



Análise estatística de estimativas da radiação solar difusa diária no território brasileiro com dados do Projeto SONDA

Marcio Ceconi (1), Daniel Vinicius Fiorin (1), Nelson Jorge Schuch (1), Fernando Ramos Martins (2), Rodrigo Brackmann (1), Enio Bueno Pereira (2)

(1) Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE-MCT em colaboração com o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT-UFSM, Santa Maria, RS, Brasil.

(2) Divisão de Clima e Meio Ambiente – DMA/CPTEC/INPE –MCT, São José dos Campos, SP, Brasil.

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

Statistical models analysis for solar radiation estimative are of vital importance to increase the knowledge of the spatial and temporal solar energy variability in order to support policies and investments in renewable energy resources. This paper presents statistical analysis performed with the application of the SMS model, developed from ground data acquired in southern Brazil, and for several locations distributed in different Brazilian sites. All the ground data used were acquired in SONDA sites and are available at INTERNET. Primary results show that the SMS model don't have good reliability in many sites. Hence, local empirical models were developed for each SONDA site. The model named ALL was developed using data acquired at all the 8 SONDA sites. Since the ALL model showed low statistical deviations it became suitable for application over Brazil.

Introdução

A transferência radiativa é o mecanismo pelo qual o sistema Terra – Atmosfera realiza praticamente toda a troca de energia com o resto do Universo (Wallace e Hobbs, 1977). O Sol emite um espectro contínuo de radiação solar, com uma distribuição espectral equivalente a de um corpo negro a uma temperatura de aproximadamente 6000 K, de acordo com a lei de Planck para a emissão de radiação (Coulson, 1975). A radiação solar cobre todo o espectro eletromagnético, mas a porção mais significativa do espectro, associada com a transferência de energia radiativa no sistema climático, é compreendida entre o ultravioleta e o infravermelho próximo (Peixoto e Oort, 1992). Costuma-se dividir o espectro eletromagnético em aproximadamente 4 μm (Coulson, 1975). A radiação menor que 4 μm é chamada radiação de onda curta ou radiação solar. A radiação maior que 4 μm é chamada radiação de onda longa. A radiação de onda longa emitida pela Terra e pela atmosfera é chamada radiação terrestre (Iqbal, 1983).

A energia proveniente do Sol que atinge uma unidade de área da superfície perpendicular à direção de propagação

da radiação solar, por unidade de tempo e à distância média entre a Terra e o Sol, no topo da atmosfera (TDA), é denominada constante solar (apesar de não ser, de fato, constante) e referenciada por S . Um valor recomendável para a constante solar é de 1368 W/m², com uma incerteza da ordem de 1% (Iqbal, 1983). Devido à ligeira variação anual da excentricidade da órbita da Terra e do movimento de rotação em torno de seu eixo, a quantidade de energia que atinge determinado ponto no TDA é função da latitude e época do ano, sendo essa variação responsável pelas correntes oceânicas e pelos ventos, de fundamental importância no balanço radiativo do planeta.

Segundo (Liou, 1980), a densidade de fluxo de radiação solar, ou irradiância, que incide em um ponto abaixo de uma superfície situada no TDA perpendicular à direção de propagação da radiação solar pode ser expressa pela equação (1).

$$E = S \left(\frac{d_m}{d} \right)^2 \cos(\theta_s) \quad (1)$$

onde $(d_m/d)^2$ representa o fator de correção de excentricidade da órbita da Terra e θ_s é o ângulo zenital solar, definido como o ângulo entre a normal à superfície da Terra e a direção de incidência da radiação solar.

Ao integrar-se a equação (1), considerada expressão instantânea da irradiância solar, em um período de tempo equivalente ao nascer e pôr do Sol, obtém-se a quantidade total de energia que atinge o TDA no período de um dia, expressa por H_0 e apresentada na equação (2).

$$H_0 = \frac{1368}{\pi} \left(\frac{d_m}{d} \right)^2 [h_0 \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin(h_0)] \quad (2)$$

onde h_0 é o ângulo horário do nascer e pôr do Sol, φ é a latitude do sítio em questão e δ é a declinação solar.

Quando a energia proveniente do Sol percorre a atmosfera, os diferentes comprimentos de onda da radiação interagem de formas diferentes com os constituintes atmosféricos, sofrendo processos de

absorção e espalhamento. A absorção da radiação na atmosfera é realizada principalmente pelo ozônio atmosférico no ultravioleta e por vapor de água e dióxido de carbono nas bandas de infravermelho. O espalhamento da radiação solar é causado principalmente pela interação da radiação com moléculas de ar, água e poeira. (Duffie e Beckman, 1991).

Espalhamento é um processo físico no qual uma partícula no caminho da onda eletromagnética remove continuamente energia da onda incidente. Essa energia é dispersa em todas as direções, funcionando como uma fonte pontual de energia espalhada (Peixoto e Oort, 1992). A razão entre o tamanho da partícula espalhadora e o comprimento de onda da radiação incidente determina o regime de espalhamento. Quando as partículas são muito menores do que o comprimento de onda da radiação, trata-se do regime de espalhamento Rayleigh. Para partículas com tamanho comparável ao da radiação incidente ou maiores, o regime é referenciado como espalhamento Mie (Iqbal, 1983). Se o tamanho da partícula é muito maior que o comprimento de onda, o desvio da radiação incidente é explicado pela ótica geométrica (Liou, 1980). O espalhamento pelo regime Rayleigh é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda da radiação (espalhamento $\sim 1/\lambda^4$). No regime Mie praticamente não há dependência entre o espalhamento e o comprimento de onda da radiação.

Ao atravessar todas as camadas de agentes espalhadores, a quantidade total de energia que atinge a superfície da Terra passa a ser denominada irradiação solar global, referenciada por H . A irradiação solar global é dividida em duas componentes: a irradiação solar direta é a parcela que atinge a superfície na mesma direção de incidência da radiação solar; e a irradiação solar difusa, referenciada por H_d , é a parcela da irradiação global que é atenuada e atinge a superfície em todas as direções. A irradiação solar difusa consiste do espalhamento por moléculas de ar, aerossóis e nuvens (Iqbal, 1983).

Este trabalho, desenvolvido no Laboratório de Recursos de Energia Renováveis do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – LRER/CRS/INPE – MCT, em Santa Maria, RS, tem por finalidade descrever as análises estatísticas realizadas para o estudo da incidência de irradiação solar difusa sobre o Território Brasileiro utilizando modelos empíricos.

Metodologia

O Projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais), coordenado e executado pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – CPTEC/INPE – MCT, financiado pela FINEP/MCT, está implantando uma rede de estações para coleta de dados solarimétricos, eólicos e ambientais em diversos sítios do Brasil, escolhidos por suas características climatológicas e antropogênicas, para dar suporte ao desenvolvimento e validação de modelos matemáticos para estimativa e levantamento de

recursos de energia solar no Território Brasileiro. Um mapa com a rede completa de estações operantes e em planejamento é apresentado na Figura 1.

Dentre as estações do Projeto SONDA, destaca-se por sua importância nesta pesquisa a estação de referência instalada no Observatório Espacial do Sul (OES), em São Martinho da Serra – RS, (referenciada por SMS), subunidade do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE – MCT, localizado em Santa Maria – RS. Uma vista panorâmica da plataforma onde estão instalados os instrumentos do Projeto SONDA é apresentada na Figura 2.

As medidas de irradiação solar global e difusa utilizadas na pesquisa foram realizadas por radiômetros modelo Piranômetro CM21 (*Kipp&Zonen*) e Piranômetro CM22 (*Kipp&Zonen*), respectivamente. Os equipamentos coletam dados a cada segundo, armazenando a média para cada minuto. Os dados são integrados ao longo do período de um dia, fornecendo a quantidade total de energia que atinge a superfície, ou irradiação, expressa em $J.m^{-2}$ (Joules por metro quadrado). As estações do Projeto SONDA selecionadas para a pesquisa, juntamente com o período de dados utilizado de cada estação são apresentados na Tabela 1. Os intervalos de dados de cada estação utilizados diferem devido a fatores como a não disponibilidade dos mesmos e a possíveis falhas nos equipamentos que resultaram em dados com pouca confiabilidade.

<i>Estação SONDA</i>	<i>Período de dados</i>
Brasília (DF) 15°36' S, 47°43' O, 1023m	08/2004 a 12/2006
Campo Grande (MS) 20°26' S, 54°32' O, 677m	01/2007 a 04/2008
Florianópolis (SC) 27°36' S, 48°30' O, 12m	08/2004 a 04/2005
Natal (RN) 5°50' S, 35°12' O, 58m	01/2007 a 04/2008
Ourinhos (SP) 22°57' S, 49°54' O, 446m	02/2006 a 05/2008
Palmas (TO) 10°11' S, 48°22' O, 48m	01/2006 a 08/2008
Petrolina (PE) 09°04' S, 40°19' O, 387m	07/2004 a 08/2007
São Martinho da Serra (RS) 29°44' S, 53°48' O, 489m	04/2006 a 11/2007

Tabela 1: Estações do Projeto SONDA com os respectivos intervalos de dados utilizados no trabalho.

Para eliminar a sazonalidade dos dados de radiação solar, normalizam-se as medidas calculando-se os parâmetros adimensionais K_t e K , definidos como a razão entre a irradiação solar global e a irradiação incidente no TDA, e a razão entre a irradiação solar difusa e a irradiação solar global, respectivamente, conforme apresentado nas equações (3).

$$K_t = \frac{H}{H_0} \quad K = \frac{H_d}{H} \quad (3)$$

Para uma dada estação, o parâmetro K_t representa a transparência da atmosfera à radiação solar, sendo denominado índice de nebulosidade da atmosfera, e o parâmetro K resulta numa indicação da quantidade de radiação difusa.

Com medidas de irradiação solar coletadas na estação SMS, de São Martinho da Serra, RS, durante o período de Agosto de 2004 a Dezembro de 2006, desenvolveu-se um modelo empírico para estimativa do parâmetro K a partir do índice de nebulosidade K_t , ao qual foi dado o nome de modelo SMS, apresentado na equação (4). O modelo foi desenvolvido através da aplicação do método dos mínimos quadrados para obtenção de um ajuste polinomial de quarta ordem. A Figura 3 apresenta a dispersão dos dados coletados na estação SMS e utilizados para o desenvolvimento do modelo SMS. A linha contínua representa os valores estimados fornecidos pelo modelo.

$$\frac{H_d}{H} = 0,999 + 0,189K_t - 3,342K_t^2 + 2,750K_t^3 - 0,910K_t^4 \quad (4)$$

Da mesma forma como o realizado para a estação SONDA - SMS, separaram-se 70% dos dados de cada uma das outras 7 estações selecionadas para o desenvolvimento de modelos matemáticos locais, e 30% para validação dos modelos. Os modelos para estimativa do parâmetro K a partir do índice de nebulosidade K_t são apresentados na Tabela 2 e suas curvas estão plotadas nas Figuras de 4 a 10.

	Modelo Empírico
BRA	$1,684 - 3,457 \cdot K_t + 3,683 \cdot K_t^2 - 2,936 \cdot K_t^3 + 0,589 \cdot K_t^4$
CPG	$0,775 + 1,629 \cdot K_t - 6,637 \cdot K_t^2 + 4,415 \cdot K_t^3$
FLP	$0,863 + 1,648 \cdot K_t - 6,369 \cdot K_t^2 + 3,192 \cdot K_t^3 + 0,925 \cdot K_t^4$
NAT	$0,445 + 3,835 \cdot K_t - 10,178 \cdot K_t^2 + 6,100 \cdot K_t^3$
ORN	$0,773 + 1,670 \cdot K_t - 6,741 \cdot K_t^2 + 4,403 \cdot K_t^3$
PLM	$0,937 - 0,364 \cdot K_t - 1,107 \cdot K_t^2 - 0,064 \cdot K_t^3$
PTR	$0,640 + 2,937 \cdot K_t - 9,863 \cdot K_t^2 + 6,701 \cdot K_t^3$

Tabela 2: Modelos empíricos desenvolvidos com os dados do Projeto SONDA para cada uma das 7 estações selecionadas.

A etapa de análise seguinte consistiu no desenvolvimento de um modelo empírico utilizando a totalidade dos dados disponíveis (conforme períodos citados na Tabela 1 e tomando-se o cuidado de reservar 30% das medidas para validação do modelo) na tentativa de conceber um modelo com validade em todo o Território Brasileiro, uma vez que a distribuição espacial das estações garantiria grande amplitude de fatores climatológicos e antropogênicos característicos de cada região. O modelo desenvolvido, denominado ALL, é apresentado na equação (5). O gráfico com as medidas empregadas em seu desenvolvimento é apresentado na Figura 11. O modelo ALL aplicado às estações utilizadas é apresentado nas Figuras de 3 a 10.

$$\frac{H_d}{H} = 0,995 - 0,812K_t + 2,992K_t^2 - 10,995K_t^3 + 8,544K_t^4 \quad (5)$$

Para verificar a confiabilidade das estimativas fornecidas pelos modelos desenvolvidos na pesquisa, são calculados os desvios estatísticos MBE (*Mean Bias Error*) e RMSE (*Root Mean Square Error*), definidos nas expressões (6) e (7). Os desvios são divididos pelo valor médio das medidas, expressando o resultado em porcentagem.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{N} \quad (6)$$

$$RMSE = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{N} \right\}^{1/2} \quad (7)$$

Os desvios estatísticos MBE e RMSE foram calculados entre as estimativas dos modelos desenvolvidos para cada estação SONDA, e o modelo ALL, e a porcentagem dos dados das estações reservados à validação (30%).

Resultados

Os desvios estatísticos MBE e RMSE entre as estimativas do modelo SMS e as medidas de cada estação selecionada são apresentados na Tabela 3.

	MBE [%]	RMSE [%]
Brasília (BRA)	1,58	21,99
Campo Grande (CPG)	15,02	24,63
Florianópolis (FLP)	-2,05	18,25
Natal (NAT)	-1,36	17,06
Ourinhos (ORN)	19,98	30,02
Palmas (PLM)	23,85	32,23
Petrolina (PTR)	13,69	23,23

Tabela 3: Desvios estatísticos entre as estimativas do modelo SMS e as medidas das 7 estações SONDA.

Uma análise geral dos desvios estatísticos permite a percepção de que o modelo SMS subestima as medidas para as estações de Florianópolis e Natal ($MBE < 0$), ambas localizadas em regiões litorâneas. Os menores desvios MBE são apresentados para as estações de Brasília, Florianópolis e Natal, fato que pode ser observado nas Figuras 4, 6 e 7, onde se vê uma distribuição quase simétrica das medidas entre as regiões superior e inferior à curva do modelo SMS.

Os menores desvios RMSE são apresentados pelas estações de Natal, Florianópolis e Brasília, para as quais o modelo SMS pode ser considerado bom em suas estimativas. O modelo SMS superestima as medidas em praticamente todos os intervalos de K_t para as estações de Campo Grande, Ourinhos e Palmas, tornando-se inviável sua aplicação a estas estações, conforme se percebe pelos altos desvios estatísticos calculados. Para a estação de Petrolina o modelo SMS apresenta bom comportamento no intervalo de $K_t < 0,4$, que representa dias completamente encobertos a parcialmente nublados, porém passa a superestimar as medidas para $K_t > 0,4$.

Os desvios estatísticos calculados entre as estimativas dos modelos locais apresentados na Tabela 2 e as medidas de cada estação reservadas para validação são apresentados na Tabela 4. Os modelos locais foram nomeados conforme as siglas das estações.

<i>Modelos empíricos:</i>	<i>MBE [%]</i>	<i>RMSE [%]</i>
<i>BRA</i>	4,49	21,16
<i>CPG</i>	5,46	17,72
<i>FLP</i>	2,69	16,95
<i>NAT</i>	9,60	22,29
<i>ORN</i>	7,44	21,36
<i>PLM</i>	8,84	26,31
<i>PTR</i>	-7,24	17,78
<i>SMS</i>	-0,73	15,83

Tabela 4: Desvios estatísticos apresentados na validação dos modelos empíricos locais desenvolvidos para as estações SONDA.

Para analisar a confiabilidade das estimativas do modelo ALL, foram calculados os desvios estatísticos MBE e RMSE para todas as estações separadamente e em conjunto. A Tabela 5 apresenta os desvios relativos ao modelo ALL para cada uma das estações selecionadas.

<i>Estações SONDA</i>	<i>MBE [%]</i>	<i>RMSE [%]</i>
<i>Brasília</i>	-8,47	21,40
<i>Campo Grande</i>	3,15	19,38
<i>Florianópolis</i>	-9,33	17,50
<i>Natal</i>	-16,33	24,20
<i>Ourinhos</i>	7,46	22,33
<i>Palmas</i>	11,02	23,48
<i>Petrolina</i>	0,58	17,31
<i>São Martinho da Serra</i>	-8,35	21,98

Tabela 5: Desvios estatísticos apresentados entre as estimativas do modelo ALL e as medidas de cada estação.

Os desvios estatísticos apresentados entre as estimativas do modelo ALL e as medidas das estações do Projeto SONDA podem ser considerados baixos, o que garante a confiabilidade do modelo no território brasileiro. Especificamente, o modelo ALL adaptou-se melhor para as estações de Petrolina, Florianópolis e Campo Grande, e apresentou confiabilidade mais reduzida para as estações de Natal, para a qual subestimou os dados, e Palmas, onde superestimou os dados. Para as outras estações o modelo pode ser considerado mais adequado.

Conclusões

Através da análise estatística efetuada com o cálculo dos desvios estatísticos MBE e RMSE, notou-se que o modelo SMS, desenvolvido com dados coletados na estação de referência do Projeto SONDA instalada no Observatório Espacial do Sul (São Martinho da Serra – RS), não apresenta boa confiabilidade para todo o Território Brasileiro, o que pode ser explicado devido às diferentes condições climatológicas e antropogênicas que caracterizam cada região do Brasil.

O modelo empírico SMS apresentou bons resultados para as estações de Brasília, Florianópolis e Natal. Outro

fato notável é que o modelo subestima as medidas para todas as estações localizadas em regiões litorâneas, o que foi indicado pela presença de desvios MBE menores do que zero, sendo que ao mesmo tempo esses desvios em módulo e os desvios RMSE são considerados baixos. Para todas as outras estações o modelo SMS superestimou as medidas e apresentou desvios estatísticos altos, o que o torna inviável para estas estações.

Em virtude do mencionado, em estudos específicos para cada estação, é adequado que se utilizem os modelos de validade local apresentados na Tabela 3.

De modo geral, considerando os baixos desvios estatísticos MBE e RMSE apresentados entre as estimativas do modelo nacional ALL e as medidas selecionadas para sua validação, o modelo ALL pode ser considerado bem adaptado para o Território Brasileiro. No entanto, sua confiabilidade mostrou-se reduzida para as estações de Natal e Palmas, para as quais subestimou e superestimou as medidas, respectivamente.

Agradecimentos

À FINEP/MCT e à Petrobrás pelo financiamento do Projeto SONDA (Processo nº 22.01.0569.00) e ao Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT pela aprovação dos Projetos de Iniciação Científica.

Referências Bibliográficas

Coulson, K. L. **Solar and Terrestrial Radiation: Methods and Measurements**, New York, Academic Press, 1975, 322 p.

Duffie, J. A.; Beckman, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1991.

Guarnieri, R. A. **Emprego de Redes Neurais Artificiais e Regressão Linear Múltipla no Refinamento das Previsões de Radiação Solar do Modelo Eta**, Master Thesis, INPE, São José dos Campos, 2006.

Iqbal, M. **An Introduction to Solar Radiation**, Toronto, Academic Press Canada, 390p, 1983.

Liou, Kuo-Nan, **An Introduction to Atmospheric Radiation**, New York, Academic Press Inc., 392p, 1980.

Peixoto J. P.; Oort, A. H. **Physics of Climate**, American Institute of Physics, AIP Press, 520p, 1992.

Pereira, E.B.; Martins F.R.; Abreu S.L.; Rütther, R., 2006. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 2006.

Wallace, J. M.; Hobbs, P. V. **Atmospheric Science: an introductory survey**, San Diego, Academic Press, 467p. 1977.



Figura 1: Mapa com a rede completa de estações do Projeto SONDA, instaladas e em planejamento. Fonte: SONDA (2009).



Figura 2: Vista panorâmica da plataforma da estação de referência do Projeto SONDA instalada no Observatório Espacial do Sul OES/CRS/INPE - MCT, em São Martinho da Serra - RS.

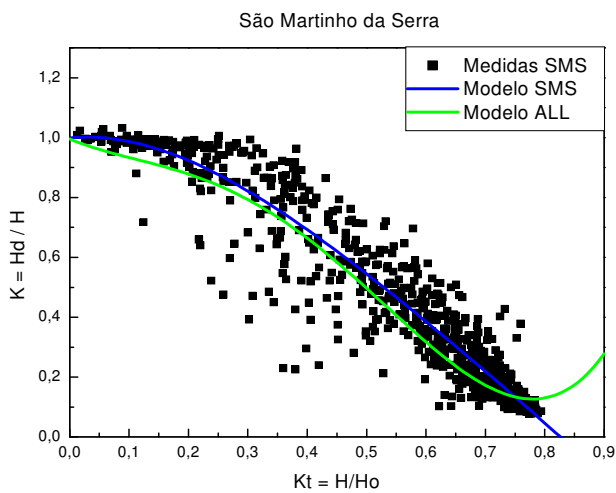


Figura 3: Modelos SMS e ALL desenvolvidos no Laboratório de Recursos de Energia Renováveis a partir de dados coletados no Observatório Espacial do Sul.

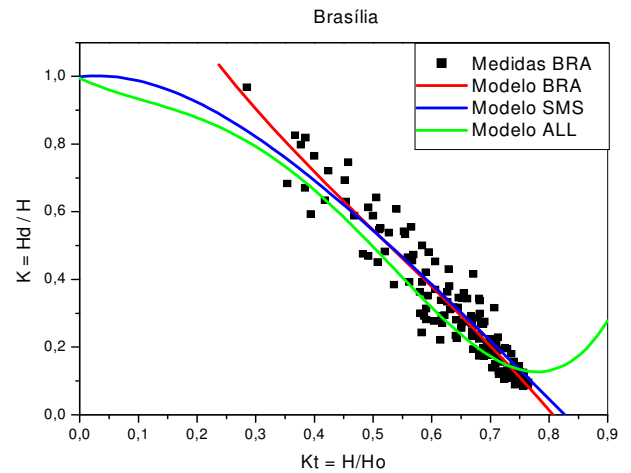


Figura 4: Modelos SMS e ALL aplicados aos dados coletados na estação SONDA de Brasília, juntamente com o modelo obtido por ajuste polinomial para este sítio.

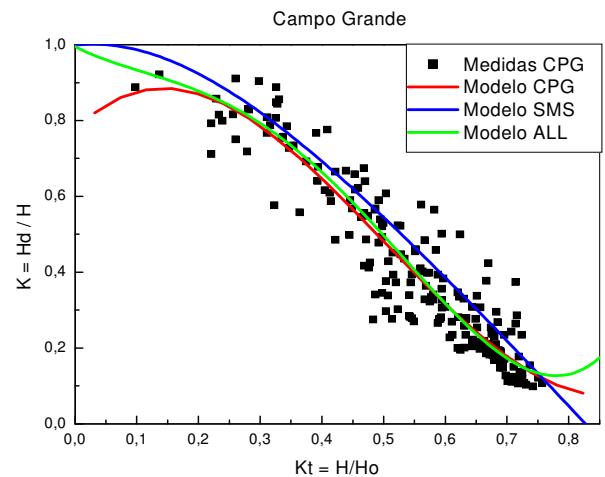


Figura 5: Modelos SMS e ALL aplicados aos dados coletados na estação SONDA de Campo Grande, juntamente com o modelo obtido por ajuste linear para este sítio.

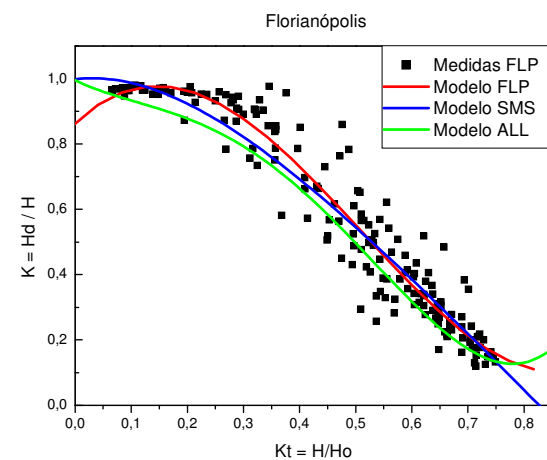


Figura 6: Modelos SMS e ALL aplicados aos dados da estação SONDA de Florianópolis, juntamente com o modelo desenvolvido por ajuste polinomial para este sítio.

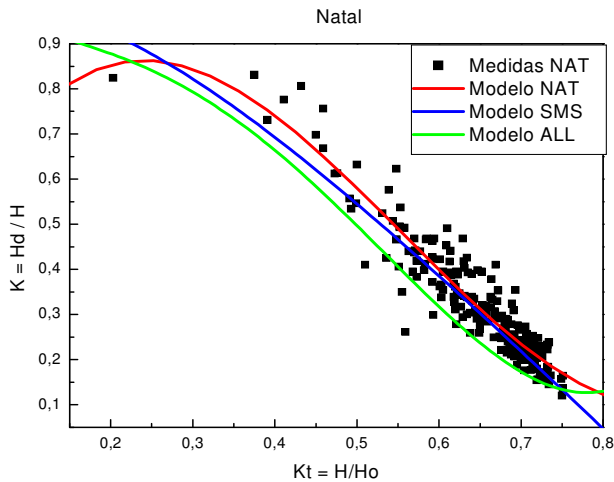


Figura 7: Modelos SMS e ALL aplicados aos dados da estação SONDA de Natal, juntamente com o modelo desenvolvido por ajuste polinomial para este sítio.

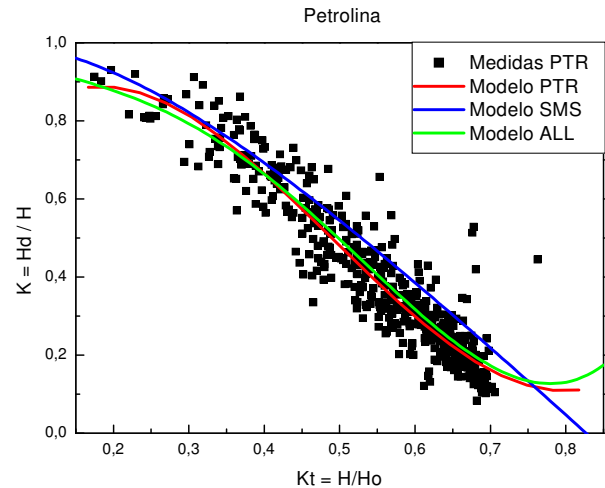


Figura 10: Modelos SMS e ALL aplicados aos dados da estação SONDA de Petrolina, juntamente com o modelo desenvolvido por ajuste polinomial para este sítio.

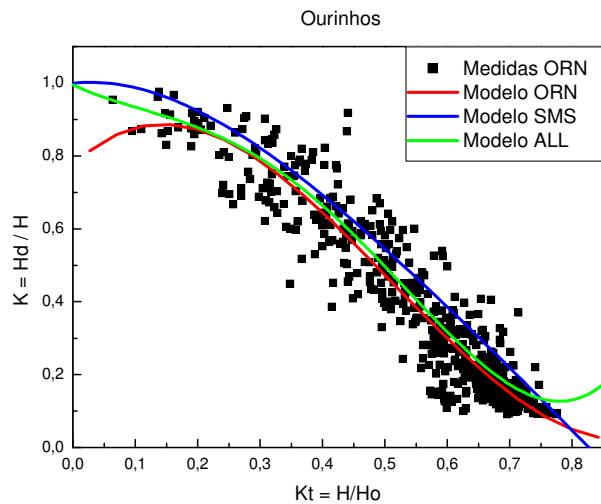


Figura 8: Modelos SMS e ALL aplicados aos dados da estação SONDA de Ourinhos, juntamente com o modelo desenvolvido por ajuste polinomial para este sítio.

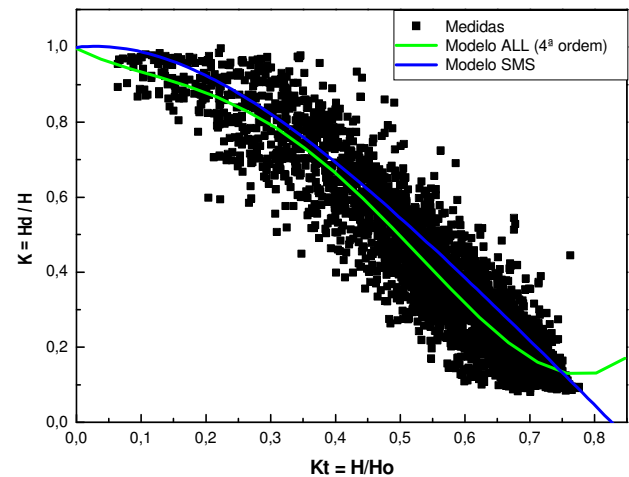


Figura 11: Dispersão das medidas utilizadas no desenvolvimento do modelo empírico ALL para o território brasileiro, juntamente com o modelo SMS.

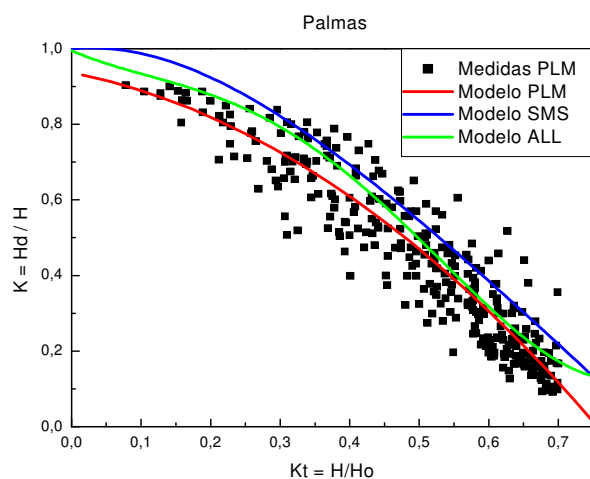


Figura 9: Modelos SMS e ALL aplicados aos dados da estação SONDA de Palmas, juntamente com o modelo desenvolvido por ajuste polinomial para este sítio.