



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ANTONIO RONIVON DE OLIVEIRA BESSA

ANÁLISE DE MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL

PAU DOS FERROS

2017

ANTONIO RONIVON DE OLIVIERA BESSA

ANÁLISE DE MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Ernandes Matos Costa

PAU DOS FERROS

2017

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

B559a Bessa, Antonio Ronivon De Oliveira.
ANÁLISE DE MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO
SOLAR GLOBAL / Antonio Ronivon De Oliveira Bessa.
- 2017.
55 f. : il.

Orientador: Francisco Ernandes Matos Costa.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2017.

1. Radiação solar. 2. Energia solar. 3.
Modelos. I. Costa, Francisco Ernandes Matos ,
orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ANTONIO RONIVON DE OLIVEIRA BESSA

ANÁLISE DE MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL

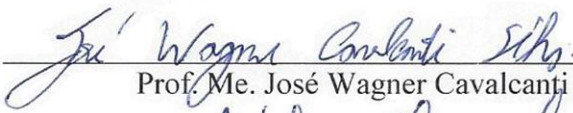
Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Aprovada em 22 de maio de 2017

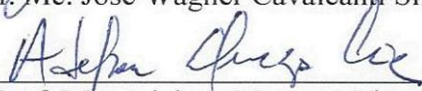
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Francisco Ernandes Matos Costa



Prof. Me. José Wagner Cavalcanti Silva



Prof. Me. Adelson Menezes Lima

*Dedico esse trabalho
aos meus pais.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Francisco Ernandes Matos Costa pela sugestão do tema e toda disponibilidade, presteza e contribuição na realização desse trabalho.

Agradeço ao Prof. Me. José Wagner Cavalcante e o Prof. Me. Adelson Menezes de Lima por comporem a banca examinadora e por todo detalhamento e cuidado na examinação do trabalho.

Agradeço a todos os professores que passaram pela minha vida, pois cada um deixou sua valiosa contribuição para minha formação pessoal e acadêmica.

Agradeço aos meus pais e irmãos por toda motivação, inspiração e incentivo pelo conhecimento, pois sem eles não chegaria a lugar nenhum. Destaco meus agradecimentos a minha mãe e ao meu pai por todo valor depositado na educação e por todo o sacrifício feito pelos meus estudos, mesmo nunca tendo as oportunidades e privilégios que tenho hoje, tudo graças a eles.

Vivemos em uma sociedade extremamente dependente da ciência e tecnologia, na qual pouquíssimos sabem alguma coisa sobre ciência e tecnologia.

Carl Sagan.

RESUMO

A radiação solar é a principal fonte de energia para os processos naturais que ocorrem na Terra. A estimativa e utilização dessa radiação são fundamentais para diferentes atividades humanas e para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis. Nesta monografia, investigamos os principais aspectos de dois modelos empíricos de estimativa da radiação solar existentes na literatura: no primeiro a radiação solar é uma função linear da insolação, enquanto que no segundo é uma lei de potência. Utilizando dados de radiação solar e insolação encontramos os valores dos parâmetros livres desses dois modelos.

Palavras-chave: Radiação solar. Energia solar. Modelos.

ABSTRACT

Solar radiation is the main source of energy for the natural processes that occur on Earth. The estimation and use of this radiation are fundamental for different human activities and for the development of sustainable technologies. In this monograph, we investigate the main aspects of two empirical models of estimation of solar radiation in the literature: in the first, solar radiation is a linear function of sunshine, while in the second it is a power law. Using data from solar radiation and insolation we find the values of the free parameters of these two models.

Keywords: Solar radiation. Solar energy. Models.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Problemática.....	12
1.2	Justificativa	13
1.3	Objetivos	13
1.3.1	Objetivo Geral.....	13
1.3.2	Objetivos Específicos.....	13
1.4	Metodologia.....	14
1.5	Estrutura da Monografia.....	14
2	A RADIAÇÃO SOLAR E SUA IMPORTÂNCIA	15
2.1	O Sol	15
2.1.1	Estrutura do Sol	15
2.2	Aspectos Geométricos do Sistema Sol-Terra	17
2.3	Radiação Solar	22
2.4	Grandezas para estudo da radiação	24
2.5	Radiação Solar Extraterrestre	29
2.5.1	Estimativa da radiação solar sobre uma superfície.....	29
2.6	Atmosfera Terrestre	34
2.7	Estimativa da radiação solar sobre a superfície terrestre	36
2.8	Importância dos dados de energia solar	38
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
3.1	Um Modelo Linear.....	40
3.2	Um Modelo Lei de Potência	44
3.2.1	Análise Estatística do Modelo	45
4	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	51
	REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

A radiação solar que chega a Terra é a principal fonte de energia para os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no nosso planeta. Em linhas gerais, todas as fontes de energia – hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e energia dos oceanos – são formas indiretas de energia solar. Além disso, a radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica ou elétrica. Pode ainda ser convertida diretamente em energia elétrica, por meio de efeitos sobre determinados materiais, entre os quais se destacam o termoelétrico e o fotovoltaico. O primeiro caracteriza-se pelo surgimento de uma diferença de potencial, ocasionada por um gradiente de temperatura. Já o segundo caracteriza-se pelo surgimento de uma diferença de potencial em material semicondutor dopado – células fotovoltaicas – quando exposto a radiação solar.

Entre os vários processos de aproveitamento da energia solar, os mais usados atualmente são o aquecimento de água e a geração fotovoltaica de energia elétrica. No Brasil, devido a características climáticas, o primeiro é mais encontrado nas regiões Sul e Sudeste e o segundo nas regiões Norte e Nordeste, em comunidades isoladas da rede de energia elétrica. Mas recentemente, com o barateamento de placas solares fotovoltaicas, tem aumentado a procura pelo uso da energia solar fotovoltaica, de forma que esse tipo de energia tem ganhado muitos consumidores adeptos nas cidades.

Uma pequena parte da energia emitida pelo Sol chega até a Terra na forma de radiação. Quando essa radiação atravessa a atmosfera terrestre, interage com a mesma, e como resultado dessa interação ocorrem os fenômenos de reflexão, difusão e absorção. Parte da radiação que incide na superfície terrestre é absorvida e reemitida na forma de calor.

A disponibilidade de radiação solar na superfície da Terra depende de muitos fatores como das condições atmosféricas (nebulosidade, umidade relativa do ar etc.), da latitude local e da posição no tempo (hora e dia do ano). Este fator se deve à inclinação do eixo imaginário em torno do qual a Terra gira diariamente em relação ao plano eclíptico e a trajetória elíptica que a Terra descreve ao redor do Sol (translação ou revolução) (DIABATÉ, 1998).

Para realizar medidas da quantidade de radiação que chega até a superfície da Terra em um dado local, são necessários aparelhos registradores e sistemas de aquisição de dados que são instalados em estações meteorológicas convencionais ou automáticas. Entretanto, o território brasileiro é muito extenso, o que inviabiliza a instalação e manutenção de medidores

solarimétricos em todo o território brasileiro. Para exemplificar as estações mais próximas do município de Pau dos Ferros estão localizadas em Apodi e Mossoró, distantes 75 km e 150 km, respectivamente. Tendo em vista essas dificuldades, a análise de modelos empíricos de estimativa da radiação solar que sejam capazes de estimar dados confiáveis é vista como sendo uma ferramenta muito útil para a concepção e instalação de projetos economicamente viáveis.

1.1 Problemática

A radiação solar está presente de inúmeras maneiras na sociedade humana, sendo utilizada de diversas formas. Ela pode ser aproveitada para o desenvolvimento tecnológico de forma a contribuir com o conforto humano, como por exemplo, a utilização da luz solar nos projetos arquitetônicos envolvendo a luz ambiente e o conforto térmico, a transmissibilidade de energia através de alvenarias na construção civil, o comportamento de materiais expostos a radiação solar na engenharia de materiais e muitas outras áreas que necessitam de dados solarimétricos.

A energia solar é uma fonte limpa e inesgotável de energia para a escala de tempo humana, entretanto o aproveitamento quando comparado a outras fontes de energias ainda é muito limitado. A razão disso, é que a produção de energia solar ainda é bastante cara quando comparada a outras fontes derivadas de combustíveis fósseis e hidrelétricas, por exemplo.

Nesse sentido, o principal desafio do setor de energia solar consiste no barateamento dos custos de transformação da energia solar em elétrica. Há dois caminhos distintos que podem contribuir para o barateamento da energia solar. O primeiro consiste em produzir instalações elétricas bem dimensionadas e economicamente viáveis. E isso só é possível a partir de informações solarimétricas consistentes da região em questão. O segundo consiste no desenvolvimento de placas fotovoltaicas feitas a partir de materiais de custo mais baixo.

Devido à grande extensão do território brasileiro as informações solarimétricas nem sempre estão disponíveis de maneira direta, já que a grande extensão do território inviabiliza, na sua totalidade, a instalação e manutenção de instrumentos destinados às medições solares. Nessa perspectiva, a análise de modelos que sejam capazes de estimar dados confiáveis é de fundamental importância para concepção dos projetos viáveis economicamente e com retorno de investimento garantido (RICIERI, 1998; GAUTIER, 1980).

1.2 Justificativa

As principais fontes de energias utilizadas no planeta ainda são as não renováveis que ocasionam problemas ambientais. Este fato tem despertado o interesse pela utilização de fontes renováveis de energia. Nesse sentido, a energia solar é vista como sendo uma boa opção na busca por alternativas menos agressivas ao meio ambiente, pois consiste numa fonte energética limpa e renovável. Entretanto, quando comparada com outras formas de energia, a solar ainda exige um investimento inicial bastante alto, de forma que seu retorno só ocorre a longo prazo.

Na tentativa de tornar a energia solar mais competitiva e atraente, são necessários que desenvolvam placas solares mais baratas e mais eficientes, e também sejam desenvolvidas instalações bem dimensionadas em regiões economicamente viáveis. Este segundo ponto só é possível a partir de informações solarimétricas consistentes da região em questão.

A energia solar também é essencial na configuração de projetos arquitetônicos, na agricultura, climatologia e meteorologia, sendo a radiação solar umas das principais variáveis da meteorologia. É essencial nos estudos de necessidades hídricas, culturas irrigadas, modelagens de crescimento e produção dos vegetais entre outros (BORGES et al, 2010, PAI et al, 2013).

A análise de modelos de estimativas de radiação solar é de suma importância para alcançar esse objetivo. Neste trabalho investigaremos, do ponto de vista teórico e observacional, dois modelos de estimativa da radiação aplicados em regiões de clima semiárido. Portanto entende-se que o mesmo é de suma importância.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

- Fazer um estudo comparativo, com dados de radiação solar e insolação, de dois modelos de estimativa da radiação solar existentes na literatura.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Investigar os principais aspectos de dois modelos empíricos de estimativa da radiação solar global.

- Utilizar dados de radiação solar e insolação para determinar os parâmetros livres dos dois modelos.
- Contribuir para a pesquisa científica na UFERSA/Pau dos Ferros.
- Obter mais conhecimento sobre o comportamento da radiação solar.

1.4 Metodologia

Esta investigação é de natureza teórica quali-quantitativa. Descreveremos a seguir as principais etapas metodológicas adotadas no desenvolvimento da pesquisa.

Em um primeiro momento foi realizada uma pesquisa de cunho bibliográfico sobre aspectos gerais da radiação solar. Em seguida foi feito um estudo sobre dois modelos empíricos de estimativa da radiação global (um linear e outro do tipo lei de potência).

Os dados de radiação solar e insolação foram obtidos no banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e no banco de dados meteorológicos para o ensino e pesquisa (BDMEP), respectivamente. Ambos os dados foram coletados na estação meteorológica OMM: 82590, localizada no município de Apodi – RN.

Os parâmetros livres dos modelos linear e lei de potência foram obtidos a partir de uma regressão linear e do método estatístico χ^2 , respectivamente.

1.5 Estrutura da Monografia

Esta monografia está estruturada em quatro capítulos, conforme descreve-se em linhas gerais a seguir.

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica da radiação solar desde sua produção no núcleo do Sol, passando pelo processo de emissão até a mesma chegar à superfície da Terra.

No capítulo 3 discute-se dois modelos empíricos de estimativa da radiação solar global em termos da insolação. No primeiro a radiação solar é uma função linear da insolação, enquanto no segundo a radiação solar é uma lei de potência da insolação.

No capítulo 4 apresenta-se as conclusões deste estudo bem como algumas perspectivas de estudos futuros.

2 A RADIAÇÃO SOLAR E SUA IMPORTÂNCIA

2.1 O Sol

O Sol é a estrela do nosso Sistema Solar, portanto, a mais conhecida pelo homem. Consiste em uma esfera de plasma incandescente concentrando mais de 99% da massa do Sistema Solar, o que equivale a 2×10^{30} kg. Seu diâmetro é aproximadamente 1.400.000 km e sua temperatura varia de 5.800 K na superfície a cerca de 15.000.000 K no núcleo (MACAGNAN, 2010). É constituído basicamente de hidrogênio (74%) e hélio (24%), além de também apresentar um pequeno percentual de outros elementos mais pesados.

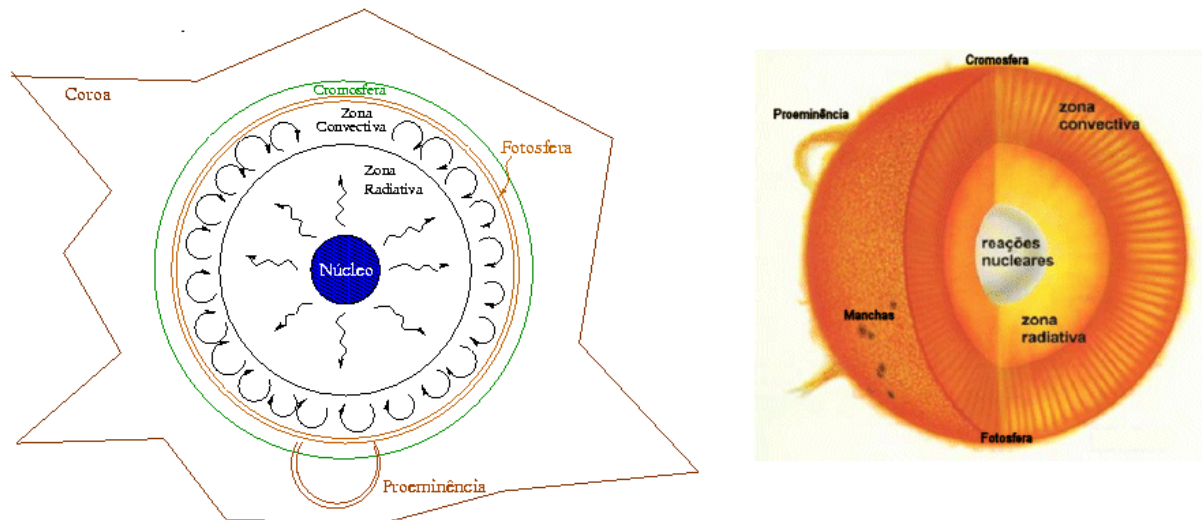
Assim como bilhões de outras estrelas no Universo, o Sol é uma poderosa fonte de energia, chegando a produzir cerca de 4×10^{23} quilowatts de potência por segundo. A sua fonte básica de energia é o processo de fusão nuclear que ocorre em seu núcleo. Nesse processo os núcleos de hidrogênio se fundem criando núcleos de hélio como subproduto e liberando uma enorme quantidade de energia (TAVARES, 2000).

Uma pequena parte da energia produzida pelo Sol chega a Terra na forma de radiação solar. Essa radiação é a principal fonte de energia para todos os processos que ocorrem no nosso planeta, desde a fotossíntese até a formação de furacões e tempestades, mantendo assim, as características da Terra como a conhecemos. É notável que toda essa energia seria extremamente destrutiva se a Terra não tivesse seus mecanismos de defesa para minimizar os efeitos da radiação e dos ventos solares, afinal o excesso de radiação emitida pelo Sol também pode causar danos, por exemplo, o câncer de pele em humanos devido a exposição excessiva aos raios ultravioleta (JUNIOR, 2011, SOUZA, 2016).

2.1.1 Estrutura do Sol

A estrutura do Sol é composta pelas seguintes regiões: o núcleo, a zona radiativa (interior), a zona convectiva, a fotosfera, a camada de reversão, a cromosfera e a corona (MACAGNAN, 2010), como ilustrado na figura 2.1.

Figura 2.1: Ilustração da estrutura do Sol, desde o núcleo até sua superfície.



Fonte: Filho e Saraiva (2016).

O núcleo do Sol é a região mais quente e densa, com temperaturas que variam de $1,5 \times 10^7$ K até 4×10^7 K, e densidade que chega aproximadamente $1,5 \times 10^5 \text{ kg/m}^3$. A grande quantidade de energia gerada nessa região, devido às reações nucleares, gera uma potência de aproximadamente $3,84 \times 10^{26} \text{ W}$. A energia produzida no núcleo pode levar cerca de 2×10^5 anos para ser transportada pela zona radiativa acima do núcleo, em seguida pela zona convectiva até atingir a superfície, onde a temperatura vai diminuindo drasticamente (MACAGNAN, 2010, CECATTO, 2009).

A zona radiativa é a parte acima do núcleo central, onde contém boa parte da massa do Sol. Nessa camada a energia proveniente do núcleo é conduzida por radiação. Os raios gama produzidos nas reações de fusão no núcleo viajam até serem absorvidos por outros íons, que emitem outro fóton em uma direção randômica, com um pequeno decréscimo de energia e assim segue o processo. Nessa camada um fóton viaja, em média, $1\mu\text{m}$ antes de ser absorvido, ocorrendo cerca de 10^{25} absorções e emissões antes do fóton chegar a superfície.

A zona convectiva do Sol é onde ocorre o processo mecânico de transferência de energia por meio do deslocamento de massas do plasma. Nessa zona o plasma mais quente sobe em direção a superfície, e o plasma mais frio desce em movimento contrário (SOBRINHO, 2013).

A fotosfera é a zona que se estende da região convectiva até a superfície do Sol. É a região onde há emissão de luz visível que pode ser observada diariamente. A fotosfera é uma

camada estreita com uma espessura na ordem de 500 km, com uma temperatura de aproximadamente 5800 graus kelvins e uma considerável diminuição da densidade em relação às camadas mais profundas, permitindo assim a diminuição da opacidade e consequentemente a livre propagação da radiação (PEREIRA E HETEM, 2010).

Junto a fotosfera encontra-se a camada de reversão que se estende por centenas de quilômetros. Essa camada contém vapor de quase todos os elementos conhecidos da crosta terrestre. Após 2500 km acima dessa camada se encontra a cromosfera, na qual juntamente com a camada de reversão, forma a atmosfera solar composta principalmente por hidrogênio e hélio (MACAGNAN, 2010). A cromosfera tem a densidade muito menor que a fotosfera, e uma espessura juntamente com a camada de reversão, em torno de 1500 km. A temperatura nessa camada vai diminuindo suavemente do topo para a base, e mantém-se numa média de 15000 K (PEREIRA E HETEM, 2010).

Já a corona, é a camada mais externa do Sol, composta por gases de baixa densidade e altíssima temperatura. Devido aos gradientes de temperatura e densidade, pode-se perceber que o Sol não é um radiador de corpo negro a temperatura fixa (MACAGNAN, 2010).

2.2 Aspectos geométricos do sistema Sol-Terra

De acordo com as leis de Newton e a teoria da gravitação universal, a Terra descreve uma órbita elíptica em torno do Sol, com este ocupando um dos focos da elipse. A velocidade média da Terra nessa órbita é de 107.000 km/h sendo que a mesma realiza uma volta completa ao redor do Sol em 365 dias, 5 horas e 48 minutos (FENG, 2013). A excentricidade da órbita da Terra é muito pequena, 0,0167, portanto, sua órbita é muito próxima de um círculo. Essa pequena excentricidade causa uma pequena variação na distância da Terra ao Sol (r) em cerca de 1,7%. Entretanto, é possível calcular o valor de r com boa precisão para qualquer época do ano a partir da equação de Spencer:

$$\left(\frac{\bar{r}}{r}\right)^2 = 1,000110 + 0,034221\cos\alpha + 0,001280\sin\alpha + 0,000719\cos(2\alpha) + 0,000077\sin(2\alpha), \quad (2.1)$$

onde $\bar{r}$ é o valor médio da distância Terra-Sol e α é dada por

$$\alpha = \frac{2\pi(d_n-1)}{365}, \quad (2.2)$$

sendo d_n o número de dias do ano, variando de 1 de janeiro a 31 de dezembro.

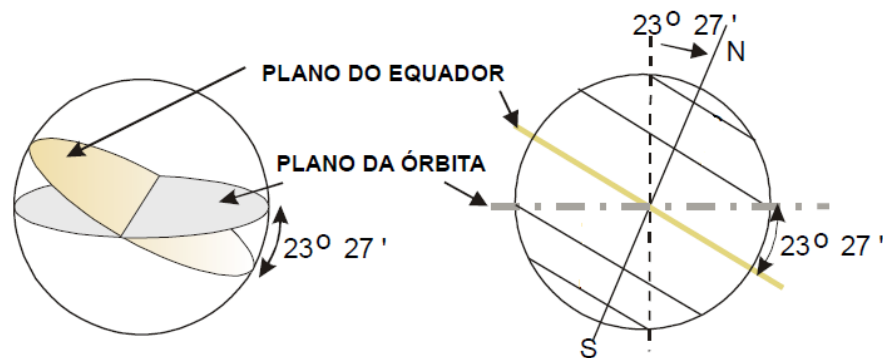
A Eq. (2.1) pode ser aproximada para a maioria das aplicações práticas de engenharia como sendo

$$e_0 = 1 + 0,033 \cos\left[\left(\frac{2\pi d_n}{365}\right)\right], \quad (2.3)$$

onde indicamos $e_0 = \left(\frac{\tilde{r}}{r}\right)^2$.

A Terra também descreve um movimento de rotação em torno de um eixo imaginário. Esse eixo possui uma inclinação de $23^\circ 27'$ em relação à linha perpendicular ao plano da órbita da Terra (plano eclíptico) como ilustrado na figura 2.2.

Figura 2.2: Ilustração da inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao plano da sua órbita.



Fonte: Varejão – Silva (2006).

Dessa forma, ao longo de sua órbita, o ângulo formado pelo plano do equador e a linha imaginária que une a Terra ao Sol – declinação solar (δ) – varia continuamente, conforme mostra a equação desenvolvida por Spencer (1971) *apud* Vianello e Alves (2000)

$$\delta = 0,006918 - 0,3999\cos\alpha + 0,070257\sin\alpha - 0,006758\cos(2\alpha) + 0,000907\sin(2\alpha) - \quad (2.4) \\ - 0,002697\cos(3\alpha) + 0,00148\sin(3\alpha).$$

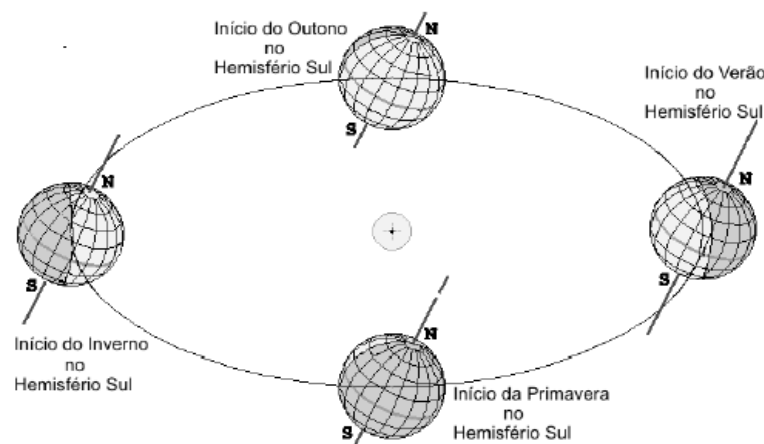
Para grande parte das aplicações de engenharia, é suficiente considerar que a Terra gira ao redor do Sol realizando uma órbita circular e com velocidade constante (MACAGNAN, 2010). Desse modo, podemos calcular a declinação solar em graus pela equação

$$\delta = 23,45\sin\left[\frac{360}{365}(d_n + 284)\right]. \quad (2.5)$$

Tendo em vista a declinação solar, devido aos movimentos de rotação e translação da Terra, um plano recebe os raios solares com ângulos de incidência que dependem da hora do dia e da época do ano. Em decorrência disso, os dois hemisférios terrestre recebem diferentes quantidade de radiação ao longo do ano, originando assim as estações do ano. Isso significa que os dias e as noites não terão a mesma duração em todos os lugares da Terra. Somente nos equinócios é que as noites são iguais aos dias, enquanto que nos solstícios os dias são mais longos e as noites mais curtas (ALVES, 2009; MACAGNAN, 2010; FENG, 2013).

A declinação solar é nula nos equinócios de primavera e outono, pois os raios solares atingem perpendicularmente a superfície da Terra nesses dias do ano, enquanto que nos solstícios de inverno e verão δ apresenta inclinação de $23^\circ 27'$ e $-23^\circ 27'$, como mostra a figura 2.3.

Figura 2.3: Ilustração da inclinação do plano equatorial ao longo do movimento de translação.

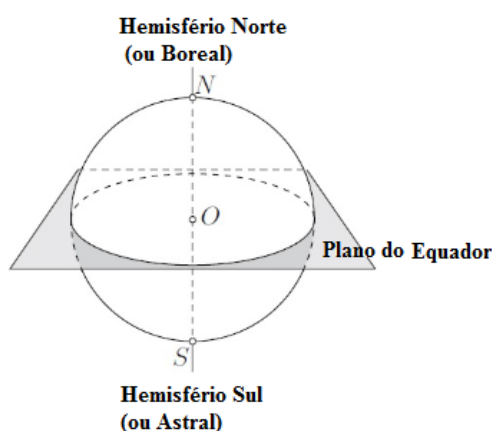


Fonte: Alves (2009).

A Terra também apresenta uma topografia de superfície bastante irregular em um formato elipsoidal com achatamento nos polos. Porém, para a maioria das aplicações pode-se considerar a Terra como uma esfera.

Nas extremidades do eixo de rotação estão os polos geográficos Norte e Sul, e no meio da superfície terrestre, perpendicular ao eixo de rotação, passa o plano do Equador que divide a Terra em dois hemisférios, o Norte ou boreal e o Sul ou astral como mostra a figura 2.4.

Figura 2.4: Plano do equador dividindo a Terra em dois hemisférios.



Fonte: Adaptado de Filho (2014).

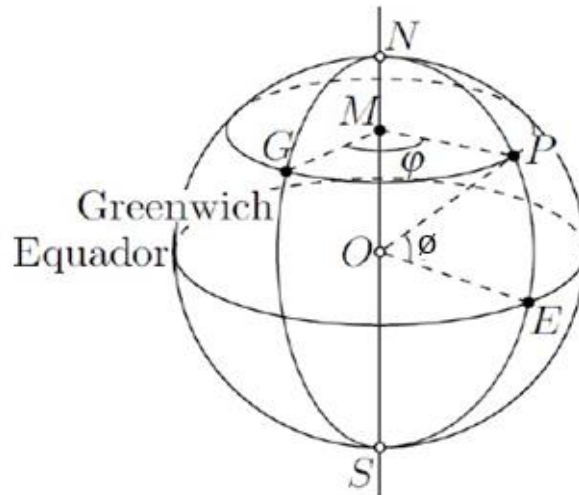
O plano do Equador é limitado pela circunferência de maior diâmetro. Os demais planos paralelos ao do Equador são chamados de *paralelos* e são limitados por circunferências de diâmetros menores na superfície terrestre.

Já os *meridianos*, são semicircunferências paralelas ao eixo de rotação da Terra e perpendiculares ao plano do Equador, ligando o polo norte ao polo sul e ao contrário dos paralelos, eles têm todas as mesmas dimensões (ALVES, 2009; VAREJÃO – SILVA, 2006; E FILHO, 2014).

O conhecimento dessas linhas, planos e pontos representativos no globo terrestre, permite determinar as coordenadas geográficas, como a latitude e a longitude, que auxiliam na localização de algum ponto sobre a superfície terrestre. Assim, a latitude de um ponto P é a medida do arco de meridiano que passa por P situado entre o paralelo que contém P e o Equador. A latitude é expressa em graus, minutos e segundos e se mede de 0° a 90° N (norte) e de 0° a 90° S dependendo do hemisfério onde se está medindo. Enquanto que a longitude de

um ponto P é a medida do arco de paralelo que passa por P situado entre o meridiano que contém P e o meridiano de Greenwich. A longitude é expressa em graus, minutos e segundos e se mede de 0° a 180° E (leste) e de 0° a 180° W (oeste) ” (ALVES, 2009, p. 25), veja a figura 2.5.

Figura 2.5: Representação das coordenadas geográficas mostrando o ângulo φ que representa a longitude do ponto P, e a latitude θ .



Fonte: Filho, (2014).

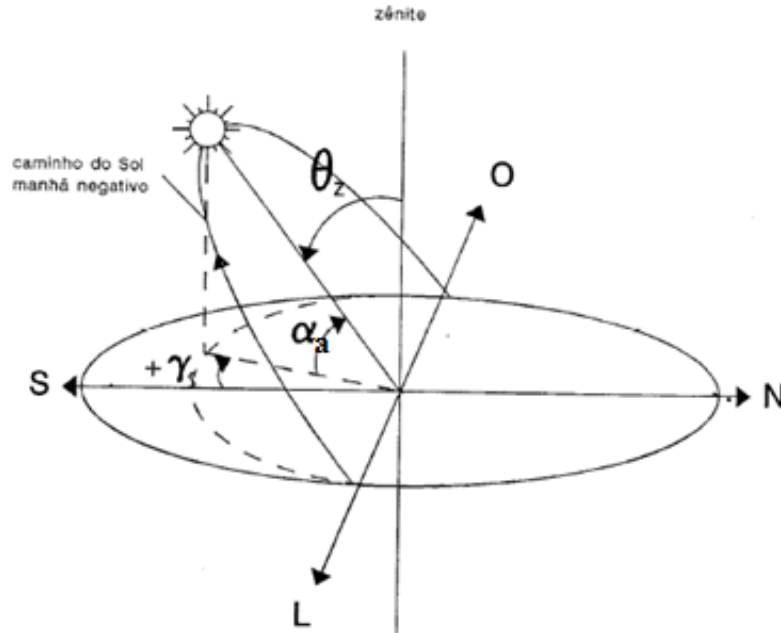
Para muitas aplicações em arquitetura e engenharia, por exemplo, é necessário calcular a posição do Sol em determinado instante. Para isso, é necessário conhecer o conceito de ângulo azimute e ângulo zenital do Sol. “O ângulo azimute (γ_s) é definido como o ângulo compreendido entre a direção norte e a projeção do vetor posição do Sol sobre o plano do horizonte local” (VAREJÃO-SILVA, 2006, p.27). O ângulo zenital (θ_z) é o ângulo entre a linha vertical do zênite local e a linha que une o observador e o Sol conforme mostra a figura 2.6.

Outro ângulo importante é o *ângulo horário* (ω), que é definido como sendo o ângulo entre o meridiano do observador e o meridiano do Sol, onde pode ser estimado por

$$\omega = \cos^{-1}(-tg\theta tg\delta), \quad (2.6)$$

valendo 0° ao meio-dia e muda 15° por hora. Considera-se esse ângulo negativo pela manhã e positivo pela tarde” (MACAGNAN, 2010, p.7).

Figura 2.6: Representação dos ângulos de azimute (γ_s) e zênite (θ_z). O ângulo α_a é a altitude solar, que nada mais é do que o complemento do ângulo zenital.



Fonte: Macagnan (2010).

2.3 Radiação Solar

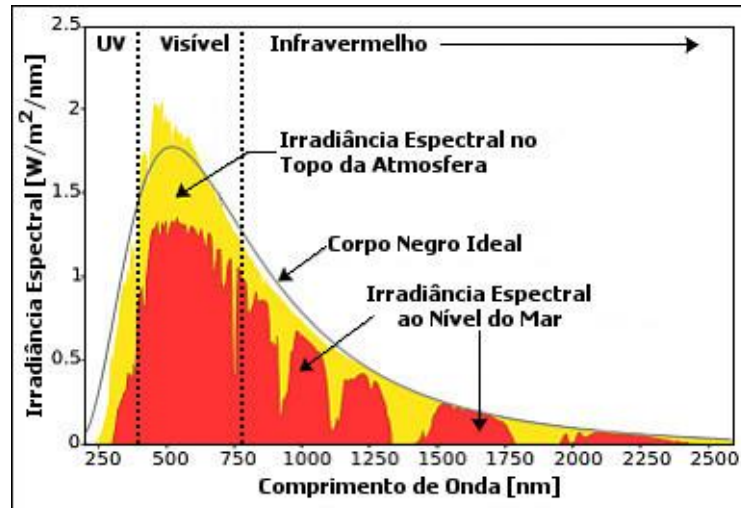
A radiação solar é a designação dada a energia emitida pelo Sol, em particular aquela que é transmitida na forma de radiação eletromagnética. Essa radiação compreende um grande intervalo de comprimento de onda, que vai desde o infravermelho próximo (4000 nm) até o ultravioleta (350 nm). A partir da figura 2.7 apresentada em seguida percebe-se que o espectro solar se aproxima de um espectro de corpo negro, descrito pela função de Planck, i.e.,

$$L_{\lambda\text{CN}}(\lambda, T) = \frac{(2hc^2)}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda KT}\right) - 1 \right]}, \quad (2.7)$$

onde h é a constante de Planck cujo valor é $6,6262 \times 10^{-34} \text{ J/s}$, K é a constante de Boltzmann $= 1,3807 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, c é a velocidade da luz no vácuo, T é a temperatura absoluta do corpo negro e λ é o comprimento de onda. Na figura 2.7 é mostrado o espectro da

radiação solar no topo da atmosfera e no nível do mar e o espectro de emissão de um corpo negro.

Figura 2.7: Espectro da radiação solar no topo da atmosfera e no nível do mar, em comparação com o espectro do corpo negro.



Fonte: Site <http://recursosolar.geodesign.com.br> (Acesso: 5 março 2017).

Por outro lado, a lei do deslocamento de Wien afirma que o espectro de radiação eletromagnética emitido por um corpo negro, é determinado pela temperatura em que este se encontra, de forma que, quanto maior a temperatura desse corpo, menor será o máximo comprimento de onda emitido pelo mesmo. Assim,

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{C}{T}, \quad (2.8)$$

onde $C = 2897\mu\text{mK}$ é a constante de Wien. Substituindo o valor da temperatura superficial do Sol na equação (2.8), encontra-se:

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{2897\mu\text{mK}}{5800K} = 0,499\mu\text{m}$$

Portanto, o pico de intensidade da luz solar está no intervalo visível, como mostrado na figura 2.7.

A maioria da radiação emitida pelo Sol encontra-se na faixa de 0,1 a 4µm, denominada ondas curtas, que vai do ultravioleta, passando pela luz visível até o infravermelho (NUNES E MARIANO, 2015). O espectro de radiação solar sofre variações ao longo do tempo que são decorrentes das absorções dos componentes atômicos, como hidrogênio, alumínio e magnésio, que ocorrem na atmosfera do Sol (CORRÊA, 2010).

De acordo com Moraes (2002) cerca de 99% da energia solar que atinge a Terra encontra-se concentrada na faixa de 0,28 a 4 µm.

2.4 Grandezas para estudo da radiação

Para estudar a interação da radiação com a matéria, é necessário definir algumas grandezas que caracterizarão o campo de radiação.

O *fluxo de radiação* (F) é definido como a potência radiante, ou seja, é a quantidade de energia (U) observada (ou detectada) por unidade de tempo. Assim,

$$F = \frac{dU}{dt}. \quad (2.9)$$

Já a *intensidade de radiação* (I) é o fluxo de radiação por unidade de área de uma seção perpendicular à direção de propagação do campo de radiação, i. é.,

$$I = \frac{1}{A} \frac{dU}{dt}. \quad (2.10)$$

Por outro lado, a *radiância* (L) é definida como sendo a quantidade de radiação emitida ou recebida por alguma fonte em uma certa direção. A razão entre a intensidade de radiação e um certo elemento de superfície em uma dada direção, estando a área da projeção ortogonal deste elemento de superfície num plano perpendicular à direção tratada (CORRÊA, 2010), sendo,

$$dI = LdA \cos\theta. \quad (2.11)$$

Já a *emitância*, está relacionada a emissão de radiação por um corpo. O termo *emitância radiante* de uma superfície se refere à densidade de fluxo de radiação emitido por

essa superfície. O Sol, por exemplo, tem uma emitância de aproximadamente $6 \times 10^7 \text{ W/m}^2$. Então o termo *irradiância* refere-se à radiação absorvida por uma superfície. Sendo o oposto da emitância, a irradiância será a densidade de fluxo de radiação que incide sobre uma superfície (VIANELLO E ALVES, 2000).

Todo corpo com temperatura acima de 0 K (zero Kelvin), emite radiação e essa radiação incide em outro corpo que conseqüentemente vai absorver uma certa quantidade desta radiação incidente. Então o termo *absortividade* ou *absortância* $a(\lambda)$ que é definida como a razão entre a quantidade de energia radiante absorvida pelo corpo (R_A) e o total incidente (R_I), isto é,

$$a(\lambda) = \frac{R_A}{R_I}. \quad (2.12)$$

Note que essa grandeza relacionada a capacidade de um corpo de absorver radiação.

A *emissividade* $\varepsilon(\lambda)$ de um corpo é definida como a razão entre a energia emitida (R_E) deste corpo e a energia emitida por um corpo negro (R_{ECN}) estando à mesma temperatura do corpo considerado, então,

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{R_E}{R_{ECN}}. \quad (2.13)$$

Logo é um termo relacionado a capacidade de um corpo de emitir radiação. Essa propriedade depende do material.

O corpo pode emitir e absorver radiação e dependendo das características do corpo, pode também refletir para diversas direções parte da energia incidente sobre ele, ele pode também absorver essa energia e a transmitir através de seu volume mássico. Outra quantidade importante é a *refletividade* ou *refletância* $r(\lambda)$ que é definido:

$$r(\lambda) = \frac{R_R}{R_I}, \quad (2.14)$$

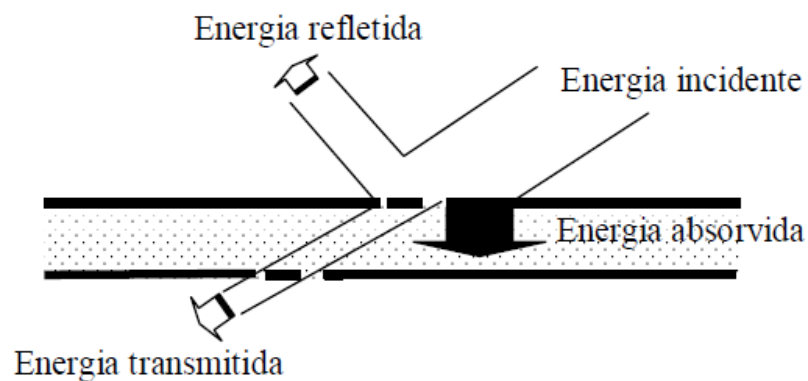
que é a razão entre a quantidade de energia radiante refletida pela substância (R_R) e a energia total incidente (R_I). Essa quantidade, está relacionada a capacidade de um corpo de refletir a radiação que incide sobre ele. Essa capacidade varia muito conforme as propriedades físicas e sua constituição, bem como as características da superfície do material. Por exemplo uma superfície mais lisa e espelhada tende a refletir mais energia que as outras.

Finalmente a transmissividade de um meio é a razão entre a quantidade de energia radiante transmitida (R_T) e o total incidente nesse meio, logo,

$$t(\lambda) = \frac{R_T}{R_I}. \quad (2.15)$$

A figura 2.8 ilustra quando o campo de radiação incide em uma superfície, onde parte da energia é refletida, parte absorvida e outra parte é transmitida.

Figura 2.8: Esquema da interação da radiação com um material alvo.



Fonte: Abreu (2011).

Com isso, podemos observar que todos esses termos se refere a uma razão do termo em questão sobre a energia incidente no corpo. Assim, a somatória de todos esses termos tem que ser igual a Um:

$$a(\lambda) + e(\lambda) + t(\lambda) = 1 \quad (2.16)$$

Nota-se então que a absorptividade e a emissividade de um corpo negro são iguais a Um, enquanto que a transmissividade e refletividade são iguais a Zero.

Agora, integrando a lei de Planck Eq. (2.7) em comprimento de onda, resulta:

$$E = \sigma T^4, \quad (2.17)$$

onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ e E fornece o poder emissivo do corpo negro. Já o poder emissivo de um corpo qualquer é dado por

$$E = \varepsilon \sigma T^4. \quad (2.18)$$

Em um determinado comprimento de onda e uma determinada temperatura, a absorptividade $a(\lambda)$ de um corpo negro é igual a sua emissividade $e(\lambda)$, ou seja, nesse dado comprimento de onda e temperatura, a energia emitida por um corpo é igual a energia absorvida por esse corpo, estando ele nesse mesmo comprimento de onda e temperatura. Assim, a absorptividade desse corpo dividida pela sua emissividade, é igual a emissividade de um corpo negro, logo:

$$\frac{e(\lambda)}{a(\lambda)} = 1 = \varepsilon_{CN}(\lambda). \quad (2.19)$$

Para um corpo negro a emissividade é igual a 1, e os corpos não-negro tem emissividade menor do que 1. Logo, para corpos cinzas (não-negro), a emissividade monocromática é calculada por:

$$\varepsilon_{\text{corpo cinza}} = \varepsilon_{\text{corpo negro}}. \quad (2.20)$$

Assim, para considerarmos a emitância radiante por todo o espectro, basta substituir a Eq. (2.18) na Eq. (2.20), e encontra-se a emitância radiante total de um corpo cinza:

$$\varepsilon_{cc} = \sigma T^4. \quad (2.21)$$

A energia radiante também sofre uma atenuação de forma exponencial ao atravessar um meio homogêneo, isto é,

$$I_{\lambda} = I_{o\lambda} e^{-K_{\lambda} X}, \quad (2.22)$$

onde $I_{o\lambda}$ é o fluxo monocromático incidente, I_{λ} é o fluxo monocromático transmitido, X é o caminho óptico, ou seja, o trajeto que a radiação fará pela espessura do material, e K_{λ} é o coeficiente monocromático de extinção que depende das características do material de permitir ou não a penetração de determinada quantidade de radiação. A Eq. (2.22) é denominada lei de Beer-Bouguer-Lambert.

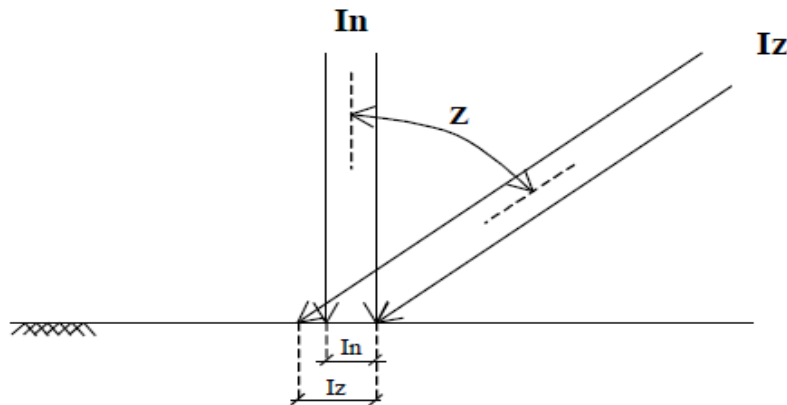
Se a radiação incidir na superfície com uma determinada angulação, a energia incidente em uma superfície inclinada é igual a energia incidente perpendicular ao plano multiplicada pelo cosseno do ângulo formado entre a radiação inclinada e a radiação perpendicular. Então com base na figura 2.9 podemos escrever

$$\cos(z) = \frac{I_z}{I_n}, \quad (2.23)$$

ou ainda,

$$I_z = I_n \cos(z), \quad (2.24)$$

Figura 2.9: Representação da lei de Lambert ou lei dos cossenos.



Fonte: Dantas, carvalho e Neto (2009).

2.5 Radiação Solar Extraterrestre

A radiação extraterrestre é a que chega ao topo da atmosfera sem penetrá-la. Vianello e Alves (2000) mostra que a irradiância solar instantânea sobre uma superfície horizontal no topo da atmosfera pode ser estimada através da equação

$$I_N = S_0 e_0 \quad (2.25)$$

onde S_0 é a *constante solar*, que pode ser definida como sendo “a energia proveniente do Sol por unidade de tempo, recebida em uma unidade de área de superfície perpendicular à direção da propagação da radiação, para a média distância Terra-Sol e no exterior da atmosfera terrestre”(COSTA, 2011, p. 22).

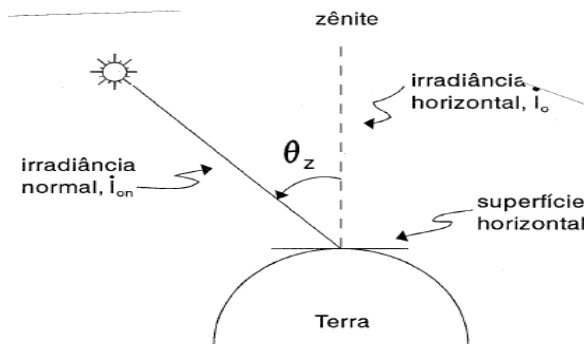
A constante solar pode ser calculada dividindo a emitância total do Sol pela área de uma esfera desde que o raio da esfera seja igual a distância média da terra ao Sol (VIANELLO E ALVES (2000), e esse valor é conhecido e foi calculado por satélites que ficam acima da atmosfera terrestre, sendo estimado em torno de 1367 W/m^2 (RIBEIRO, 2006).

2.5.1 Estimativa da radiação solar sobre uma superfície

Considere uma linha vertical normal à superfície da Terra, no lugar em que se encontra um observador, essa linha normal intercepta a esfera celeste em dois pontos, denominados de zênite e nadir. Essa linha forma um ângulo $\varnothing$ com o plano do equador, onde esse ângulo, como já foi visto, é a latitude geográfica que ao norte deste plano é positiva, e ao sul é negativa. O círculo máximo na esfera celeste é o horizonte do observador, onde o plano passa pelo centro da Terra de modo normal a uma linha que une o centro da Terra e o Zênite.

Como vimos em seções anteriores, o ângulo θ_z formado pelo zênite local e a linha que une o observador e o Sol é o ângulo de zênite, conforme pode ser observado na figura 2.10.

Figura 2.10: Relação entre a irradiância direta e normal numa superfície horizontal.



Fonte: Macagnan, (2010).

A radiação incidente sobre uma superfície normal aos raios do Sol no topo da atmosfera, pode ser escrita como

$$I_N = S_0 e_0, \quad (2.26)$$

Pela figura 2.10 podemos observar que a radiação incidente pode ser determinada pela expressão

$$I = I_N \cos(\theta_z). \quad (2.27)$$

Já o ângulo Zenital é expresso em termos de $\varnothing$, da declinação solar e do ângulo horário como

$$\cos(\theta_z) = \sin(\varnothing) \sin(\delta) + \cos(\varnothing) \cos(\delta) \cos(\omega). \quad (2.28)$$

A radiação que incide na superfície em um intervalo diferencial de tempo (dt), é

$$I_t = I_N \cos(\theta_z) dt. \quad (2.29)$$

É mais conveniente converter o intervalo de tempo infinitesimal dt de horas para ângulo horário, utilizando a equação de velocidade de rotação da Terra. Isso deve ser feito pois a constante solar (S_0) está em unidade de energia. Assim, se a velocidade angular da Terra é dada por

$$\Omega = \frac{d\omega}{dt} = \frac{2\pi}{24h} \Rightarrow dt = \frac{12}{\pi} d\omega, \quad (2.30)$$

Combinando as equações (2.26), (2.28) e (2.30) na Eq. (2.29), temos

$$I_t = \frac{12}{\pi} S_0 e_0 [\sin(\emptyset) \sin(\delta) + \cos(\emptyset) \cos(\delta) \cos(\omega)] d\omega. \quad (2.31)$$

Se integrarmos a equação anterior em ângulo horário, temos

$$I_t = \frac{12}{\pi} S_0 e_0 \int_{\omega_1 - \frac{\pi}{24}}^{\omega_1 + \frac{\pi}{24}} [\sin(\emptyset) \sin(\delta) + \cos(\emptyset) \cos(\delta) \cos(\omega)] d\omega, \quad (2.32)$$

que resulta em

$$I_t = S_0 e_0 \left[\sin(\emptyset) \sin(\delta) + \left(\frac{24}{\pi} \right) \sin \left(\frac{24}{\pi} \right) \cos(\emptyset) \cos(\delta) \cos(\omega_i) \right]. \quad (2.33)$$

Considerando que

$$\left(\frac{24}{\pi} \right) \sin \left(\frac{24}{\pi} \right) = 0,9972 \approx 1. \quad (2.34)$$

Então,

$$I_t = S_0 e_0 [\sin(\emptyset) \sin(\delta) + \cos(\emptyset) \cos(\delta) \cos(\omega_i)]. \quad (2.35)$$

Podemos determinar a radiação extraterrestre diária que incide sobre uma superfície horizontal integrando I_t do nascer do sol (n_s) ao por do sol (P_s). Assim

$$H = \int_{n_s}^{P_s} I_t dt \quad (2.36)$$

Considerando a simetria do dia, e_0 e δ constantes ao longo do dia e o ângulo horário ao nascer do Sol ω_s dado em graus, podemos expressar a radiação solar diária incidente em uma superfície plana pela seguinte equação:

$$H = \frac{24}{\pi} S_0 e_0 \left[\left(\frac{\pi}{180} \right) \omega_s (\sin(\delta) \sin(\varnothing)) + (\cos(\delta) \cos(\varnothing) \sin(\omega_s)) \right]. \quad (2.37)$$

É muito importante para o estudo da energia solar conhecer como determina a radiação diária incidente sobre uma superfície. Pois a partir dela, e admitindo-se um modelo de atmosfera terrestre, podemos determinar a radiação global na superfície terrestre.

Caso a superfície tenha uma inclinação β , a radiação extraterrestre incidente de acordo com a lei de Lambert vista anteriormente, é dada por

$$I_\beta = I \cos \gamma. \quad (2.38)$$

onde γ é o ângulo de incidência. Se essa superfície inclinada estiver voltada para o equador, podemos calcular a radiação entre dois ângulos horários ω_1 e ω_2 pela expressão

$$I_\beta = \frac{12}{\pi} S_0 e_0 \int_{\omega_1}^{\omega_2} [\sin(\delta) \sin(\varnothing - \beta) + \cos(\delta) \cos(\varnothing - \beta) \cos(\omega)] d\omega. \quad (2.39)$$

Para uma hora completa, sendo ω_i o ângulo horário na metade desta hora, temos

$$I_\beta = S_0 e_0 [\sin(\delta) \sin(\varnothing - \beta) + \cos(\delta) \cos(\varnothing - \beta) \cos(\omega_i)], \quad (2.40)$$

ou ainda,

$$I_\beta = \frac{12}{\pi} S_0 e_0 [\cos \delta \cos(\emptyset - \beta) (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + (\omega_2 - \omega_1) \sin \delta \sin(\emptyset - \beta)]. \quad (2.41)$$

Integrando agora a equação anterior entre ω_s e ω_p , temos

$$H_\beta = \left[\frac{24}{\pi} S_0 e_0 \omega_{s'} \sin \delta \sin(\emptyset - \beta) + \cos \delta \cos(\emptyset - \beta) \sin \omega_{s'} \right]. \quad (2.42)$$

onde,

$$\omega_{s'} = \min\{\omega_{s'} \cos^{-1}[-\tan \delta \tan(\emptyset - \beta)]\}. \quad (2.43)$$

Caso a superfície esteja orientada arbitrariamente, tem-se

$$H_{\beta\gamma} = \left(\frac{12}{\pi} \right) S_0 e_0 \int_{\omega_{ns}}^{\omega_{ps}} \cos \theta d\omega. \quad (2.44)$$

ou ainda,

$$H_{\beta\gamma} = \left(\frac{12}{\pi} \right) S_0 e_0 \cos(P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5), \quad (2.45)$$

sendo P_1, P_2, P_3, P_4 e P_5 em valores absolutos dados, respectivamente, por:

$$P_1 = \cos \beta \sin \gamma \sin \gamma \sin \emptyset \mid \omega_{ns} - \omega_{ps} \mid \left(\frac{\pi}{180} \right), \quad (2.46)$$

$$P_2 = \sin \delta \cos \emptyset \sin \beta \cos \gamma \mid \omega_{ns} - \omega_{ps} \mid \left(\frac{\pi}{180} \right), \quad (2.47)$$

$$P_3 = \cos \beta \cos \emptyset \cos \delta \mid \sin \omega_{ns} - \sin \omega_{ps} \mid, \quad (2.48)$$

$$P_4 = \cos \delta \cos \gamma \sin \emptyset \sin \beta \mid \sin \omega_{ns} - \sin \omega_{ps} \mid, \quad (2.49)$$

$$P_5 = \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \mid \cos \omega_{ns} - \cos \omega_{ps} \mid. \quad (2.50)$$

2.6 Atmosfera Terrestre

A atmosfera terrestre é constituída principalmente por nitrogênio (78%) e moléculas de oxigênio (21%), esses gases juntamente com o argônio, representam 99,9% dos gases permanentes da atmosfera, ou seja, dos gases cuja quantidade volumétrica não varia para altitudes acima de 60 Km. Ainda na atmosfera terrestre, estão contidas diversas partículas sólidas e líquidas tais como os aerossóis, as gotículas de água ou cristais de gelo, sendo que os mesmos, ao contrário dos gases permanentes, variam consideravelmente no espaço e no tempo (GUIMARÃES, 2003).

Gases como o ozônio, o dióxido e monóxido de carbono e o metano, variam consideravelmente de um local para outro e temporalmente, sendo que as concentrações desses gases estão sujeitas a interferências imediatas de ações humanas, como a atividade agrícola e industrial de cada localidade (GUIMARÃES, 2003).

Esses gases e partículas presentes na atmosfera terrestre interferem diretamente na passagem da radiação solar para chegar até a superfície da terra, sendo que parte dessa radiação extraterrestre que chega na superfície da atmosfera, ao atravessar a atmosfera, a mesma é absorvida, refletida e espalhada por essas partículas e gases (MORAES, 2002).

Os gases presentes na atmosfera terrestre têm capacidades distintas de absorção da radiação solar, onde essa capacidade depende do comprimento de onda da energia emitida pelo Sol. Por exemplo, existe regiões do espectro eletromagnético para os quais a atmosfera absorve quase toda a radiação incidente, não deixando quase nada chegar na superfície. Assim, dependendo dos tipos de gases presentes em determinadas regiões da atmosfera, os mesmos podem facilitar ou dificultar a passagem de radiação até a superfície da terra (MORAES, 2002).

Tomando como exemplo alguns gases, Echer, Souza e Schuch (2001) mostra que oxigênio molecular (O_2) e o ozônio (O_3) apresentam fortes bandas de absorção na região ultravioleta do espectro eletromagnético, compreendendo assim comprimentos de ondas entre $0,001\mu m$ e $0,39\mu m$. Enquanto outras moléculas como os vapores d'água (H_2O) e o dióxido de carbono (CO_2) absorvem mais energia na faixa do infravermelho correspondendo a comprimentos de onda entre $0,7\mu m$ e $1000\mu m$. A região do visível sofre pouca absorção por parte das moléculas presentes na atmosfera, sendo que a radiação emitida nessa intensidade

pelo Sol chega com pouca atenuação na superfície da terra. Segundo Moraes (2002), nessas regiões onde são praticamente transparentes a entrada de energia eletromagnéticas, são onde colocam-se detectores de energia eletromagnética para a realização do sensoriamento remoto dos objetos da terra, sendo essas regiões conhecidas como janelas atmosféricas.

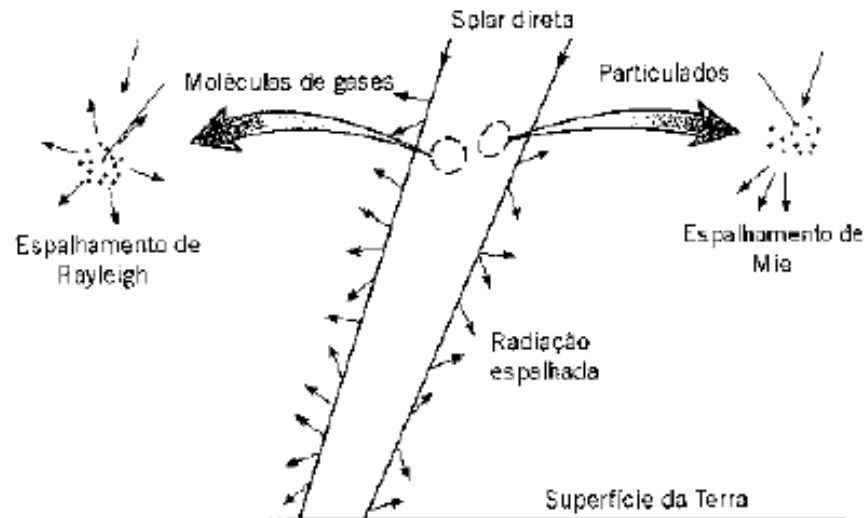
Assim, a *absorção* nada mais é do que a transformação, realizada pelas partículas, da energia na forma eletromagnética em energia interna nas partículas, podendo posteriormente ser ou não ré-irradiada, onde isso vai depender da estrutura eletrônica e distribuição dos níveis quânticos de cada partícula (ECHER, SOUZA E SCHUCH , 2001).

A radiação que atinge a atmosfera terrestre não só é absorvida pelos elementos compositores da atmosfera, como também sofrem *espalhamentos*. O espalhamento é um processo físico associado a irradiação das ondas eletromagnéticas e sua interação com o meio onde a mesma perpassa, podendo ocorrer com todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético. Nesse processo a energia eletromagnética que incide sobre uma partícula é absorvida pela mesma, e ré-irradiada para todas as direções, sendo que esse espalhamento é fortemente dependente da razão entre o tamanho da partícula que recebe a radiação incidente, e o comprimento da onda eletromagnética que incidiu sobre essa partícula (GUIMARÃES, 2003, ECHER, SOUZA E SCHUCH , 2001).

O espalhamento é classificado como *isotrópico*, quando o ângulo que a onda incide na partícula é igual ao ângulo que a onda é espalhada, ou seja, a onda de energia incidente é simétrica a energia que sofre o espalhamento. No caso em que as partículas que recebem a energia incidente são bem menores que o comprimento dessa onda incidente é classificado como espalhamento RAYLEIGH, e quando as partículas são bem menores que o comprimento de onda é classificado como espalhamento MIE (GUIMARÃES, 2003). A figura 2.11 apresentada na página seguinte ilustra esses espalhamentos.

Ainda segundo Guimarães (2003), o espalhamento ocorre devido três fenômenos distintos, que são a *difração*, *reflexão* e *refração*. A *difração* é quando a onda eletromagnética nunca entra em contato direto com a partícula, porém a presença da partícula altera a direção de propagação da onda. A *reflexão* é quando as ondas são refletidas pela a superfície da partícula, e a *refração* é justamente quando as ondas são absorvidas pelas partículas e posteriormente são emergidas em diferentes direções.

Figura 2.11: Ilustração do espalhamento da radiação solar ao chegar na atmosfera terrestre.



Fonte: Incropera et al (2008).

O espalhamento da energia eletromagnética devido os componentes da atmosfera terrestre influencia na caracterização da energia solar e mesmo terrestre, disponíveis para o sensoriamento remoto, sendo que essa energia ao atingir a atmosfera e consequentemente ser espalhada, parte dessa energia do espalhamento retorna para o espaço, podendo assim influenciar na energia refletida ou emitida da superfície terrestre que são detectadas pelos sensores orbitais (MORAES, 2002).

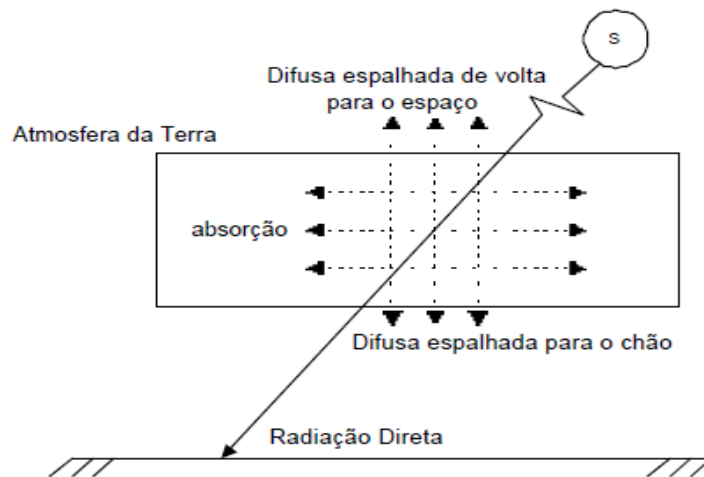
2.7 Estimativa da radiação solar sobre a superfície terrestre

Conhecer a quantidade de radiação solar que se encontra disponível na superfície da terra é essencial para inúmeras aplicações, pois através desses valores é possível estimar rendimentos energéticos de edificações, modelos climáticos, agricultura, entre outros. Saber de medidas da radiação em alguns pontos da superfície terrestre possibilita desenvolver medidas empíricas que possibilita a predição de energia solar disponível em diferentes lugares que não se tem essas medidas (MACAGNAN, 2010).

Devido aos efeitos ocasionados pelas configurações da atmosfera terrestre que vimos anteriormente, a radiação solar que chega até a superfície da terra se divide em duas componentes, a radiação direta e difusa. A radiação *direta* é a parte da radiação que atinge a

superfície da terra sem sofrer nenhum tipo de espalhamento ou desvio na sua direção original. Já a radiação *difusa* é a parte da energia que ao passar pela camada atmosférica sofre espalhamentos devido aos constituintes da atmosfera, como as moléculas de ar, poeiras, aerossóis e etc. como podemos ver esquematicamente na figura 2.12.

Figura 2.12: Representação esquemática da radiação direta, absorvida e difusa.



Fonte: Guimarães (2003).

A radiação total, conhecida também como radiação *global*, é a soma da radiação direta, difusa e da radiação que conseqüentemente venha a ser refletida pela superfície da Terra. (GUIMARÃES, 2003, INCROPERA et al, 2008).

A radiação total diária H_T que incide em uma superfície com inclinação β em relação a uma superfície horizontal é dada pela soma das radiações direta H_d , difusa H_f , e a radiação refletida pelo solo H_r .

$$H_T = H_d + H_f + H_r. \quad (2.51)$$

A radiação direta incidente sobre uma superfície inclinada é calculada através de correção da radiação direta projetada na horizontal (H_h), isto é,

$$H_d = H_h R_B \quad (2.52)$$

onde R_B é um fator de correção valendo $R_B = \frac{\cos \theta_\beta}{\cos \theta_z}$ devido à mudança no ângulo de incidência dos raios solares sobre uma superfície inclinada com a face voltada para o equador.

Sendo a reflexão na superfície do solo de forma isotrópica, fração de energia refletida pela superfície que atinge a superfície inclinada pode ser escrita como

$$H_r = H_g \rho \frac{1}{2} (1 - \cos \beta), \quad (2.53)$$

onde ρ é a refletividade ou albedo da superfície, ou seja, a razão entre a radiação refletida e a radiação incidente na superfície.

Considerando a intensidade da radiação difusa como sendo uniforme em todo o hemisfério celeste, Macagnan (2010) derivou a expressão abaixo para a estimativa da irradiação difusa

$$H_f = H_{fd} \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \quad (2.54)$$

Substituindo as equações (2.52), (2.53) e (2.54) na Eq. (2.51) tem-se

$$H_T = H_h R_B + H_f \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) + H_r \frac{1}{2} (1 - \cos \beta), \quad (2.55)$$

que é a radiação incidente sobre uma superfície com inclinação β .

2.8 Importância dos dados de energia solar

Os dados de radiação solar global e insolação são muito importantes pois são inúmeras as aplicações que podem se fazer com esses dados, como por exemplo a utilização para elaboração de tecnologias de conversão da energia solar, como a fotovoltaica. A utilização na meteorologia para os estudos de transferência radiativa e da física atmosférica.

Tem aplicações na climatologia para estudos de fenômenos como o do efeito estufa e efeitos de urbanização. Na agricultura, com utilização nos estudos da interação da radiação

solar com as plantas gerando os processos de fotossíntese e evapotranspiração. Para a medicina quando se trabalha com algum objeto de estudo onde o Sol seja influente, como o câncer de pele, por exemplo. Os dados solarimétricos são também utilizados na área de engenharia e ciência dos materiais, estudo da influência na degradação de polímeros, coberturas reflexivas e etc.

Geralmente os dados solarimétricos são obtidos por instrumentos específicos que medem a potência incidente por unidade de superfície, integrada sob os variados comprimentos de onda (GUIMARÃES 2003). Para a obtenção da radiação solar global, por exemplo, pode ser utilizado o piranômetro, o mesmo consiste em

um instrumento cujo sensor de irradiação é uma pilha termoelétrica, constituída por termopares em série. A função dos termopares é gerar uma tensão elétrica proporcional à diferença de temperatura entre duas superfícies, normalmente pintadas de preto e branco e igualmente iluminadas. Assim, a diferença de potencial medida na saída do instrumento pode ser relacionada com o nível de irradiação incidente (GUIMARÃES, 2003, p. 17).

Porém devido à escassez de dados meteorológicos dessa natureza, torna-se necessário a utilização de equações empíricas que possibilitam a estimativa da radiação solar em função de outros parâmetros, como a nebulosidade, o brilho solar entre outros.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 O Modelo Linear de Estimativa da Radiação Solar

Conforme foi discutido, o conhecimento das informações solarimétricas como a radiação solar global e a insolação de uma dada região, é muito importante para diferentes atividades humanas como a agricultura, a arquitetura, a hidrologia, a meteorologia, etc. Além disso, essas informações também são muito úteis para a implantação de usinas solares economicamente viáveis.

O primeiro ajuste empírico de estimativa da radiação solar global foi feito por Angström (1924) e modificado por Prescott (1940). Esse modelo consiste em uma relação linear entre a radiação solar global (R_G) e a insolação, isto é,

$$R_G = I_N \left(a + b \left(\frac{n}{N} \right) \right), \quad (3.1)$$

onde a e b são constantes a serem determinadas empiricamente por meio de regressão linear de medidas previamente realizadas em uma determinada localidade; n é a duração em horas do brilho solar observado (insolação) e N é o número teórico de horas de Sol para um dia médio do mês, i. é.,

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\operatorname{tg} \vartheta \operatorname{tg} \delta). \quad (3.2)$$

É mais conveniente reescrever a Eq. (3.1) como

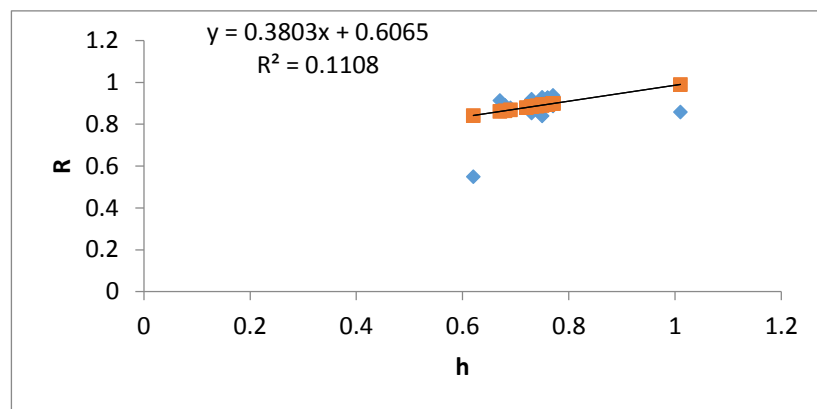
$$R = a + bh, \quad (3.3)$$

onde tem-se definido $R = R_G/I_N$ e $h = n/N$. Geralmente, os valores de a e b variam para cada mês do ano.

Para analisar o comportamento do modelo de Angström-Prescott na região semiárida do Rio Grande do Norte, utilizamos dados de radiação solar e insolação da estação meteorológica automática localizada no município de Apodi-RN; latitude de $-5,61^\circ$ e altitude de 150 m. Os dados de radiação solar e insolação foram obtidos nos bancos de dados do (INMET) e do BDMEP, respectivamente. Os dados obtidos datam de 1 de agosto a 30 de outubro de 2016, compreendendo um período de 3 meses.

A regressão linear foi feita para cada mês individualmente e para o período geral, utilizando uma margem de variabilidade de 0.05. Para o mês de agosto foi encontrado $a = 0.60648$ e $b = 0.380318$, com coeficiente de correlação $r = 0.332853$ e coeficiente de determinação $r^2 = 0.110791$, indicando baixa relação entre esses elementos meteorológicos e grande dispersão, nesse mês. A figura 3.1 mostra a dispersão desses dados bem como a reta de tendência.

Figura 3.1: Dispersão de R com h para o mês de agosto de 2016.

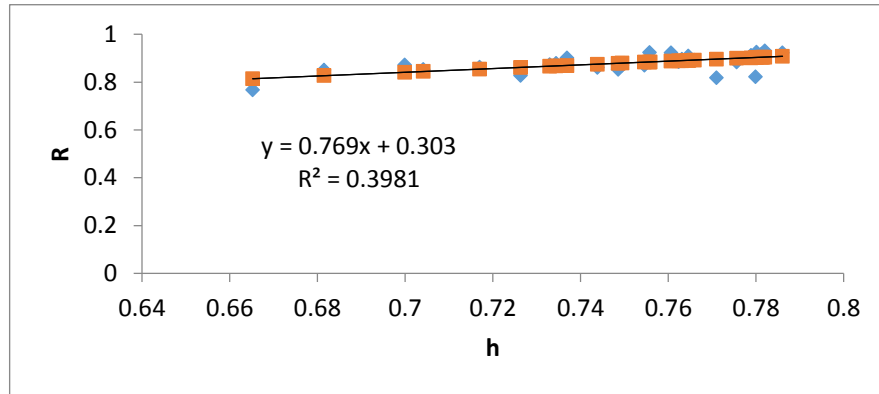


Fonte: Autor (2017).

Aplicando o mesmo procedimento ao mês de setembro encontramos $a = 0.302990828$ e $b = 0.768967504$, com coeficiente de correlação linear $r = 0.630962262$ e $r^2 = 0.398113377$ indicando moderada relação entre os elementos meteorológicos e uma dispersão considerada neste mês, como mostrado na figura 3.2.

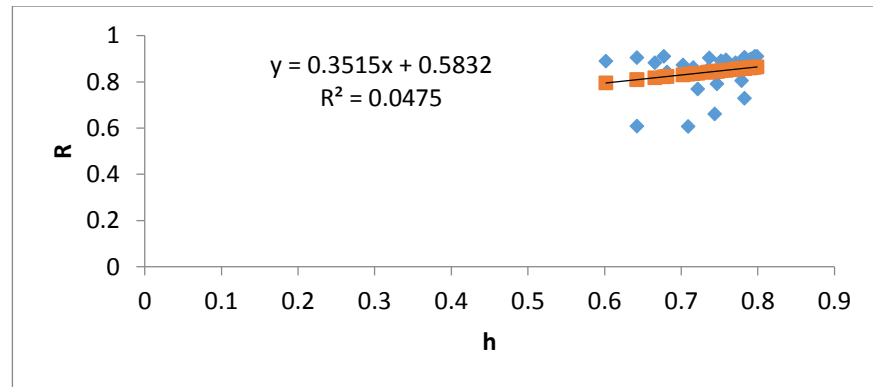
Já para o mês de outubro encontramos $a = 0.583243654$, $b = 0.351520162$, $r = 0.218051776$ e $r^2 = 0.047546577$ apresentando assim uma baixa correlação linear entre os dados meteorológicos e grande dispersão dos dados neste mês, como ilustrado na figura 3.3.

Figura 3.2: Dispersão de R com h para o mês de setembro de 2016.



Fonte: Autor (2017).

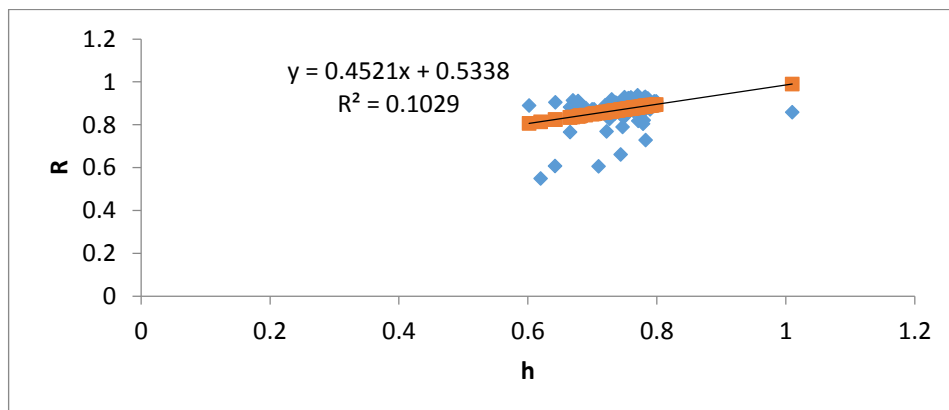
Figura 3.3: Dispersão de R com h para o mês de outubro de 2016.



Fonte: Autor (2017).

Finalmente, na figura 3.4 é mostrado a dispersão de R com h para os três meses. Neste caso encontramos $a = 0.533791224$ e $b = 0.452070232$ com $r = 0.32077478$ e $r^2 = 0.10289646$.

Figura 3.4: Dispersão de R com h para os três meses de 2016 mencionados.



Fonte: Autor (2017).

A tabela 3.1 mostra um sumário dos resultados discutidos anteriormente.

Tabela 3.1: Coeficientes do modelo linear.

	a	b	r²
Agosto	0.6065	0.3803	0.1108
Setembro	0.3030	0.7690	0.3981
Outubro	0.5832	0.3515	0.0475
Geral	0.5338	0.4521	0.1029

Fonte: Autor (2017).

Utilizando um nível de significância também igual a 0.05 na regressão linear e um conjunto de dados catalogados em um período de seis anos (2002 a 2008), Buriol et al (2012) utilizou o modelo de Angström-Prescott para estimar a radiação solar em Santa Maria – RS. O mesmo encontrou valores de a variando de 0.165 no mês de julho até 0.2366 em janeiro, e valores de b variando de 0.5363 em janeiro a 0.632 em outubro; e o nível de significância r^2 entre 0.867 em setembro e 0.918 em outubro.

A Ref. Buriol et al (2012) também mostrou que o coeficiente a está relacionado com a radiação solar difusa, enquanto que o valor do coeficiente b está relacionado com a radiação solar global direta.

Carvalho (2011) fez uma análise do modelo Angström-Prescott com dados das estações convencional e automática para Seropédica – RJ, no período de 2000 a 2007. O mesmo estimou os valores de a e b mensal, anual e geral por meio de regressão linear. O modelo teve melhor desempenho para estimativa da radiação solar global utilizando os valores mensais. Foi encontrado a variando de 0.232 no mês de agosto a 0.299 em janeiro. O valor de b variou de 0.397 em abril até 0.504 em janeiro. Na regressão encontrou r^2 sempre acima de 0.81 que mostra uma alta relação entre a razão de radiação com a razão de insolação.

Com o objetivo de analisar os coeficientes a e b da equação de Angström-Prescott para estudar sua influência na radiação solar e na evapotranspiração de influência para o perímetro irrigado de Bebedouro em Petrolina – PE, Silva et al (2014) encontrou, analisando dados de 43 anos, valores mensais de a variando de 0.2467 em setembro a 0.3211 em janeiro, e b variando de 0.2785 em janeiro a 0.3637 em setembro, sendo r^2 entre 0.48 em novembro a 0.69 em maio, mostrando uma mediana relação entre os dados no mês de novembro e maio. Os valores anuais foram $a = 0.2861$ e $b = 0.3055$ com $r^2 = 0.63$, e os valores da análise geral

foram $a = 0.2853$ e $b = 0.3105$ com $r^2 = 0.57$ indicando uma relação mediana entre os dados meteorológicos mesmo sendo uma quantidade significativa de dados.

Junior et al (2011) realizou um estudo parecido com os apresentados aqui para encontrar os coeficientes da equação de Angström-Prescott para Parnaíba – PI, onde o mesmo utilizou regressão linear para determinar os coeficientes a e b nos períodos chuvosos (janeiro a maio), seco (junho a dezembro) e anual no período de 2004 a 2010. Os valores encontrados foram $a = 0.3107$ e $b = 0.5383$ no período chuvoso, com $r^2 = 0.7145$ indicando uma boa relação entre as variáveis meteorológicas nesse período. Para o período seco obteve $a = 0.3130$ e $b = 0.5086$ com $r^2 = 0.5153$ mostrando uma mediana relação entre os dados nesse período seco. E no período anual a regressão exibiu $a = 0.3207$ e $b = 0.4598$ com $r^2 = 0.6296$ sendo então uma relação mediana entre os dados no período anual.

Alguns autores como Macagnan (2010) *apud* Rietveld (1978) têm argumentado que os valores de a e b encontram-se dentro dos intervalos $(0.17 - 0.32)$ e $(0.37 - 0.69)$, respectivamente. Dessa forma, é possível relacionar a e b , em médias de longo prazo, com a razão $\frac{n}{N}$ através das seguintes formas:

$$a = 0.1 + 0.24 \left(\frac{n}{N} \right), \quad (3.4)$$

$$b = 0.38 + 0.08 \left(\frac{N}{n} \right). \quad (3.5)$$

Substituindo as Equações (3.4) e (3.5) na Eq. (3.1), encontra-se

$$R_G = I_N \left(0.18 + 0.62 \left(\frac{n}{N} \right) \right). \quad (3.6)$$

3.2 O Modelo Lei de Potência para a Radiação Solar

Vimos na seção anterior que o modelo de Angström-Prescott consiste na verdade em um ajuste linear entre a transmissividade atmosférica global R e a razão de insolação h . Este modelo tem sido largamente investigado e testado na literatura. Por ser um modelo linear apresenta muitas limitações.

Costa (2017) propôs um modelo mais geral que o de Angström-Prescott para estimativa da radiação solar. Neste modelo, a transmissividade atmosférica global R é escrita como uma lei de potência da razão de insolação h , isto é,

$$R = A + (1 + h)^B - 1, \quad (3.7)$$

onde A e B são constantes a serem determinadas. Da equação anterior segue que a radiação solar global é dada por

$$R_G = I_N \left[A + \left(1 + \frac{n}{N} \right)^B - 1 \right]. \quad (3.8)$$

Pelo fato desse modelo ser uma lei de potência, a determinação das constantes A e B não é tão simples como no caso anterior. Para tanto, precisamos utilizar um método estatístico como o dos mínimos χ^2 .

3.2.1 Análise Estatística do Modelo Lei de Potência

A ideia geral do método é a seguinte: considere um conjunto de quantidades mensuráveis χ_i^{obs} (por exemplo, a razão insolação) medida em dia d_i com erros σ_i . Seja um dado modelo de estimativa da radiação solar representado pela função R_g , que depende de um certo conjunto de parâmetros desconhecidos $\mathbf{P}$

$$R_g(d | \mathbf{P}) = R_g(d | A, B). \quad (3.9)$$

A comparação entre o modelo e os dados é feita através da função $[\chi^2(\mathbf{P})]$, que é definida como

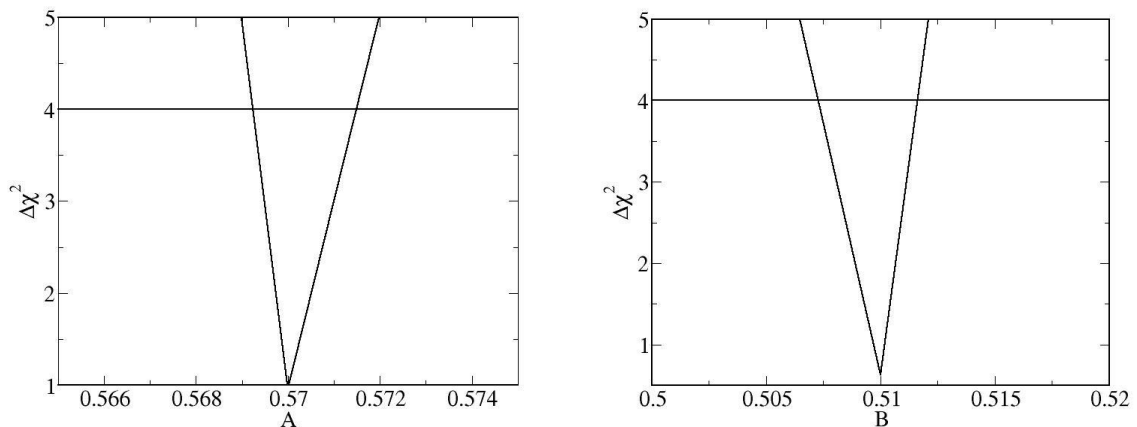
$$\chi^2(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^N \frac{[\chi_i^{obs}(d_i) - \chi_i^{teo}(d_i | \mathbf{P})]^2}{\sigma_i^2}, \quad (3.10)$$

que calcula o valor teórico da quantidade $\chi_i^{teo}(d_i | \mathbf{P})$ para determinados valores dos parâmetros $\mathbf{P}$ e compara com o valor observado χ_i^{obs} . O melhor ajuste ocorre para os valores de $\mathbf{P}$ que minimizam a equação (3.10).

O melhor ajuste também pode ser verificado dividindo-se χ_{min}^2 pelo número de graus de liberdade que é a diferença entre o número de pontos e o número de parâmetros. Uma razão aproximadamente igual a 1 $\left(\frac{\chi_{min}^2}{N-n} \cong 1\right)$ indica um bom ajuste.

Na análise estatística a função χ^2 foi minimizada para cada mês individualmente. A figura 3.5 mostra a variância $\chi^2 = \chi^2 - \chi_{min}^2$ em função dos parâmetros A (esquerda) e B (direita), para o mês de agosto. A partir dessa análise encontramos como melhor ajuste para A = 0.57 e B = 0.51 respectivamente.

Figura 3.5: A variância $\Delta\chi^2$ como função dos parâmetros A (esquerda) e B (direita) para agosto.

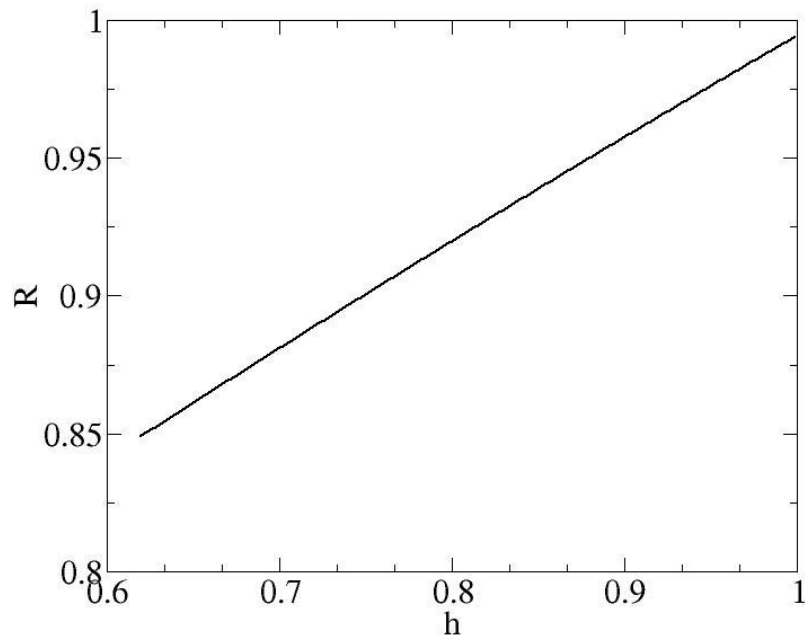


Fonte: Autor (2017).

Utilizando o melhor ajuste para A e B nós também mostramos na figura 3.6 a evolução da razão de radiação solar global em função da razão de insolação para o mês de agosto. Percebe-se que a lei de potência se aproxima muito de uma função linear.

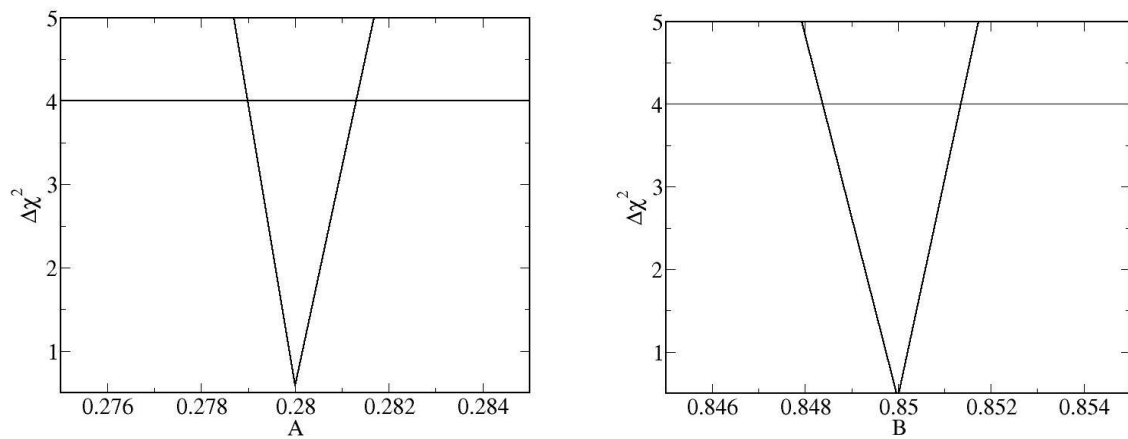
Resultados similares também são mostrados nas figuras 3.7 e 3.8 para o mês de setembro, enquanto que os referentes ao mês de outubro são mostrados nas figuras 3.9 e 3.10.

Figura 3.6: Razão de radiação solar em função da razão de insolação para o mês de agosto.



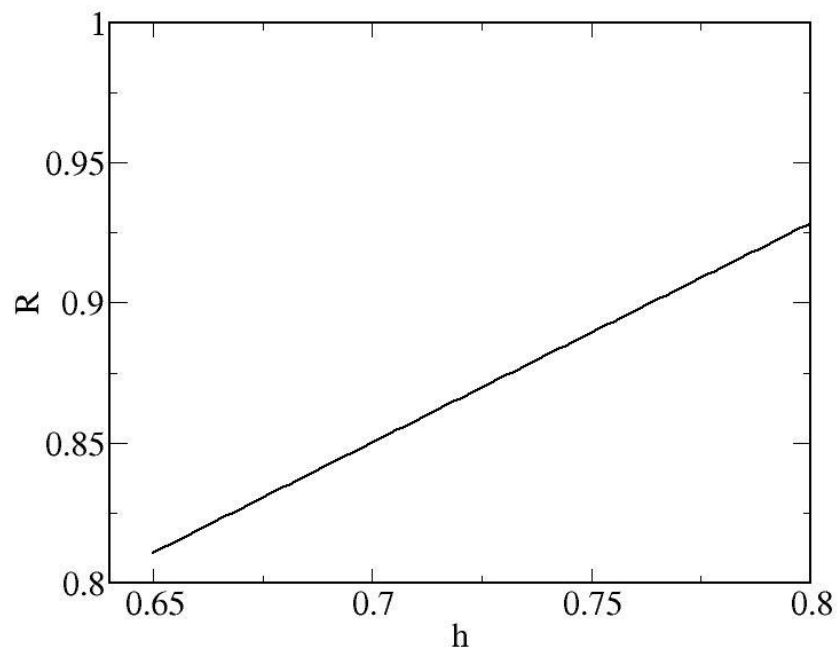
Fonte: Autor (2017).

Figura 3.7: A variância $\Delta\chi^2$ como função dos parâmetros A (esquerda) e B (direita) para setembro.



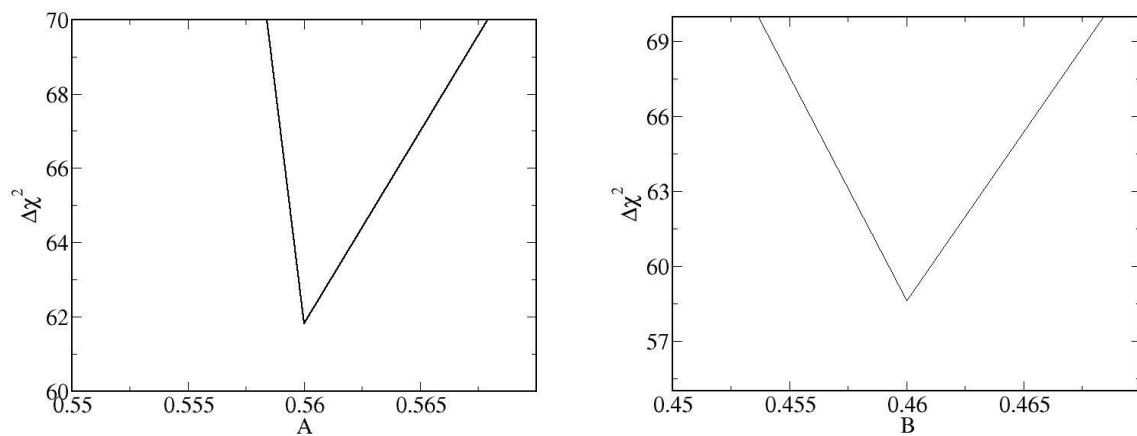
Fonte: Autor (2017).

Figura 3.8: Razão de radiação solar em função da razão de insolação para o mês de setembro.



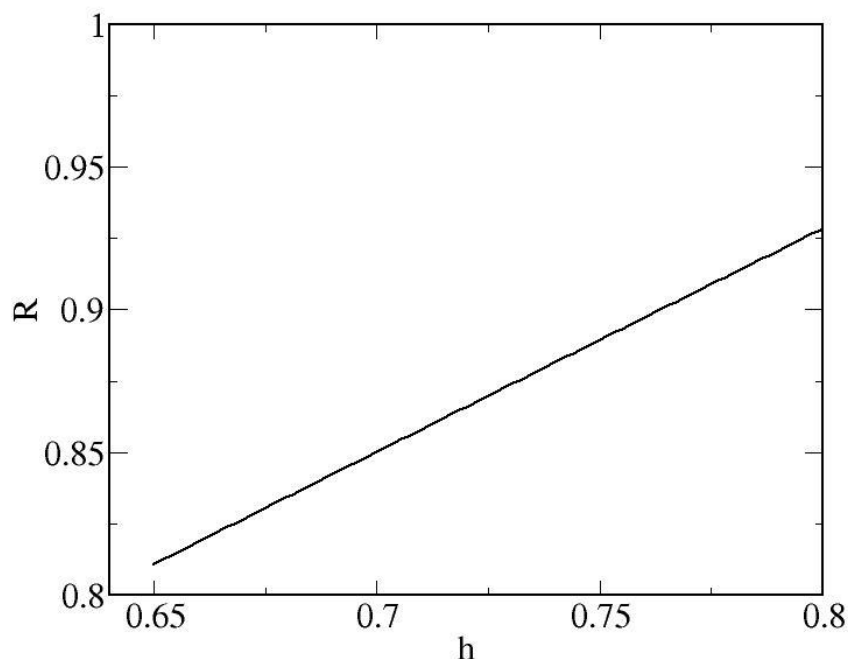
Fonte: Autor (2017).

Figura 3.9: A variância $\Delta\chi^2$ como função dos parâmetros A (esquerda) e B (direita) para outubro.



Fonte: Autor (2017).

Figura 3.10: Razão de radiação solar em função da razão de insolação para o mês de outubro.



Fonte: Autor (2017).

Os valores dos coeficientes encontrados são mostrados na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Coeficientes do modelo do tipo lei de potência.

	<i>A</i>	Erro	<i>B</i>	Erro
Agosto	0.57	+0.5715 -0.5692	0.51	+0.5116 -0.5073
Setembro	0.28	+0.2814 -0.2790	0.85	+0.8514 -0.8483
Outubro	0.56	-	0.46	-

Fonte: Autor (2017).

Os resultados obtidos nessa análise preliminar mostram que ambos os modelos são condizentes com os dados observacionais. No caso do modelo linear os valores dos parâmetros *a* e *b* estão bem próximos dos valores encontrados por outros autores em estudos com um número maior de dados. É possível observar nos gráficos, que alguns valores da razão de insolação encontram-se distantes da reta de regressão, assim, segundo Buriol (2012) os valores encontrados abaixo da reta de tendência representa situações em que o Sol brilhou apenas nas primeiras e/ou nas últimas horas do dia, enquanto que os valores acima da reta, representam situações onde o Sol brilhou somente horas próximas ao meio dia. Quanto ao modelo lei de potência também encontramos valores de *A* e *B* próximos aos valores do

modelo linear; e como pode ser verificado nas figuras 3.6, 3.8 e 3.10 o comportamento da lei de potência é bastante próximo da função linear.

4 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Foi apresentado inicialmente uma breve discussão sobre os aspectos gerais da radiação solar, desde sua produção no núcleo do Sol até sua incidência na superfície da Terra. Observou-se que a mesma exerce um papel fundamental sobre todos os processos que ocorrem no planeta. Além disso, o conhecimento de informações solarimétricas é de suma importância para diferentes atividades humanas e para o desenvolvimento tecnológico e sustentável.

Utilizando dados observacionais dos meses de agosto, setembro e outubro de 2016, da estação meteorológica do município de Apodi – RN, estudou-se a viabilidade observacional de dois modelos de estimativa da radiação solar global. Para o primeiro modelo fez-se uma regressão linear e encontrou-se os valores dos parâmetros livres (a e b) enquanto que para o segundo fez-se uma análise estatística do χ^2 e encontrou-se o melhor ajuste dos parâmetros livres (A e B). Em ambos os casos foi determinado os valores dos parâmetros para cada mês em separado.

Os resultados obtidos mostram que ambos os modelos conseguem explicar satisfatoriamente os dados observacionais. Os valores dos parâmetros a e b do modelo linear estão bem próximos dos valores encontrados por outros autores em estudos com um número maior de dados. Quanto a lei de potência, esta precisa ser melhor comparada com os dados.

Como uma perspectiva de trabalho futuro pretende-se estender essa análise para um conjunto de dados maior, incluindo dados de outras estações da região semiárida.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Sérgio; DE CARVALHO, João Pitombeira; MILIES, Francisco César Polcino. A geometria do globo terrestre. **IME/USP. Disponível em [www. bienasbm. ufba. br](http://www.bienasbm.ufba.br)** **M**, v. 29, 2009.
- ANGSTRÖN, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, London, v.50, p.121-126, 1924.
- ANTONIETA, Maria. **CONHECIMENTO BÁSICO SOBRE O RECURSO SOLAR**. 2011. Disponível em: <http://recursosolar.geodesign.com.br/Pages/Sol_Rad_Basic_RS.html>. Acesso em: 5 de março 2017.
- BERUSKI, Gustavo Castilho et al. Desempenho de diferentes modelos de estimativa da radiação solar global em Ponta Grossa, PR. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s.l.], v. 30, n. 2, p.205-213, jun. 2015.
- BORGES, Valéria P. et al. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 14, n. 1, 2010.
- BURIOL, Galileo Adeli et al. Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria-RS. **Ciência Rural**, v. 42, n. 9, p. 1563-1567, 2012.
- CARVALHO, DF de et al. Coeficientes da equação de Angström-Prescott e sua influência na evapotranspiração de referência em Seropédica, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 8, p. 838-844, 2011.
- CECATTO, José Roberto. O SOL. **Curso de Introdução à Astronomia e Astrofísica**, v. 9, 2009.
- COLOMBO JUNIOR, Pedro Donizete. O SOL SOB UM OLHAR INTERDISCIPLINAR – RELATO DE UMA EXPERIÊNCIA DIDÁTICA COM ÊNFASE NA FÍSICA SOLAR. **Experiências em Ensino de Ciências**, São Paulo, v. 6, n. 2, p.133-150, ago. 2011. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/eenci/artigos/Artigo_ID152/v6_n2_a2011.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2017.
- CORRÊA, Marcelo de Paula. **Fundamentos de Meteorologia**. Itajubá, 2010.

COSTA, Ricardo Jorge Rosa dos Reis. **Comparação de métodos de seguimento solar para sistemas fotovoltaicos**. 2011. Tese de Doutorado.

COSTA et al, F. E. M. [Em preparação 2017].

DAL PAI, Alexandre et al. Estimation of hourly, daily and monthly mean diffuse radiation based on MEO shadowring correction. **Energy Procedia**, v. 57, p. 1150-1159, 2013.

DANTAS, Antônio Augusto Aguiar; DE CARVALHO, Luiz Gonsaga; NETO, Pedro Castro. **Radiação solar**.

DA SILVA, A. O. COEFICIENTES DE ANGSTRÖM-PRESCOTT E SUA INFLUÊNCIA NA RADIAÇÃO SOLAR E ET_0 NO PERÍMETRO IRRIGADO DE BEBEDOURO EM PETROLINA/ANGSTROM-PRESCOTT COEFFICIENTS AND ITS INFLUENCE ON SOLAR RADIATION AND ET_0 IN THE BEBEDOURO IRRIGATION PERIMETER, PETROLINA-PE. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 8, n. 4, p. 333-342, 2014.

DE ABREU, Paulo G. et al. Análise termográfica da temperatura superficial de telhas. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 15, n. 11, p. 1193-1198, 2011.

DE MORAES, Elisabete Caria. **CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO**. São José dos Campos, 2002.

DIABATÉ, L., REGAS, M. WALD, L., “Estimating Incident Solar Radiation at the Surface from Images of the Earth Transmitted by Geostationary Satellites: the Heliosat Project”, *Solar Energy*, v. 5, pp. 261-278, (1988).

ECHER, E.; SOUZA, M. P.; SCHUCH, N. J. A lei de Beer aplicada na atmosfera terrestre. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, n. 3, 2001.

FENG, LIN MING. **Distâncias Astronômicas e Geometria**. 2013.

GAUTIER, C., DIAK, G., MASSE S., “A Simple Physical Model to Estimate Incident Solar Radiation at the Surface from GOES Satellite Data”, *Journal of Applied Meteorology*, v. 19 (1005), (1980).

GREGORIO-HETEM, Jane; JATENCO-PEREIRA, Vera. **FUNDAMENTOS DE ASTRONOMIA**. São Paulo: Vitae, 2010. Disponível em: <<http://www.astro.iag.usp.br/~jane/aga215/>>. Acesso em: 26 fev. 2017.

GUIMARÃES, Ana Paula Cardoso. **Estimativa de Parâmetros da Camada Atmosférica para Cálculo da Irradiação Solar Incidente na Superfície Terrestre**. 2003. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008.

JÚNIOR, ANDRADE; BRAGA, DARLAN L.; NOLETO, DONAVAN H. Coeficientes da equação de Angström-Prescott para Parnaíba, Piauí. **Comunicata Scientiae**, n. 3, p. 50-54.

MACAGNAN, Mario H. Introdução à radiação solar. **Porto Alegre: UFRGS. Programa de pós-graduação em engenharia mecânica**, 2010.

MORAES, EC de; FIORIO, Peterson R. Fundamentos de sensoriamento remoto. **São José dos campos: INPE**, 2002.

NUNES, André Becker; MARIANO, Glauber Lopes. **Meteorologia em Tópicos:.** Pelotas: Dr Ltda, 2015.

OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza; SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. **O Sol - a nossa estrela**. 2016. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm>>. Acesso em: 5 abr. 2017.

PRESCOTT, J.A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. **Transactions of the Royal Society Science Australian**, Adelaide, v.64, p.114-118, 1940.

RIBEIRO, Hugo Emanuel Barreira et al. **Implementação de um sistema de calculo para sistemas de energia solar**. 2016.

RICIERI, R. P. Modelos de estimativas e avaliação dos métodos de medida da radiação solar difusa. 1998. 89f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, (1998).

SOBRINHO, J. L. G. **O Sol e o seu interior**. 2013.

SILVA FILHO, Antônio Edson Pereira da. **A trigonometria esférica e o globo terrestre**. 2014. Tese de Doutorado.

SOUZA, Natallia Sanches e. **ANÁLISE DA RELAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NA FORMAÇÃO DE ILHAS DE CALOR EM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES URBANAS EM CUIABÁ – MT**. 2016. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física Ambiental, Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2016.

TAVARES, M. Aprendendo sobre o Sol. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Niterói, v. 22, n. 0, p.78-82, 1 mar. 2000.

VAREJÃO-SILVA, Mario Adelmo. **Meteorologia e climatologia**. INMET, 2000.

VIANELLO, Rubens Leite; ALVES, Adil Rainier. **Meteorologia Básica e aplicações**. Viçosa: Ufv, 2000. 448 p.