados pela variabilidade dos constituintes atmosféricos e pela presença de nuvens de baixa espessura ótica não detectadas pela na seleção dos dias de céu claro. Observam-se

maiores desvios no crepúsculo solar ( $SZA > 90$ ), quando o caminho óptico percorrido pela radiação solar é maior, e portanto, estando mais sujeita a interações com os constituintes atmosféricos.

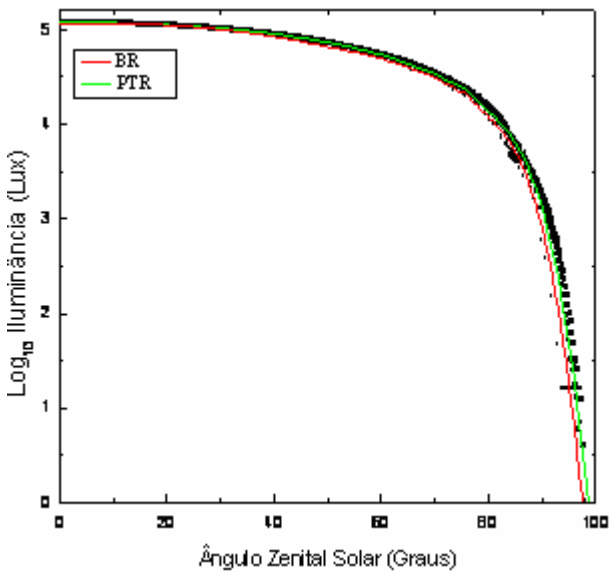


Figura 1 – Dispersão das medidas (SMS)

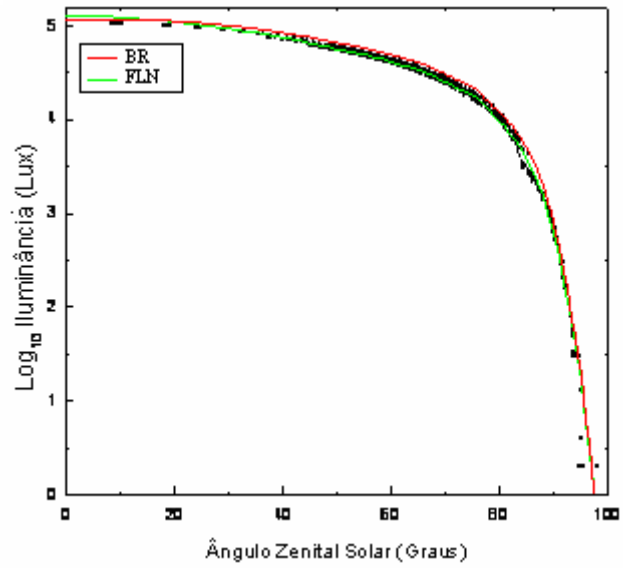


Figura 2 – Dispersão das medidas (FLN)

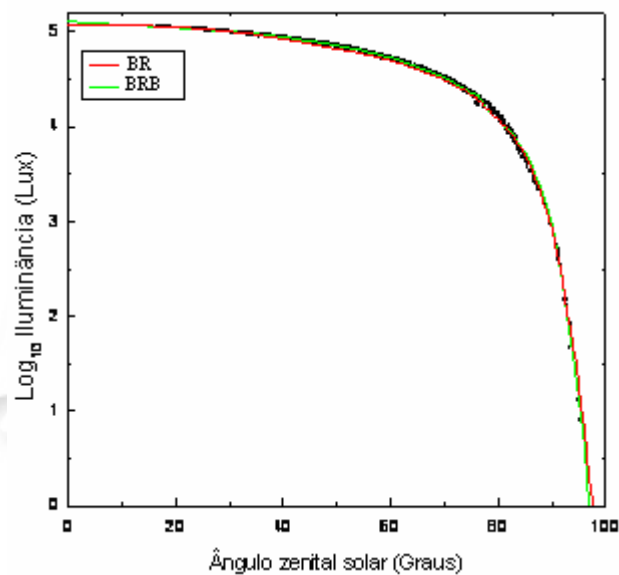


Figura 3 – Dispersão das medidas (BRB)

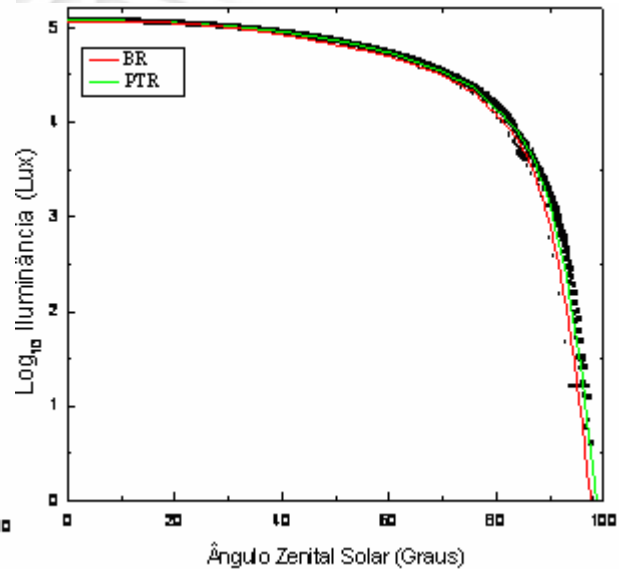


Figura 4 – Dispersão das medidas (PTR)

O modelo BR apresentou boa concordância com os dados coletados em SMS e BRB, de maneira que apresentou um desempenho similar aos modelos locais desenvolvidos para essas estações, com BIAS da ordem de 1% e RMSE em torno de 5%. O modelo regional BR não apresentou um bom desempenho nas estações FLN e PTR. Os desvios apresentados pelo modelo BR nessas estações é superior aos desvios observados para os modelos locais. A localização de FLN em uma cidade de grande porte em área costeira pode ser um dos fatores que influenciaram os resultados em consequência da maior umidade e concentração de aerossóis atmosféricos. Outro fator que influenciou os resultados é a diferença de quantidade de dias de céu claro entre as quatro

estações. O modelo BR apresenta-se melhor ajustado à estação de SMS uma vez que esta estação apresenta quase 3 vezes mais dias de céu claro disponíveis.

Tabela 3. Medidas Estatísticas realizadas (kLux).

Estação	Desvio	Modelo local	Modelo BR
SMS	MBE	-0,01257	-0,024
	RMSE	0,05374	0,0581
FLN	MBE	-0,0169	0,06636
	RMSE	0,06932	0,09405
BRB	MBE	0,00712	-0,00692
	RMSE	0,04897	0,06074
PTR	MBE	-0,014	-0,07896
	RMSE	0,06993	0,16669

## CONCLUSÃO

O modelo BR apresentou boa confiabilidade para as localidades SMS e BRB. Nessas localidades os desvios apresentados pelas estimativas fornecidas pelo modelo regional BR foram da mesma ordem de grandeza dos desvios apresentados pelas estimativas dos respectivos modelos locais. A confiabilidade do modelo BR para as estações localizadas em FLN e PTR foi inferior a apresentada pelos modelos locais. Duas hipóteses foram levantadas para explicar o fato: a menor quantidade de dias de céu claro dessas estações, principalmente PTR, quando comparado aos dados disponíveis em SMS; e a localização de FLN em uma cidade de grande porte em região costeira. Uma vez que a quantidade de dados de SMS utilizados no ajuste do modelo BR foi maior do que a quantidade de dados das demais estações, o modelo está melhor ajustado às condições atmosféricas dessa região. No entanto, uma série maior de dados, inclusive utilizando dados de outras estações da rede SONDA, deverá ser analisada para uma melhor avaliação e aperfeiçoamento do modelo empírico BR. Além do melhoramento do modelo BR, a análise da influência da nebulosidade sobre a iluminância natural com o intuito de estimar valores de iluminância em função da presença de nuvens de ser realizada na continuidade deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

À FINEP (projeto SONDA - 22.01.0569.00). Ao Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT pelo estágio de MPP, e ao PIBIC/INPE – MCT – CNPq/MCT pela aprovação dos Projetos de MG, RFB e DVF.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 Ryer, A., 1998. Light measurement handbook. ISBN 0-9658356-9-3, International Light Inc. Newburyport, USA, 64p.

2 Martins, F.R., Pereira, E.P., Longo, K. Níveis de Iluminância do céu no alvorecer e no ocaso. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza, 2004.

3 Iqbal, M., 1983. An Introduction to Solar Radiation: Academic Press Canadá, Toronto, 390p

