

Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 87-91, 1996.

Recebido para publicação em 23/02/95. Aprovado em 08/11/95.

ISSN 0104-1347

## **RELAÇÃO ENTRE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E INSOLAÇÃO PARA O ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL<sup>1</sup>**

### **RELATIONSHIP BETWEEN DECENIAL GLOBAL SOLAR RADIATION AND INSOLATION IN THE STATE OF RIO GRANDE DO SUL**

Denise Cybis Fontana<sup>2</sup> e Daniela Oliveira<sup>3</sup>

#### **RESUMO**

A radiação solar global é um elemento meteorológico não usualmente medido nas estações meteorológicas, sendo importante buscar formas de estimá-lo. O objetivo deste trabalho foi determinar os coeficientes da equação de Ångström que relaciona a radiação solar global e a insolação para o estado do Rio Grande do Sul. Neste sentido, foram ajustadas equações de regressão linear utilizando valores deceniais de densidade de fluxo de radiação solar global e de insolação, período 1980-90, de 20 estações agrometeorológicas pertencentes à FEPAGRO/SCT-RS. Verificou-se que para o estado do Rio Grande do Sul é possível estimar a radiação solar global, em nível decenal, em locais onde haja disponibilidade de dados de insolação. Houve associação entre o coeficiente  $b_1$  e fatores como latitude, altitude e transmissividade atmosférica.

**Palavras-chave:** radiação solar global, insolação, equação de Ångström

#### **SUMMARY**

Global solar radiation is not usually measured on meteorological stations. Therefore, it is

---

<sup>1</sup>Projeto Parcialmente financiado pelo CNPq.

<sup>2</sup>Eng<sup>a</sup> Agr<sup>a</sup>, Dr<sup>a</sup>, Prof<sup>a</sup> da Faculdade de Agronomia-UFRGS, Cx. Postal 776, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS.

<sup>3</sup>Bolsista de iniciação científica do CNPq, Faculdade de Agronomia-UFRGS, Cx. Postal 776, CEP 91501-970,

Porto Alegre, RS.

important to seek away to estimate the amount of solar radiation incidente. The objective of this study was to determine Ångstrom coefficients, which relate global solar radiation and insolation in the state of Rio Grande do Sul. Linear regressions using decennial data of flux density of solar radiation and insolation (1980-90) from 20 agrometeorological stations of FEPAGRO/SCT-RS, were adjusted. It was found that in the state of Rio Grande do Sul it is possible to estimate global solar radiation, at decennial level, in locations where there are available insolation data. We find good association among  $b_1$  coefficient and latitude, altitude and atmospheric transmissivity.

**Key words:** global solar radiation, insolation, Ångstrom's equation.

## INTRODUÇÃO

A radiação solar global é um elemento meteorológico muito importante para o cálculo da evapotranspiração, realização de zoneamentos agroclimáticos e estabelecimento/utilização de modelos de crescimento e produção de culturas. Entretanto, apesar de sua grande importância, não é usualmente medido nas estações meteorológicas, devido principalmente ao custo dos instrumentos de medição direta. É sabido, entretanto, que existe uma relação entre a densidade de fluxo de radiação solar recebida na superfície da terra e a insolação.

Autores de diversas partes do globo têm buscado estimar a densidade de fluxo de radiação solar global através do estabelecimento de relações empíricas com a insolação, já que esse é um elemento mais facilmente determinado. CHANG (1968) apontou valores de 0,23 e 0,48 para os coeficientes  $b_0$  e  $b_1$  da equação de Ångstrom como médias mundiais. Porém, é sabido que estes coeficientes dependem, principalmente, da camada atmosférica a ser atravessada pela radiação solar, sendo, portanto, influenciados pela latitude e altitude do local, assim como pela época do ano. Para as condições do Rio Grande do Sul, BERLATO (1971), LOPES (1971), MOTA et al. (1977) e ESTEFANEL et al. (1990), ajustaram coeficientes de equações empíricas para algumas localidades do Estado para a estimativa da radiação solar global a partir da insolação.

Buscando uma melhor caracterização das regiões ecoclimáticas do Estado, através da utilização de um número maior de estações meteorológicas em relação aos trabalhos citados anteriormente e utilizando dados decenciais, o presente trabalho teve como objetivo determinar os coeficientes da equação de Ångstrom que relaciona a densidade de fluxo de radiação solar global e a insolação para o Estado do Rio Grande do Sul.

## MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados valores médios decendiais de densidade de fluxo de radiação solar global e de insolação, referentes ao período de 1980-90, oriundos de 20 estações agrometeorológicas pertencentes à Fundação de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio Grande do Sul (FEPAGRO/SCT-RS).

Para o estabelecimento destas relações foram utilizadas equações de regressão linear, ajustadas pelo método dos mínimos quadrados, para cada localidade, região ecoclimática (RIO GRANDE DO SUL, 1994) e para todo o Estado, em intervalos de tempo mensal e anual.

A equação geral utilizada foi:

$$\frac{R_s}{R_a} = b_0 + b_1 \frac{n}{N} \quad (1)$$

sendo  $R_s$  a densidade de fluxo de radiação solar global decendial ( $\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ),  $n$  o número de horas de insolação ocorridas em períodos decendiais,  $R_a$  a densidade de fluxo de radiação solar incidente numa superfície horizontal paralela à superfície do solo no topo da atmosfera ( $\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ),  $N$  o número de horas de insolação astronomicamente possível, e  $b_0$  e  $b_1$  os coeficientes da equação de regressão linear.

Os valores de densidade de fluxo de radiação solar global ( $R_s$ ) e de insolação ( $n$ ) foram provenientes de medições sistemáticas e ininterruptas, realizadas nas estações agrometeorológicas, utilizando o actinógrafo (bimetálico - Fuess) e o heliógrafo (Fuess), respectivamente.

A densidade de fluxo de radiação solar global incidente numa superfície horizontal paralela à superfície do solo no topo da atmosfera ( $R_a$ ) foi calculada por:

$$R_a = \frac{1440}{p} S \left( \frac{\bar{d}}{d} \right)^2 H \sin \mathbf{q} \sin \mathbf{d} + \\ + \cos \mathbf{q} \cos \mathbf{d} \sin H \quad (2)$$

sendo  $S$  a constante solar ( $2,0 \text{ lymin}^{-1}$ ),  $d$  a distância média do Sol a Terra ( $150 \times 10^6 \text{ Km}$ ),  $d$  a

distância do Sol a Terra na época considerada (fornecida pelo anuário astronômico),  $H$  o ângulo horário ( $H$  no primeiro termo a direita é expresso em radianos),  $\theta$  a latitude e  $\delta$  a declinação do sol (fornecida pelo anuário astronômico).

O ângulo horário ( $H$ ) no momento do nascer astronômico do sol foi calculado pela expressão:

$$H = \arccos(-\operatorname{tg} \theta \operatorname{tg} \delta) \quad (3)$$

O número astronomicamente possível de horas de sol ( $N$ ) foi obtido de valores tabelados em função da latitude e época do ano (CHANG, 1971).

Os coeficientes das equações obtidas foram submetidos ao teste F utilizando o nível de 5% de probabilidade de erro e os valores calculados foram comparados com valores de uma tabela estatística.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os coeficientes médios anuais da equação de regressão linear que relacionou a densidade de fluxo de radiação solar global e a insolação para as 20 localidades estudadas. Todos os coeficientes foram significativos ao nível de 5% de probabilidade, indicando que para os locais utilizados neste trabalho é possível estimar falhas de medidas, assim como, corrigir eventuais erros de medida em séries climáticas.

A extrapolação destes coeficientes para outras localidades que não aquelas que deram origem aos coeficientes somente é possível caso exista associação entre os coeficientes da equação de Ångstrom e fatores como latitude e altitude. Seria esperado que os coeficientes  $b_1$  aumentassem com o aumento da altitude e diminuição da latitude, visto que estes coeficientes estão relacionados à transmissividade atmosférica e que a camada de ar que a radiação solar atravessa para atingir a superfície é menor em altas altitudes e baixas latitudes (ESTEFANEL et al., 1990).

Tabela 1 - Coordenadas geográficas e coeficientes da equação de Ångstrom ( $b_0$  e  $b_1$ ) para estimar a densidade de fluxo de radiação solar global, média anual, a partir da insolação, coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e número de observações ( $n$ ) para algumas localidades do Estado do Rio Grande do Sul, período 1980-90.

	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE (m)	$b_0$	$b_1$	$r^2$	$n$
Alegrete	29°46'59"	55°46'59"	96	0,19	0,49	0,57	202
Cachoeirinha	29°57'36"	51°04'22"	4	0,20	0,56	0,67	393
Cruz Alta	28°38'21"	53°36'34"	473	0,20	0,53	0,64	349
Encruzilhada do Sul	30°32'35"	52°31'20"	420	0,15	0,47	0,68	316
Erechim	27°37'46"	52°16'33"	760	0,19	0,47	0,43	351
Farroupilha	29°14'30"	51°26'20"	702	0,17	0,60	0,53	338
Eldorado do Sul	30°04'25"	51°43'42"	46	0,15	0,47	0,68	316
Ijuí	28°23'17"	53°54'50"	448	0,25	0,46	0,50	271
Júlio de Castilhos	29°13'26"	53°40'45"	514	0,17	0,62	0,77	393
Osório	29°40'49"	50°13'56"	32	0,17	0,50	0,45	387
Quaraí	30°23'17"	56°26'53"	100	0,25	0,38	0,59	335
Rio Grande	32°01'44"	52°15'37"	15	0,27	0,32	0,52	306
Santa Rosa	27°51'50"	54°25'59"	360	0,15	0,55	0,69	360
Santo Augusto	27°51'24"	54°46'59"	380	0,17	0,53	0,65	216
Soledade	29°03'14"	52°26'00"	716	0,23	0,41	0,64	349
São Gabriel	30°27'27"	54°19'01"	109	0,23	0,45	0,71	337
Taquari	29°48'15"	51°49'30"	76	0,24	0,41	0,57	388
Uruguaiana	29°45'23"	57°05'12"	74	0,24	0,41	0,50	220
Vacaria	28°30'09"	50°56'12"	955	0,25	0,46	0,51	271
Veranópolis	28°56'14"	51°33'11"	705	0,21	0,40	0,46	316

O efeito da altitude sobre o coeficiente  $b_1$ , que pode ser analisado em locais situados em latitudes próximas e altitudes diferentes, foi observado em Ijuí e Cruz Alta (0,46 e 0,53, respectivamente), Veranópolis e Vacaria (0,40 e 0,46 respectivamente), Taquari e Alegrete (0,41 e 0,49, respectivamente), Alegrete e Júlio de Castilhos (0,49 e 0,62, respectivamente) e Quaraí e Encruzilhada de Sul (0,38 e 0,47, respectivamente). Nos casos citados as localidades estão situadas em latitudes semelhantes e o aumento na altitude determinou aumento no valor médio anual do coeficiente  $b_1$ , ou seja, coerente com o esperado.

Da mesma forma, utilizando locais situados em altitudes próximas e latitudes distintas, pode-se analisar o efeito da latitude sobre o coeficiente  $b_1$ . A tendência de diminuição no valor do  $b_1$  médio anual com o aumento da latitude foi observado nos casos de Cruz Alta e Encruzilhada do Sul (0,53 e 0,47, respectivamente), Erechim e Veranópolis (0,47 e 0,40, respectivamente) e Eldorado do Sul e Rio Grande (0,47 e 0,32, respectivamente).

Embora tenha havido coerência com o esperado (aumento em  $b_1$  com o aumento da altitude e diminuição da latitude) nos casos apontados acima, a mesma não foi verificada em vários outros casos. Este fato, possivelmente, foi consequência do efeito conjunto da latitude e altitude, aliado a outras características locais. Fato que deve ser melhor investigado em trabalhos futuros.

Na Tabela 2 é apresentado o comportamento mês a mês dos coeficientes de regressão médios para as diversas regiões ecoclimáticas do Estado do Rio Grande do Sul. Observou-se que, em geral, os valores de  $b_1$  foram mais elevados nos meses de inverno do que nos meses de verão. As maiores diferenças foram verificadas na região climática da Serra do Sudeste, onde nos meses de verão os coeficientes  $b_1$  foram 0,29, 0,17 e 0,41, enquanto nos meses de inverno os mesmos apresentaram

Tabela 2 - Coeficientes da equação de Ångström ( $b_0$  e  $b_1$ ) para estimar a densidade de fluxo de radiação solar global média mensal a partir da insolação; coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e número de observações ( $n$ ) para as diferentes regiões ecoclimáticas para o Estado do Rio Grande do Sul, período 1980-90.

Regiões	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
<b>Campanha</b>													
$b_0$	0,34	0,23	0,27	0,26	0,28	0,22	0,19	0,23	0,23	0,23	0,24	0,31	0,23
$b_1$	0,30	0,38	0,36	0,32	0,33	0,43	0,50	0,43	0,41	0,47	0,40	0,34	0,42
$r^2$	0,32	0,56	0,33	0,56	0,40	0,66	0,72	0,62	0,68	0,57	0,66	0,27	0,60
$n$	92	100	88	89	85	92	93	92	85	95	93	91	1094
<b>Depressão Central</b>													
$b_0$	0,28	0,23	0,31	0,24	0,26	0,24	0,16	0,20	0,20	0,22	0,24	0,28	0,22
$b_1$	0,42	0,42	0,34	0,40	0,40	0,40	0,57	0,49	0,40	0,50	0,45	0,42	0,48
$r^2$	0,52	0,54	0,33	0,63	0,46	0,50	0,72	0,72	0,66	0,57	0,63	0,38	0,61
$n$	93	96	99	94	90	94	89	96	96	99	95	94	1135
<b>Serra do Sudeste</b>													
$b_0$	0,36	0,17	0,17	0,13	0,24	0,10	0,09	0,12	0,14	0,16	0,23	0,28	0,15
$b_1$	0,17	0,41	0,47	0,46	0,32	0,52	0,54	0,50	0,49	0,48	0,34	0,29	0,47
$r^2$	0,50	0,75	0,80	0,81	0,55	0,82	0,79	0,82	0,70	0,71	0,48	0,18	0,68
$n$	27	26	25	28	26	24	30	28	28	30	29	25	316
<b>Planalto Médio</b>													
$b_0$	0,26	0,19	0,15	0,21	0,18	0,21	0,17	0,19	0,16	0,22	0,23	0,22	0,18
$b_1$	0,52	0,56	0,64	0,48	0,56	0,44	0,56	0,54	0,59	0,51	0,50	0,59	0,58
$r^2$	0,60	0,64	0,65	0,76	0,74	0,71	0,75	0,68	0,74	0,55	0,70	0,53	0,69
$n$	69	65	65	62	62	67	64	68	69	69	68	66	794
<b>Planalto Superior</b>													
$b_0$	0,34	0,21	0,35	0,25	0,30	0,28	0,17	0,26	0,22	0,19	0,29	0,36	0,25
$b_1$	0,35	0,51	0,29	0,46	0,39	0,33	0,56	0,35	0,45	0,62	0,41	0,31	0,46
$r^2$	0,56	0,61	0,27	0,55	0,35	0,58	0,79	0,37	0,59	0,71	0,70	0,10	0,51
$n$	26	21	22	13	26	21	26	27	29	22	28	23	271
<b>Serra do Nordeste</b>													
$b_0$	0,24	0,25	0,26	0,27	0,27	0,13	0,10	0,10	0,17	0,10	0,16	0,24	0,18
$b_1$	0,55	0,43	0,44	0,38	0,44	0,64	0,71	0,68	0,56	0,75	0,64	0,47	0,53
$r^2$	0,35	0,35	0,31	0,41	0,31	0,71	0,68	0,72	0,61	0,61	0,68	0,17	0,48
$n$	55	58	50	53	50	61	56	50	57	53	55	56	654
<b>Litoral</b>													
$b_0$	0,22	0,21	0,25	0,25	0,31	0,26	0,25	0,17	0,19	0,24	0,20	0,29	0,24
$b_1$	0,45	0,39	0,39	0,35	0,31	0,30	0,33	0,54	0,47	0,40	0,45	0,31	0,39
$r^2$	0,48	0,54	0,50	0,44	0,30	0,37	0,49	0,69	0,56	0,42	0,53	0,23	0,46
$n$	53	56	57	45	63	63	63	60	57	62	59	55	693
<b>Missões</b>													
$b_0$	0,33	0,22	0,34	0,25	0,29	0,28	0,17	0,26	0,21	0,19	0,29	0,36	0,25
$b_1$	0,35	0,48	0,29	0,46	0,39	0,33	0,57	0,34	0,44	0,61	0,42	0,31	0,46
$r^2$	0,57	0,55	0,27	0,55	0,35	0,54	0,78	0,41	0,58	0,70	0,72	0,10	0,50
$n$	25	22	23	14	22	25	23	26	29	15	29	24	271
<b>Alto e Médio Vale do Uruguai</b>													
$b_0$	0,18	0,14	0,17	0,18	0,16	0,17	0,13	0,14	0,17	0,20	0,22	0,22	0,17
$b_1$	0,51	0,51	0,49	0,43	0,55	0,50	0,59	0,60	0,53	0,50	0,43	0,47	0,52
$r^2$	0,53	0,58	0,37	0,51	0,63	0,58	0,61	0,67	0,64	0,56	0,56	0,29	0,58
$n$	84	88	85	77	75	76	31	83	79	84	74	80	927

valores de 0,52, 0,54 e 0,50. Este resultado corrobora os trabalhos de MOTA et al. (1977) e de ESTEFANEL et al.(1990), os quais afirmaram que este padrão de comportamento é consequência de que no inverno a transmissividade da atmosfera é maior do que no verão, devido a menor quantidade de poeira existente no ar e a freqüente entrada de massas de ar polar (massas frias com menor turbulência em relação às massas tropicais). Os valores mais elevados dos coeficientes de determinação no inverno em relação ao verão reforçam esta hipótese.

Os coeficientes médios regionais obtidos neste trabalho podem e devem ser utilizados para a estimativa da densidade de fluxo de radiação solar global em locais situados dentro da mesma região ecoclimática, que possuam medições de insolação e onde não haja critério mais preciso de estimativa. Entretanto, a representatividade destes coeficientes deve ser considerada como dependente de características próprias das regiões ecoclimáticas. Em algumas regiões climáticas como é o caso do Litoral, a equação média da região introduz erros decorrentes da utilização de somente duas localidades que apresentam grande diferença em termos de latitudes, determinando diferenças importantes nos

coeficientes da equação de regressão.

Os coeficientes  $b_0$  e  $b_1$  médios para o Estado do Rio Grande do Sul (Tabela 3) foram semelhantes aos ajustados por BERLATO (1971), apontando para o fato de que o aumento no número de anos, de localidades e o intervalo de tempo decencial não introduziram mudanças significativas na reta de regressão linear média do Estado.

TABELA 3 - Coeficientes da equação de Ångstrom ( $b_0$  e  $b_1$ ) para estimar a densidade de fluxo de radiação solar global média mensal a partir da insolação; coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e número de observações ( $n$ ) médios para o estado do Rio Grande do Sul, período 1980-90.

Coeficientes	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
$b_0$	0,27	0,21	0,24	0,23	0,26	0,22	0,18	0,19	0,19	0,21	0,25	0,37	0,21
$b_1$	0,42	0,44	0,44	0,40	0,38	0,41	0,51	0,49	0,48	0,49	0,41	0,30	0,47
$r^2$	0,42	0,48	0,40	0,53	0,41	0,50	0,64	0,60	0,60	0,51	0,51	0,23	0,52
$n$	551	555	534	490	530	554	542	556	557	549	557	548	6523

## CONCLUSÕES

Para o Estado do Rio Grande do Sul é possível estimar a densidade de fluxo de radiação solar global, em nível decencial, a partir de dados de insolação em locais onde os mesmos encontrem-se disponíveis.

Existe associação entre os valores do coeficiente de regressão  $b_1$  e fatores como latitude e altitude. Entretanto, outros fatores devem ser estudados.

Os valores de  $b_1$  são determinados por fatores relacionados à transmissividade atmosférica, apresentando valores menores no verão e maiores no inverno.

A representatividade dos coeficientes da regressão em nível regional é dependente de características de cada região ecoclimática.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o fornecimento dos dados de radiação solar global e de insolação por parte da Seção de Ecologia Agrícola da Fundação de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO) da Secretaria de Ciência e Tecnologia (SCT)/RS.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERLATO, M. A. Radiação Solar no Estado do Rio Grande do Sul. **Agronomia Sulriogradense**. Porto Alegre. v. 5, p. 115-131, 1971.
- CHANG, J. **Climate and Agriculture. An Ecological Survey**. Aldine. Chicago. p. 304. 1968.
- CHANG, J. **Problems and Methods in Agricultural Climatology**. Oriental Publishing Company. Hawai. p. 96. 1971.
- ESTEFANEL, V., SCHENEIDER, F. M., BERLATO, M. A. et al. Insolação e Radiação Solar Global na Região de Santa Maria, RS. I. Estimativa da Radiação Solar Global Incidente a partir de Dados de Insolação. **Rev. Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria. v. 20, n. 3-4. p. 203-218. 1990.
- 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.
- LOPES, N. F. **Estimativa da Radiação Solar durante o Ciclo Vegetativo dos Cereais no Rio Grande do Sul**. Pelotas, IPEAS. 32 p. 1971.(Boletim Técnico, 73).
- RIO GRANDE DO SUL. **Macrozoneamento Agroecológico e Econômico**. Secretaria da Agricultura e Abastecimento; Centro Nacional de Pesquisa do Trigo. Porto Alegre: 1994. 2 v.