

GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS DE RADIAÇÃO SOLAR A PARTIR DE DADOS DE INSOLAÇÃO HORÁRIA NO NORDESTE BRASILEIRO

Samira de Azevedo Santos Emiliavaca – samira@isi-er.com.br

Magaly de Fatima Correia

Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Ciências Atmosféricas

Maria Regina Silva Aragão

Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Ciências Atmosféricas

Alan Rodrigues de Sousa

Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis, Laboratório de Energia Solar

Ilana Thayna Amaral de Freitas

Universidade Federal da Paraíba, Centro de Energias Alternativas e Renováveis

Élida Elouise Paiva de Oliveira

Universidade Federal de Pelotas, Departamento de Meteorologia

Resumo. Séries de radiação solar são fundamentais para o dimensionamento de projetos solares fotovoltaicos. Um método de leitura automatizada de heliogramas permitiu a geração de um banco de dados de insolação horária. Os dados de insolação horária de 13 estações climatológicas serviram para o ajuste do modelo de Angström-Prescott e permitiu a estimativa de dados de radiação solar mais precisos. Os valores de desempenho do modelo de Angström-Prescott modificado tornaram explícito o melhor desempenho do método proposto a fim de estimar a radiação global. Dessa forma o método proposto pode ser utilizado em localidades que não dispõem de equipamentos mais sofisticados como é caso das medições realizadas por piranômetros. Além de mostrar que o dado contido no heliograma possui muito mais informações capazes de serem exploradas e aproveitadas no contexto de geração de séries sintéticas de radiação solar com eficiência muito maior.

Palavras-chave: Insolação, Angström, heliogramas.

1. INTRODUÇÃO

Embora o Brasil tenha disponível dados do potencial solar extraídos a partir de medições observacionais e de dados de satélites (Pereira *et al.*, 2017), ainda existe uma carência de dados confiáveis coletados em estações de superfície. E, em programas de aproveitamento da radiação solar e sua conversão em energia térmica ou fotovoltaica, é imprescindível que esses projetos sejam iniciados com o estudo da série de radiação solar para a região de interesse (Starke *et al.*, 2018).

Quando o local de interesse não possui medições de radiação solar, uma solução é a utilização de modelos de estimativas. A partir de dados meteorológicos acessíveis, vários tipos de modelos empíricos foram propostos para a estimativa da Radiação Global (Hg). Alguns modelos baseados na cobertura de nuvens (Almorox e Hontoria, 2004; Bakirci, 2009; Bayrakçi *et al.*, 2018), modelos baseados em temperatura (Hassan *et al.*, 2016; Yacef *et al.*, 2014) e modelos híbridos que estimam Hg utilizando diferentes variáveis meteorológicas (Almorox e Hontoria, 2004; Mecibah *et al.*, 2014). Contudo vários estudos sugerem que os modelos empíricos baseados na insolação geralmente fornecem estimativas mais precisas de Hg do que aquelas baseadas na temperatura do ar ou em outra variável meteorológica única (Zhang *et al.*, 2017; Chukwujindu, 2017). Embora a precisão da estimativa de Hg possa ser melhorada por modelos híbridos, os modelos baseados na insolação são os modelos empíricos mais amplamente aplicados para a estimativa de Hg devido à disponibilidade e confiabilidade dos dados medidos de insolação na maioria das estações meteorológicas ao redor do mundo (Fan *et al.*, 2019).

A existência de uma relação direta entre a radiação global diária e a insolação foi sugerida inicialmente por Kimball em 1919. Posteriormente, outros pesquisadores passaram a desenvolver modelos estatísticos que permitissem estimar a radiação solar que chega à superfície a partir dos dados de insolação. O primeiro modelo com esse propósito foi desenvolvido por Angström (1924). Em seguida, Prescott (1940) simplificou o modelo de Angström, permitindo que, a partir dos coeficientes linear e angular da equação de regressão linear simples entre a razão de insolação e de radiação solar global, pudesse estimar a radiação solar global baseado nos dados de insolação. O modelo denominado de Angström-Prescott, teve como base adaptações em função de condições climáticas locais e vem sendo utilizado universalmente (Blanco e Sentelhas, 2002; Almorox e Hontoria, 2004; Tiba *et al.*, 2005; Yorukoglu e Celik, 2006; Buriol *et al.*, 2012; Okonkwo e Nwokoye, 2014, Escobedo *et al.*, 2012; Suehrcke *et al.*, 2013; Jamil e Siddiqui, 2017; Fan *et al.*, 2019).

Embora a maioria dos instrumentos meteorológicos tenham sido modernizados e automatizados, tanto na forma de medir como armazenar, a coleta dos dados de insolação não acompanhou os avanços tecnológicos e seu processo de medição e coleta continua sendo realizado de forma manual, onde um observador habilitado realiza a leitura do heliograma e registra o tempo durante o qual houve incidência de raios solares diretos durante um dia. Erros instrumentais decorrentes do mau funcionamento do heliógrafo ou mesmo decorrentes de situações peculiares tais como mudanças ambientais na área da estação meteorológica podem não ser perceptíveis ao observador caso não exista o conhecimento adequado sobre o padrão de comportamento da insolação ou a necessidade imediata do processamento e/ou tratamento dos dados observados. A subjetividade da coleta pode induzir erros sistemáticos e afetar diretamente a qualidade do banco de dados gerado (Ceballos *et al.*, 1992; Raniero *et al.*, 2018; Emiliavaca *et al.*, 2021). Muito embora possam ocorrer problemas desse tipo, os dados de

insolação representam uma das fontes de informações sobre o comportamento da radiação solar mais antigas disponíveis, com séries climatológicas na maioria das estações contendo mais de 30 anos de dados medidos.

Portanto, a proposta desse trabalho é investigar o grau de correlação existente entre a cobertura de nuvem, o índice de transmissividade atmosférico e a insolação horária extraída com o uso da ferramenta SPDH (Sistema de Processamento Digital de Heliogramas), avaliando como o valor médio diário da insolação pode ser utilizado em estimativas mais precisas da radiação solar.

2. METODOLOGIA

2.1 Dados de insolação

O principal conjunto de informações utilizado nesta pesquisa é constituído por um banco de dados de heliogramas originais referente a 13 estações climatológicas (Tab. 1), disponibilizado pelo Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, por meio do Distrito de Meteorologia (DISME) em Recife-PE. A insolação, definida como o número de horas de brilho solar, é amplamente utilizada em estudos que estimam a radiação solar a partir de outros dados meteorológicos (Coelho, 2016; Praxedes et al., 2016; Okonkwo e Nwokoye, 2014; Belúcio et al., 2014). O instrumento que registra a insolação é denominado heliógrafo e suas medições possuem alta correlação com os componentes da radiação solar (Santos et al., 2016; Porfirio et al., 2011; Ceballos et al., 1992). Seu princípio de medição é simples e foi introduzido no século 19 (Coulson, 1975). Uma esfera de quartzo ou de vidro concentra os raios solares sobre uma fita de papel graduada em horas (heliograma). A convergência da radiação solar direta no heliograma produz a queima pontual do papel quando o sol não está oculto por nuvens. O resultado gerado é uma medida do intervalo de tempo durante o qual houve incidência de raios solares diretos durante um dia.

Tabela 1: Estações climatológicas selecionadas.

Estações Climatológicas INMET						
Latitude (graus)	Longitude (graus)	Altitude (m)	ID Estação	Município	UF	Sigla
-9,44	-36,7	274,9	82992	Palmeira dos Índios	AL	PAI
-3,73	-40,33	109,62	82392	Sobral	CE	SOB
-6,36	-39,29	217,67	82686	Iguatu	CE	IGU
-7,1	-34,86	7,43	82798	João Pessoa	PB	JOP
-7,01	-37,26	249,09	82791	Patos	PB	PAT
-9,38	-40,48	370,46	82983	Petrolina	PE	PET
-8,06	-34,96	11,3	82900	Recife	PE	REC
-8,51	-39,33	341,46	82886	Cabrobó	PE	CAB
-7,03	-41,48	207,93	82780	Picos	PI	PIC
-8,35	-42,25	235,33	82879	São João do Piauí	PI	SJP
-5,08	-42,81	74,36	82578	Teresina	PI	TER
-6,46	-37,08	169,85	82690	Caicó	RN	CAI
-5,11	-36,76	3,43	82594	Macau	RN	MAC

Os registros de insolação disponibilizados pelo INMET foram processados com o objetivo de obter dados de insolação horária por meio de leitura automatizada usando o modelo SPDH proposto por Emiliavaca *et al.*, (2021). O SPDH foi desenvolvido no software de cálculo numérico MATLAB. Sucintamente, o modelo realiza vários procedimentos de filtragem e tratamento da imagem (Fig. 1a) e em seguida calcula o número de pixels de cor magenta que existe dentro do heliograma, essa informação é quantificada através de um histograma onde o eixo x (abscissas) representa o tamanho do heliograma e o eixo y (ordenadas) o número de *pixels* de cor magenta em cada unidade do heliograma (Figura 1b). Posteriormente, o modelo binariza o histograma representando a existência de magenta como 1 e a ausência de magenta como 0 (Figura 1c).

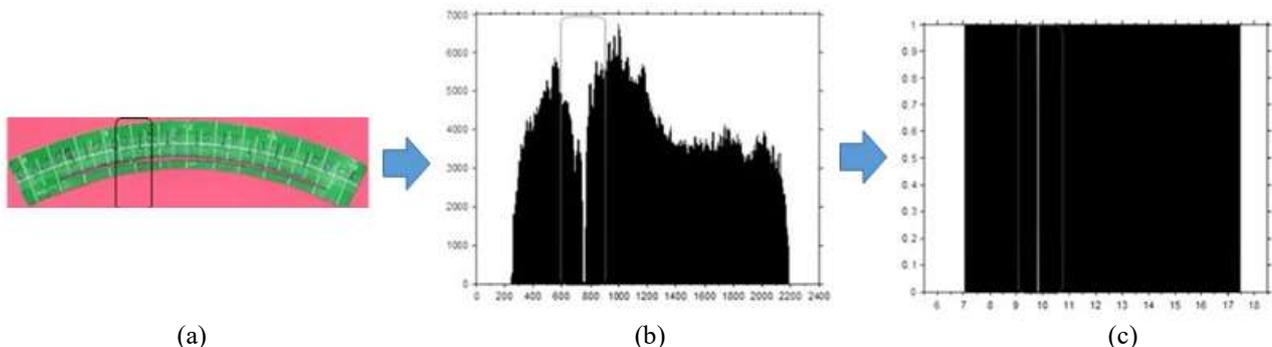


Figura 1: Síntese das etapas do processo de leitura dos heliogramas no SPDH: (a) imagem digitalizada do heliograma, (b) contagem dos pixels da cor magenta referentes à área queimada do heliograma e (c) binarização da informação.

Nesta pesquisa, foram seguidas as regras propostas por Persaud (1997): observações diárias devem ser excluídas caso uma das variáveis (insolação ou radiação solar à superfície) seja desconhecida; observações diárias devem ser excluídas quando a razão entre a radiação solar à superfície e a radiação solar extraterrestre for superior a 1.

Também foram utilizados dados horários de irradiância global horizontal, para o mesmo período de dados dos heliogramas originais, coletados pelas estações automáticas climatológicas do INMET.

2.2 Modelos Angström-Prescott

O primeiro modelo de estimativa de radiação média diária ou mensal H_g foi desenvolvido por Angström (1924), e posteriormente modificado por Prescott (1940). A equação de Angström-Prescott é definida como:

$$K_t = \frac{H_g}{H_0} = a + b \frac{S_d}{S} \quad (1)$$

onde K_t é o índice de transmissividade da atmosfera na sua fração diária, H_g é a radiação global, H_0 é a radiação do topo da atmosfera, $\frac{S_d}{S}$ é a razão de insolação (número de horas de brilho solar ao longo de um dia e duração do período diurno - fotoperíodo) e a e b são os coeficientes da regressão, onde a é o coeficiente que expressa a fração da radiação solar extraterrestre que atinge a Terra em dias totalmente nublados, correspondendo a componente difusa da radiação e b é o coeficiente complementar que representa o total de radiação solar global. Os valores de H_0 foram calculados de acordo com a Eq. (2).

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360D}{365} \right) \right] \left[\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin \varphi \sin \delta \right] \quad (2)$$

onde $I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ é a constante solar, D é o dia juliano, φ é a latitude (em graus) e δ é a declinação solar (em graus) e definida como:

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + D) \right] \quad (3)$$

ω_s é o ângulo horário solar e corresponde ao deslocamento angular do movimento aparente do sol devido a rotação da terra e varia entre -180° e 180° e pode ser calculado através da Eq. (4).

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (4)$$

O fotoperíodo (S) pode ser calculado de acordo com:

$$S = \frac{2}{15} \omega_s \quad (5)$$

2.3 Modelos Paulescu e Badescu

Paulescu e Badescu (2011) mostraram que a insolação relativa ou razão de insolação é inversamente relacionada à cobertura de nuvem (baixa magnitude da insolação relativa indicará elevada cobertura de nuvem), onde matematicamente a estimativa da cobertura de nuvens pode ser obtida da seguinte forma:

$$f = 1 - \frac{S_d}{S} \quad (6)$$

onde f é a fração de cobertura de nuvem estimada através dos dados da razão de insolação (razão entre a insolação diária S_d e o fotoperíodo S) (Harrison e Coombes, 1986; Badescu, 1991). A Eq. (6) é um modelo para determinação da fração de cobertura de nuvens amplamente utilizado em modelos de computação da radiação solar e foi rigorosamente provado em Badescu (1992).

2.4 Modelos Propostos

Com base no banco de dados de heliogramas foi possível obter os valores horários da insolação (S_h). A partir desses dados foi calculado o valor médio horário da insolação para cada dia analisado (\bar{S}_h) e verificou-se a hipótese de que a insolação horária média diária possui alta correlação com a razão de insolação ($\frac{S_d}{S}$), e verificou-se que a média dos valores de correlação foi de 0,981 entre as estações analisadas, nesse caso pode-se reescrever as Eq. (1) e Eq. (6) como:

$$\frac{H_g}{H_0} = a + b \bar{S}_h \quad (7)$$

$$f = 1 - \bar{S}_h \quad (8)$$

A eficiência do modelo SPDH e a avaliação do desempenho dos modelos de estimativa foram avaliados pelos indicadores estatísticos: desvio das médias MBE (*Mean Bias Error*) e raiz quadrada do desvio quadrático médio RMSE (*Root Mean Square Error*) (Wilks, 2011). Além do erro médio e desvios quadráticos também foram determinados o coeficiente de desempenho (c), o índice de concordância (d) de Willmott (Willmott et al., 1985) e o coeficiente de correlação de Pearson (r). O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas. Este coeficiente varia entre os valores -1 e 1. O valor 0 (zero) significa que não há relação linear, o valor 1 indica uma relação linear perfeita e o valor -1 também indica uma relação linear perfeita, mas inversa. Quanto mais próximo estiver de 1 ou -1, mais forte é a associação linear entre as duas variáveis. O grau da correlação foi verificado conforme proposto por Devore (2006).

Segundo Camargo e Sentelhas (1997) o coeficiente de c pode ser interpretado conforme Tab.2.

Tabela 2: Critérios de interpretação do índice de desempenho (c) dos métodos de estimativa.

c	Classificação
≤0,40	Péssimo
0,41 a 0,50	Mau
0,51 a 0,60	Sofrível
0,61 a 0,65	Mediano
0,66 a 0,75	Bom
0,76 a 0,85	Muito Bom
>0,85	Ótimo

3. RESULTADOS

No processo de ajuste e validação do SPDH foram utilizados heliogramas de 13 estações climatológicas do INMET referente ao ano de 2012, ano escolhido por dispor de heliogramas suficientes para a análise. Uma das etapas importantes no processo de validação de um modelo é a quantificação entre os valores observados e calculados pelo modelo. Através desse processo podem ser calculados os erros inerentes, que nada mais são que a diferença entre os valores observados e os valores calculados (Tomás, 1997).

Como indicadores estatísticos, além do coeficiente de correlação foram calculados o erro médio (MBE), o desvio médio quadrático (RMSE) e o índice de desempenho, os resultados são apresentados na Tabela 3. Os erros médios podem apresentar resultados negativos (subestimativa) ou positivos (superestimativa). Quanto mais próximo de zero, melhor é o resultado. Observa-se que, apesar de muito baixos, os valores dos erros predominantemente negativos indicam que todas as estações climatológicas, o SPDH subestimou os valores com exceção da estação SJP. Verificou-se que as estações PAT e SJP foram as que apresentaram os menores erros, enquanto que as estações TER e CAI foram as que apresentaram os maiores valores de erros associados.

Tabela 3: Resultado estatístico entre os dados observados e os dados estimados pelo SPDH para cada estação.

Estação	BEM	RMSE	r	c
PAI	-0,011	0,079	0,982	0,975
SOB	-0,016	0,079	0,982	0,976
IGU	-0,027	0,103	0,969	0,959
JOP	-0,033	0,167	0,928	0,902
PAT	-0,001	0,076	0,981	0,975
PET	-0,025	0,093	0,974	0,966
REC	-0,027	0,125	0,957	0,942
CAB	-0,031	0,099	0,973	0,963
PIC	-0,015	0,091	0,976	0,968
SJP	0,001	0,073	0,983	0,977
TER	-0,037	0,125	0,961	0,946
CAI	-0,070	0,178	0,923	0,892
MAC	-0,019	0,090	0,976	0,967

Uma das causas da diferença entre observações e estimativas é o efeito dos baixos valores de radiação solar no início da manhã e no final da tarde. Esse impacto é mais claramente detectado através da comparação entre as séries com dados horários apresentada na Tab. 2, na qual os maiores erros são observados na faixa de horário das 06 às 07 horas (-0,079 em PET e -0,075 em CAI e MAC) e das 17 às 18 horas (-0,072 em CAI e -0,076 em MAC). Resultados semelhantes foram encontrados por Emiliavaca *et al.*, (2021) com o uso do modelo SPDH na análise de 6 meses específicos para estação climatológica de Natal. Raniero *et al.*, (2018) também apresentou uma metodologia para automatização do processo de contagem das horas de brilho solar, capaz de realizar a leitura apenas de heliogramas do tipo retilíneo, onde os indicadores estatísticos apresentados mostraram que o modelo superestimou ligeiramente os valores observados.

No processamento dos dados e checagem das estimativas verificou-se que alguns dos valores com início de subestimativa não estavam associados com ineficiência do modelo. Foi constatado que eles ocorreram em função de possíveis falhas no procedimento de leitura (observação) dos heliogramas. Um exemplo típico desse tipo de falha foi detectado nos dados coletados nos dias 12 de janeiro, 14 de março e 13 de agosto de 2012 na estação CAI, como pode ser visto na comparação entre as ilustrações apresentadas na Fig. 2. A anotação de 0,8 feita pelo observador diretamente no heliograma no dia 12/01, de 0,8 no dia 14/03 e de 1,0 no dia 13/08 evidencia um dos tipos mais comuns de erro de leitura. Na Fig. 2 é possível verificar que a área queimada nos heliogramas corresponde a um valor menor que o registrado em relação aos valores registrados pelo modelo. Esse padrão de leituras aparentemente superestimadas pelo observador foi registrado principalmente nas estações que apresentaram os valores de erros mais elevados (REC, TER e CAI). Embora os erros apresentados tenham sido mais elevados que as demais estações, vale salientar que em nenhum caso os valores ultrapassaram 0,1%, o que representa uma elevada eficácia do modelo.

Tabela 4: Valores dos erros e coeficientes de correlação entre os dados horários observados e os estimados pelo SPDH para cada estação.

Erro médio													
Hora	PAI	SOB	IGU	JOP	PAT	PET	REC	CAB	PIC	SJP	TER	CAI	MAC
6-7	-0,024	-0,045	-0,047	-0,017	0,013	-0,079	-0,011	-0,071	-0,009	-0,020	-0,026	-0,075	-0,075
7-8	0,000	-0,037	-0,033	-0,029	-0,005	-0,042	-0,011	-0,041	-0,036	-0,005	-0,080	-0,140	-0,021
8-9	-0,001	-0,012	-0,029	-0,018	-0,004	-0,040	-0,015	-0,036	-0,012	-0,001	-0,060	-0,094	-0,013
9-10	-0,006	-0,012	-0,025	-0,028	-0,005	-0,031	-0,029	-0,029	-0,019	-0,001	-0,051	-0,101	-0,005
10-11	-0,008	-0,014	-0,025	-0,029	-0,004	-0,028	-0,058	-0,029	-0,016	0,001	-0,053	-0,078	-0,005
11-12	-0,009	-0,018	-0,020	-0,012	-0,002	-0,020	-0,066	-0,027	-0,018	0,003	-0,047	-0,069	-0,004
12-13	-0,009	-0,007	-0,015	-0,028	-0,005	-0,018	-0,081	-0,023	-0,014	0,003	-0,048	-0,050	-0,005
13-14	-0,004	-0,009	-0,018	-0,034	0,001	-0,014	-0,037	-0,026	-0,016	0,007	-0,030	-0,060	-0,006
14-15	-0,013	-0,005	-0,022	-0,039	0,004	-0,013	-0,012	-0,019	-0,014	-0,002	-0,017	-0,054	-0,009
15-16	-0,007	-0,010	-0,031	-0,055	-0,002	-0,014	-0,003	-0,024	-0,021	-0,002	-0,017	-0,058	-0,006
16-17	-0,002	-0,007	-0,035	-0,091	0,005	-0,011	-0,008	-0,034	-0,020	0,006	-0,021	-0,055	-0,016
17-18	-0,058	-0,024	-0,046	-0,044	-0,008	-0,011	-0,022	-0,037	0,003	0,025	-0,028	-0,072	-0,076
Desvio Médio Quadrático – DMQ													
Hora	PAI	SOB	IGU	JOP	PAT	PET	REC	CAB	PIC	SJP	TER	CAI	MAC
6-7	0,129	0,116	0,123	0,111	0,124	0,164	0,094	0,143	0,140	0,129	0,101	0,140	0,174
7-8	0,059	0,110	0,155	0,258	0,054	0,112	0,150	0,112	0,119	0,059	0,188	0,261	0,102
8-9	0,051	0,076	0,113	0,203	0,046	0,104	0,108	0,087	0,068	0,042	0,179	0,215	0,067
9-10	0,060	0,055	0,089	0,192	0,054	0,093	0,111	0,082	0,068	0,036	0,152	0,229	0,053
10-11	0,041	0,061	0,068	0,148	0,060	0,078	0,170	0,084	0,077	0,042	0,132	0,201	0,066
11-12	0,049	0,066	0,061	0,108	0,045	0,072	0,172	0,100	0,063	0,050	0,122	0,180	0,074
12-13	0,054	0,050	0,048	0,112	0,030	0,062	0,195	0,080	0,057	0,043	0,165	0,168	0,073
13-14	0,052	0,065	0,055	0,130	0,037	0,057	0,119	0,071	0,078	0,045	0,075	0,163	0,061
14-15	0,065	0,070	0,063	0,168	0,050	0,054	0,079	0,076	0,083	0,053	0,085	0,145	0,059
15-16	0,067	0,072	0,113	0,182	0,072	0,066	0,093	0,077	0,090	0,060	0,085	0,146	0,061
16-17	0,080	0,075	0,116	0,246	0,100	0,072	0,077	0,089	0,100	0,079	0,075	0,160	0,075
17-18	0,170	0,124	0,187	0,152	0,160	0,140	0,131	0,175	0,138	0,159	0,125	0,175	0,164
Coeficiente de Correlação de Pearson – r													
Hora	PAI	SOB	IGU	JOP	PAT	PET	REC	CAB	PIC	SJP	TER	CAI	MAC
6-7	0,910	0,821	0,871	0,664	0,882	0,882	0,722	0,882	0,869	0,869	0,855	0,828	0,775
7-8	0,989	0,958	0,932	0,611	0,987	0,964	0,907	0,967	0,957	0,988	0,914	0,840	0,955
8-9	0,990	0,972	0,960	0,852	0,989	0,965	0,961	0,979	0,980	0,993	0,913	0,867	0,978
9-10	0,985	0,984	0,969	0,867	0,981	0,964	0,956	0,978	0,977	0,993	0,925	0,844	0,981
10-11	0,993	0,982	0,979	0,908	0,974	0,973	0,919	0,974	0,961	0,989	0,945	0,852	0,968
11-12	0,990	0,976	0,980	0,952	0,985	0,966	0,914	0,953	0,978	0,982	0,959	0,877	0,963
12-13	0,988	0,986	0,986	0,952	0,993	0,968	0,904	0,960	0,979	0,987	0,888	0,876	0,971
13-14	0,988	0,980	0,980	0,933	0,989	0,977	0,955	0,976	0,962	0,988	0,970	0,891	0,979
14-15	0,983	0,978	0,977	0,882	0,984	0,980	0,978	0,963	0,965	0,984	0,955	0,925	0,981
15-16	0,981	0,981	0,933	0,888	0,973	0,972	0,970	0,970	0,970	0,982	0,966	0,927	0,983
16-17	0,975	0,982	0,947	0,823	0,963	0,976	0,980	0,975	0,966	0,976	0,981	0,922	0,981
17-18	0,843	0,881	0,770	0,699	0,811	0,887	0,648	0,809	0,871	0,856	0,880	0,806	0,823

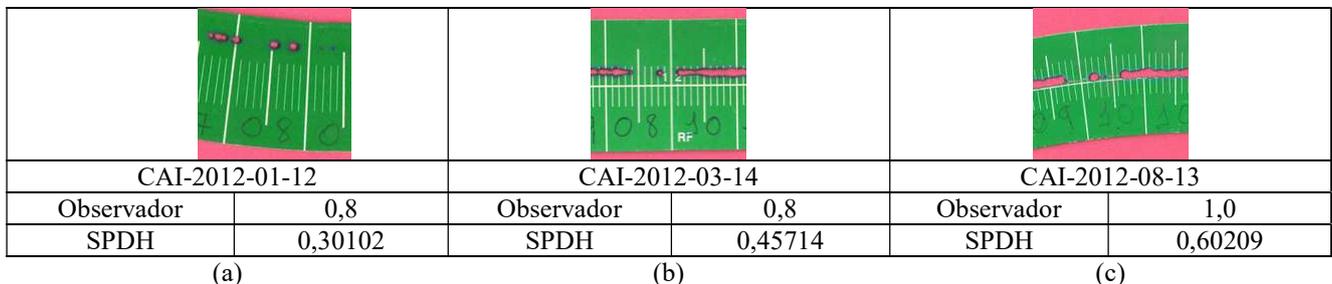


Figura 2: Casos de superestimativas na leitura dos heliogramas (registro de valores maiores do que o período de tempo com queima do heliograma) na estação Caicó (CAI) (a) para o dia 12 de janeiro, (b) para o dia 14 de março e (c) para o dia 13 de agosto de 2012.

3.1. Resultados com os Modelo Propostos

Com a extração dos dados horários de insolação, realizada a partir da análise dos heliogramas, foi calculada as correlações entre os valores da insolação horária média diária (\bar{S}_h) e a razão de insolação ($\frac{S_d}{S}$) e a partir da análise dos indicadores estatísticos empregados (Tab.5) é possível verificar o grau de similaridade entre os valores de \bar{S}_h e $\frac{S_d}{S}$ assumem

valores próximos a 1. Tais estimativas estão fortemente correlacionadas com coeficientes de Pearson variando de 0,951 a 0,995. Os valores do índice de concordância variaram entre 0,975 a 0,998, mostrando uma concordância quase perfeita. Já o índice de confiança (que variou de 0,928 a 0,993) expõe o ótimo desempenho do método proposto a fim de estimar a cobertura de nuvem. Os resultados encontrados são melhores que os encontrados por Diniz (2018) ao empregar uma modificação do modelo de Paulescu e Badescu para a cidade de Campina Grande, através do rearranjo do modelo de Angström-Prescott.

A alta correlação apresentada entre os valores de \bar{S}_h e $\frac{S_d}{S}$ evidenciam que o valor de \bar{S}_h pode ser empregue no modelo para obtenção da nebulosidade de Paulescu e Badescu (2011). A função modificada apresentou excelência no ajuste linear obtido na aplicação do coeficiente de correlação e o método proposto pode ser empregue a fim de se estimar a cobertura de nuvens.

Tabela 5: Indicadores estatísticos aplicados ao dados de cobertura de nuvem calculados pelos modelos de Paulescu e Badescu e pelo modelo proposto.

$f(\bar{S}_h) \times f(\frac{S_d}{S})$			
Estações	r	d	c
PAI	0,980	0,990	0,971
SOB	0,992	0,996	0,987
IGU	0,995	0,998	0,993
PAT	0,993	0,996	0,989
PET	0,985	0,992	0,978
REC	0,973	0,987	0,960
CAB	0,961	0,980	0,942
PIC	0,951	0,975	0,928
SJP	0,975	0,977	0,933
TER	0,983	0,991	0,975
CAI	0,980	0,990	0,970
MAC	0,994	0,997	0,991
PAI	0,988	0,994	0,951

A alta correlação entre os dados de $\frac{S_d}{S}$ e \bar{S}_h , permitiram também propor a modificação do modelo de Angström-Prescott através do rearranjo matemático proposto na Eq. 7, com a finalidade de determinar o ajuste linear simples empregue na dispersão entre $\frac{H_g}{H_0}$ e \bar{S}_h e a partir da calibração local, determinar os respectivos coeficientes (a e b) de cada estação. Na Figura 3. 3 é possível verificar que os ajustes lineares entre os dados de $\frac{H_g}{H_0}$ versus $\frac{S_d}{S}$ e $\frac{H_g}{H_0}$ versus \bar{S}_h são praticamente idênticos, resultados da alta correlação verificada entre os valores de $\frac{S_d}{S}$ e \bar{S}_h . A estação JOP foi retirada da análise por não dispor de dados de radiação suficientes dentro do período analisado.

Segundo Angström (1956) o coeficiente a pode ser interpretado fisicamente como a fração da radiação que atinge a superfície da terra durante um dia completamente nublado, dependendo do tipo de espessura das nuvens predominantes. Enquanto que a soma dos coeficientes a e b é considerada como a fração potencial da irradiação solar que chega ao topo da atmosfera. Assim, os valores da soma de a e b são influenciados pelo comprimento ótico e pela composição atmosférica da região em estudo. Observa-se na Fig. 3 que o modelo de Angstrom se ajustou melhor aos dados de \bar{S}_h em praticamente todas as estações analisadas, com exceção da estação de IGU, cujo coeficiente de determinação foi menor na dispersão com os dados de \bar{S}_h . Esse resultado mostrou que o modelo de Angström-Prescott modificado proposto apresentou eficiência maior que o modelo de Angström-Prescott em praticamente todas as estações analisadas.

Na Tab. 6 pode-se verificar os coeficientes a e b, a soma dos coeficientes e o coeficiente de determinação e de correlação de Pearson para cada estação analisada pelos modelos de Angström-Prescott e pelo modelo modificado proposto. Santos (2012) avaliou a eficiência do modelo de Angström-Prescott para a estação PAI e apresentou em seu estudo coeficientes a=0,325 e b=0,405, enquanto os resultados encontrados neste estudo mostraram que pelo modelo de Angström-Prescott (a=0,277 e b=0,397), já pelo modelo de Angström-Prescott modificado foram encontrados coeficientes a=0,277 e b=0,394. A diferença no tamanho das séries utilizadas pode ser explicar a diferença nos coeficientes encontrados para as estações. Os coeficientes encontrados para a estação SJP com o modelo de Angström-Prescott (a=0,291 e b=0,422) e Angström-Prescott modificado (a=0,3010 e b=0,4656) diferiram também dos valores encontrados por Ribeiro et al., (2018), cujos valores encontrados foram a=0,275 e b=0,444. Valores diferentes dos coeficientes a e b foram encontrados por Tiba (2002) para as estações de SOB (a=0,30 e b=0,37), PAT (a=0,25 e b=0,47), PET (a=0,27 e b=0,43) e REC (a=0,27 e b=0,44).

Os indicativos estatísticos (Tab. 6) mostraram que o modelo de Angström-Prescott modificado obteve classificação de desempenho superior aos valores encontrados pelo modelo de Angström-Prescott para as estações de SOB, IGU, PAT, PET, REC, CAB, PIC, SJP, TER, CAI, MAC. As estações de PET e REC obtiveram os melhores desempenhos (Muito bom). O desempenho da estação SJP é similar ao encontrado por Ribeiro et al., (2018). Enquanto que as estações TER (mediano) e MAC (sofrível) foram as que apresentaram o pior desempenho. Segundo Belúcio et al., (2014) o mau desempenho apresentado pelo coeficiente de desempenho pode ser devido à qualidade dos dados coletados, mesmos estes tendo passado por testes de qualidade antes de seu uso, ou quando o modelo não consegue representar a variabilidade existente dentro do período analisado, devendo-se, dessa forma buscar equações com outros ajustes diferentes do linear para realizar-se a estimativa da radiação. Entretanto como o valor do desempenho de MAC não ficou abaixo de 0,51, este ainda pode ser adotado.

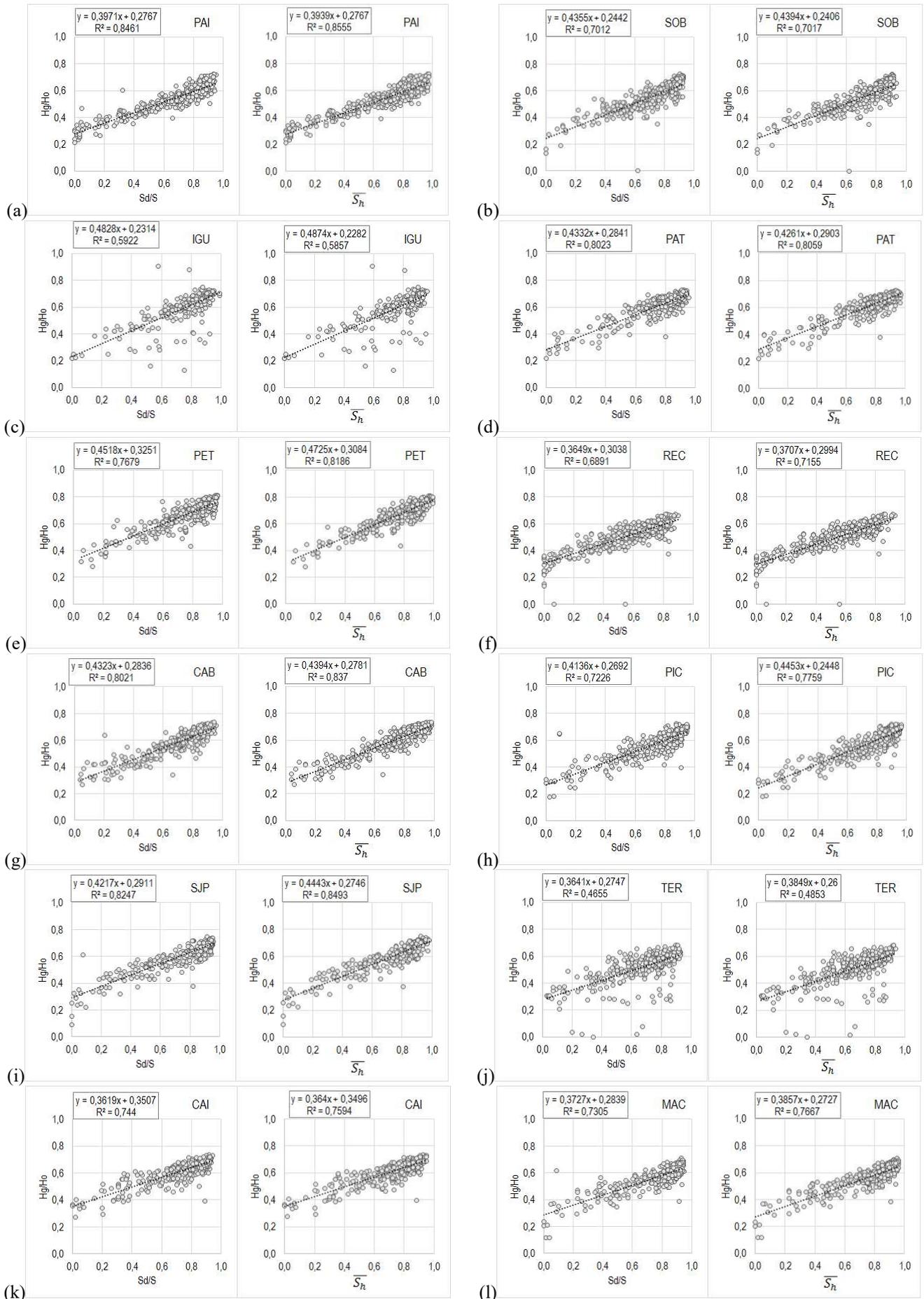


Figura 3: Ajuste linear simples empregue na dispersão entre $\left(\frac{H_g}{H_0}\right)$ e $\left(\frac{S_d}{S}\right)$ e entre $\left(\frac{H_g}{H_0}\right)$ e $\left(\bar{S}_h\right)$, para as estações (a) PAI, (b) SOB, (c) IGU, (d) PAT, (e) PET, (f) REC, (g) CAB, (h) PIC, (i) SJP, (j) TER, (k) CAI e (l) MAC.

Tabela 6: Indicadores estatísticos para análise de concordância da radiação solar global medida e estimada para as estações.

Modelo de Angström-Prescott							
Estações	a	b	a+b	r	d	c	Classificação
PAI	0,277	0,397	0,674	0,920	0,725	0,667	Bom
SOB	0,244	0,436	0,680	0,837	0,664	0,555	Sofrível
IGU	0,307	0,391	0,698	0,770	0,654	0,504	Sofrível
PAT	0,284	0,433	0,717	0,896	0,662	0,593	Sofrível
PET	0,325	0,452	0,777	0,876	0,750	0,657	Bom
REC	0,304	0,365	0,669	0,830	0,735	0,610	Mediano
CAB	0,284	0,432	0,716	0,896	0,703	0,630	Mediano
PIC	0,269	0,414	0,683	0,850	0,657	0,559	Sofrível
SJP	0,291	0,422	0,713	0,908	0,694	0,630	Mediano
TER	0,275	0,364	0,639	0,682	0,601	0,410	Mau
CAI	0,351	0,362	0,713	0,863	0,660	0,570	Sofrível
MAC	0,284	0,373	0,657	0,855	0,567	0,485	Mau

Modelo de Angström-Prescott Modificado							
Estações	a	b	a+b	r	d	c	Classificação
PAI	0,277	0,394	0,671	0,925	0,720	0,725	Bom
SOB	0,241	0,439	0,680	0,838	0,664	0,662	Bom
IGU	0,228	0,487	0,716	0,765	0,657	0,654	Bom
PAT	0,290	0,426	0,716	0,898	0,662	0,666	Bom
PET	0,308	0,473	0,781	0,905	0,768	0,766	Muito Bom
REC	0,299	0,371	0,670	0,846	0,755	0,754	Muito Bom
CAB	0,278	0,439	0,718	0,915	0,722	0,722	Bom
PIC	0,245	0,445	0,690	0,881	0,678	0,668	Bom
SJP	0,275	0,444	0,719	0,922	0,720	0,708	Bom
TER	0,260	0,385	0,645	0,697	0,618	0,609	Mediano
CAI	0,350	0,364	0,714	0,871	0,667	0,666	Bom
MAC	0,273	0,386	0,658	0,876	0,571	0,572	Sofrível

CONCLUSÕES

A validação do modelo SPDH mostrou que os valores calculados estão bem correlacionados com os registrados nos heliogramas com erros médios inferiores a 0,1. As menores correlações e maiores erros médios foram encontrados nos intervalos (horário local) entre 06 e 07 horas (-0,079) e das 17 às 18 horas, e 17 e 18 horas (-0,076), possivelmente relacionados à menor incidência de irradiação solar, implicando uma queima mais leve e superficial do cartão nessas horas.

A partir da análise do banco de heliogramas conclui-se que o método de estimativa de radiação global com base na insolação horária, apresentou resultados superiores aos encontrados com o modelo de Angström-Prescott tradicional para as estações analisadas. E que os dados de insolação horária podem ser utilizados no modelo de estimativa de cobertura de nuvem, com correlações superiores 0,91 em todas as estações analisadas.

Os valores de desempenho do modelo de Angström-Prescott modificado tornaram explícito o melhor desempenho do método proposto a fim de estimar a radiação global. Dessa forma o método proposto pode ser empregado em localidades que não dispõem de equipamentos mais sofisticados como é caso das medições realizadas por piranômetros. Além de mostrar que o dado contido no heliograma possui muito mais informações capazes de serem exploradas e aproveitadas no contexto de geração de séries sintéticas de radiação solar com eficiência muito maior.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) por fornecer registros originais Campbell-Stokes, séries históricas de duração mensal da insolação e totais de precipitação diária e mensal, ao ISI-ER (Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis) pelo apoio e infraestrutura prestados, à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e UFCG (Universidade Federal de Campina Grande) pelo apoio financeiro parcial a esta pesquisa, à Petrobras pelo aporte financeiro no âmbito do projeto ANEEL PD-0553-0017/2011 e à CTG Brasil pelo aporte financeiro atual no âmbito do projeto ANEEL PD-10381-0620/2020.

REFERÊNCIAS

- Almorox, J. Y., & Hontoria, C. (2004). Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. *Energy Conversion and Management*, 45(9-10), 1529-1535.
- Angstrom, A. (1924). Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 50(210), 121-126.

- Angstrom, A. (1956). Computation of global radiation from records of sunshine. *Ark. Geofys.*, (Sweden), 2.
- Bădescu, V. (1991). Studies concerning the empirical relationship of cloud shade to point cloudiness (Romania). *Theoretical and applied climatology*, 44(3), 187-200.
- Bădescu, V. (1992). Over and under estimation of cloud amount: theory and Romanian observations. *International journal of solar energy*, 11(3-4), 201-209.
- Bakirci, K. (2009). Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey. *Energy*, 34(4), 485-501.
- Bayrakçı, H. C., Demircan, C., & Keçebaş, A. (2018). The development of empirical models for estimating global solar radiation on horizontal surface: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2771-2782.
- Belúcio, L. P., Silva, A. P. N. D., Souza, L. R., & Moura, G. B. D. A. (2014). Radiação solar global estimada a partir da insolação para Macapá (AP). *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29(4), 494-504.
- Blanco, F. F., & Sentelhas, P. C. (2002). Coeficientes da equação de Angström-Prescott para estimativa da insolação para Piracicaba, SP. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 10(2), 295-300.
- Buriol, G. A., Estefanel, V., Heldwein, A. B., Prestes, S. D., & Horn, J. F. C. (2012). Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria-RS. *Ciência Rural*, 42(9), 1563-1567.
- Camargo, A. D., & Sentelhas, P. C. (1997). Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de agrometeorologia*, 5(1), 89-97.
- Ceballos, J. C., et al. Desempenho de heliógrafos e actinógrafos na estimativa de insolação e fluxo direcional. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 7(2), p. 563-581, 1992.
- Chukwujindu, N. S. (2017). A comprehensive review of empirical models for estimating global solar radiation in Africa. *Renewable and sustainable energy reviews*, 78, 955-995.
- Coelho, L. D. N. (2016). Modelos de estimativa das componentes de radiação solar a partir de dados meteorológicos.
- Coulson, K. (2012). *Solar and terrestrial radiation: methods and measurements*. Elsevier.
- Devore, J. L. (2010). *Probabilidade e estatística para engenharia e ciências*. Cengage Learning Edições Ltda..
- Diniz, J. M. T. (2018). A cobertura de nuvem e a sua influência para a variabilidade térmica do solo.
- Escobedo, J. F., Teramoto, E. T., Oliveira, A. P., Soares, J., & Codato, G. (2012). Equações de estimativa das frações solar direta (K_{Dh}) e difusa (K_d) em função do índice de claridade (K_t) e razão de insolação (n/N). *Avances en y Medio Ambiente*, 16.
- Fan, J., Wu, L., Zhang, F., Cai, H., Zeng, W., Wang, X., & Zou, H. (2019). Empirical and machine learning models for predicting daily global solar radiation from sunshine duration: A review and case study in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 100, 186-212.
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2000). *Processamento de imagens digitais*. Editora Blucher.
- Harrison, A. W., & Coombes, C. A. (1986). Empirical relationship of cloud shade to point cloudiness (Canada). *Solar Energy*, 37(6), 417-421.
- Hassan, G. E., Youssef, M. E., Mohamed, Z. E., Ali, M. A., & Hanafy, A. A. (2016). New temperature-based models for predicting global solar radiation. *Applied energy*, 179, 437-450.
- Huang, T. S. 1965. PCM picture transmission. *IEEE Spectrum*, vol 2, n.12, p57-63.
- Iqbal, M. (1983). An introduction to solar energy. *edition: academic press. toronto*.
- Jamil, B., & Siddiqui, A. T. (2017). Generalized models for estimation of diffuse solar radiation based on clearness index and sunshine duration in India: applicability under different climatic zones. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 157, 16-34.
- Kasten, F., and G. Czeplak (1980). "Solar and Terrestrial Radiation Dependent on the Amount and Type of Cloud." *Solar Energy* 24 (2): 177–189. doi:10.1016/0038-092X(80)90391-6.
- Kimball, H. H. (1919). Variations in the total and luminous solar radiation with geographical position in the United States. *Monthly Weather Review*, 47(11), 769-793.
- Mecibah, M. S., Boukelia, T. E., Tahtah, R., & Gairaa, K. (2014). Introducing the best model for estimation the monthly mean daily global solar radiation on a horizontal surface (Case study: Algeria). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 194-202.
- Okonkwo, G. N., & Nwokoye, A. O. C. (2014). Estimating global solar radiation from temperature data in Minna location. *European Scientific Journal*, 10(15).
- Paulescu, M., & Badescu, V. (2011). New approach to measure the stability of the solar radiative regime. *Theoretical and applied climatology*, 103(3), 459-470.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima, F. J., Rüther, R., ... & Souza, J. G. D. (2017). Atlas brasileiro de energia solar.
- Persaud, N., Lesolle, D., & Ouattara, M. (1997). Coefficients of the Angström-Prescott equation for estimating global irradiance from hours of bright sunshine in Botswana and Niger. *Agricultural and forest meteorology*, 88(1-4), 27-35.
- Porfirio, A. C. S., Ceballos, J. C., de Souza, J. L., & Rodrigues, M. L. (2011). Uma análise da insolação diária estimada por heliógrafo, pireliômetro equivalente e satélite em Maceió, AL. In *Congresso Brasileiro de Agrometeorologia* (Vol. 17).
- Praxedes, K. C.; Tapia, G. I. M.; Santos, S. A. (2016) Estimate of Angstrom's turbidity coefficient to Natal city. In: 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2016, Vitória-ES. ENCIT 2016.
- Prescott, J. A. (1940). Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Trans. Roy. Soc. S. Aust.*, 46, 114-118.
- Raniero, M. R., Calça, M. V. C., & Dal Pai, A. (2018). Automatização do processo de contagem das horas de brilho solar.
- Ribeiro, A. D. A., de Andrade Junior, A. S., da Silva, E. M., Bastos, E., & Simeão, M. (2018). Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação no Estado do Piauí, Brasil. *Embrapa Meio-Norte-Artigo em periódico indexado (ALICE)*.

- Santos, C. M. D. (2012). Irradiação solar global com diferentes modelos para Alagoas.
- Santos, S. A. Aproveitamento de Energia Solar no Estado do Rio Grande do Norte: Aplicação do Modelo SPDH na Geração e Análise de Dados em Alta Resolução. Tese de doutorado. Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Ciências Atmosféricas, 2015.
- SANTOS, S. A.; SILVA, P. K. O.; CORREIA, M. F.; SILVA ARAGÃO, M. R. PADRÕES HOMOGÊNEOS DE INSOLAÇÃO NO RIO GRANDE DO NORTE. *Ciência e Natura*, v. Especial, p. 426-429, 2013.
- SANTOS, S. A.; Soares, B. L.; Lira, A. L. O.. ANÁLISE DA IRRADIÂNCIA GLOBAL HORIZONTAL SOBRE A CIDADE DE NATAL DURANTE UM PERÍODO CHUVOSO EXTREMO. In: VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016, Belo Horizonte. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016.
- Starke, A. R., Lemos, L. F., Boland, J., Cardemil, J. M., & Colle, S. (2018). Resolution of the cloud enhancement problem for one-minute diffuse radiation prediction. *Renewable Energy*, 125, 472-484.
- Suehrcke, H., Bowden, R. S., & Hollands, K. G. T. (2013). Relationship between sunshine duration and solar radiation. *Solar Energy*, 92, 160-171.
- Tiba, C., De Aguiar, R., & Fraidenraich, N. (2005). Analysis of a new relationship between monthly global irradiation and sunshine hours from a database of Brazil. *Renewable Energy*, 30(6), 957-966.
- Tomás, P. M. P. P. (1997). Modelos de Previsão da Erosão Hídrica em Solos Agrícolas. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (Vol. 100). Academic press.
- Willmott, C. J., Ackleson, S. G., Davis, R. E., Feddema, J. J., Klink, K. M., Legates, D. R., ... & Rowe, C. M. (1985). Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C5), 8995-9005.
- Yacef, R., Mellit, A., Belaid, S., & Şen, Z. (2014). New combined models for estimating daily global solar radiation from measured air temperature in semi-arid climates: application in Ghardaïa, Algeria. *Energy conversion and management*, 79, 606-615.
- Yorukoglu, M., & Celik, A. N. (2006). A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration. *Energy Conversion and Management*, 47(15-16), 2441-2450.
- Zhang, J., Zhao, L., Deng, S., Xu, W., & Zhang, Y. (2017). A critical review of the models used to estimate solar radiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 314-329.

GENERATION OF SYNTHETIC SOLAR RADIATION SERIES FROM HOURLY INSOLATION DATA IN NORTHEASTERN BRAZIL

Abstract. *Solar radiation series are fundamental for the design of photovoltaic solar projects. A continuous heliogram method of generating a solution database. The hourly insolation data from 13 climatological stations served for the fit data of the Angström-Preseott model and more accurately projected the forecast of solar fit data. The performance model of the modified Preseott-Values model became explicit the best performance of the proposed method in order to estimate a global radiation. In this way, the proposed method can be carried out in locations that are not considered to have more designed equipment in the case of measurements performed by pyranometers. In addition to showing that the data contained in the heliogram has more efficiencies capable of being explored and used in the context of generating series of solar radiation with much greater.*

Key words: *Sunshine duration, SPDH, sunshine records.*