

Artigo

Coeficientes de Angström-Prescott para Estimar a Radiação Solar no Rio Grande do Sul

Kelin Pribs Bexaira¹, Nereu Augusto Streck¹, Jossana Ceolin Cera² , Solismar Damé Prestes³¹*Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil.*²*Instituto Rio Grandense do Arroz, Cachoeirinha, RS, Brasil.*³*Instituto Nacional de Meteorologia, Porto Alegre, RS, Brasil.*

Recebido em 14 de Abril de 2017 – Aceito em 24 de Novembro de 2017

Resumo

O objetivo do trabalho foi determinar os coeficientes b_0 e b_1 da equação de Angström-Prescott para os locais do estado do Rio Grande do Sul que possuem dados de radiação solar medidos por piranômetros eletrônicos e dados de brilho solar medidos por heliógrafos, bem como espacializar esses coeficientes para o Estado. Foram utilizados dados de radiação solar global e dados de brilho solar nas Estações Meteorológicas Automáticas e Convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia de 13 locais do Rio Grande do Sul. Os valores dos coeficientes b_0 e b_1 foram determinados por meio da análise de regressão linear entre razão de radiação solar global e razão de brilho solar, na escala mensal e anual. A representação da variabilidade espacial dos coeficientes b_0 e b_1 no RS foi através de mapas usando o método de interpolação análise objetiva de Cressman. Os coeficientes b_0 e b_1 da equação de Angström-Prescott foram atualizados para os 13 locais do Rio Grande do Sul e nos outros locais estes coeficientes podem ser estimados através dos mapas. O coeficiente b_0 diminui durante o inverno e aumenta durante o verão enquanto os valores do coeficiente b_1 são mais elevados para os meses de inverno e primavera.

Palavras-chave: radiação solar global, brilho solar, piranômetro, heliógrafo.

Angström-Prescott Coefficients for Estimating Solar Radiation in Rio Grande do Sul

Abstract

The objective of this study was determine the coefficients b_0 and b_1 of the Angström-Prescott equation for several locations in the State of Rio Grande do Sul using solar radiation data measured with electronic pyranometers and sunshine duration data measured with a analytical sunshine recorder and map theses coefficients for the entire state. Solar radiation data, measured by electronic pyranometer, and sunshine data, measured with a conventional Campbell-Stokes sunshine recorder in the Automatic and Conventional Weather Stations of the National Institute of Meteorology, respectively, for 13 locations across the state, were used. The values of the coefficients b_0 and b_1 were determined through linear regression analysis between solar radiation ratio and sunshine ratio for data grouped monthly and annually. Maps with the spatial variability of the coefficients across the State were built using the Cressman objective interpolation analysis. The coefficients b_0 and b_1 of the Angström-Prescott equation were updated for the 13 locations across the State and for other locations they can be estimated from maps. The coefficient b_0 decreases during winter and increases during summer whereas the coefficient b_1 is greater during winter and spring months.

Keywords: solar radiation, sunshine, pyranometer, sunshine recorder.

1. Introdução

A radiação solar global é a fonte primária de energia responsável por grande parte dos processos físicos e bioquímicos no sistema solo-planta-atmosfera no Planeta. Do

total da radiação solar incidente no topo da atmosfera, apenas uma parte atinge a superfície terrestre, devido aos processos de reflexão, difusão e absorção ao atravessar a atmosfera (Beruski *et al.*, 2015), denominada radiação solar global incidente na superfície terrestre (Q_g). A Q_g é uma

variável empregada em modelos agrícolas, na caracterização climática, em estudos da necessidade hídrica, evapotranspiração, na estimativa do potencial de produtividade das culturas, no planejamento de instalações para o aproveitamento da energia solar e na previsão de safras agrícolas (Estefanel *et al.*, 1990; Fontana e Oliveira, 1996; Beruski *et al.*, 2015).

A Q_g é medida nas estações meteorológicas convencionais (EMC) por instrumentos analógicos, como por exemplo, os actinógrafos bimetalícos, enquanto nas estações meteorológicas automáticas (EMA) é medida por piranômetros eletrônicos (Dornelas *et al.*, 2006). Entretanto, os instrumentos de medição direta da radiação solar global possuem, custo relativamente alto e a necessidade contínua de manutenção (Carvalho *et al.*, 2011). Por isso, nas séries históricas das EMC geralmente não há dados de Q_g , apenas dados de número de horas de brilho solar (n), medida por heliógrafo.

Existe uma relação entre Q_g e n , pois quanto mais horas sem nuvens durante o dia, mais radiação solar chega até a superfície terrestre e esta relação tem sido usada na estimativa da radiação solar global quando esta variável não é medida diretamente (Buriol *et al.*, 2012). Uma das primeiras e mais usadas equações para relacionar Q_g com n foi a equação linear de Angström-Preseott (publicada por Angström em 1924 e modificada por Preseott em 1940) (Penman, 1948). Os coeficientes b_0 e b_1 da equação de Angström-Preseott devem ser ajustados para cada local e época do ano, a fim de melhor representar a variação da radiação em função do brilho solar, já que estes dependem principalmente da camada atmosférica a ser atravessada (Carvalho *et al.*, 2011). Entretanto, só é possível determinar os coeficientes b_0 e b_1 em locais que possuem ambos os valores de Q_g e n , limitando a determinação dos coeficientes à disponibilidade desses valores. A partir da determinação dos coeficientes para algumas localidades é também possível espacializar os mesmos para regiões e/ou Estado, como por exemplo, através da análise objetiva de Cressman que consiste na interpolação dos coeficientes (Cressman, 1959). A determinação dos coeficientes em locais que possuem atualmente os dados de Q_g além de serem utilizados para a espacialização desses coeficientes também é importante para estudos que utilizem séries históricas, as quais possuem em sua maioria somente dados de n .

A transmitância solar global, representada pela razão entre a radiação solar global e a radiação no topo da atmosfera, e a fração ou razão de brilho solar (quantidade de horas de brilho solar em relação ao comprimento máximo do dia), são empregadas na equação de Angström-Preseott para a determinação dos coeficientes b_0 e b_1 , os quais englobam os fatores que afetam os processos de absorção e difusão da radiação solar (Paulescu *et al.*, 2008).

Para o Rio Grande do Sul (RS), Berlatto (1971), Lopes (1971), Mota *et al.* (1977), Estefanel *et al.* (1990), Fontana

e Oliveira (1996) e Buriol *et al.* (2012), determinaram os coeficientes b_0 e b_1 somente para algumas localidades e regiões do Estado. Além disso, exceto no trabalho de Buriol *et al.* (2012) para Santa Maria, os coeficientes foram calculados antes dos anos 2000, quando o equipamento de medida da radiação solar global nas EMC do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) era o actinógrafo bimetalíco, um piranômetro analógico menos preciso que o piranômetro eletrônico utilizado a partir dos anos 2000 nas Estações Meteorológicas Automáticas do INMET. Assim, este trabalho teve o objetivo de determinar os coeficientes b_0 e b_1 da equação de Angström-Preseott para os locais do estado do RS que possuem dados de radiação solar medidos por piranômetros eletrônicos e dados de brilho solar medidos por heliógrafos, bem como espacializar esses coeficientes para o Estado.

2. Material e Métodos

Foram utilizados os dados diários de radiação solar global (Q_g , medida por piranômetro eletrônico) e brilho solar (n , medido por heliógrafo) de 13 estações meteorológicas pertencentes ao INMET, cujas coordenadas geográficas estão na Tabela 1 e as diferenças de níveis entre os locais analisados estão representadas no mapa altimétrico das estações (Fig. 1). Foram utilizados dados de sete anos (Tabela 1), sendo que para a determinação e validação dos coeficientes b_0 e b_1 da equação de Angström-Preseott foi utilizada a técnica de validação cruzada com particionamento dos dados pelo Método Holdout, onde 80% (seis anos) da série de dados destinaram-se para a determinação dos coeficientes e 20% (um ano) para a validação dos mesmos (Tabela 1). Primeiramente, os dados utilizados para a determinação dos coeficientes foram submetidos a uma análise de qualidade para eliminar dados espúrios e quantificar a falhas de dados (Tabela 2). Foi considerado falha quando não havia dado disponível de radiação solar diária e/ou brilho solar e também dados espúrios eliminados na análise de qualidade. O período de estudo para a determinação dos coeficientes não foi com anos ininterruptos devido à falta de dados diários em determinados anos e locais.

Dos 13 locais, 11 possuíam EMC (mede o n) e EMA (mede a Q_g) operando no mesmo local, que é a situação ideal para determinar os coeficientes b_0 e b_1 . Nos outros dois locais, Santa Vitória do Palmar e Iraí, havia somente a EMC e os dados de Q_g foram obtidos da EMA mais próxima, no Chuí (17 km de Santa Vitória do Palmar) e em Frederico Westphalen (23 km de Iraí), respectivamente.

Para visualizar a variabilidade da radiação solar foram elaborados mapas sazonais, ou seja, foi calculada a média da radiação solar diária para cada estação do ano: primavera, verão, outono e inverno com o mesmo período da série de dados utilizada para determinação dos coeficientes de Angström-Preseott (6 anos). Além disso, calculou-se também a média da radiação solar diária, para este

Tabela 1 - Coordenadas geográficas e período de estudo utilizado na determinação e validação dos coeficientes b_0 e b_1 da equação de Angström-Prescott.

Local	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período de estudo	
				Determinação dos coeficientes	Validação dos coeficientes
Bagé	-31,33	-54,10	242	2008-2013	2015
Cruz Alta	-28,63	-53,60	473	2008-2010	2012-2014
Iraí	-27,18	-53,23	247	2008-2013	2014
Lagoa Vermelha	-28,22	-51,50	840	2008-2013	2015
Passo Fundo	-28,22	-52,40	684	2008-2011	2013-2014
Porto Alegre	-30,02	-51,22	47	2009-2014	2015
Rio Grande	-32,03	-52,10	2	2002-2003	2005-2008
Santa Maria	-29,70	-53,70	95	2009-2014	2015
Santa Vitória do Palmar	-33,51	-53,35	24	2009-2014	2015
Santana do Livramento	-30,83	-55,60	328	2002-2004	2006-2008
São Luiz Gonzaga	-28,40	-55,02	245	2008-2010	2012-2014
Torres	-29,35	-49,73	5	2009-2014	2015
Uruguiana	-29,75	-57,08	62	2007-2010	2012-2013

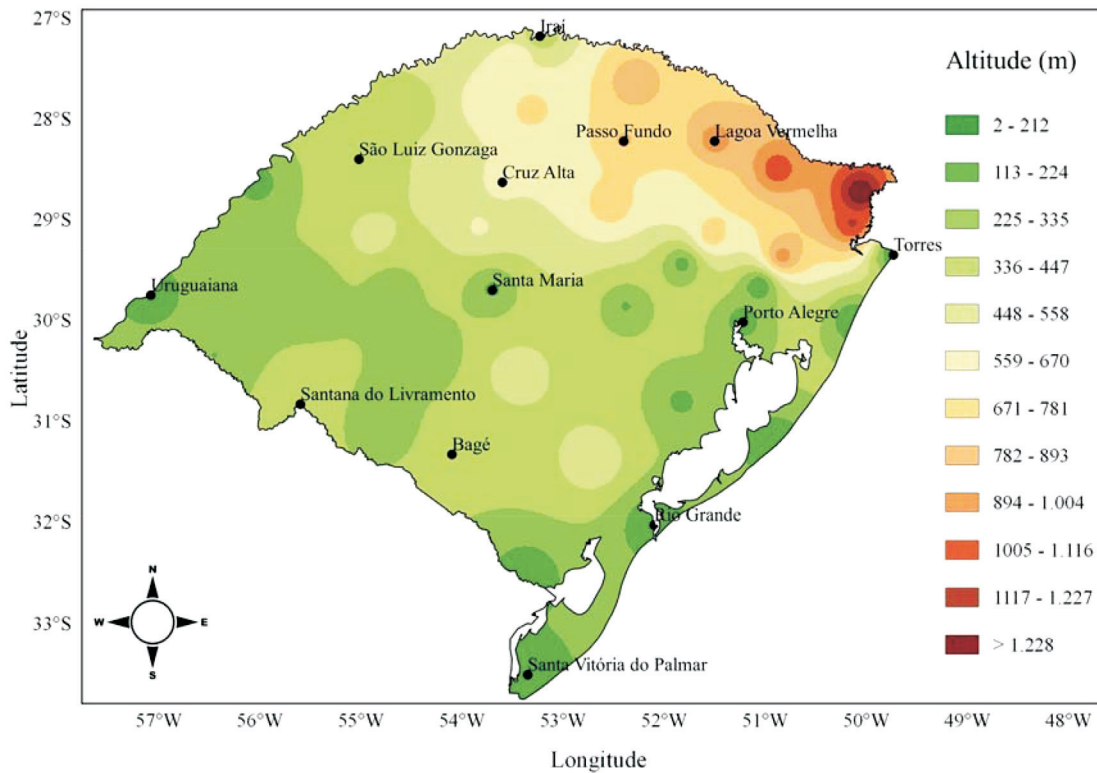


Figura 1 - Mapa altimétrico do Rio Grande do Sul e a localização das estações meteorológicas do INMET utilizadas no estudo.

mesmo período, separando os anos de acordo com as fases do El Niño-Oscilação Sul (ENOS): anos Neutros, anos de El Niño e anos de La Niña.

Para a determinação dos coeficientes b_0 e b_1 , calculou-se para cada dia, a razão de radiação solar global (R) e a razão de brilho solar (h), com as Eqs. (1) e (2) (Buriol *et al.*, 2012):

$$R = \frac{Q_g}{Q_o} \tag{1}$$

$$h = \frac{n}{N} \tag{2}$$

em que Q_g é a radiação solar global recebida na superfície terrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), Q_o é a radiação solar recebida no

Tabela 2 - Falha nos dados de radiação solar e/ou brilho solar durante o período de estudo utilizado para a determinação dos coeficientes.

	Falha nos dados (%)												
	2002	2003	2004*	2005	2006	2007	2008*	2009	2010	2011	2012*	2013	2014
Bagé	-	-	-	-	-	-	1	1	1	2	0	0	-
Cruz Alta	-	-	-	-	-	-	0	1	1	-	13	0	10
Iraí	-	-	-	-	-	-	1	1	2	1	6	1	-
Lagoa Vermelha	-	-	-	-	-	-	0	1	1	1	1	1	-
Passo Fundo	-	-	-	-	-	-	1	0	0	0	-	1	10
Porto Alegre	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	0	2	9
Rio Grande	10	10	-	4	2	1	2	-	-	-	-	-	-
Santa Maria	-	-	-	-	-	-	-	2	0	5	1	1	18
Santa Vitória do Palmar	-	-	-	-	-	-	-	1	2	25	47	46	48
Santana do Livramento	18	17	1	-	8	9	7	-	-	-	-	-	-
São Luiz Gonzaga	-	-	-	-	-	-	0	0	1	-	2	1	34
Torres	-	-	-	-	-	-	-	1	3	1	4	1	9
Uruguaiana	-	-	-	-	-	7	2	30	29	-	30	24	-

*Anos bissexto = 366 dias.

- Anos não utilizados.

topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), n é o brilho solar real (h dia^{-1}) e N é a duração máxima de brilho solar (h dia^{-1}).

O N e o Qo foram calculados, respectivamente, pelas Eqs. (3) e (4) (Ometto, 1981):

$$N = \left(\frac{2}{15} \right) \arccos(-\text{tg}\phi \cdot \text{tg}\delta) \quad (3)$$

$$Qo = 37,60 \cdot \left(\frac{Dm}{D} \right)^2 \cdot (H \cdot \text{sen}\phi \cdot \text{sen}\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \text{sen}H) \quad (4)$$

em que, ϕ é a latitude do local (em decimal), δ é a declinação solar (em decimal), Dm é a distância média Terra-Sol (km); D é a distância Terra-Sol no momento considerado (km) e H é a duração do dia solar (em radianos).

A duração do dia (H), foi calculada pela Eq. (5) (Buriol *et al.*, 2012):

$$H = \arccos(-\text{tg}\phi \cdot \text{tg}\delta) \quad (5)$$

Obtiveram-se os valores dos coeficientes $b0$ e $b1$ da equação de Angström-PreScott (Eq. (6)), por análise de regressão linear entre razão de radiação solar global (R) e razão de brilho solar (h), para os dados agrupados na escala mensal e anual:

$$Qg = Qo \left(b0 + b1 \cdot \frac{n}{N} \right) \quad (6)$$

em que $b0$ é o coeficiente linear e $b1$ é o coeficiente angular.

Os coeficientes $b0$ e $b1$ da Eq. (6), determinados nesse estudo, foram submetidos a análise de regressão linear múltipla considerando como preditores dos coeficientes as coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude), com o procedimento 'stepwise' em SAS (Statistical Analy-

sis Software) e ao nível de significância de 15%. A representação da variabilidade espacial dos coeficientes $b0$ e $b1$ no RS foi através de mapas gerados pelo programa GrADS (Grid Analysis and Display System) que utiliza o método de interpolação análise objetiva de Cressman (Cressman, 1959).

Para a validação dos coeficientes $b0$ e $b1$ com dados independentes, foi estimada a radiação solar global diária, no período de um ano (Tabela 1), através da equação de Angström-PreScott (Eq. (6)) utilizando os coeficientes mensais e anuais de cada local. Para a avaliação do desempenho dos coeficientes na estimativa de radiação solar global diária, foram utilizadas as estatísticas MBE (Mean Bias Error) - Eq. (7) (Souza *et al.*, 2011), MAE (Mean Absolute Error) - Eq. (8) (Hallak e Pereira Filho, 2011), RMSE (Root Mean Square Error) - Eq. (9) (Souza *et al.*, 2011), "d" (Índice de concordância de Willmott) - Eq. (10) (Willmott, 1981), e R^2 (Coeficiente de determinação) - Eq. (11) (Storck *et al.*, 2011), dados por:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{N} \quad (7)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N (|S_i - O_i|)}{N} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{N}} \quad (9)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i|)^2} \quad (10)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - \overline{O_i})^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \overline{O_i})^2} \tag{11}$$

em que S_i = valores estimados, O_i = valores observados, N = número de observações, $\overline{O_i}$ = média dos valores observados, $\overline{S_i}$ = média dos valores estimados.

O MBE representa o erro médio de tendência ou Viés e indica o desvio das médias. Esse erro retrata se os modelos estão com uma tendência de subestimativa ou superestimativa em relação aos valores observados (Hallak e Pereira Filho, 2011). O MAE ou erro médio absoluto é considerado preciso como medida da capacidade de modelos numéricos em reproduzir a realidade (Fox, 1981).

O RMSE é a raiz do erro quadrático médio e informa o valor real do erro produzido pelo modelo, na mesma dimensão da variável analisada. É utilizado para expressar a acurácia do modelo, mas não diferencia superestimativa de subestimativa. Quanto menores os valores de RMSE melhor o desempenho do modelo (Souza *et al.*, 2011).

O índice de concordância de Willmott “d” (Willmott, 1981) e o coeficiente de determinação R^2 (Storck *et al.*, 2011), variam de 0 a 1 e, ambos indicam o quanto os valores estimados se ajustam aos valores observados. Quanto mai-

or o R^2 , mais explicativo é o modelo, melhor ele se ajusta à amostra.

3. Resultados e Discussão

Analisando os mapas sazonais de radiação solar diária incidente observa-se que mesmo com uma quantidade reduzida de dados, o padrão sazonal do Rio Grande do Sul foi capturado, ou seja, a primavera e verão possuem maior incidência da radiação solar, e o outono e inverno possuem os menores valores (Fig. 2).

Quando se analisa a radiação solar incidente para cada fase do ENOS, as diferenças ficam perceptíveis (Fig. 3). Os maiores valores de radiação solar foram na fase Neutra e de La Niña ($0,34 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ maior nos anos de La Niña). Para os eventos de El Niño a radiação solar diária é menor, como se esperava, devido à maior ocorrência de chuvas e consequente maior cobertura de nuvens durante esses eventos (Fig. 3).

Os coeficientes b_0 e b_1 da equação de Angström-Prescott estimados para os 13 locais no RS (Tabela 3) indicam, respectivamente, a fração da radiação solar global diária esperada em dias sem brilho solar (completamente nublado) e a taxa de variação de Q_g para cada hora de brilho

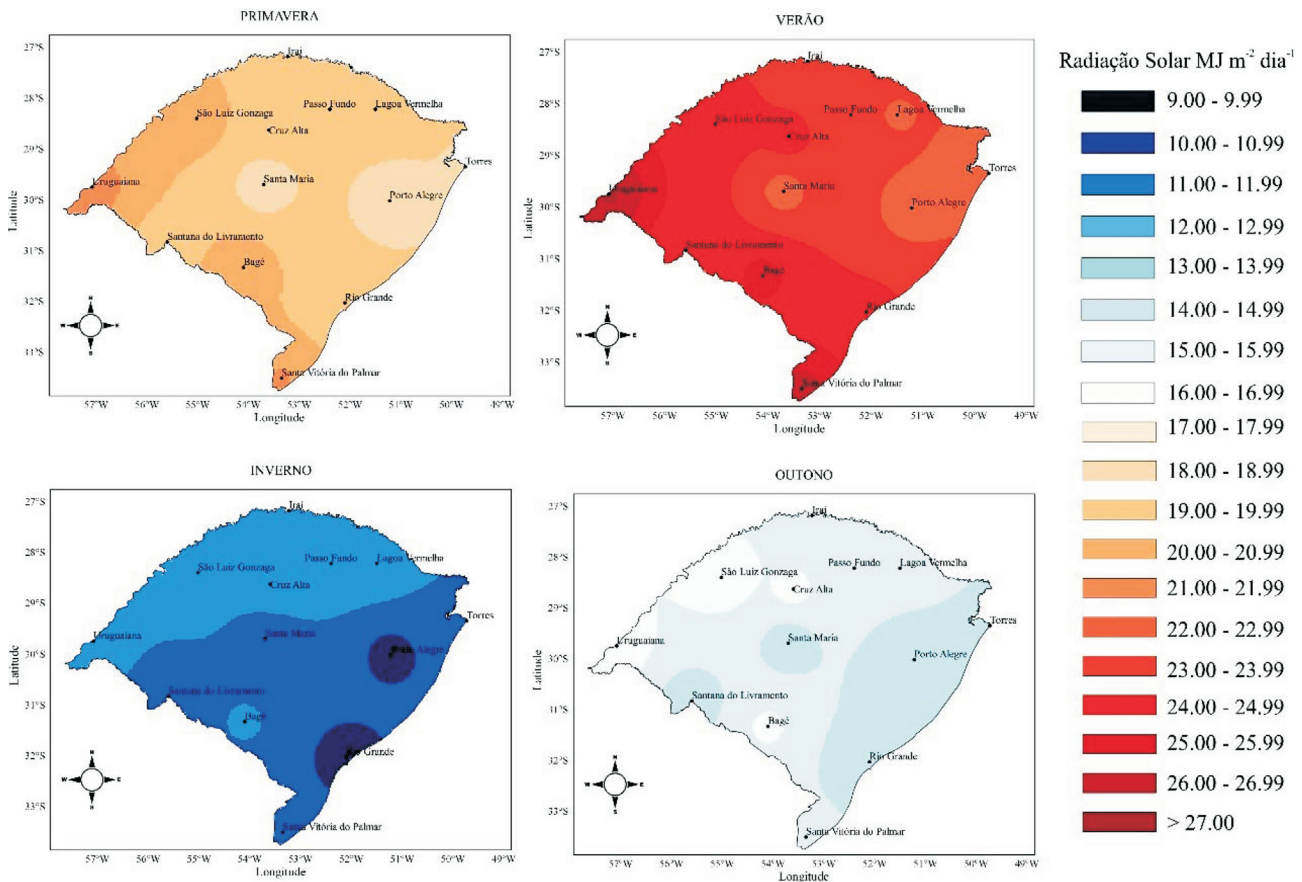


Figura 2 - Radiação solar diária incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) nas quatro estações do ano (Primavera, Verão, Outono e Inverno) no Rio Grande do Sul durante o período utilizado para determinar os coeficientes de Angström-Prescott.

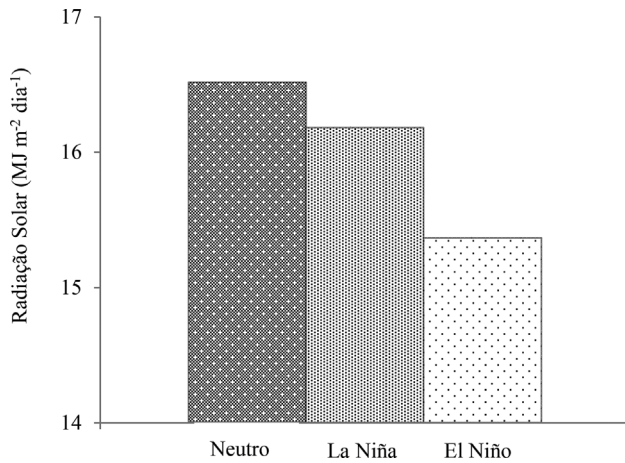


Figura 3 - Radiação solar diária incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) média para as três fases do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) no Rio Grande do Sul durante o período utilizado para determinar os coeficientes de Angström-Preccott.

solar. Os coeficientes de determinação (R^2), de modo geral, foram semelhantes aos encontrados por Buriol *et al.* (2012) e maior que os encontrados por Fontana e Oliveira (1996), confirmando a forte relação entre as variáveis radiação solar global e brilho solar.

Analisando os valores mensais do coeficiente b_0 , para os meses de verão os valores são mais elevados que para os meses de inverno (Tabela 3), pois segundo Estefanel *et al.* (1990) apesar de proporcionalmente a radiação solar difusa ser maior no inverno, quantitativamente é menor que no verão. Já os valores do coeficiente b_1 são mais elevados para a maioria dos locais nos meses de primavera (setembro e outubro) e em alguns locais nos meses de inverno (junho e julho) (Tabela 3), pois nestes meses a transmissividade da atmosfera em dias completamente límpidos é maior do que no verão, devido a menor quantidade de poeira no ar e a frequente entrada de massas de ar frio e

Tabela 3 - Coeficientes b_0 e b_1 mensal e anual da equação de Angström-Preccott para estimar a radiação solar global a partir do brilho solar e coeficientes de determinação (R^2), para as 13 localidades do Rio Grande do Sul.

Local	Coeficientes	Mensal												Anual
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Bagé	b_0	0,25	0,22	0,25	0,22	0,21	0,19	0,17	0,19	0,18	0,18	0,21	0,23	0,20
	b_1	0,56	0,56	0,51	0,55	0,53	0,57	0,58	0,59	0,64	0,62	0,60	0,62	0,59
	R^2	0,88	0,90	0,88	0,92	0,89	0,91	0,94	0,90	0,91	0,90	0,91	0,92	0,90
Cruz Alta	b_0	0,21	0,21	0,20	0,15	0,20	0,17	0,16	0,18	0,14	0,16	0,17	0,20	0,18
	b_1	0,56	0,55	0,56	0,60	0,58	0,65	0,64	0,56	0,62	0,62	0,60	0,59	0,60
	R^2	0,90	0,91	0,92	0,92	0,89	0,92	0,91	0,90	0,94	0,94	0,92	0,91	0,91
Iraí	b_0	0,29	0,26	0,20	0,19	0,20	0,21	0,18	0,20	0,19	0,20	0,25	0,27	0,21
	b_1	0,48	0,48	0,60	0,60	0,57	0,57	0,60	0,58	0,66	0,63	0,54	0,52	0,57
	R^2	0,85	0,83	0,20	0,86	0,83	0,77	0,84	0,84	0,89	0,85	0,85	0,81	0,83
Lagoa Vermelha	b_0	0,28	0,27	0,23	0,21	0,19	0,18	0,17	0,18	0,17	0,20	0,25	0,23	0,21
	b_1	0,54	0,52	0,60	0,59	0,58	0,62	0,62	0,59	0,68	0,67	0,57	0,61	0,60
	R^2	0,89	0,89	0,90	0,91	0,93	0,93	0,94	0,91	0,91	0,90	0,91	0,90	0,89
Passo Fundo	b_0	0,24	0,25	0,21	0,20	0,20	0,16	0,16	0,20	0,16	0,18	0,22	0,22	0,20
	b_1	0,51	0,47	0,53	0,52	0,52	0,59	0,56	0,55	0,63	0,58	0,53	0,55	0,55
	R^2	0,92	0,91	0,90	0,90	0,92	0,92	0,93	0,86	0,93	0,92	0,92	0,92	0,91
Porto Alegre	b_0	0,21	0,20	0,20	0,19	0,18	0,15	0,14	0,16	0,16	0,20	0,19	0,21	0,18
	b_1	0,53	0,53	0,55	0,56	0,57	0,61	0,63	0,59	0,62	0,56	0,57	0,54	0,58
	R^2	0,91	0,92	0,92	0,91	0,91	0,94	0,94	0,92	0,91	0,91	0,93	0,92	0,92
Rio Grande	b_0	0,23	0,21	0,23	0,22	0,21	0,20	0,20	0,17	0,19	0,22	0,22	0,27	0,21
	b_1	0,53	0,53	0,51	0,50	0,47	0,48	0,49	0,56	0,56	0,55	0,54	0,48	0,52
	R^2	0,89	0,88	0,89	0,88	0,86	0,86	0,89	0,89	0,88	0,90	0,88	0,88	0,87
Santa Maria	b_0	0,20	0,20	0,19	0,18	0,19	0,17	0,15	0,15	0,14	0,18	0,18	0,18	0,17
	b_1	0,56	0,52	0,54	0,53	0,51	0,55	0,56	0,55	0,60	0,56	0,57	0,59	0,56
	R^2	0,92	0,90	0,92	0,90	0,89	0,91	0,93	0,93	0,93	0,92	0,90	0,94	0,91
Santa Vitória do Palmar	b_0	0,25	0,26	0,24	0,23	0,22	0,21	0,19	0,19	0,22	0,21	0,21	0,25	0,22
	b_1	0,60	0,53	0,56	0,54	0,55	0,63	0,60	0,57	0,61	0,64	0,63	0,61	0,60
	R^2	0,82	0,76	0,75	0,80	0,81	0,83	0,83	0,80	0,76	0,84	0,88	0,89	0,81

Table 3 - cont.

Local	Coeficientes	Mensal												Anual
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Santana do Livramento	b_0	0,26	0,22	0,18	0,22	0,24	0,18	0,18	0,18	0,15	0,18	0,20	0,22	0,19
	b_1	0,49	0,52	0,57	0,52	0,49	0,57	0,56	0,54	0,60	0,59	0,58	0,56	0,56
	R^2	0,82	0,84	0,88	0,79	0,76	0,84	0,87	0,86	0,93	0,89	0,90	0,85	0,86
São Luiz Gonzaga	b_0	0,25	0,26	0,20	0,17	0,22	0,20	0,18	0,19	0,18	0,19	0,24	0,22	0,21
	b_1	0,56	0,52	0,58	0,61	0,56	0,60	0,61	0,58	0,63	0,64	0,59	0,64	0,59
	R^2	0,87	0,88	0,92	0,92	0,90	0,93	0,91	0,92	0,92	0,92	0,87	0,91	0,90
Torres	b_0	0,24	0,24	0,23	0,20	0,23	0,19	0,18	0,16	0,18	0,24	0,26	0,24	0,22
	b_1	0,58	0,55	0,57	0,56	0,50	0,54	0,54	0,58	0,65	0,58	0,55	0,59	0,56
	R^2	0,90	0,92	0,91	0,94	0,91	0,92	0,92	0,93	0,89	0,88	0,91	0,90	0,89
Uruguaiiana	b_0	0,31	0,30	0,28	0,30	0,24	0,23	0,21	0,25	0,19	0,23	0,24	0,26	0,24
	b_1	0,49	0,46	0,50	0,48	0,54	0,56	0,57	0,52	0,63	0,58	0,56	0,55	0,55
	R^2	0,78	0,77	0,75	0,76	0,73	0,77	0,76	0,78	0,86	0,85	0,77	0,75	0,79

seco no RS (Mota, 1977; Estefanel *et al.*, 1990). Os valores de b_0 e b_1 mensais encontrados para Santa Maria (Tabela 3) são próximos aos encontrados por Buriol *et al.* (2012), que determinaram os coeficientes b_0 e b_1 mensais para Santa Maria, no período de 2002 a 2008, como por exemplo, para janeiro os valores foram 0,24 e 0,54 e em julho foram 0,17 e 0,61, para b_0 e b_1 respectivamente.

Na distribuição espacial dos valores anuais dos coeficientes b_0 e b_1 , o primeiro possui valores mais baixos na maior parte da região Central do estado e na região de Cruz Alta, com valores variando de 0,16 a 0,18 (Fig. 4A). Isso possivelmente ocorre por essa região ter períodos mais longos com nevoeiro e também umidade relativa mais alta,

principalmente durante os meses mais frios (de junho a setembro, Fig. 5) proporcionando assim, mais radiação difusa, o que faz diminuir o coeficiente b_0 . O coeficiente b_1 não apresentou um padrão, sendo as regiões Nordeste, Noroeste e parte da região Sul as que apresentaram valores mais elevados, variando de 0,58 a 0,62 (Fig. 4B), provavelmente por serem regiões mais altas, possuindo uma transmissividade maior.

Os valores anuais de b_0 e b_1 encontrados por Fontana e Oliveira (1996) para as localidades de Cruz Alta (0,20 e 0,53, respectivamente), Rio Grande (0,27 e 0,32, respectivamente) e Uruguaiiana (0,24 e 0,41, respectivamente) são menores e maiores, respectivamente, que os encontrados no

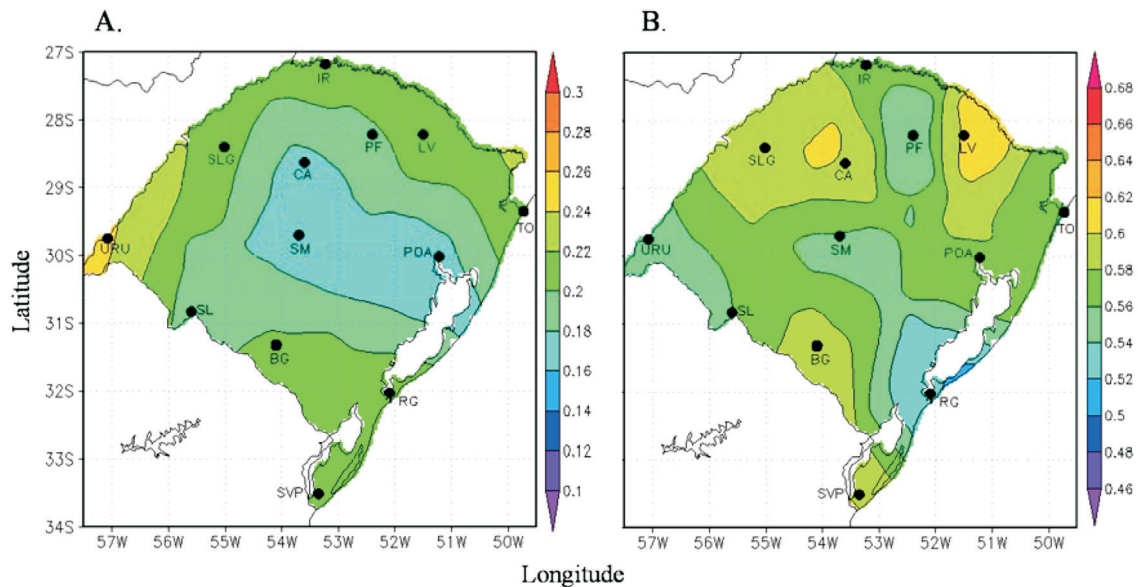


Figura 4 - Coeficientes anuais b_0 (A) e b_1 (B) da equação de Angström-Prescott para estimar a radiação solar global a partir do brilho solar, no Rio Grande do Sul. SVP: Santa Vitória do Palmar, RG: Rio Grande, BG: Bagé, SL: Santana do Livramento, URU: Uruguaiiana, SM: Santa Maria, POA: Porto Alegre, TO: Torres, LV: Lagoa Vermelha, PF: Passo Fundo, CA: Cruz Alta, SLG: São Luiz Gonzaga, IR: Iraí.

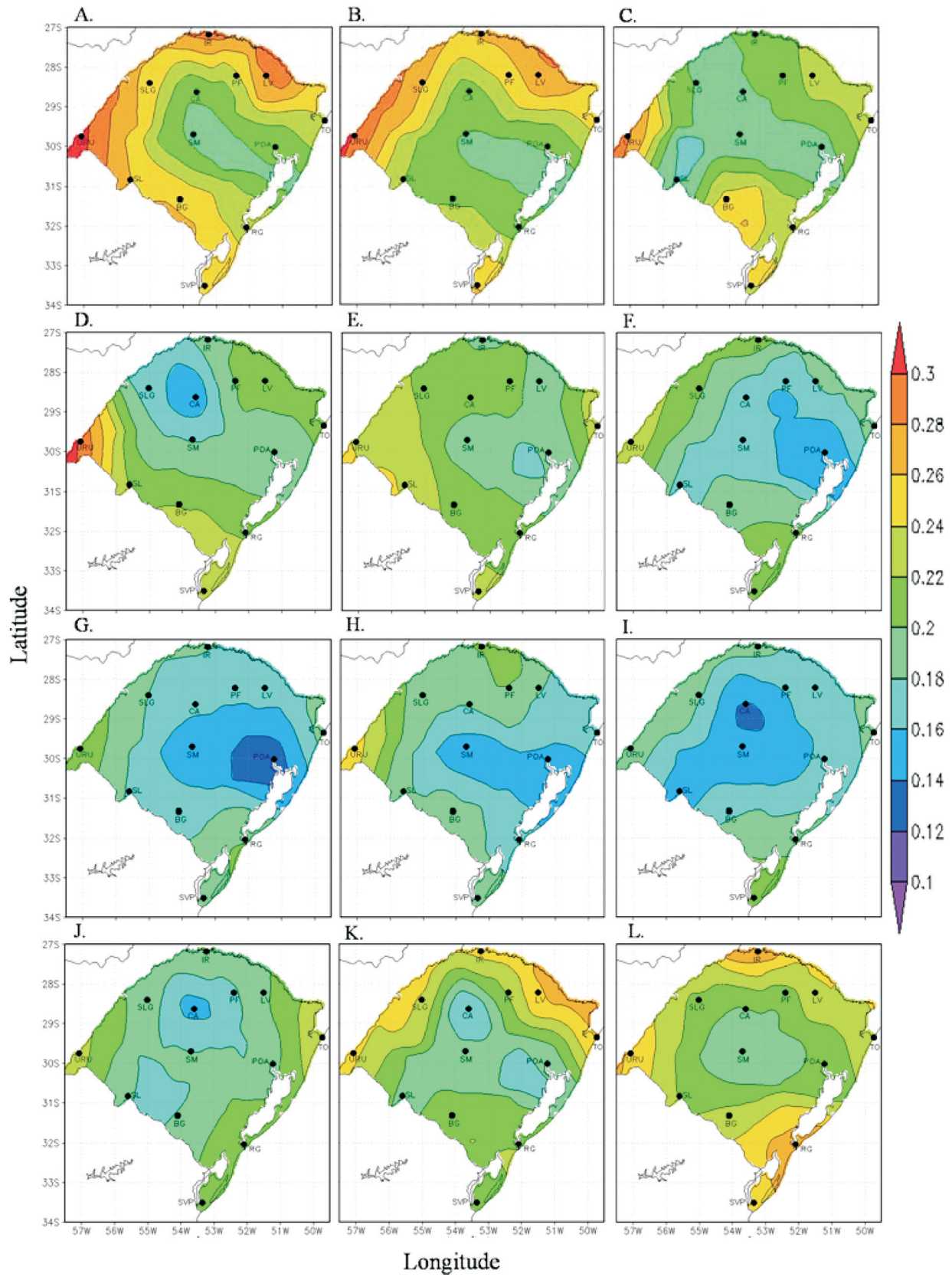


Figura 5 - Coeficientes mensais b_0 da equação de Angström-Prescott para estimar a radiação solar global a partir do brilho solar, no Rio Grande do Sul. (A) Janeiro, (B) Fevereiro, (C) Março, (D) Abril, (E) Maio, (F) Junho, (G) Julho, (H) Agosto, (I) Setembro, (J) Outubro, (K) Novembro e (L) Dezembro. SVP: Santa Vitória do Palmar, RG: Rio Grande, BG: Bagé, SL: Santana do Livramento, URU: Uruguaiiana, SM: Santa Maria, POA: Porto Alegre, TO: Torres, LV: Lagoa Vermelha, PF: Passo Fundo, CA: Cruz Alta, SLG: São Luiz Gonzaga, IR: Iraí.

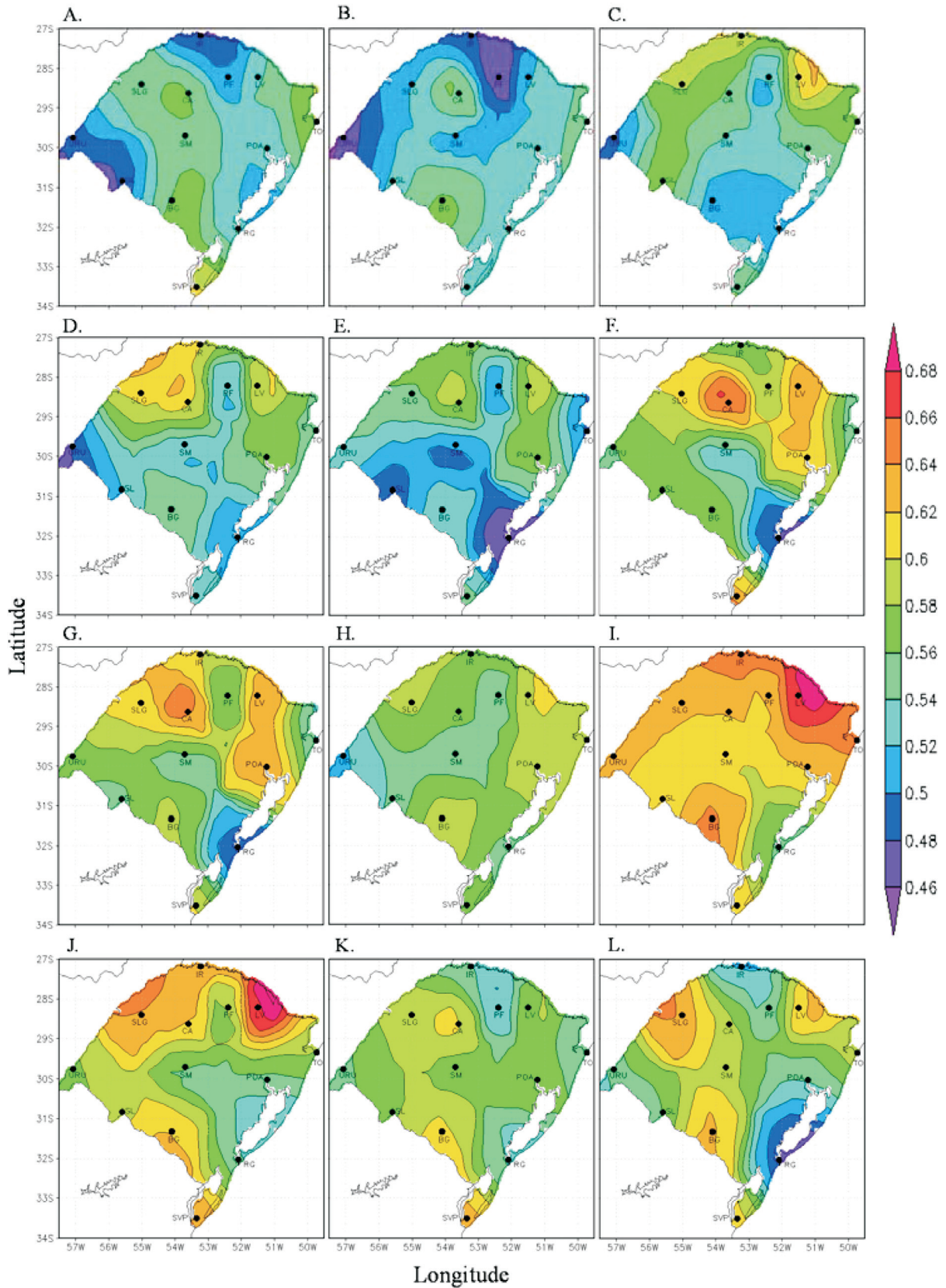


Figura 6 - Coeficientes mensais b_1 da equação de Angström-Prescott para estimar a radiação solar global a partir do brilho solar, no Rio Grande do Sul. (A) Janeiro, (B) Fevereiro, (C) Março, (D) Abril, (E) Maio, (F) Junho, (G) Julho, (H) Agosto, (I) Setembro, (J) Outubro, (K) Novembro e (L) Dezembro. SVP: Santa Vitória do Palmar, RG: Rio Grande, BG: Bagé, SL: Santana do Livramento, URU: Uruguaiana, SM: Santa Maria, POA: Porto Alegre, TO: Torres, LV: Lagoa Vermelha, PF: Passo Fundo, CA: Cruz Alta, SLG: São Luiz Gonzaga, IR: Iraí.

Tabela 4 - Estatísticas utilizadas para avaliar o desempenho da equação de Angström-Prescott na estimativa da radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), utilizando os coeficientes b_0 e b_1 mensal.

Locais	MBE ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)	MAE ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)	RMSE ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)	d	R ²
Bagé	0,10	1,62	2,16	0,98	0,94
Cruz Alta	0,31	1,75	2,79	0,97	0,88
Iraí	-0,30	2,59	3,51	0,95	0,90
Lagoa Vermelha	0,22	1,42	1,90	0,98	0,92
Passo Fundo	-0,47	1,79	2,41	0,97	0,90
Porto Alegre	0,15	1,41	1,94	0,98	0,93
Rio Grande	0,44	1,46	1,99	0,98	0,94
Santa Maria	0,01	1,36	1,85	0,98	0,94
Santa Vitória do Palmar	1,32	1,55	1,86	0,99	0,98
Santana do Livramento	0,76	1,54	2,07	0,98	0,94
São Luiz Gonzaga	-0,12	1,66	2,34	0,98	0,92
Torres	0,51	1,69	2,44	0,97	0,91
Uruguaiana	-0,60	2,69	3,76	0,95	0,81

presente trabalho (Tabela 3). Isto ocorre, possivelmente, pelo uso de diferentes instrumentos medidores da radiação solar global.

Para o coeficiente b_0 mensal, notou-se que os valores são mais baixos na região Central do RS e, especificamente durante os meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro (Fig. 5 F,G,H,I) e mais elevados na região Oeste, Norte e Sul do estado, indicando que a radiação difusa é maior em Janeiro e menor em Julho (Buriol *et al.*, 2012). O coeficiente b_1 mensal, não apresentou um padrão (Fig. 6), porém analisando isoladamente os meses de Janeiro e Julho, estes corroboram com Buriol *et al.* (2012), em que b_1 é maior em Julho e menor em Janeiro, indicando que a transmissividade da atmosfera é maior no mês mais frio.

A análise de regressão múltipla indicou que o efeito das coordenadas geográficas sobre os coeficientes b_0 e b_1 não é significativo para a maioria dos meses do ano. Para os coeficientes mensais b_1 , apenas a latitude foi significativa em 5 meses (Mar, Abr, Mai, Set e Nov), para b_0 apenas a longitude foi significativa em 4 meses (Jan, Mai, Jun e Ago) e a altitude foi significativa para b_0 e b_1 apenas em Outubro e b_1 em Junho. Assim, a estimativa dos coeficientes b_0 e b_1 para as localidades do RS que não sejam as 13 listadas na Tabela 3 poderá ser realizada por meio de interpolações dos coeficientes com o auxílio dos mapas apresentados nas Figs. 4, 5 e 6.

As estatísticas indicam bom desempenho da equação de Angström-Prescott em estimar a radiação solar global utilizando os coeficientes b_0 e b_1 mensal (Tabela 4). Dos 13 locais, a equação está subestimando a radiação solar global diária em 4 locais: Iraí, Passo Fundo, São Luiz Gonzaga e Uruguaiana. O maior RMSE foi de $3,76 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, em Uruguaiana e o menor foi de $1,85 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, em Santa Maria. Além disso, o índice de determinação (R^2) não foi inferior a 80% e o índice de concordância de Willmott (d) não foi inferior a 95% em nenhuma estimativa.

4. Conclusões

1. Os coeficientes b_0 e b_1 da equação de Angström-Prescott foram determinados para 13 locais do Rio Grande do Sul e nos outros locais estes coeficientes podem ser estimados através dos mapas.

2. O coeficiente b_0 diminui durante o inverno e aumenta durante o verão enquanto os valores do coeficiente b_1 são mais elevados para os meses de inverno e primavera.

3. Não foi encontrada relação entre os coeficientes b_0 e b_1 e as coordenadas geográficas, segundo a análise de regressão múltipla. A não dependência dos coeficientes com as coordenadas se dá pelas características específicas de cada local.

4. A equação de Angström-Prescott apresentou desempenho satisfatório em estimar a radiação solar global diária a partir do brilho solar, usando os coeficientes b_0 e b_1 mensais e anuais determinados nesse estudo.

Referências

- BERLATO, M.A. Radiação Solar no Estado do Rio Grande do Sul. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 5, p. 115-131, 1971.
- BERUSKI, G.C.; PEREIRA, A.B.; SENTELHAS, P.C. Desempenho de diferentes modelos de estimativa da radiação solar global em Ponta Grossa, PR. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 30, n. 2, p. 205-213, 2015.
- BURIOL, G.A.; ESTEFANEL, V.; HELDWEIN, A.B.; PRESSES, S.D.; HORN, J.F.C. Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria - RS. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 9, p. 1563-1567, 2012.
- CARVALHO, D.F.; SILVA, D.G. da; SOUZA, A.P. de; GOMES, D.P.; ROCHA, H.S. da. Coeficientes da equação de Angström-Prescott e sua influência na evapotranspiração de referência em Seropédica, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 8, p. 838-844, 2011.

- CRESSMAN, G.P. An operational objective analysis system. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 87, n. 10, p. 367-374, 1959.
- DORNELAS, K.D.S.; SILVA, C.L. da; OLIVEIRA C.A. da S. Coeficientes médios da equação de Angström-Precott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 8, p. 1213-1219, 2006.
- ESTEFANEL, V.; SCHNEIDER, F.M; BERLATO, M.A.; BURIOL, G.A; HELDWEIN, A.B. Insolação e radiação solar global na região de Santa Maria, RS: I - Estimativa da radiação solar global incidente a partir dos dados de insolação. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, v. 20, n. 3-4, p. 203-218, 1990.
- FONTANA, D.C.; OLIVEIRA, D. Relação entre radiação solar global e insolação para o Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 4, p. 87-91, 1996.
- FOX, D.G. Judging Air Quality Model Performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 62, p. 599- 609, 1981.
- HALLAK, R.; PEREIRA FILGO, A.J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 26, n. 4, p. 591-608, 2011.
- LOPES, N.F.; GOMES, A.S.; MOTTA, F.S.; GARCET, J.R.B.; GOEDERT, C.O. *et al.* **Estimativa da radiação solar durante o ciclo vegetativo dos cereais no Rio Grande do Sul**. Pelotas: IPEAS, 1971. 32 p. (Boletim Técnico, 73).
- MOTA, F.S. da; BEIRSDORF, M.I.C.; ACOSTA, M.J.C. Estimativa preliminar da radiação solar no Brasil. **Ciência e Cultura**, Pelotas, v. 29, n. 11, p. 1274-1283, 1977.
- OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 425p.
- PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings Royal Society**, London, v. 193, n. 1032, p. 120-145, 1948.
- PAULESCU, M.; PAUL, G.; TUCAN-PAULESCU, E. Fuzzy logic algorithms for atmospheric transmittances of use in solar energy estimation. **Energy Conversion and Management**, Belton, v. 49, n. 12, p. 3691-3697, 2008.
- SOUZA, P.A; ESCOBEDO, J.F.; DAL PAL, A.; GOMES, E.N. Estimativas das componentes da radiação solar incidente em superfícies inclinadas baseadas na radiação global horizontal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 277-288, 2011.
- STORCK, L.; GARCIA, D.C.; LOPES, S.J.; ESTEFANEL, V. **Experimentação Vegetal**. Santa Maria: Ed. Da UFSM, 2011. 200p.
- WREGGE M.S.; STEINMETZ, S.; REISSER JUNIOR, C.; ALMEIDA, I.R. de. **Atlas climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Brasília: EMBRAPA, 2012.
- WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981.