



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/02.24.16.10-TDI

MODELAGEM DA DISTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE NA SUPERFÍCIE DO TERRENO A PARTIR DE DADOS SRTM

Ana Cláudia dos Santos Luciano

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelo Dr. Márcio de Morisson
Valeriano, aprovada em 24 de
março de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3J338LH>>

INPE
São José dos Campos
2015

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
(CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação
(SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/02.24.16.10-TDI

MODELAGEM DA DISTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE NA SUPERFÍCIE DO TERRENO A PARTIR DE DADOS SRTM

Ana Cláudia dos Santos Luciano

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelo Dr. Márcio de Morisson
Valeriano, aprovada em 24 de
março de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3J338LH>>

INPE
São José dos Campos
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Luciano, Ana Cláudia dos Santos.

L963m Modelagem da distribuição da radiação solar incidente na superfície do terreno a partir de dados SRTM / Ana Cláudia dos Santos Luciano. – São José dos Campos : INPE, 2015.
xxii + 88 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/02.24.16.10-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.
Orientador : Dr. Márcio de Morisson Valeriano.

1. Energia solar. 2. MDE. 3. Topografia. 4. SRTM. I.Título.

CDU 551.521.1:528.8

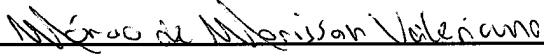


Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

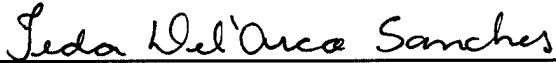
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Sensoriamento Remoto

Dr. Márcio de Morisson Valeriano



Presidente / Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Ieda Del'Arco Sanches



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dra. Helena França



Convidado(a) / UFABC / Santo André - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Título: "Modelagem da distribuição da radiação solar incidente na superfície do terreno a partir de dados SRTM."

Aluno (a): **Ana Cláudia dos Santos Luciano**

São José dos Campos, 24 de Março de 2015

Dedico a minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Dr. Márcio de Morisson Valeriano, pelo apoio, confiança e ensinamento durante o desenvolvimento desta pesquisa.

A meus pais, Cláudio e Márcia, pelo amor e apoio durante este período.

A minha irmã Paula pelos conselhos, pela força, paciência e amor.

A minhas avós (Benedita e Leonilda) pela força, incentivo e esperança.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

Ao INPE pela infraestrutura oferecida e ao corpo docente pelo conhecimento transmitido nas aulas e no dia a dia.

Aos colegas estudantes da PG-SER, especialmente a turma do ano de 2013, que disponibilizaram de seu tempo para me ensinar e colaborar com o desenvolvimento desta pesquisa e por proporcionarem momentos inesquecíveis neste período.

Aos amigos que conheci no INPE, em especial ao Fábio, Denise e Alexsandro por todo apoio, companhia, paciência e bons momentos que me proporcionaram ao lado deles durante este período de mestrado.

Ao João Vila e a Myrian Abdon, agradeço pelas oportunidades e ao incentivo de iniciar o mestrado.

À Vanessa Canavesi pela disponibilização dos dados de inventário florestal da Empresa Votorantim Celulose e Papel.

Agradeço a Deus por sua fidelidade e amor incondicional.

RESUMO

A utilização de Modelos Digitais de Elevação (MDEs), por sensoriamento remoto, consiste em um insumo promissor na aplicação dos estudos do meio físico relacionados ao regime de radiação solar. No entanto, o conhecimento do comportamento da distribuição da radiação solar incidente na superfície terrestre e dos possíveis condicionantes de sua variação ainda é pouco explorado. O objetivo deste estudo foi experimentar o cálculo da distribuição da radiação solar incidente na superfície terrestre a partir de MDEs obtidos do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) sob diferentes condições topográficas, atmosféricas e de localização. Foram estudados os níveis típicos e padrões gerais de variação da radiação solar incidente na superfície terrestre calculada em períodos diário, mensal, semestral e anual, em três áreas de topografia variada, localizadas nas regiões equatorial, tropical e subtropical. A radiação solar foi calculada com o algoritmo *Solar Analyst*, sobre MDEs refinados do SRTM, obtidos do Topodata. Os parâmetros atmosféricos foram testados para condições de céu claro a nublado em comparação com os valores *default* do algoritmo e com medidas obtidas de piranômetros. Por fim, dados de produtividade de uma área de plantio de *Eucalyptus spp.* foram analisados para verificar sua relação com os resultados de radiação solar. Os resultados gerais indicaram que a razão entre os níveis máximos e mínimos da radiação solar diminuiu com o aumento do período de análise (diário, mensal, semestral, anual). A amplitude de radiação solar anual aumentou com o aumento da declividade, embora os níveis máximos tenham apresentado aumento discreto em comparação com a forte diminuição dos níveis mínimos. Foi verificado que os níveis de radiação solar anual médios, nas diversas combinações de declividade e orientação de vertentes, diminuíram com o aumento da latitude. Esta redução mostrou-se associada a um aumento da amplitude devido a uma redução dos níveis mínimos. A integração de parâmetros atmosféricos momentâneos de diferentes localidades em períodos anuais gerou valores mais estáveis e mais próximos ao *default* do algoritmo. As simulações com estes parâmetros mostraram que o aumento da nebulosidade ocasiona a redução dos níveis de radiação solar anual no terreno, além de reduzir a amplitude relativa da variação devida ao relevo. Os resultados da relação entre a radiação solar anual e o crescimento de *Eucalyptus spp.* indicaram variação da produtividade de acordo com os condicionantes agronômicos espécie, espaçamento, solos e suas combinações. Entretanto, a distribuição dos dados de radiação solar nos talhões se apresentou relativamente uniforme, o que não permitiu verificar de maneira conclusiva a correlação esperada.

MODELING THE DISTRIBUTION OF INCIDENT SOLAR RADIATION AT THE TERRAIN SURFACE FROM SRTM DATA

ABSTRACT

The use of Digital Elevation Models (DEMs) by remote sensing is a promising data in the application of physics environment studies related to solar radiation. However, the knowledge of incident solar radiation distribution at the Earth's surface and the possible variation constraints is still under explored. The aim of this study was to try the calculation of solar radiation distribution incident at the Earth's surface from *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) DEMs with different topographic conditions, atmospheric and location. Were studied typical levels and general standards of solar radiation incidents in the Earth's surface calculated for daily, months, semesters and year period, for three studies sites with varied topography, located in the equatorial, tropical and subtropical areas. The Solar Analyst software package was used to compute solar radiation, with basis on refined MDEs, from database Topadata. The atmospheric parameters were tested with data varying from clear sky to cloudy conditions and it was compared to algorithm default values and pyranometer measurements. Finally, the productivity data of *Eucalyptus spp.* and solar radiation results were analyzed. The overall performance indicated that the ratio of the maximum and minimum levels of solar radiation decreased with the increasing periods (daily, monthly, biannual and annual). The annual solar radiation amplitude has increased when the slope increasing, although the maximum levels had showed slight increase compared with the strong decrease in minimum levels. The medium annual solar radiation levels decreased with the increasing of the latitude for all combinations of slope and aspect. This reduction was associated with increased amplitude because of decreasing minimum levels. The annual integration of atmospheric parameters from different areas generated stable values and similar to algorithm default. The nebulosity causes a decreasing annual solar radiation levels at the surface and reduces the solar radiation variation due to the relief. The relationship between annual solar radiation and *Eucalyptus spp.* growth indicated productivity variation according to the conditions agronomic, species, distance, soils and combinations of these variables. However, the solar radiation distribution at the eucalyptus stands was relatively uniform, because of that was not possible to verify the expected correlation.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Distribuição espectral da radiação solar (Raios ultravioleta - UV; Luz visível - visível; Infravermelho próximo - NIR; Infravermelho de ondas curtas - SWIR) a 6000 K.	4
Figura 2.2 - Movimento da Terra em relação ao Sol e posição da Terra referente as distâncias máximas e mínimas do Sol.	6
Figura 2.3 - Dinâmica diária do ângulo horário e anual da declinação solar (A) com as respectivas variações da declinação solar ao longo do ano (B).	6
Figura 2.4 - Variação do fotoperíodo, ao longo do ano, com a latitude.	8
Figura 2.5 - Variação dos ângulos solares zenital (θ_s) e azimutal (φ_s) ao meio-dia do equinócio em função da latitude.	9
Figura 2.6 - Espectro da radiação solar incidente no topo da atmosfera e na superfície terrestre ao nível do mar após interação com os constituintes atmosféricos.	10
Figura 2.7 - Fontes de iluminação em relevo variável: (1) Irradiância direta, (2) Irradiância difusa, (3) Irradiância refletida de terrenos vizinhos, (θ_o) ângulo de incidência dos raios solares com a normal à superfície, (θ_s) ângulo zenital solar.	13
Figura 2.8 - Geometria de iluminação momentânea em um local do terreno de acordo com a declividade e a orientação de vertentes.	14
Figura 2.9 - Cálculo da porção visível do céu (<i>viewshed</i>) em uma célula do modelo digital de elevação (MDE) - altitude. Traçado dos ângulos horizontais para o conjunto de direções (A), ângulo horizontal $H\omega$ para a direção ω (B) e ângulos horizontais calculados e mapa da porção visível do céu para a célula do MDE (C).	20
Figura 2.10 - Mapa da trajetória do disco solar na latitude 39°N com intervalo diário de 0,5 horas e intervalo mensal durante o ano. Cores utilizadas apenas para individualizar os setores.	21
Figura 2.11 - Mapa da distribuição da radiação difusa e divisão do céu em setores definidos por 16 divisões zenitais e 16 divisões azimutais. Cores utilizadas apenas para individualizar os setores.	22
Figura 2.12 - Sobreposição dos mapas de distribuição da radiação difusa e o mapa da trajetória do disco solar ao mapa da porção visível do céu. Cores utilizadas apenas para individualizar os setores.	23
Figura 2.13 - Esquema simplificado da produção de substâncias pelas plantas.	25
Figura 2.14 - Relações entre o meio físico e o crescimento e distribuição dos organismos.	30
Figura 3.1 - Relevo sombreado (Sol de Norte, a 45° de elevação e MDE com exagero vertical de 3x): A - área de estudo 1 (Equatorial); B - área de estudo 2 (Tropical) e C - área de estudo 3 (Subtropical).	34
Figura 3.2 - Relevo sombreado (Sol de Norte, a 45° de elevação e MDE com exagero vertical de 3x) da área de estudo 4. Limites dos talhões de <i>Eucalyptus spp.</i> sobrepostos.	35
Figura 3.3 - Fluxo geral das atividades de análise do comportamento da radiação solar.	39
Figura 3.4 - Imagem de curvatura horizontal e área dos talhões após redução da largura de 60 m.	47
Figura 3.5 - Relevo sombreado (Sol de Norte, a 45° de elevação e MDE com exagero vertical de 3x): Localização e distribuição do material genético de <i>Eucalyptus spp.</i> presente nos talhões: <i>Eucalyptus Saligna</i> (ESA), <i>Eucalyptus Grandis</i> (EGR) e <i>Eucalyptus Dunni</i> (EDU).	48

Figura 4.1 - Comparação das condições do relevo com as diferenças de radiação solar anual para níveis de <i>skysize</i> e <i>viewshed</i> na área de estudo 3 (Subtropical). Classes de declividade do terreno (A), imagem resultante da diferença entre a radiação solar anual dos testes 1 e 2 (B) e imagem resultante da diferença entre a radiação solar anual dos testes 1 e 3 (C).	50
Figura 4.2 - Relação da radiação solar anual com as características do relevo. Declividade (A), orientação de vertentes (B) e radiação solar anual (C) na área de estudo 3 (Subtropical).	51
Figura 4.3 - Radiação solar total diária para o solstício de inverno, equinócio e solstício de verão nas três áreas de estudo.	53
Figura 4.4 - Radiação solar total mensal para junho, setembro e dezembro nas três áreas de estudo.	54
Figura 4.5 - Radiação solar total semestral para os períodos primavera e outono nas três áreas de estudo.	56
Figura 4.6 - Radiação solar total anual nas três áreas de estudo.	57
Figura 4.7 - Níveis máximos, médios e mínimos e amplitude da radiação solar anual em função do relevo do terreno na área de estudo 3 (Subtropical). Dados apresentados na Tabela A.1 do Apêndice A.	59
Figura 4.8 - Comportamento do cosseno do ângulo de radiação solar ($\cos \theta_0$) e sua variação, representada pela função derivada, igual a $(-\sin \theta_0)$	60
Figura 4.9 - Diferentes combinações de dados atmosféricos para o cálculo da radiação solar (transmitância e porção difusa): estação meteorológica de Cuiabá (ALVES et al., 2013); Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al., 2006), com transmitância estimada; e parâmetros de configuração <i>default</i> do <i>Solar Analyst</i> (FU; RICH, 2000).	61
Figura 4.10 - Níveis máximos (máx), médios (méd) e mínimos (mín) da radiação solar anual em função do relevo para as condições atmosféricas de céu claro (cl), parcialmente nublado (pn) e nublado (nb). Dados apresentados nas Tabelas A.2, A.3 e A.4 do Apêndice A.	62
Figura 4.11 - Amplitudes de radiação solar anual em função do relevo para as condições atmosféricas de céu claro (cl), parcialmente nublado (pn) e nublado (nb). Dados apresentados nas Tabelas A.2, A.3 e A.4 do Apêndice A.	63
Figura 4.12 - Radiação solar anual direta (A), orientação de vertentes (B), radiação solar anual difusa (C) e declividade (D).	63
Figura 4.13 - Relações dos totais anuais de radiação solar, referentes à porção difusa e direta, com a declividade (θ_i) e o cosseno da orientação de vertentes (φ_i).	64
Figura 4.14 - Dados da correlação entre o total de radiação em um ano de dias claros em relação ao total em anos com frações variáveis em dias nublados.	66
Figura 4.15 - Níveis de radiação solar anual nas condições de relevo plano e montanhoso para as áreas de estudo 1, 2 e 3, localizadas nas regiões equatorial, tropical e subtropical, respectivamente. .	67
Figura 4.16 - Níveis máximos, mínimos e amplitude de radiação solar anual em função do relevo do terreno, na área de estudo 1 (Equatorial). Dados apresentados na Tabela A.5 do Apêndice A.	68
Figura 4.17 - Níveis máximos, mínimos e amplitude de radiação solar anual em função do relevo do terreno, na área de estudo 2 (Tropical). Dados apresentados na Tabela A.6 do Apêndice A.	68
Figura 4.18 - Níveis máximos, mínimos e amplitude de radiação solar anual em função do relevo do terreno, na área de estudo 3 (Subtropical). Dados apresentados na Tabela A.1 do Apêndice A.	68
Figura 4.19 - Totais de radiação solar anual nas áreas de estudo 1-região equatorial (A), 2-região tropical (B) e 3-região subtropical (C).	69

Figura 4.20 - Relações dos totais anuais de radiação solar com a declividade (θ) e o cosseno da orientação de vertentes (ϕ), nas áreas 1 (equatorial) e 3 (subtropical).	70
Figura 4.21 - Níveis de radiação solar anual (A) e classes de declividade do terreno (B) na área de estudo 4 e nos talhões de <i>Eucalyptus spp.</i>	71
Figura 4.22 - Radiação solar anual média (A) e produtividade (B) dos talhões de <i>Eucalyptus Saligna</i> com coeficiente de variação da radiação solar anual menor do que 1%.	72

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 2.1 - Grandezas físicas da radiação solar incidente na Terra	5
Tabela 2.2 - Valores diários de radiação solar ($\text{Cal.cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) em diferentes declividades e orientações de vertentes no dia 21 de março na latitude 40° no hemisfério Norte.	15
Tabela 3.1 - Dados dos parâmetros atmosféricos adotados	37
Tabela 3.2 - Parâmetros de funcionamento do algoritmo utilizados nos testes de análise.	42
Tabela 4.1 - Radiação solar anual obtida dos testes de análise dos parâmetros de funcionamento do modelo.....	50
Tabela 4.2 - Comparações entre resultados médios de radiação solar anual sob diferentes condições atmosféricas.	65
Tabela A.1 - Níveis máximos, médios, mínimos e amplitude de radiação solar anual em função do relevo do terreno, na área de estudo 3 (Subtropical).	87
Tabela A.2 - Níveis máximos, médios, mínimos e amplitude de radiação solar anual em função do relevo do terreno para a condição atmosférica de céu claro (cl), na área de estudo 3 (Subtropical).	87
Tabela A.3 - Níveis máximos, médios, mínimos e amplitude de radiação solar anual em função do relevo do terreno para a condição atmosférica de céu parcialmente nublado (pn), na área de estudo 3 (Subtropical).....	87
Tabela A.4 - Níveis máximos, médios, mínimos e amplitude de radiação solar anual em função do relevo do terreno para a condição atmosférica de céu nublado (nb), na área de estudo 3 (Subtropical).....	88
Tabela A.5 - Níveis máximos, médios, mínimos e amplitude de radiação solar anual em função do relevo do terreno, na área de estudo 1 (Equatorial).	88
Tabela A.6 - Níveis máximos, médios, mínimos e amplitude de radiação solar anual em função do relevo do terreno, na área de estudo 2 (Tropical).	88

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASI	Italian Space Agency
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CAP	Circunferência a Altura do Peito
DLR	German Aerospace Center
EDU	Eucalyptus Dunni
EGR	Eucalyptus Grandis
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESA	Eucalyptus Saligna
ff	Fator de forma da floresta
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JPL	Jet Propulsion Laboratory
kt	Índice de claridade
LIDAR	Light Detection and Ranging
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDEs	Modelos Digitais de Elevação
METI	Ministry of Economy Trade and Industry do Japão
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIR	Infravermelho próximo
PAR	Radiação fotossinteticamente ativa
P_{dif}	Porção da radiação difusa
SID	Serviço de Informação e Documentação
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SPG	Serviço de Pós-Graduação
SPOT	Système Probatoire d'Observation de la Terre
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SWIR	Infravermelho de ondas curtas
TDI	Teses e Dissertações Internas
TIR	Infravermelho termal
TM	Thematic Mapper

UV	Raios ultravioleta
$V_{\text{árvore}}$	Volume da árvore
V_c	Volume cilíndrico
VCP	Votarantim Celulose e Papel
VTCC	Volume Total de madeira com casca
Zfactor	Fator de proporcionalidade

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 FUNDAMENTAÇÃO.....	3
2.1. Radiação solar	3
2.1.1. Natureza	3
2.1.2. Dinâmica celeste	5
2.1.3. Efeito da atmosfera	9
2.1.4. Efeito do relevo.....	12
2.2. Modelos Digitais de Elevação (MDEs).....	16
2.2.1. Variáveis geomorfológicas	18
2.2.2. Cálculo da radiação solar	19
2.3. Crescimento vegetal	23
2.3.1. A cultura de eucalipto	26
2.3.2. Métodos de avaliação do crescimento de florestas	27
3 MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1. Material	33
3.1.1. Áreas de estudo	33
3.1.2. Dados	35
3.1.3. Recursos de análise	38
3.2. Plano geral de trabalho	38
3.3. Metodologia	40
3.3.1. Funcionamento do algoritmo	41
3.3.2. Análise dos níveis típicos e distribuição da radiação solar no terreno	42
3.3.3. Efeito do relevo.....	43
3.3.4. Efeito da atmosfera	43
3.3.5. Efeito da latitude	45
3.3.6. Relação da radiação solar no crescimento de <i>Eucalyptus spp.</i>	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
4.1. Caracterização da radiação solar	49
4.1.1. Parâmetros de funcionamento do modelo de radiação solar	49
4.1.2. Análise dos níveis de radiação solar e seus padrões de distribuição no terreno.....	51
4.2. Comportamento da radiação solar em relação ao relevo, atmosfera e latitude.....	58
4.2.1. Relação da radiação solar com o relevo	58
4.2.2. Efeito das condições atmosféricas na distribuição da radiação solar	60
4.2.3. Distribuição da radiação solar em latitudes variadas	66
4.3. Relação da radiação solar anual com o crescimento de <i>Eucalyptus spp.</i>	70
5 CONCLUSÕES.....	75

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
APÊNDICE A	87
A.1 Tabelas.....	87

1 INTRODUÇÃO

Informações de relevo proveniente dos Modelos Digitais de Elevação (MDEs) têm sido amplamente utilizadas na identificação e análise dos sistemas terrestres. A utilização destas informações requer a derivação da variável altimetria para obtenção de variáveis geomorfológicas como declividade, orientação de vertentes e curvaturas. Os dados geomorfológicos, bem como suas combinações, podem ser utilizados em estudos da vegetação, do solo e do clima como descritores específicos relacionados a fatores influentes nestes aspectos. Dentre as aplicações possíveis, encontram-se estudos relacionados a solos, distribuição da flora e da fauna, análises de processos de evapotranspiração, quantificação da radiação solar incidente na superfície terrestre, distribuição de água no solo, o estudo de processos de erosão e deslizamento, principalmente.

O uso de dados geomorfológicos juntamente com informações do clima, geologia, solos e atividades antrópicas consistem em importantes fatores na formação e distribuição da cobertura vegetal (GUISAN; ZIMMERMANN, 2000). Mapas termométricos na escala de topoclima (1:1.000.000) foram favorecidos ao incluir dados topográficos para espacialização das informações climáticas obtidas em postos meteorológicos (VALERIANO; PICINI, 2000). Neste caso, com MDE de dados Radarsat-1 sob resolução de 1km, considera-se somente o efeito geral da altitude, latitude e eventualmente longitude, com base nas tendências gerais da temperatura. Em escala mais detalhada, porém, o efeito local da distribuição de radiação sobre a temperatura torna-se mais evidente, como foi explorado por Xin e Chenchao (2008), que propuseram informações de distribuição da radiação solar para produção de mapas mais detalhados (1:50.000).

A utilização ótima da informação de radiação solar incidente na superfície terrestre requer o conhecimento da dinâmica celeste, características topográficas locais e dos processos de atenuação atmosférica. A distribuição da radiação solar devido à topografia, apesar de ainda não ser um uso comum, tem colaborado em estudos de evapotranspiração (MÉSZÁROŠ; MIKLÁNEK, 2006) e de crescimento de espécies vegetais em diferentes condições topográficas (BRUNORI et al., 1995). Neste sentido, o

mapeamento da radiação solar a partir dos dados de MDEs é um insumo promissor na aplicação dos estudos do meio físico relacionados ao regime de radiação solar.

Alguns sistemas de informação geográfica (SIG) e de processamento de imagens têm colaborado na criação de modelos da radiação solar interceptada pela superfície em diferentes escalas espaciais e temporais para utilização das informações de radiação no suporte e/ou solução de problemas diversos (DUBAYAH; RICH, 1995; KUMAR et al., 1997). Em geral, os modelos utilizam como dados de entrada os MDEs e a partir da definição de parâmetros atmosféricos, localização latitudinal e períodos de análise, os recursos criam mapas de distribuição da radiação solar.

Embora existam recursos capazes de modelar a distribuição da radiação solar incidente na superfície terrestre a partir de MDEs, sua aplicação para o conhecimento do comportamento de sua distribuição e dos possíveis condicionantes de variação ainda é pouco explorada. Por este motivo, análises referentes aos parâmetros de operação dos modelos e às características da área de estudo são necessárias para a avaliação e aplicação da radiação solar como variável climática. O objetivo deste trabalho consiste em experimentar o uso de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) obtidos do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) para o cálculo da distribuição da radiação solar incidente na superfície terrestre. Para isso, os seguintes objetivos específicos devem ser atendidos:

- a) Caracterizar a distribuição da radiação solar em períodos diário, mensal, semestral e anual;
- b) Analisar o comportamento da distribuição da radiação solar anual incidente na superfície de acordo com parâmetros topográficos;
- c) Analisar a distribuição da radiação solar anual incidente na superfície de acordo com parâmetros atmosféricos;
- d) Analisar a influência da localização (latitude) no cálculo e distribuição da radiação solar anual na superfície;
- e) Testar a correlação dos resultados de radiação solar anual calculados com os dados SRTM (*i.e.*, Topodata) com a variação de crescimento de *Eucalyptus spp.*

2 FUNDAMENTAÇÃO

2.1. Radiação solar

Devido à importância da radiação solar incidente na superfície terrestre em processos climatológicos, hidrológicos, ecológicos, de engenharia e outros, a natureza da radiação solar, a dinâmica celeste relacionada com sua distribuição bem como sua interação com a atmosfera e relevo serão abordadas neste item.

2.1.1. Natureza

A superfície do Sol é a fonte da maior parte de radiação solar visível que incide na Terra. A energia solar é transferida entre o Sol e a Terra através da radiação eletromagnética, também definida como onda eletromagnética, que se propaga no espaço à velocidade da luz e é composta por vetores elétrico e magnético. A energia emitida pelo Sol consiste em um espectro contínuo de energia eletromagnética com variações de ondas curtas (raios gama - comprimento de onda abaixo de 10^{-11} m) a ondas longas (ondas de rádio - comprimento de onda acima de 1 m) (COULSON, 1975).

A 6000 K, a distribuição espectral da radiação emitida pelo Sol ocorre, principalmente, em comprimentos de onda mais curtos, de raios ultravioleta (UV) ao infravermelho de ondas curtas (SWIR) (Figura 2.1). A Terra intercepta uma porção muito pequena da energia emitida pelo Sol e posteriormente reflete parte desta energia ao espaço, processo no qual absorve grande parte da radiação solar de ondas curtas para reemitir em ondas longas (IQBAL, 1983).

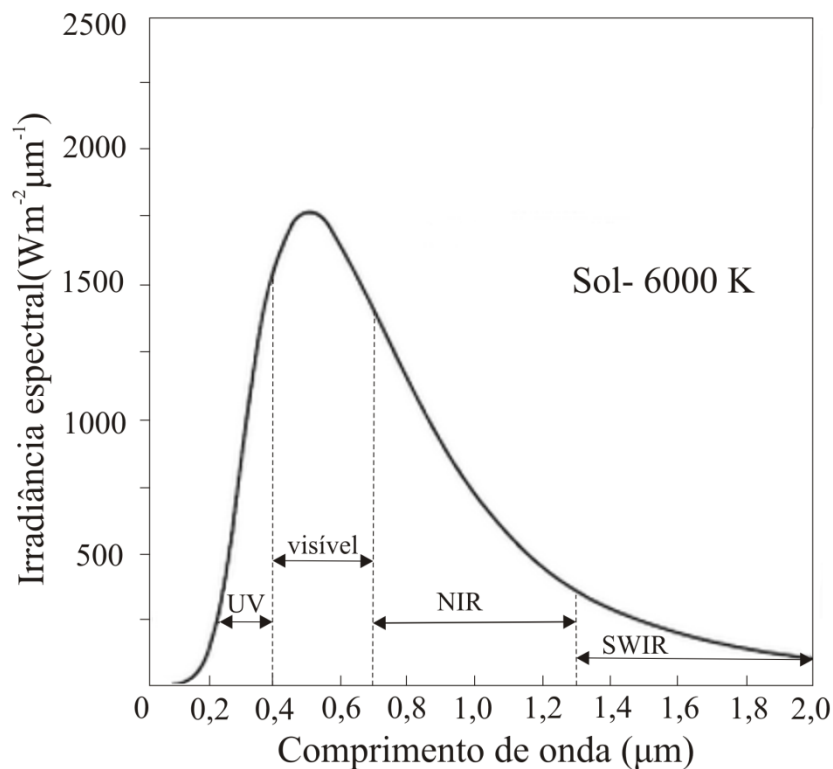


Figura 2.1 - Distribuição espectral da radiação solar (Raios ultravioleta - UV; Luz visível - visível; Infravermelho próximo - NIR; Infravermelho de ondas curtas - SWIR) a 6000 K.

Fonte: Adaptada de Iqbal (1983).

A energia radiante proveniente do Sol é obtida pelo produto entre a constante de Planck ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s) e a variável frequência (f) da energia eletromagnética, que corresponde à razão entre a velocidade da luz ($3 \cdot 10^8$ m/s) e o comprimento de onda (ELACHI; ZYL, 2006). Ao interagir com a superfície terrestre, a quantidade de energia incidente em uma área específica, normal ao fluxo incidente, para um determinado período de tempo é expressa em $W \cdot h/m^2$. Na Tabela 2.1 são apresentadas as grandezas físicas que representam a energia radiante do Sol, em cada comprimento de onda (λ).

Tabela 2.1 - Grandezas físicas da radiação solar incidente na Terra.

Grandezas	Símbolo	Equação	Unidades
Energia Radiante	Q_λ	$Q_\lambda = h \cdot f$	Joule (J)
Densidade de energia radiante	W_λ	$W_\lambda = dQ_\lambda/dV$	J/m^3
Fluxo radiante	ϕ_λ	$\phi_\lambda = dQ_\lambda/dT$	J/s=Watt(W)
Densidade de fluxo radiante (Irradiância)	E_λ	$E_\lambda = d\phi_\lambda/dA$	W/m^2

Fonte: Adaptada de Elachi e Zyl (2006).

A quantidade de energia radiante que chega à Terra é dependente das variações de sua posição em relação ao Sol. Já a variabilidade espacial da radiação solar incidente na superfície terrestre ocorre por motivos referentes à orientação da Terra em relação ao Sol, as nuvens e heterogeneidades atmosféricas e, por fim, à topografia. O primeiro motivo determina o gradiente latitudinal e as estações do ano enquanto que o segundo está associado ao tempo e o clima, em escala relativamente regionalizada. Já o terceiro motivo é causado pela variabilidade espacial da exposição do terreno dado pela topografia, uma vez que a declividade e a orientação de vertentes determinam o ângulo de incidência da radiação solar e o sombreamento local pelo relevo circunvizinho (BÖHNER; ANTONIC', 2009; VIANELLO; ALVES, 2000).

2.1.2. Dinâmica celeste

O movimento da Terra em torno do Sol descreve uma hélice elíptica (Figura 2.2). Em virtude da forma elíptica da órbita terrestre, a distância Terra-Sol varia ao longo do ano em torno de um valor médio de $149,6 \times 10^6$ km. No ano, a distância mínima Terra-Sol é de aproximadamente $147,1 \times 10^6$ km e a máxima de $152,1 \times 10^6$ km. O ponto da trajetória da Terra mais próximo ao Sol é denominado periélio e o mais afastado de afélio. A Terra passa pelo afélio em 4 de julho e pelo periélio em 3 de janeiro (TUBELIS; NASCIMENTO, 1980; VIANELLO; ALVES, 2000). No periélio, a Terra recebe cerca de 3,4% a mais de radiação solar do que no afélio, isto porque a relação entre a

quantidade de radiação solar incidente na Terra é inversamente proporcional ao quadrado da distância Terra-Sol (IQBAL, 1983).

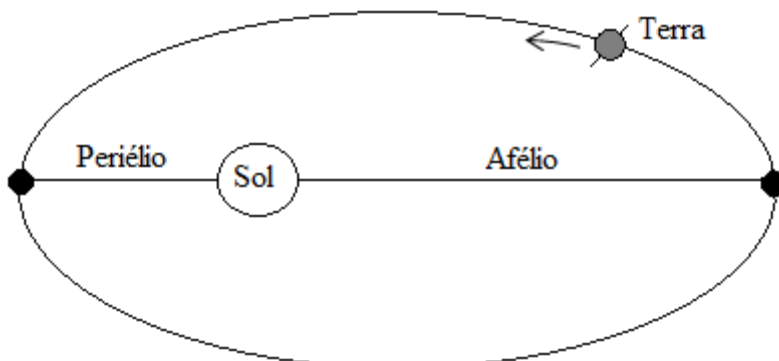


Figura 2.2 - Movimento da Terra em relação ao Sol e posição da Terra referente as distâncias máximas e mínimas do Sol.

Uma vez que o eixo da terra é inclinado em relação ao Equador solar, e a posição relativa Terra-Sol é alterada a cada instante, um mesmo local sobre o globo terrestre recebe durante o ano diferentes quantidades de energia solar. De acordo com Ometto (1981) a energia que incide sobre um ponto fixo em uma superfície horizontal do globo terrestre é expressa em função da declinação solar (dinâmica anual), da latitude e do ângulo horário (dinâmica diurna), representados por δ , Y e h , respectivamente (Figura 2.3).

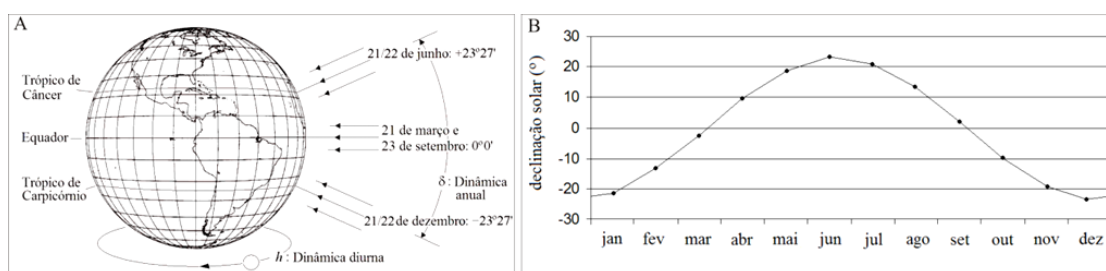


Figura 2.3 - Dinâmica diária do ângulo horário e anual da declinação solar (A) com as respectivas variações da declinação solar ao longo do ano (B).

Fonte: Adaptada de Valeriano (2011).

Neste sentido, a geometria de iluminação na superfície terrestre, dependente dos ângulos solares (θ_s - ângulo zenital solar e ϕ_s - ângulo azimutal solar), é controlada pela dinâmica anual e diurna do disco solar. Os ângulos solares são calculados a partir das seguintes Equações, conforme Ometto (1981):

$$\cos \theta_s = \sin Y . \sin \delta + \cos Y . \cos \delta . \cos h \quad (2.1)$$

$$\sin \varphi_s = \cos \delta . \sin h / \sin \theta_s \quad (2.2)$$

A declinação solar (δ), correspondente ao ângulo formado entre a linha que liga o centro da Terra ao Sol e o plano do Equador, varia de 23° 27' N a 23° 27' S, aproximadamente, e é função apenas do dia do ano (D) (ver Figura 2.3 e Equação 2.3). As posições do Sol nas quais sua declinação é igual aos valores extremos, nos trópicos de Câncer e Capricórnio, são denominadas de solstícios e as posições de declinação nula, na linha do Equador, de equinócios.

$$\delta = - 23,45^\circ . \cos ((360^\circ/365) . (D + 10)) \quad (2.3)$$

As estações do ano são definidas com início nos solstícios e nos equinócios (TUBELIS; NASCIMENTO, 1980). No hemisfério Sul, o solstício de verão ocorre em 21/22 de dezembro, o solstício de inverno em 21/22 de junho e o equinócio de outono e primavera em 21 de março e 23 de setembro, respectivamente. No hemisfério Norte a data de início das estações do ano ocorre seis meses depois em relação ao hemisfério Sul (GEDDES, 1939). O Hemisfério Sul recebe mais energia solar que o Hemisfério Norte entre 23 de setembro e 21 de março (semestre primaveral no Sul). Neste período, a maior área iluminada na superfície terrestre é no solstício de verão. De 21 de março a 23 de setembro (semestre outonal no Sul) a situação se inverte e o Hemisfério Sul passa a receber menos energia solar que o Hemisfério Norte, com mínima no solstício de inverno (SILVA, 2001).

Ao longo do dia, em virtude da inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao seu plano da órbita, as variações da radiação solar incidente na Terra são dependentes do ângulo horário. Estas variações estão diretamente ligadas à duração dos dias e das noites. O ângulo horário, ângulo medido no pólo celestial entre o meridiano local e o meridiano solar (IQBAL, 1983), corresponde ao percurso aparente do Sol através dos meridianos. O cálculo deste ângulo inicia-se a partir do meio-dia local (12:00) e modifica 15° a cada hora (Equação 2.4).

$$h = 15. [hora\ local - 12] \quad (2.4)$$

A duração do dia varia continuamente em todas as latitudes, exceto no Equador, que tem duração do dia de 12 horas durante todo o ano. A duração efetiva do dia, ou fotoperíodo (N) (Equação 2.5), é definida entre o nascer e o pôr do Sol em determinado local e data através do cálculo dos ângulos horários do nascer e do pôr do Sol (TUBELIS; NASCIMENTO, 1980). Este cálculo é função da latitude local e da declinação do Sol em determinado dia do ano (Equação 2.6).

$$N = 2H/15 \quad (2.5)$$

$$H = \cos^{-1} (-\tan Y \cdot \tan \delta) \quad (2.6)$$

Nos pólos há apenas um dia e uma noite durante o ano, com duração aproximada de seis meses cada. Em um hemisfério, nas latitudes intermediárias aos pólos, o fotoperíodo aumenta do início do inverno até o final da primavera e diminui a partir do princípio do verão até o final do outono (Figura 2.4). Este atinge valor máximo anual no dia em que se inicia o verão do hemisfério e valor mínimo no dia em que se inicia o inverno deste mesmo hemisfério (GEDDES, 1939; SILVA, 2001).

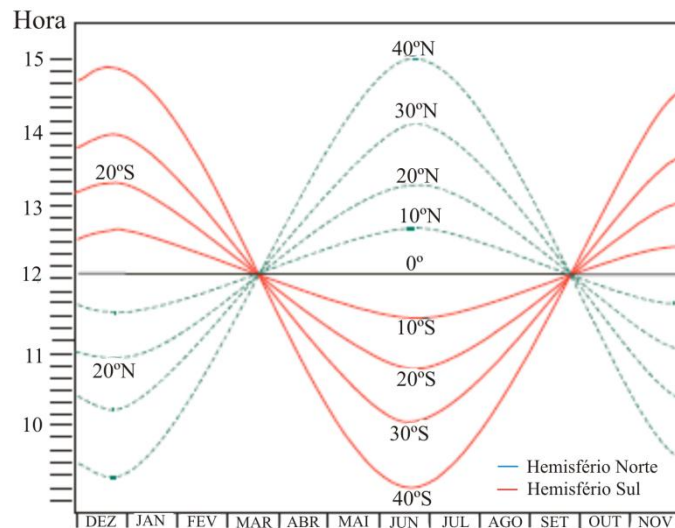


Figura 2.4 - Variação do fotoperíodo, ao longo do ano, com a latitude.

Fonte: Silva (2001).

Diante destas considerações, no Equador, ao meio dia do dia de equinócio, o Sol encontra-se no zênite (elevação solar igual a 90°) e portanto o ângulo solar zenital é correspondente a 0° (Figura 2.5). Nestas condições, a diferença entre a latitude e a declinação solar é nula e a distribuição dos ângulos de incidência dos raios solares, para uma superfície horizontal, aumenta com o aumento da latitude (Figura 2.5) e, conseqüentemente, a variação dos ângulos de incidência dos raios solares sobre uma superfície com relevo também aumenta.

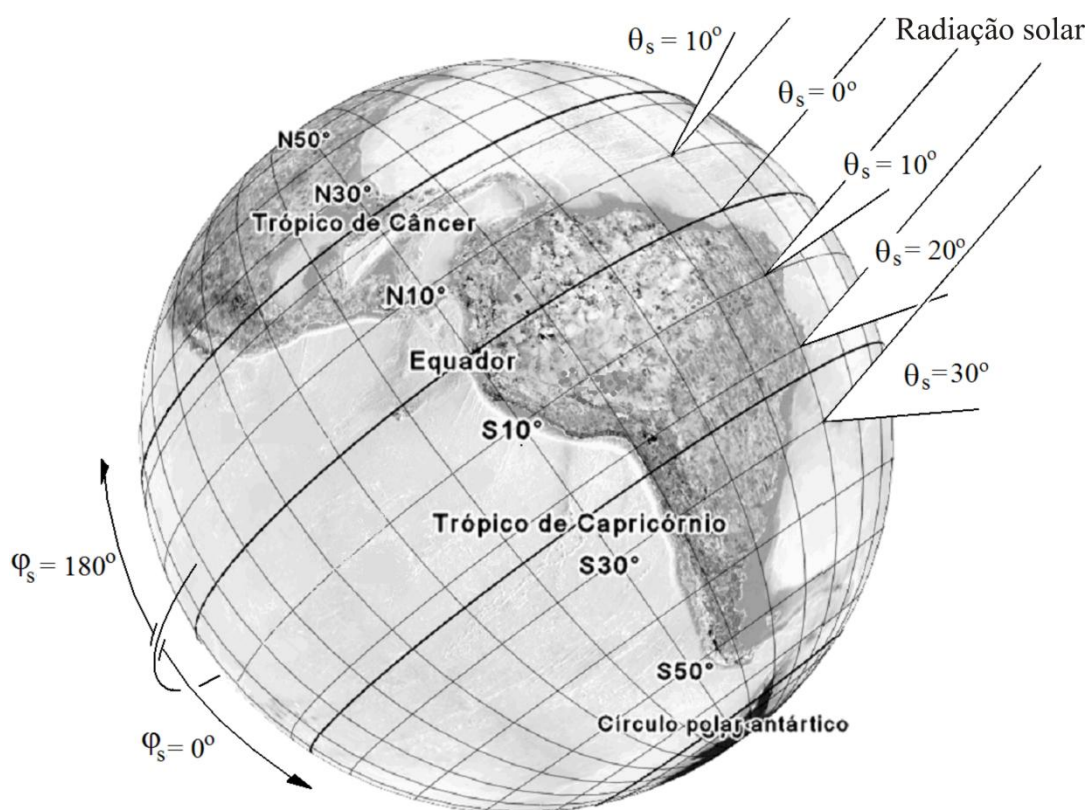


Figura 2.5 - Variação dos ângulos solares zenital (θ_s) e azimutal (φ_s) ao meio-dia do equinócio em função da latitude.

Fonte: Adaptada de Valeriano (2011).

2.1.3. Efeito da atmosfera

A distribuição espectral da radiação solar incidente na superfície da Terra é função da radiação solar extraterrestre e dos constituintes atmosféricos (Figura 2.6) que afetam os processos de espalhamento e absorção pela atmosfera terrestre (IQBAL, 1983). A

radiação solar ao atravessar a atmosfera é modificada em intensidade por espalhamento de moléculas, gotas de água, poeira, e outras partículas de aerossol presentes na atmosfera; por absorção de gases e partículas atmosféricas; e também pela absorção e reflexão da superfície do solo ou água subjacente (COULSON, 1975). Para Slater (1980), as principais reduções da intensidade da radiação solar ocorrem principalmente pela dispersão molecular e a presença de aerossóis.

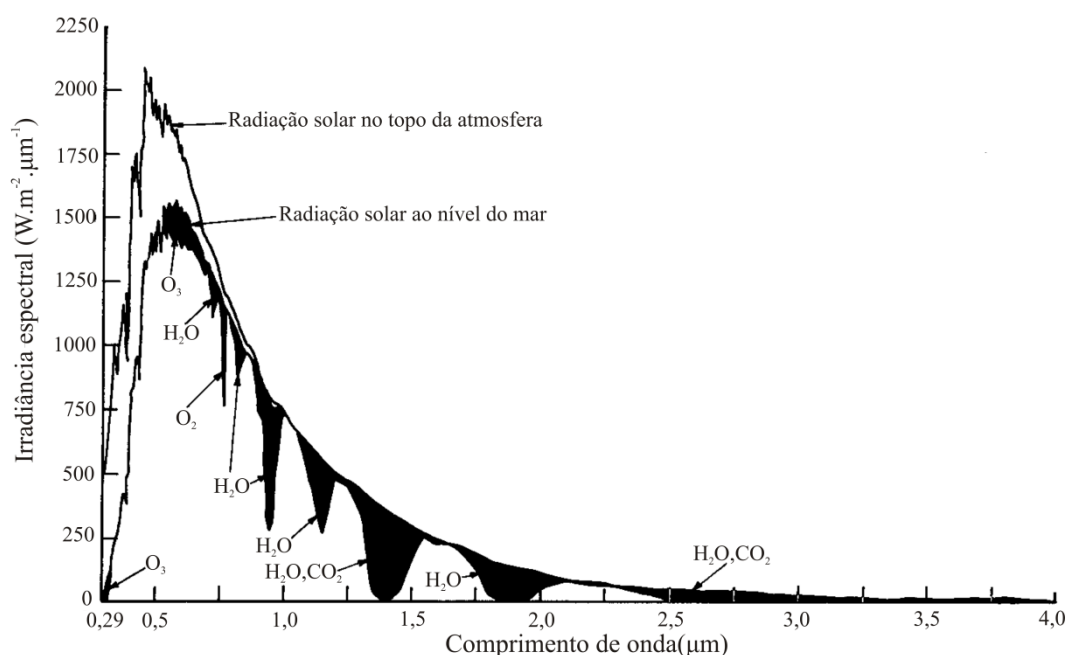


Figura 2.6 - Espectro da radiação solar incidente no topo da atmosfera e na superfície terrestre ao nível do mar após interação com os constituintes atmosféricos.

Fonte: Adaptada de Iqbal (1983).

Portanto, os efeitos atmosféricos nos processos de espalhamento e absorção da radiação solar variam no espaço e no tempo assim como com a quantidade dos constituintes atmosféricos e as mudanças das massas de ar (DUFFIE; BECKMAN, 1980). De acordo com Pereira et al. (2006) cerca de 30% da radiação solar incidente no topo da atmosfera é refletida por nuvens, gases, partículas atmosféricas e a superfície terrestre. O restante da radiação solar incidente, correspondente a 70%, é absorvida pelos constituintes atmosféricos e produz o aquecimento do sistema e por consequência a evaporação da água ou convecção.

Parte da radiação solar espalhada pela atmosfera incide na superfície terrestre em forma de radiação difusa, a qual é distribuída em todas as direções do céu. A distribuição da radiação difusa é dependente de coeficientes de transmissão atmosférica obtidos para a radiação solar total ou global incidente na superfície. A radiação global é correspondente à soma da radiação direta com a radiação difusa e refletida. Em geral, a radiação direta é a componente de maior proporção da radiação global seguida da radiação difusa e por fim da radiação refletida, a qual pode ser negligenciada na soma entre as componentes (FU; RICH, 1999b). A intensidade da radiação solar direta e difusa varia com a nebulosidade, portanto a maior proporção de radiação difusa nos dias nublados se deve, obviamente, aos efeitos de dispersão adicionais ocasionados por nuvens.

Para Lingamgunta e Veziroglu (2004), as atenuações atmosféricas da radiação solar ocorrem em virtude das variações nas camadas da atmosfera, a qual se modifica tanto para épocas do ano como para horas do dia. Além disso, os autores sugerem que para previsão da radiação solar incidente em determinado local é útil definir um padrão das condições do céu como claro, sob nenhuma condição de nuvem. No entanto, para tal procedimento é necessário o uso de dados meteorológicos a longo prazo, os quais ainda são escassos para muitos lugares, principalmente em locais com relevo montanhoso.

Neste contexto, Batlles et al. (2008) propuseram em seu estudo um método para estimar as condições atmosféricas (transmitância atmosférica e a porção da radiação difusa), no Sul da Espanha, com o intuito de obter a radiação solar global diária incidente na superfície. O método consistiu na caracterização das condições do céu por meio do índice de claridade (kt), definido por Iqbal (1983) como a razão entre a radiação solar global diária e a radiação solar diária no topo da atmosfera. A porção da radiação difusa foi obtida de medições radiométricas e correlacionada com os diferentes intervalos de kt. Em seguida, a transmitância atmosférica foi calculada por meio da fração difusa e da radiação solar global medida em estações radiométricas. Os resultados mostraram que os parâmetros atmosféricos foram melhor determinados em condições de céu claro.

O índice de claridade (kt) informa a respeito da quantidade de nuvens presentes no céu e portanto está diretamente ligado aos parâmetros de transmitância atmosférica e

radiação difusa. Outros estudos caracterizaram as condições de céu e relacionaram a radiação solar global com as porções direta e difusa por meio de índices de claridade sob diferentes condições de localização e relevo (JACOVIDES et al., 1996; LIU; JORDAN, 1960; MARTÍNEZ-DURBÁN et al., 2009). Os resultados indicaram que os maiores valores de kt estão associados com a presença de dias claros e portanto menor nebulosidade. Por este motivo, os dias claros apresentam menor fração da radiação difusa e portanto maior transmitância da radiação solar através da atmosfera.

2.1.4. Efeito do relevo

Os gradientes latitudinais de radiação solar são causados pela geometria da Terra, movimentos de rotação e translação ao redor do Sol, e analisados em escala global. Já para análises em escalas regionais e locais, o relevo é o principal fator que altera a distribuição de radiação solar na superfície terrestre (HOFIERTA; ŠŮRI, 2002).

Em um terreno com topografia variável, há três fontes de iluminação (Figura 2.7): (1) irradiância direta, a qual é fortemente influenciada pelo ângulo entre o feixe de radiação solar e a normal à superfície, e inclui sombreamento do próprio relevo e sombras de relevos vizinhos; (2) irradiância difusa, parte da radiação pode ser dispersa pelo terreno próximo; (3) irradiância direta e difusa refletida por terrenos vizinhos ao ponto de interesse (DUBAYAH; RICH, 1995).

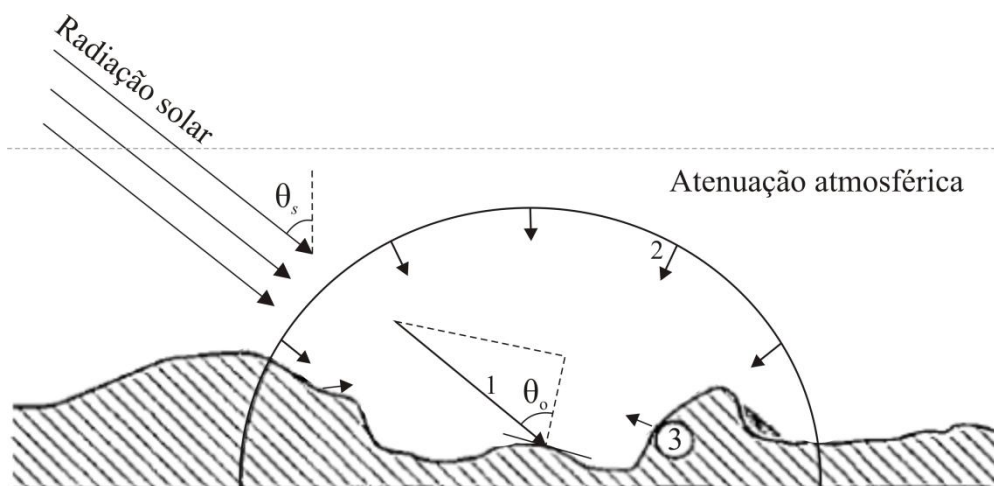


Figura 2.7 - Fontes de iluminação em relevo variável: (1) Irradiância direta, (2) Irradiância difusa, (3) Irradiância refletida de terrenos vizinhos, (θ_o) ângulo de incidência dos raios solares com a normal à superfície, (θ_s) ângulo zenital solar.

Fonte: Adaptada de Dubayah e Rich (1995).

A relação entre a radiação solar interceptada por uma superfície e o fluxo incidente é dada pela lei do cosseno da iluminação: $S = S_i \cos \theta_o$, onde S corresponde a densidade de fluxo radiante incidente em uma superfície, S_i a densidade de fluxo radiante perpendicular ao feixe incidente e θ_o o ângulo entre o feixe de radiação solar e a normal à superfície (OKE, 1978).

A distribuição da radiação em uma superfície é representada pelo fator cosseno ($\cos \theta_o$), determinado pela Equação 2.7, da trigonometria esférica:

$$\cos \theta_o = \cos \theta_s \cos \theta_t + \sin \theta_s \sin \theta_t \cos (\varphi_s - \varphi_t) \quad (2.7)$$

onde $\cos \theta_o$ é o fator cosseno, θ_s é o ângulo zenital solar, θ_t corresponde a declividade, φ_s é o ângulo azimutal solar e φ_t corresponde a orientação de vertentes. De acordo com Valeriano (2011), num dado momento, em que a geometria de iluminação permanece constante, as variações apresentadas pela topografia, em função da declividade e da orientação de vertentes, determinam as diferenças de intensidade radiante ao longo da superfície terrestre através da expressão tridimensional do relevo (Figura 2.8).

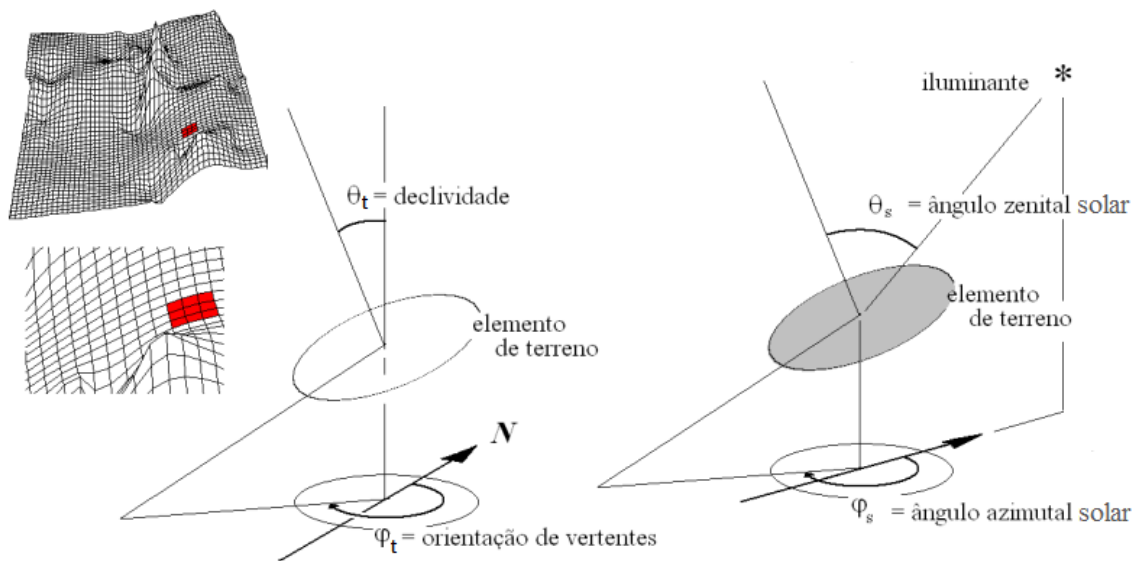


Figura 2.8 - Geometria de iluminação momentânea em um local do terreno de acordo com a declividade e a orientação de vertentes.

Fonte: Valeriano (2011).

Neste contexto, devido às variações da geometria de superfície e das direções de exposição do terreno, as áreas montanhosas (por exemplo, declividade de 60°), ao contrário das áreas planas (exemplo, 15°), possuem maior variação da distribuição de radiação solar incidente no terreno (Tabela 2.2). Disso resulta que as áreas planas têm menor variação do ângulo de incidência dos raios solares em relação a normal à superfície do que as áreas íngremes, onde as variações de orientação o modificam com mais intensidade. No entanto, vale ressaltar que o cálculo do $\cos \theta_0$ requer o conhecimento dos ângulos azimutais e zenitais da exposição do terreno, mais conhecidos por declividade e orientação de vertentes, em combinação com os correspondentes ângulos azimutais e zenitais do Sol (Equação 2.7 e Figura 2.8).

Tabela 2.2 - Valores diários de radiação solar ($\text{Cal.cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) em diferentes declividades e orientações de vertentes no dia 21 de março na latitude 40° no hemisfério Norte.

Declividade ($^\circ$)	Orientação de vertentes Latitude 40° N				
	N	NE/NW	E/W	SE/SW	S
0	564	564	564	564	564
15	420	461	551	636	669
30	248	346	523	668	729
45	59	248	485	666	738
60	0	181	436	621	698
75	0	134	376	545	610
90	0	99	306	439	480

Fonte: Adaptada de Buffo et al. (1972).

Estudos propõem o cálculo da radiação solar global em superfícies com relevo variável a partir de dados disponíveis em superfícies horizontais (KLUCHER, 1979; TEMPS; COULSON, 1977). Nestes trabalhos, os dados de insolação foram obtidos por piranômetros, e as informações de topografia local (declividade e orientação de vertentes) e a localização do Sol (ângulos azimutais e zenitais) para uma determinada data foram utilizadas no cálculo. Os resultados obtidos colaboraram na avaliação de modelos de insolação para prever a radiação solar em superfícies inclinadas e favoreceram assim a implementação dos algoritmos de estimativa com base em referências medidas.

Dubayah (1992) combinou modelos digitais de elevação com dados de reflectância obtidos de imagens do sensor TM, do satélite Landsat, para modelar a variabilidade espacial da radiação solar líquida. Para isso, foi utilizado um mapa de radiação solar derivado dos dados de reflectância da imagem TM, com correções atmosféricas e topográficas da imagem, e um mapa da radiação solar aparente, sem correções topográficas. Os resultados mostraram a importância do efeito topográfico na modulação da radiação solar incidente em relevos variáveis, bem como em relevos

suaves. O autor conclui que o método que não utilizou o efeito da topografia representou de maneira imprecisa a variabilidade espacial da radiação solar líquida.

2.2. Modelos Digitais de Elevação (MDEs)

O Modelo Digital de Elevação (MDE) fornece informações essenciais a respeito da topografia da superfície terrestre e de suas características. Por ser um importante insumo para o tratamento e análise de dados da superfície, o MDE pode ser utilizado em estudos hidrológicos, topográficos, cartográficos e geomorfológicos, entre outras aplicações (HIRT et al., 2010). Essencialmente, MDEs são arquivos de dados georreferenciados de cotas altimétricas, em geral estruturados em matrizes (*raster*). Os dados para elaboração de MDE por sensoriamento remoto podem ser obtidos a partir de fotografias aéreas, sensores ópticos, radares a bordo de aviões, espaçonaves ou satélites e por *Light Detection and Ranging* (LIDAR) (DEILAMI et al., 2012; GUO et al., 2011).

Dentre os sensores remotos ópticos encontram-se o *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) e o *Système Probatoire d'Observation de la Terre* (SPOT). O SPOT foi o primeiro a obter imagens estereoscópicas que permitem a extração de MDE da superfície terrestre, o que possibilitou extrair dados em três dimensões sobre as áreas da superfície (NIKOLAKOPOULOS et al., 2006). Em contrapartida o ASTER possibilitou obter imagens quase que instantaneamente por meio de um sistema de aquisição *along track*.

O sensor ASTER foi lançado em Dezembro de 1999 a bordo do satélite Terra em uma missão conjunta da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) com o *Ministry of Economy Trade and Industry* do Japão (METI) (NIKOLAKOPOULOS et al., 2006). De acordo com sua geometria de visualização, este sensor é adequado para geração de MDEs com resolução espacial de 1 arco-segundos (1" ou 30m) entre as latitudes 83°N e 83°S (ZHAO, 2011). O sensor é projetado para cobrir 14 bandas espectrais do visível ao infravermelho termal e inclui três subsistemas diferentes: o visível e infravermelho próximo (VNIR), infravermelho de ondas curtas (SWIR) e o infravermelho termal (TIR) . Os dados das imagens estéreo são registrados somente na banda 3, correspondente a região do espectro do infravermelho próximo, com

comprimento de onda 0,78 a 0,86 μm (HIRANO et al.,2003). O MDE obtido do ASTER apresenta falhas ocasionais em sua cobertura em várias regiões, na forma de artefatos poligonais e lineares. Estas falhas vêm do processo de mosaicagem entre dados de órbitas distintas, devido à impossibilidade de uma aquisição das imagens estereoscópicas contínua livre de condições atmosféricas desfavoráveis. Como consequência, os efeitos adversos da aquisição e da produção de dados altimétricos limitam o uso dos modelos digitais de elevação para aplicações específicas (BOLCH et al., 2005; GUTH, 2010; HIRT et al., 2010).

Para obtenção de MDEs com sensores radar, encontra-se os dados do *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM). O SRTM realizou uma geração mundial de modelos digitais de elevação, com impacto expressivo sobre as possibilidades de aplicação de MDE. O sistema consistiu de duas antenas para aquisição de informações interferométricas (TOUTIN; GRAY, 2000) na banda C, com comprimento de onda de 5,6 cm, e na banda X, com comprimento de onda de 3,1 cm. Os dados da banda C foram processados no *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) e os dados da banda X no Centro Aeroespacial da Alemanha (DLR). A missão ocorreu em Fevereiro do ano 2000, elaborado por um esforço conjunto da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), o *German Aerospace Center* (DLR) e *Italian Space Agency* (ASI) (FARR et al., 2007; RABUS et al., 2003). O objetivo da missão foi adquirir modelos digitais de elevação da superfície da terra entre as latitudes 60° N e 56° S, o que corresponde a cerca de 80% da superfície terrestre do planeta. Estes dados foram disponibilizados publicamente com resolução de 1 arco-segundos (1'' ou 30m) para os Estados Unidos e seus territórios, e 3 arco segundos (3''ou 90m) para as outras regiões do mundo (YANG et al., 2011) até o ano de 2015. A partir de então, os dados de 1 arco-segundos (1'' ou 30m) foram disponibilizados para América do Sul, Europa Ocidental, América Central e Ilhas do Caribe.

A aquisição dos dados SRTM, realizada de 11 a 22 de fevereiro de 2000, foi planejada para suprir informações em escalas entre 1:250.000 e 1:100.000. Estes dados foram disponibilizados para a América do Sul a partir de 2003, com resolução horizontal de 3 arco-segundos (~90m) e resolução vertical de 1m. Em função das restrições

características dos dados SRTM, foram aplicadas técnicas de pré-tratamento anteriores à sua utilização para que pudessem ser utilizados e aplicados nas diversas áreas com desempenho otimizado. A precisão dos dados SRTM é avaliada, principalmente, por erros constantes ao longo da coleta dos dados e erros variáveis no tempo devido ao movimento das antenas interferométricas, como descrito por Rodriguez et al. (2006). Além disso, os dados de elevação do SRTM apresentam significativa sensibilidade a feições presentes acima da superfície, como por exemplo, o efeito dossel descrito por Kelldorfer et al. (2004). Devido a este efeito, a elevação do MDE de dados SRTM corresponde à cota do terreno em combinação com variações na altura do dossel.

2.2.1. Variáveis geomorfológicas

De acordo com Moore et al. (1993), os atributos topográficos derivados dos MDEs, também chamados de variáveis geomorfológicas, podem ser divididos em primários e secundários. Os atributos primários são calculados diretamente a partir dos MDEs e correspondem as variáveis locais como a própria altitude, a declividade, orientação de vertentes, curvaturas verticais e horizontais. Os atributos secundários (índices), são obtidos por meio das combinações dos atributos primários e podem ser utilizados no mapeamento de informações mais específicas da superfície terrestre e de maior complexidade. Dentre estes atributos encontram-se o índice de umidade, o índice de transporte de sedimentos, índice de corrente de máximo fluxo e também a distribuição da radiação solar no terreno (MOORE et al., 1993; WILSON; GALLANT, 2000).

Para Gallant e Wilson (2000), a declividade corresponde à primeira derivada da altitude, ou à inclinação do terreno em relação à horizontal, e pode ser associada à força com que a gravidade induz o fluxo da água e de outros materiais pela superfície do terreno. A declividade pode ser expressa em graus (0° a 90°) ou em porcentagem (0 a ∞). A declividade exerce papel significativo na hidrologia e geomorfologia. A orientação de vertentes se refere à direção azimutal da maior inclinação do terreno, no sentido descendente, portanto é expressa em graus, de 0° a 360° , como as direções na bússola. Esta variável é mais frequentemente utilizada de maneira indireta (VALERIANO, 2008), como componente do processamento de atributos secundários. Sua aplicação mais evidente no contexto de SIG é a modelagem hidrológica, por definir as linhas de

fluxo de escoamento superficial e, por conseguinte, permitir o mapeamento da estrutura da drenagem por algoritmos de fluxo (JIMÉNEZ FERNÁNDEZ, 2011). Em combinação com a declividade, pode ser utilizada para mapear a variação de radiação solar incidente devida ao relevo, como foi mostrado na Equação 2.7.

De maneira geral, os atributos topográficos secundários quantificam aspectos específicos desempenhados pela topografia como às características do solo, o volume e distribuição de água no solo, a susceptibilidade de erosão causada pela água e a distribuição e diversidade da flora e fauna (WILSON; GALLANT, 2000). O índice de corrente de máximo fluxo, índice de umidade e o índice de capacidade de transporte de sedimentos, considerados atributos topográficos secundários, foram utilizados no desenvolvimento da pesquisa de Silveira (2010), com o objetivo de delimitar unidades preliminares de solos, a partir da declividade e da área específica de contribuição (outra variável derivada de MDE).

A partir de um nível de complexidade, como a mapeamento de processos, variáveis não topográficas são requeridas para integração com informações do relevo em modelos descritivos e funcionais. Da mesma forma, a Equação 2.7 integra a declividade e a orientação de vertentes em combinações com os ângulos solares (variáveis climáticas) no cálculo da quantidade de radiação solar recebida num determinado ponto.

2.2.2. Cálculo da radiação solar

A aquisição de dados de radiação solar para o monitoramento e quantificação da distribuição da radiação na superfície terrestre não é uma tarefa de implementação fácil. Em virtude das variações locais, a interpolação com dados obtidos em campo, em geral, não representa adequadamente a radiação solar incidente na superfície. Como alternativa, os algoritmos para estimativa espacializada da radiação solar disponíveis em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) consistem em um meio eficiente para obter informações a respeito da variação espacial e temporal da radiação solar (FU; RICH, 2000).

Dentre os recursos para estimativas da radiação solar espacial encontram-se o SOLARFLUX (HETRICK et al., 1993), TopoView (FU; RICH, 1999a), HemiView

(RICH et al., 1999) e o Solar Analyst (FU; RICH, 1999b). Estes recursos são projetados para calcular a radiação solar incidente na superfície em ambiente SIG. O programa HemiView foi desenvolvido para análise de fotografias hemisféricas e é muito utilizado no estudo de dosséis. O TopoView e o SolarAnalyst utilizam MDEs como entrada e produzem como saída mapas de radiação solar direta, difusa, global e de duração da radiação direta para um período.

O Solar Analyst consiste em um algoritmo semelhante ao TopoView, que calcula a radiação solar direta e difusa a partir de MDEs e de dados atmosféricos (transmitância e porção da radiação difusa). Inicialmente, para cada célula do MDE, é definido um conjunto de direções (Figura 2.9A) e, em seguida, é determinado o ângulo máximo da porção visível, ângulo horizontal, para cada direção (Figura 2.9B). Para as direções que não foram selecionadas, os ângulos horizontais são calculados por interpolação. Estes ângulos são convertidos em um sistema de coordenadas hemisféricas para representar a porção visível do céu em cada célula do MDE (Figura 2.9C). De acordo com Fu e Rich (2000) a porção visível do céu (*viewshed*) é dependente da latitude e altitude, orientação da superfície, sombras projetadas de terrenos vizinhos, mudanças diárias e sazonais do ângulo solar bem como das atenuações atmosféricas.

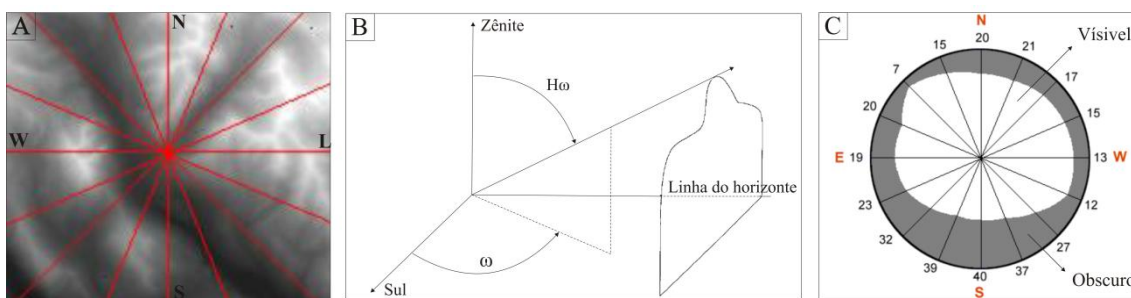


Figura 2.9 - Cálculo da porção visível do céu (*viewshed*) em uma célula do modelo digital de elevação (MDE) - altitude. Traçado dos ângulos horizontais para o conjunto de direções (A), ângulo horizontal $H\omega$ para a direção ω (B) e ângulos horizontais calculados e mapa da porção visível do céu para a célula do MDE (C).

Fonte: Adaptada de Dozier e Frew (1990) e Fu e Rich (1999b).

A radiação solar direta para cada direção do céu é dependente do mapa de trajetória do disco solar (*sunmap*) que é calculado em projeção hemisférica, semelhante ao *viewshed*.

Para caracterização da posição do disco solar e da distribuição da radiação difusa, a abóbada celeste é dividida em uma série de setores definidos por intervalos zenitais e azimutais a cujos centróides são associados ângulos zenitais e azimutais.

A trajetória aparente do Sol no tempo é determinada de acordo com a latitude especificada, e é representada pelos setores percorridos pelo disco solar (ângulos zenitais e azimutais) em intervalos diários e sazonais (Figura 2.10). Na operação do algoritmo, o período analisado, fornecido como parâmetro, determina de quais setores serão computadas parcelas temporais de radiação solar, para seu acúmulo em fase posterior do cálculo. No exemplo da Figura 2.10, estão mapeados os possíveis setores de Sol a partir de um ponto a 39° de latitude Norte em parcelas correspondentes a intervalos de meia hora (na dimensão diurna) por um mês (dimensão anual).

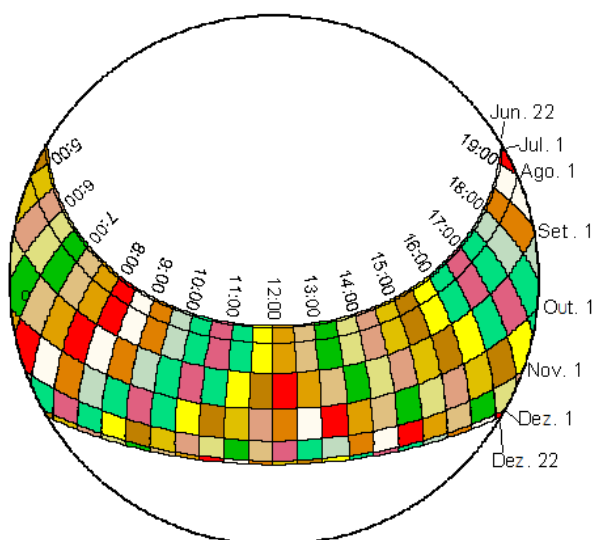


Figura 2.10 - Mapa da trajetória do disco solar na latitude 39°N com intervalo diário de 0,5 horas e intervalo mensal durante o ano. Cores utilizadas apenas para individualizar os setores.

Fonte: Adaptada de Fu e Rich (1999b).

Ao contrário da radiação direta, a radiação solar difusa proveniente de todas as direções do céu, é obtida por meio do mapa da distribuição da radiação difusa (*skymap*). Da mesma forma que para o mapa de trajetória solar, a abóbada celeste é dividida em uma série de setores definidos por divisões zenitais e azimutais (Figura 2.11) e em seguida, os ângulos zenitais e azimutais do centróide de cada setor são calculados.

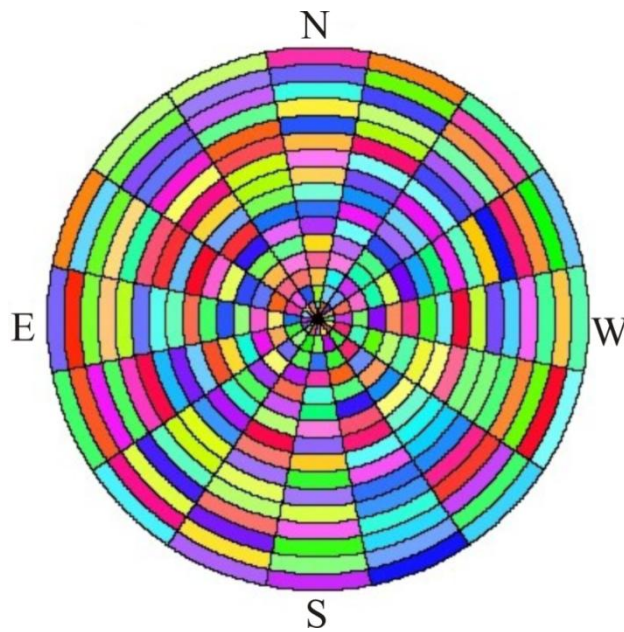


Figura 2.11 - Mapa da distribuição da radiação difusa e divisão do céu em setores definidos por 16 divisões zenitais e 16 divisões azimutais. Cores utilizadas apenas para individualizar os setores.

Fonte: Adaptada de Fu e Rich (1999b).

Por fim, o mapa da distribuição da radiação difusa (*skymap*) e o mapa de trajetória do disco solar (*sunmap*) são sobrepostos ao mapa da porção visível do céu (*viewswhed*) (Figura 2.12) para o cálculo da radiação solar global. A radiação solar global é correspondente à soma da porção da radiação difusa com a porção de radiação direta. A radiação solar direta é calculada para cada setor do céu visível de acordo com a posição do Sol, e as atenuações atmosféricas e a orientação das vertentes do terreno vizinho através de equações de um simples modelo de transmissão (FU; RICH, 1999b). O cálculo da radiação difusa pode ser feito com equações do modelo *standard overcast*, radiação difusa varia com o ângulo zenital, ou com o modelo *uniform overcast sky*, a radiação difusa é considerada a mesma em todas as direções do céu (FU; RICH, 1999b). Em ambos os modelos, a radiação difusa é calculada no centróide de cada setor acima do horizonte e integrada no intervalo de tempo desejado.

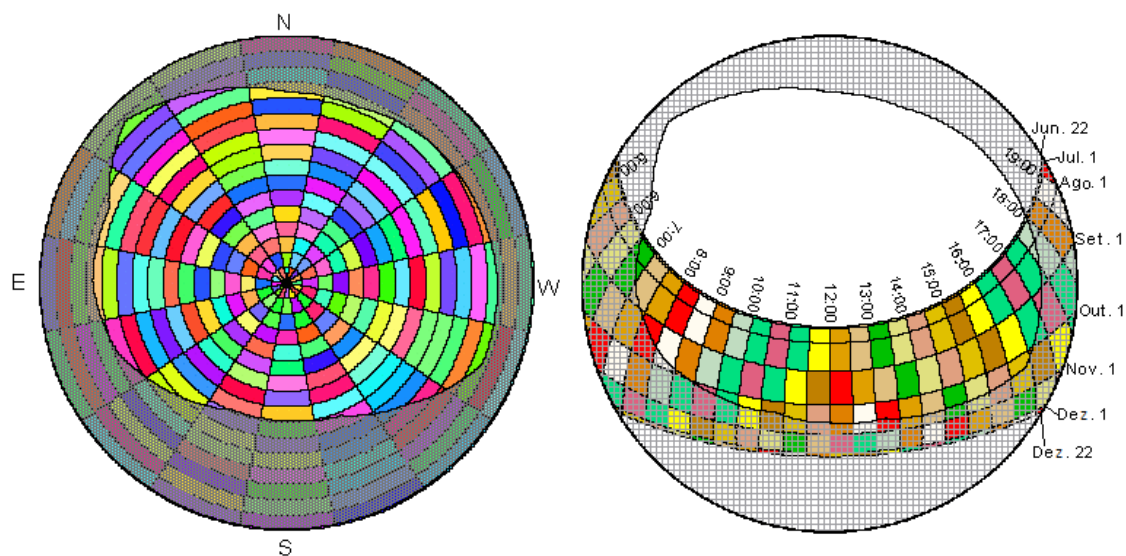


Figura 2.12 - Sobreposição dos mapas de distribuição da radiação difusa e o mapa da trajetória do disco solar ao mapa da porção visível do céu. Cores utilizadas apenas para individualizar os setores.

Fonte: Adaptada de Fu e Rich (1999b).

Para cada setor do céu, referente às porções visíveis, o cálculo e a distribuição da radiação solar são obtidos pelo ângulo de incidência entre os setores do céu e a superfície de interesse. Este ângulo corresponde ao ângulo entre o feixe de radiação solar e a normal à superfície (θ_0). Como descrito no item 2.1.4, o cálculo e distribuição da radiação solar em uma superfície é obtido pelo fator cosseno ($\cos \theta_0$) (ver Equação 2.7). As derivações topográficas bem como os ângulos solares necessários ao cálculo do fator cosseno são obtidos no funcionamento interno do algoritmo de cálculo da radiação solar.

2.3. Crescimento vegetal

O habitat natural de uma planta assim como as condições intrínsecas deste ser vivo determina as características relativas ao seu desenvolvimento e produção final. A radiação solar intervém diretamente sobre o crescimento e o desenvolvimento da planta e é fundamental à produção de biomassa.

O processo elementar responsável pelo crescimento vegetal é a fotossíntese. O processo de fotossíntese corresponde a uma série complexa de reações que utilizam a radiação fotossinteticamente ativa (PAR), definida entre os limites de 0,4 a 0,7 μm do espectro

visível, para transformar gás carbônico em açúcar e produzir assim matéria seca (CASTRO, 1987; GATES, 1980).

A intensidade de radiação solar está relacionada ao processo de fotossíntese, que permite uma cadeia de processos bioquímicos que resulta no crescimento vegetal. A quantidade de energia que a planta necessita em cada estágio fenológico é um valor praticamente constante para o mesmo cultivar (OMETTO, 1981). Porém, há um sistema complexo de relações ecofisiológicas no qual diferentes aspectos afetados pela energia solar atuam em mecanismos distintos envolvidos na produção de substâncias orgânicas pelas plantas. Num esquema simplificado do crescimento vegetal (Figura 2.13), são considerados os fatores do solo (físicos, químicos e biológicos) e atmosféricos (água e gás carbônico) como componentes de entrada da fotossíntese. Além do efeito direto sobre a condição física e química do solo, o clima atua nas transformações energéticas, através dos fatores luz e temperatura, que envolvem a fotossíntese e a respiração, principalmente, cujo regime e intensidade são características do metabolismo das plantas reguladas pelo seu potencial genético. No processo de respiração, as substâncias orgânicas, produzidas pelo processo de fotossíntese, são consumidas a partir de suas formas livres ou de tecidos de armazenamento. Estes processos são acompanhados por trocas metabólicas de menor intensidade, de energia e matéria, no sentido inverso, isto é, pelas vias de consumo e perdas de energia e de aporte de substâncias ao meio abiótico. Grande parte do aproveitamento da energia solar no espectro visível pela planta corresponde à fotossíntese. Uma pequena fração é utilizada na ativação de enzimas e no controle da expressão fenotípica e da fisiologia da planta em resposta do regime de luz, em mecanismo regulado por suas características genéticas. A produção de biomassa nas suas diferentes formas, explorada como alimentos, combustíveis ou fibras, corresponde à acumulação de energia resultante do balanço destas relações em tecidos de armazenamento (CASTRO, 1987).

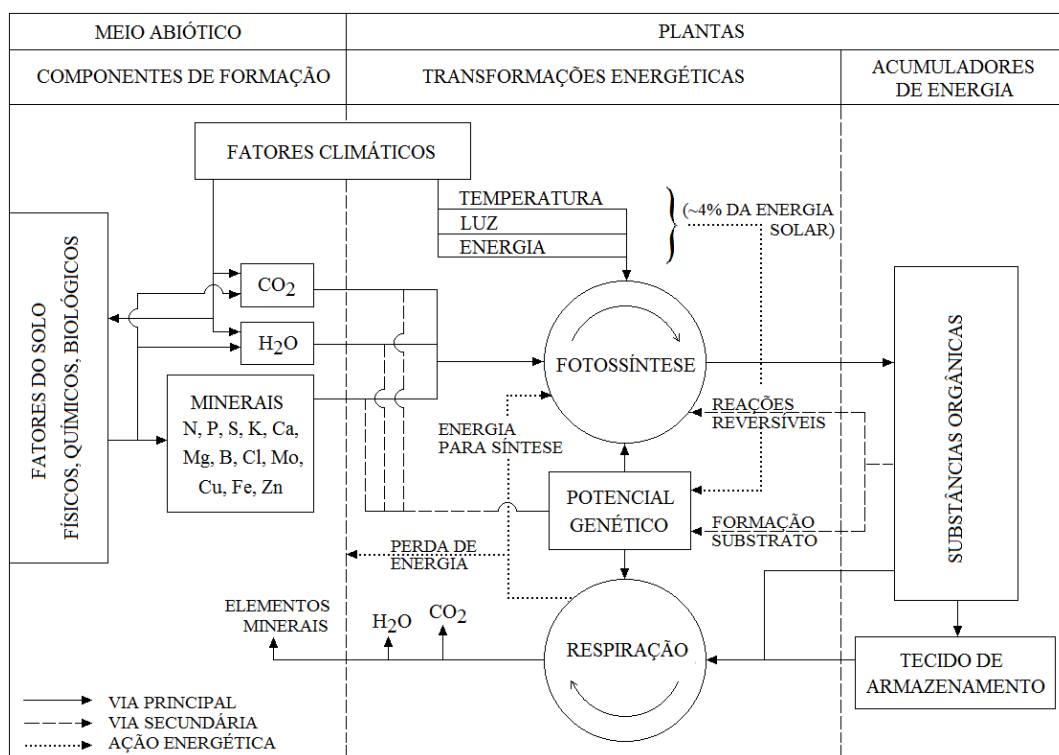


Figura 2.13 - Esquema simplificado da produção de substâncias pelas plantas.

Fonte: Adaptada de Castro (1987).

Dessa forma, a relação entre a quantidade de radiação solar disponível e o crescimento vegetal está sujeita à variação de diversos outros fatores, além de efeitos indiretos da própria radiação solar, como os níveis de evapotranspiração, que afetam a disponibilidade de água no solo (OMETTO, 1981), por sua vez também relacionada ao transporte de nutrientes, por exemplo. Portanto, até que se torne por si um fator limitante devido à extrema escassez, o efeito das variações do nível de radiação solar incidente sobre o crescimento vegetal deverá responder a uma combinação de condicionantes locais (climáticos e pedológicos) e à constituição genética das plantas observadas.

Em consequência desta complexidade, além de modificações no crescimento (BRUNORI et al., 1995), são encontradas na literatura algumas referências a mudanças no padrão temporal de florescimento (BARBOUR et al., 1980). De modo geral, estas observações são localizadas em regiões de latitude subtropical, onde há maior sensibilidade da radiação solar a mudanças de declividade e de orientação de vertentes.

Jackson (1966) relata um atraso de 2,8 dias no florescimento de uma mesma espécie entre plantas distantes apenas 8m, porém em vertentes contrapostas de um vale de orientação Leste-Oeste. Esta defasagem corresponde à expectativa dada por diferenças climáticas em relação a uma localidade a uma distância de 80km (para Norte, ou, em direção ao Pólo) ou a uma elevação de 85m. A mesma autora observou uma defasagem média de 7,2 dias no florescimento de todas as espécies incluídas em seu estudo quando se compararam as populações entre vertentes voltadas a Norte e a Sul, o que corresponde ao efeito de um deslocamento latitudinal de cerca de 210km, ou de 170m de elevação.

2.3.1. A cultura de eucalipto

As plantações florestais de eucalipto têm colaborado na produção de madeira e fibras em importante alternativa à exploração de florestas naturais (LEÃO, 2000). Com origem na Austrália, o (gênero) eucalipto possui cerca de 600 espécies adaptadas a diversas condições de solo e clima. No Brasil há uma grande diversidade de espécies do gênero *Eucalyptus spp.* utilizadas para reflorestamento (MORAIS, 2006). Dentre as espécies do gênero *Eucalyptus*, encontram-se a *camaldulensis*, *citriodora*, *cloezina*, *tereticornis*, *saligna* e *grandis*, que é a espécie mais plantada no país (MORA; GARCIA, 2000).

Para Santana et al. (2008), a produção destas florestas é determinada pela quantidade de radiação solar interceptada pela copa e pela eficiência de conversão dessa radiação em biomassa. No estudo de Brunori et al. (1995), o crescimento de *Eucalyptus occidentalis* e *Eucalyptus sargentii* foi variável entre as espécies. As diferenças foram atribuídas às características da espécie e sua adaptação às condições do meio, ao tipo de solo em que estão localizadas e aos impactos causados pelas condições de relevo na distribuição da precipitação, bem como na distribuição da radiação solar. Em outro estudo (MORAIS, 2006), o desenvolvimento do gênero *Eucalyptus spp.* foi relacionado com o espaçamento utilizado no plantio. Os resultados mostraram que o espaçamento apresentou impacto maior no crescimento do diâmetro do que na altura do eucalipto. De acordo com as condições dos estudos, o crescimento e desenvolvimento do gênero *Eucalyptus spp.* foi dependente não só da incidência de radiação solar responsável pelo

processo de fotossíntese assim como de outros fatores como espécie, tipo de solos, clima, manejo e espaçamento.

2.3.2. Métodos de avaliação do crescimento de florestas

Os métodos de avaliação do crescimento florestal utilizam dados obtidos por medições diretas ou indiretas. Os métodos de avaliação direta consistem na aquisição de dados por meio de medições em campo. As medições indiretas, por sensoriamento remoto, têm sido muito utilizadas em conjunto com as medições diretas. Além disso, a inclusão de dados externos que influenciam no crescimento e na distribuição das florestas tem colaborado na modelagem do crescimento florestal. Neste item serão descritos métodos de avaliação do crescimento florestal por levantamentos diretos, sensoriamento remoto e modelagem ecofisiológica.

2.3.2.1. Levantamentos diretos

A estimativa de crescimento por meio de levantamentos diretos é feita a partir de medições em campo realizadas nos inventários florestais, que normalmente incluem diâmetro da árvore à altura do peito e a altura dita *comercial* (SEGURA; KANNINEN, 2005). Nos levantamentos em campo também podem ser incluídas outras variáveis biofísicas de fácil medição em campo.

As medições das características quantitativas e qualitativas da população florestal são feitas em unidades amostrais, representadas por pontos, extensões de área (fixas ou variáveis), por linhas de amostragem ou mesmo por uma árvore individual. As parcelas de área fixa podem se assemelhar a figuras geométricas retangulares, circulares ou quadradas. No Brasil, em florestas plantadas, é comum a utilização de parcelas circulares ou retangulares entre 300 e 600 m² (SOARES et al., 2006).

Técnicas de modelagem e amostragem têm sido os principais meios de desenvolvimento pesquisado para o estudo do crescimento de florestas. De maneira geral, a amostragem corresponde a uma estimativa de crescimento de árvores individuais, a qual poderá ser modelada para obter a informação de crescimento em uma área extensa por expansão, numa técnica de otimização da medição direta (PARRESOL, 1999).

Vários estudos buscam quantificar o crescimento florestal por meio do desenvolvimento de equações alométricas. Estas são obtidas da aplicação de análises de regressão entre medidas diretas destrutivas, onde as árvores foram derrubadas, medidas e pesadas, e medições não-destrutivas de parâmetros biofísicos, como diâmetro, altura e área basal (NELSON et al., 1999; OVERMAN et al., 1994; SEGURA; KANNINEN, 2005).

2.3.2.2. Sensoriamento remoto

Os dados de crescimento florestal obtidos a partir de dados de sensoriamento remoto apresentam vantagens quanto à periodicidade da coleta, ao formato digital que permite um rápido processamento de grandes quantidades de informações, e a alta correlação entre as bandas espectrais e as variáveis de vegetação (LU, 2006).

Dados de sensores ópticos e de radar, bem como sua integração, têm colaborado na iniciativa de novas pesquisas, no aprimoramento do potencial dos resultados obtidos na estimativa de parâmetros biofísicos e consequente crescimento de florestas. Barbosa et al. (2014), Sarker e Nichol (2011) e Zheng et al. (2004) utilizaram imagens de sensores ópticos para estimativa de crescimento com base em variáveis da reflectância espectral, como índices de vegetação e textura, em conjunto com informações de campo. Para avaliação do potencial destes estudos, foram elaborados modelos de regressões lineares e múltiplas entre dados de crescimento medidos em campo e as variáveis derivadas das imagens. Da mesma forma, dados obtidos de imagens de radar (ENGLHART et al., 2011) têm colaborado na estimativa de crescimento de florestas, principalmente quando há a combinação destas informações com informações de imagens ópticas (CUTLER et al., 2012).

Alguns estudos têm considerado a influência da topografia sobre dados de sensoriamento para o mapeamento da cobertura vegetal e estimativa de crescimento (BARBOSA et al., 2014; RIAÑO et al., 2003), numa utilização da condição momentânea da iluminação durante a aquisição dos dados remotos. Esta aplicação de MDE como insumo para a distribuição de iluminação consiste na correção dos efeitos da topografia sobre os dados remotos, e não deve ser confundida com o uso almejado no presente estudo, em que constitui um fator bioclimatológico. Ressalta-se que a

utilização das informações de sensoriamento exerce função diagnóstica na estimativa de crescimento devido à especificidade do período de análise dos dados e da necessidade da presença física do alvo a ser estudado.

2.3.2.3. Modelagem ecofisiológica

A modelagem ecofisiológica consiste no estudo da adaptação da fisiologia dos organismos às condições ambientais diversas, o que corresponde à influência dos fatores ambientais sobre os organismos e seus processos fisiológicos. No contexto das ciências agrárias, tal conhecimento constitui a componente biótica do embasamento necessário para propor práticas de manejo, estimar a produtividade potencial de uma espécie e/ou cultura, simular o crescimento em áreas distintas, assim como estimar os fatores ambientais que limitam este crescimento (CASTRO, 1987). O crescimento ou a distribuição de uma determinada espécie está sujeito às relações com o meio físico (Figura 2.14). Iverson et al. (1994) consideraram em sua pesquisa que a distribuição do crescimento florestal é função do potencial de uma paisagem subsistir sob as condições climáticas, edáficas e topográficas existentes e o impacto cumulativo de atividades humanas.

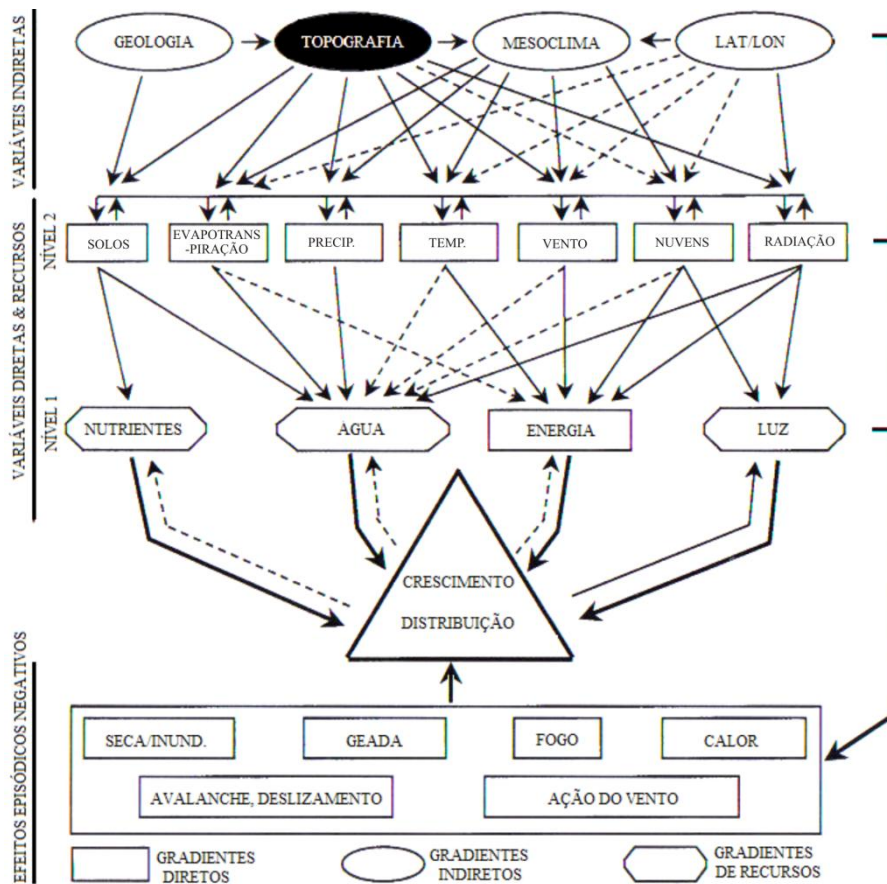


Figura 2.14 - Relações entre o meio físico e o crescimento e distribuição dos organismos.

Fonte: Adaptada de Guisan e Zimmermann (2000).

Diversas abordagens que utilizam a modelagem ecofisiológica podem ser aplicadas para estimar o crescimento de uma cultura e/ou espécie. Florinsky e Kuryakova (1996) realizaram análises comparativas da influência de variáveis topográficas sobre propriedades da cobertura vegetal em diferentes áreas de estudo. Os resultados indicaram boa correlação entre dados biofísicos da cobertura vegetal e as variáveis locais curvaturas vertical e horizontal, área de captação e as variáveis topográficas combinadas (índices topográficos). Estas combinações são descritores topográficos diversos elaborados como indicadores específicos de diferentes aspectos condicionantes do desenvolvimento arbóreo. Esta abordagem tem como pressuposto a relação dos descritores topográficos com fatores abióticos, principalmente (abstraídos os possíveis mecanismos de fitossociologia e de outras interações bióticas), sobretudo aqueles ligados a propriedades do solo e à hidrologia superficial (MOORE et al., 1993). A

caracterização paramétrica do relevo pode ser relacionada com estas propriedades por dois fundamentos distintos: como decorrência das propriedades físicas do material (substrato) do terreno e como condição para os processos de pedogênese ou morfogênese presentes e pretéritos. Em aplicações semelhantes no bioma amazônico, a despeito das pequenas variações altimétricas, esta abordagem permitiu a modelagem da composição florística e da distribuição espacial de espécies (BISPO et al., 2012), assim como uma melhoria importante na estimativa de biomassa (BISPO et al., 2014) em relação às técnicas de sensoriamento remoto (*i.e.*, polarimetria SAR) aplicadas isoladamente. Os fatores considerados nestes casos são direta e exclusivamente relacionados a componentes de formação, conforme o esquema de produção de biomassa, apresentado na Figura 2.13.

O efeito do relevo sobre a radiação solar incidente, por sua vez, atua sobre o aporte primordial de luz e calor para o conjunto de transformações energéticas, sobretudo o processo de fotossíntese (CASTRO, 1987), porém não exclusivamente. A distribuição espacial da temperatura está diretamente associada à incidência de radiação (XIN; CHENCHAO, 2008), que assim afeta também os ventos e a evaporação (OKE, 1978). Por fim, uma vez que os processos gerais de ciclagem de nutrientes do solo, decomposição de material orgânico e a solubilização e o transporte de minerais são dependentes dos regimes térmico e hídrico (MALAVOLTA, 1980), os efeitos da radiação solar se estendem indiretamente por todos os fatores (abióticos) de formação, sejam energia ou matéria (Figura 2.13). Desta forma, variações na radiação solar incidente podem representar efeitos diversos sobre o crescimento vegetal, que dependem do complexo sistema de relações ecofisiológicas envolvidas em cada situação.

Brunori et al. (1995) avaliaram o crescimento de duas espécies de eucalipto, em diferentes declividades e orientações de vertentes, localizadas no deserto de Negev em Israel. O efeito da declividade no crescimento das árvores de ambas espécies não foi significativo, o que levou os autores a concluir que as características do solo contribuíram na diferença de crescimento em locais com declividades distintas. Em contrapartida, as árvores em vertentes voltadas para o Pólo apresentaram maior

crescimento do que aquelas voltadas para o Equador e, em função das condições microclimáticas da região, a diferença de crescimento observado em vertentes distintas foi atribuída à distribuição da iluminação. Nas vertentes voltadas para o Pólo a iluminação direta anual do Sol é menor, o que favorece a redução dos níveis de evapotranspiração (numa área caracterizada por deficiência hídrica) e cria melhores condições de crescimento para as árvores. Assim como o efeito sobre a disponibilidade de água devido à evapotranspiração observada neste estudo foi preponderante para o desenvolvimento arbóreo, e de modo inverso à expectativa em relação à oferta de radiação solar, outros fatores devem ser considerados como possíveis efeitos, eventualmente antagônicos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

3.1.1. Áreas de estudo

Foram selecionadas inicialmente três áreas, nas latitudes equatorial, tropical e subtropical, representadas por quadrículas de aproximadamente 27x27 quilômetros, correspondentes a grades de 900x900 células (*pixels*) de dados do Topodata. Nas diferentes latitudes, foram selecionadas áreas que apresentassem diversidade topográfica, em função da presença de classes de declividade de plana a montanhosa, em vertentes que estivessem dispostas em orientações variando de Norte a Sul (Figura 3.1). A área 1 (Equatorial) localiza-se no município de São Gabriel da Cachoeira na região Norte do Estado de Amazonas nas sub-bacias hidrográficas conjugadas do rio Negro da Bacia hidrográfica do rio Amazonas (BRASIL, 2000). De acordo com os dados Topodata, o relevo dominante é suave ondulado e a declividade situa-se predominantemente entre 0,4% e 13,5%. A altitude varia de 44m a 1.044m. O tipo climático da região, pela classificação Köppen, é Af, caracterizado como tropical, com ausência de período seco ao longo do ano (BASTOS, 1982).

A área 2 (Tropical) localiza-se predominantemente nos municípios de Barra de São Francisco e Água Doce do Norte, região Noroeste do Estado de Espírito Santo, e no município de Mantena na região do Vale do Rio Doce no estado de Minas Gerais. A região localiza-se nas Bacias costeiras do Sudeste, especificamente nas sub-bacias conjugadas do rio São Mateus e do rio Doce (BRASIL, 2000). Os dados Topodata indicam que o relevo dominante é forte ondulado com declividades predominantemente entre 3,7% e 45% e altitude entre 128m e 932m. Segundo a classificação Köppen o clima da região é classificado como Aw, caracterizado como tropical, com maior pluviosidade no verão do que no inverno (BRASIL, 2005).

A área 3 (Subtropical) localiza-se predominantemente nos municípios Morro Grande e Timbé do Sul, na região Sul do Estado de Santa Catarina e no município São José dos Ausentes na região Nordeste do Estado de Rio Grande do Sul na sub-bacia hidrográfica do rio Uruguai da Bacia hidrográfica do rio da Prata (BRASIL, 2000). O relevo

dominante é ondulado a forte ondulado, com declividades predominantemente entre 3% e 45% e altitude entre 133m e 1.386m, de acordo com os dados Topodata. Apresenta um clima quente e temperado com pluviosidade significativa ao longo do ano e de acordo com a classificação Köppen a área está inserida entre os tipos climáticos Cfa e Cfb, caracterizados como subtropical e temperado, respectivamente (PANDOLFO et al.,2002).

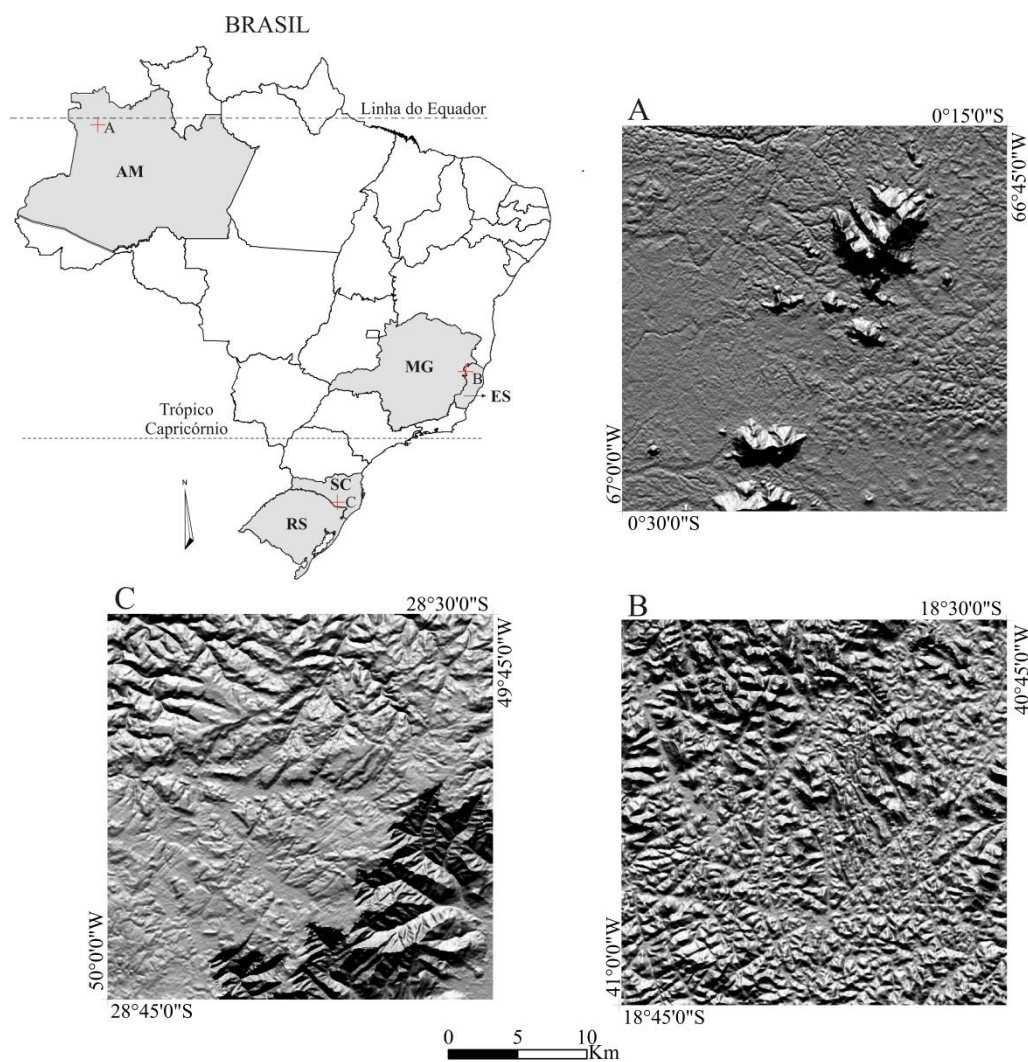


Figura 3.1 - Relevo sombreado (Sol de Norte, a 45° de elevação e MDE com exagero vertical de 3x): A - área de estudo 1 (Equatorial); B - área de estudo 2 (Tropical) e C - área de estudo 3 (Subtropical).

Para o estudo de caso envolvendo os dados florestais, a área de estudo 4 foi estabelecida em função da disponibilidade de dados correspondente a plantios de *Eucalyptus spp.*

(Figura 3.2). A área pertence à indústria Votorantim Celulose e Papel, localizada no Município de Capão Bonito, região Sudoeste do Estado de São Paulo, na Bacia hidrográfica do rio da Prata na sub-bacia hidrográfica do rio Paraná (BRASIL, 2000). Com base na classificação de Köppen, Setzer (1946) atribui para a região os tipos climáticos Cfa e Cfb, ambos sem estiagem. O relevo predominante desta região é ondulado com a presença de colinas de topos convexos e tabulares. A vegetação caracteriza-se pela presença de Savana e Floresta Ombrófila, a qual foi substituída ao longo dos anos por atividades agrícolas e reflorestamentos (CANAVESI, 2008).

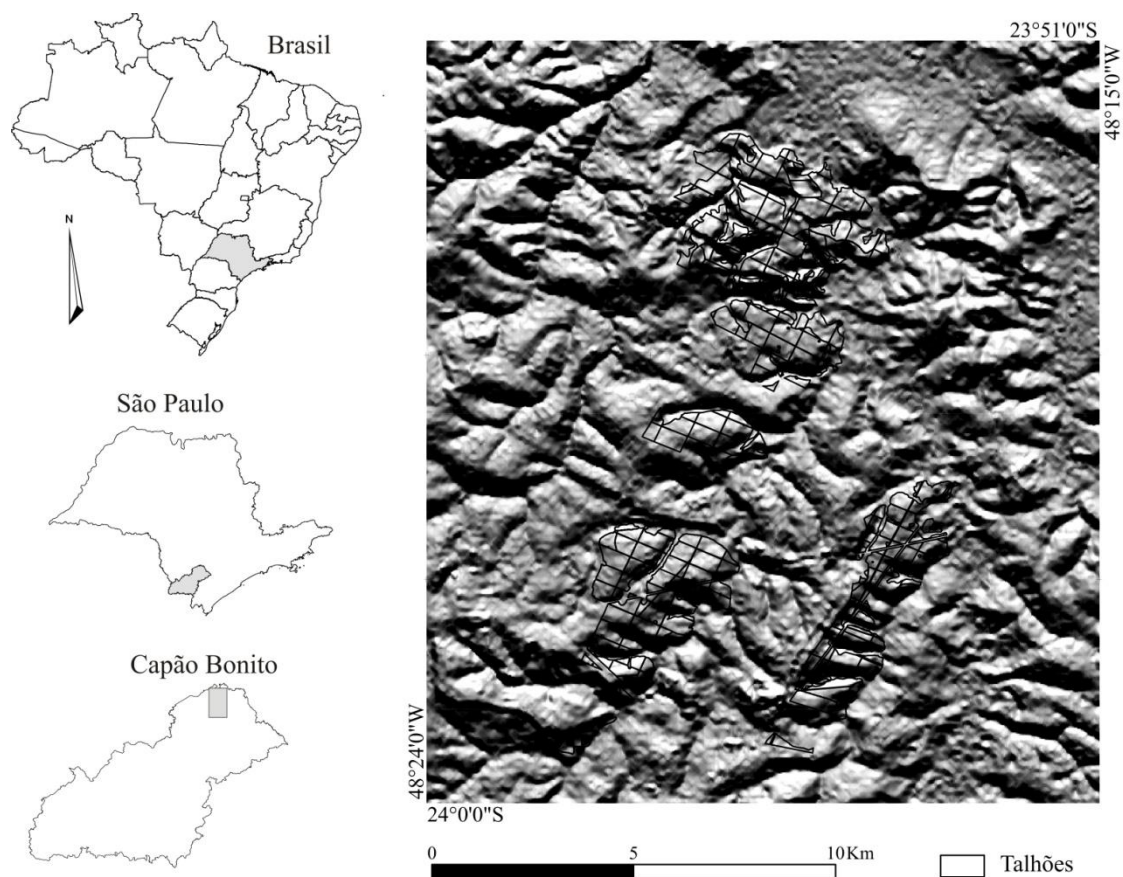


Figura 3.2 - Relevo sombreado (Sol de Norte, a 45° de elevação e MDE com exagero vertical de 3x) da área de estudo 4. Limites dos talhões de *Eucalyptus spp.* sobrepostos.

3.1.2. Dados

3.1.2.1. Dados de relevo

Para atendimento dos objetivos específicos foram utilizadas derivações locais do MDE do SRTM disponíveis no banco de dados Topodata (BRASIL, 2008) referentes à

altitude, declividade, orientação de vertentes e curvatura horizontal. Como especificado no item 2.2.2, para o cálculo da radiação solar foi utilizado somente a variável topográfica altitude, uma vez que as derivações necessárias ao cálculo do cosseno do ângulo de incidência são obtidos no funcionamento interno do algoritmo de cálculo da radiação solar. Os dados de declividade e orientação de vertentes do Topodata foram utilizados para as análises conjuntas da relação da radiação solar anual calculada e o relevo. A curvatura horizontal foi utilizada como base da correção geométrica do vetor dos talhões de *Eucalyptus spp.*

3.1.2.2. Dados atmosféricos

Foram utilizados dados atmosféricos referentes a porção da radiação difusa (P_{dif}) e a transmitância atmosférica (τ). A condição *default* do algoritmo, de nome *clear sky* (FU; RICH, 2000), utiliza o valor aproximado da P_{dif} igual 0,3 e o valor de τ igual a 0,5. Nos testes relacionados à atmosfera, as condições atmosféricas foram determinadas de acordo com a literatura pelo índice de claridade kt (razão entre a radiação solar global diária incidente no terreno e a radiação solar diária no topo da atmosfera) e classificadas em céu nublado, céu parcialmente nublado e céu claro. Os dados adotados para realização dos testes (Tabela 3.1) foram determinados conforme a parametrização realizada por Alves et al. (2013), que em seus estudos definiram a porção da radiação difusa e da transmitância atmosférica para o cálculo da radiação solar incidente, em Cuiabá-MT, levando em consideração diferentes intervalos de kt . O índice de claridade médio para a área de estudo ($kt = 0,47$) está dentro do intervalo obtido por Valiati e Ricieri (2005) na região de Cascavel –PR, que apresentou valores mínimos de kt médio anual (média dos kt mensais mínimos) de 0,163 e valores máximos de kt médio anual (média dos kt mensais máximos) de 0,55. De forma subsidiária, foram observados ainda dados do Atlas de Energia Solar (PEREIRA et al., 2006), para avaliação e considerações sobre as alternativas de parametrização da atmosfera.

Tabela 3.1 - Dados dos parâmetros atmosféricos adotados

Condições atmosféricas	Porção da radiação difusa(P_{dif})	Transmitância(τ)
Céu Claro	0,2	0,68
Céu Parcialmente Nublado	0,32	0,49
Céu Nublado	0,77	0,13

3.1.2.3. Dados de inventário florestal

Os dados utilizados no estudo de caso com *Eucalyptus spp.*, fornecidos pela empresa Votorantim Celulose e Papel (VCP), referem-se a talhões como unidade de registro individual, cujo levantamento é feito em parcelas para composição do inventário florestal. Estes dados contêm especificação de tipo de solo, espaçamento, data de plantio, idade da planta, espécie e produtividade (m^3/ha) do volume total de madeira com casca (VTCC). O arquivo disponibilizado pela VCP corresponde a dados históricos referentes ao ano de 2003.

A VCP realiza uma amostragem de campo por parcelas que contêm 60 árvores dispostas em 6 linhas de 10 árvores, de tamanho variável conforme o espaçamento de plantio. Para o cálculo do tamanho da parcela são medidos os comprimentos de cada fila e duas larguras, uma entre as árvores 1 e 60 e outra entre as árvores 10 e 51. São coletados os dados de Circunferência a Altura do Peito (CAP), a altura das 5 árvores dominantes da parcela e a altura das árvores da primeira linha. Todas as alturas foram medidas por meio de um hipsômetro de Haga.

Para o cálculo do volume de madeira (m^3/ha) a VCP utilizou como base os dados referentes ao CAP, altura das árvores (H) e o tamanho da parcela. De maneira geral, o volume real de madeira é obtido por meio da multiplicação do volume cilíndrico (V_c) por um fator de forma da floresta (ff) (Equações 3.1 e 3.2). Para obter o volume em cada parcela são utilizados modelos hipsométricos em conjunto com modelos volumétricos (FRANCEZ et al., 2010).

$$V_c = [(\pi \times CAP^2)/4] \times H \quad (3.1)$$

$$V_{\text{árvore}} = V_c \times ff \quad (3.2)$$

3.1.3. Recursos de análise

O cálculo da radiação solar foi feito pelo modelo de radiação solar espacial com o módulo *Solar Analyst* (FU; RICH, 1999b), como descrito no item 2.2.2, implementado no programa ArcGIS 9.3 (ESRI, 2006). Neste mesmo programa, foram feitas operações de pré-processamento (correção geométrica e contraste), quando necessárias. Para o geoprocessamento e execução de análises estatísticas de regressão entre imagens foi utilizado o programa Idrisi Selva 17.0 (EASTMAN, 2012). As análises de estatística descritiva foram feitas no pacote estatístico R (R CORE TEAM, 2013). Os testes de comparação de médias entre variáveis foram feitos no pacote estatístico Minitab 14 (MINITAB, 2003). Outros programas foram utilizados na conversão de formatos para auxiliar a migração de arquivos entre os programas diversos, dentre eles, o SPRING 4.3.3 (CÂMARA et al., 1996) e o Global Mapper 13.0 (GLOBAL MAPPER LLC, 2011).

3.2. Plano geral de trabalho

Para atender ao objetivo geral da pesquisa foram desenvolvidas atividades com o intuito de aplicar o MDE obtido do SRTM ao cálculo da distribuição de radiação solar incidente na superfície terrestre. Para conhecimento do comportamento geral da radiação solar, foram aplicados testes sobre uma área na região subtropical para verificar o efeito de condições topográficas e atmosféricas e em mais duas áreas, nas regiões equatorial e tropical, para o efeito da latitude (Figura 3.3). Posteriormente, um estudo de caso sobre uma área específica de plantio de *Eucalyptus spp.* foi elaborado para verificar a relação entre os resultados calculados e dados de crescimento vegetal.

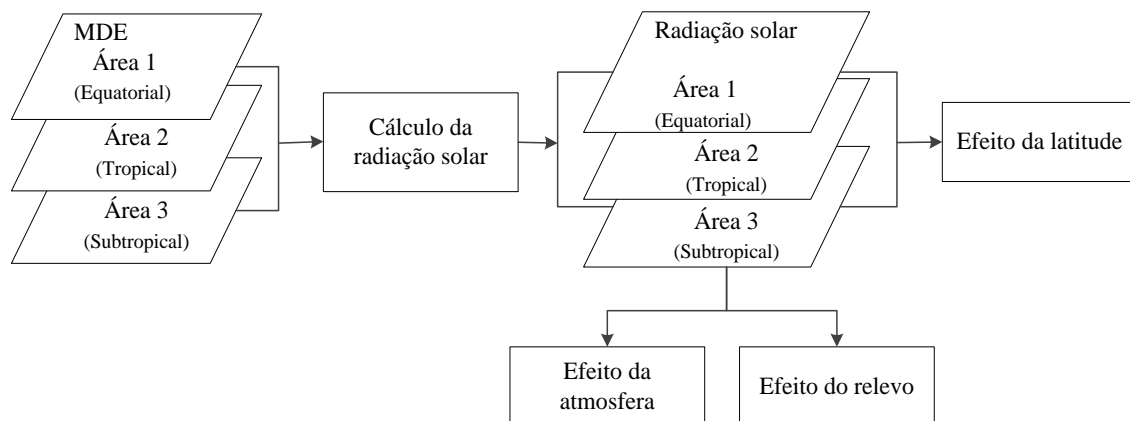


Figura 3.3 – Fluxo geral das atividades de análise do comportamento da radiação solar.

As seguintes atividades foram desenvolvidas:

A. Testes dos parâmetros de operação do algoritmo de cálculo da radiação solar anual: a radiação solar anual foi calculada com diferentes níveis de resolução da caracterização da atmosfera (*skysize*) e da descrição do horizonte (*viewshed*). A observação dos resultados destes testes, bem como os aspectos operacionais (tempo de processamento) serviram de base para a seleção das condições de operação a serem adotadas como padrão nos demais ensaios.

B. Análise das características da radiação solar: a radiação solar foi calculada para períodos diário, mensal, semestral e anual de acordo com a padronização obtida na atividade A. Os níveis típicos de radiação solar e seus padrões de distribuição no terreno foram analisados para todos os períodos sob diferentes condições de relevo e latitude. A descrição das variações da radiação solar no terreno para as condições de período, relevo e localização serviu de apoio para aplicação das atividades seguintes.

C. Testes da sensibilidade da radiação solar às características do relevo: os valores de radiação solar anual foram examinados em conjunto com as classes de declividade do terreno. Foram observadas características da dispersão dos resultados (máximos, mínimos, média e amplitude) em cada classe de declividade.

D. Testes da sensibilidade da radiação solar às condições atmosféricas: a radiação solar anual foi calculada para condições atmosféricas variáveis, em combinações de seus parâmetros (porção da radiação difusa e transmitância) típicas de dias de céu claro,

parcialmente nublado e nublado, de acordo com a literatura. Em cada situação, foram observadas as frações direta e difusa da radiação solar e o total obtido foi relacionado às características do relevo nos mesmos testes feitos no item C. A estes testes foram acrescentadas análises da correlação das componentes diretas e difusa da radiação solar com as variáveis topográficas declividade e orientação de vertentes. Por fim, foram avaliados os desvios e a correlação decorrentes de uma parametrização fixa da atmosfera em relação a condições variáveis.

E. Sensibilidade da radiação solar à latitude: a radiação solar anual foi calculada em áreas localizadas nas regiões equatorial, tropical e subtropical, em que foram examinadas as diferenças de distribuição dos resultados absolutos e se repetiram os testes (C) de sua relação com características do relevo. Também foram analisadas as correlações da radiação solar com a declividade e orientação de vertentes nas diferentes localidades.

F. Estudo de caso de plantio de *Eucalyptus spp.*: a radiação solar anual foi calculada conforme a padronização obtida na atividade A e relacionada com a produtividade dos talhões. Foram feitos testes de comparação de médias, para um único material genético, para simplificação do estudo e análise do grau de influência dos condicionantes de crescimento espaçamento, tipos de solos e suas combinações na resposta da produtividade do material genético à radiação solar. Aos testes foram acrescentadas análises da correlação da radiação solar anual com a variável produtividade para o conjunto de dados com os menores coeficientes de variação da radiação solar anual nos talhões. No caso de correlação não significativa, a relação entre a produtividade e radiação solar anual foi obtida por testes de comparação de médias da produtividade para os grupos de talhões mais iluminados e menos iluminados.

3.3. Metodologia

Para a metodologia desenvolvida nos testes, de modo geral, foi utilizada a área de estudo 3 (Subtropical) devido a sua localização na latitude de 28°S favorecer as condições de variações da radiação solar que se pretendeu observar. Somente para os testes envolvendo o efeito da latitude (3.2-B e E) foram acrescentadas as áreas 1 (Equatorial) e 2 (Tropical), para comparação. Para o teste de aplicação em plantio de

Eucalyptus spp. (3.2-F), foi utilizada a área de estudo 4, cuja localização foi determinada pelos dados de inventário florestal.

Os testes isolados de parâmetros atmosféricos (transmitância e porção difusa) levaram à adoção dos níveis *default* do algoritmo, correspondentes as condições atmosféricas de *clear sky* (na terminologia de Fu e Rich, 2000), nos experimentos gerais. Nos testes específicos envolvendo a atmosfera (3.2-D), foram aplicados os níveis correspondentes a céu claro, parcialmente nublado e nublado, obtidos por Alves et al. (2013). No teste com os dados de crescimento de *Eucalyptus spp.* (3.2-F), foram utilizados os parâmetros atmosféricos de dias claros, após observação dos demais resultados frente às condições observadas nas áreas de plantio.

3.3.1. Funcionamento do algoritmo

Foram analisadas as variações causadas por mudanças nos parâmetros de funcionamento do algoritmo referentes à resolução da caracterização da atmosfera (*skysize*) e a descrição do horizonte (*viewshed*). Estes dados foram modificados, mantendo-se como parâmetros constantes nos cálculos de radiação solar o ano de 2013, como período analisado, e fator de proporcionalidade (*zfactor*) de 0,00000996. Este fator é a proporção entre a unidade que expressa a dimensão vertical e aquela das coordenadas x e y . No caso, MDE com altitude em metros e coordenadas em graus decimais, há uma variação do *zfactor* de acordo com a latitude da área de estudo. Portanto, o valor usado para testes em outras áreas foi igualmente ajustado segundo esta variação.

Os dados utilizados para cada parâmetro nos testes realizados (Tabela 3.2) foram modificados individualmente. Para efeito da análise de sensibilidade da modificação dos parâmetros de funcionamento do algoritmo, o teste 1, foi adotado como base.

Foi analisada a sensibilidade do algoritmo ao detalhamento da distribuição de radiação difusa na abóbada celeste por meio da alteração do parâmetro *skysize*. De maneira recíproca e independente, a sensibilidade do algoritmo à descrição do horizonte foi analisada, alterando-se o parâmetro de *viewshed*. Foram observados as alterações nas

distribuições dos valores absolutos da radiação solar anual resultante bem como comparado o tempo de processamento para cada teste.

Tabela 3.2 - Parâmetros de funcionamento do algoritmo utilizados nos testes de análise.

Teste	Skysize	Viewshed
1	200	16
2	400	16
3	200	32

3.3.2. Análise dos níveis típicos e distribuição da radiação solar no terreno

A radiação solar foi calculada para períodos diário, mensal, semestral e anual nas áreas de estudo 1 a 3 (Figura 3.1), as quais estão localizadas nas regiões equatorial, tropical e subtropical, respectivamente. O cálculo para o período diário foi feito para os dias de solstícios (verão e inverno) e o dia de um dos equinócios (*i.e.*, nos dias de equinócio o cálculo da radiação solar é invariável em virtude do ponto de simetria da declinação solar no Equador nestes dias). No período mensal, as observações foram feitas nos meses de junho (inverno), setembro (primavera) e dezembro (verão). A radiação solar semestral foi calculada para o semestre primavera (setembro a março) e outonal (março a setembro).

A radiação solar calculada em cada período foi fatiada em intervalos que representassem seus níveis típicos em todas as localizações e em todas as datas de análise, o que possibilitou a comparação e a análise de variação da radiação solar no terreno entre as diversas instâncias testadas. A análise inicial consistiu em observar o efeito geral das variáveis topográficas, declividade e orientação de vertentes, no cálculo da radiação solar. Para cada período de análise foram observadas as variações dos níveis típicos de radiação solar e seu comportamento de distribuição em cada dia, mês ou semestre, em todas as latitudes. Por fim, os níveis típicos de radiação solar incidente no terreno foram comparados entre si e suas respectivas faixas de variação descritas em cada período.

3.3.3. Efeito do relevo

A análise do efeito do relevo consistiu no exame conjunto dos dados de radiação solar anual com os dados das classes de declividade do terreno. Foram consideradas as classes de declividade do terreno plano (0% a 3%), suave ondulado (3% a 8%), ondulado (8% a 20%), forte ondulado (20% a 45%), montanhoso (45% a 75%) e escarpado (acima de 75%), segundo a classificação realizada por EMBRAPA (1999).

Os testes foram realizados inicialmente em SIG, por meio da consulta dos dados de radiação solar em cada classe de declividade. Os valores de radiação solar máximos, médios, mínimos e amplitude foram obtidos para cada classe de declividade do terreno e posteriormente registrados em planilha.

A dispersão dos dados resultantes da consulta foi obtida pela relação entre os dados presentes na planilha. A relação foi dada pela associação de cada classe de declividade aos respectivos valores de radiação solar (máximos, médios, mínimos e amplitude), representada na forma gráfica.

3.3.4. Efeito da atmosfera

Foi feita a caracterização dos parâmetros atmosféricos em diferentes períodos de análise por meio de combinações dos dados de transmitância e porção da radiação difusa. Para isso, os dados atmosféricos do *default* do programa *Solar Analyst* foram comparados com os dados da parametrização de Alves et al. (2013), obtidos da estação meteorológica de Cuiabá, e os dados sazonais extraídos do Atlas de Energia Solar (PEREIRA et al., 2006).

A análise do efeito da atmosfera no cálculo e distribuição da radiação solar foi desenvolvida em etapas. A radiação solar anual foi calculada para cada condição atmosférica de acordo com os parâmetros descritos na Tabela 3.1 (item 3.2.2.2).

Na primeira etapa foi analisada a sensibilidade da radiação solar a condições atmosféricas variáveis. Dessa maneira, a radiação solar total incidente na superfície calculada para as condições atmosféricas de céu claro, parcialmente nublado e nublado foi relacionada com as características do relevo de acordo com a metodologia descrita

no item 3.3.3. Os valores de radiação solar resultantes de diferentes condições atmosféricas foram avaliados em termos de proporções e graus de correlação.

A etapa seguinte consistiu em observar os resultados referentes às componentes da radiação incidente no terreno, difusa e direta, para cada condição atmosférica. Os valores absolutos das componentes foram divididos pela radiação solar total incidente para determinar suas proporções, cujas relações com a declividade e orientação de vertentes foram avaliadas em diagramas de dispersão e por análises de regressão.

Por fim, foi analisada a relação entre resultados obtidos para dias claros e obtidos sob diferentes proporções de dias nublados, para avaliar a padronização dos parâmetros atmosféricos em experimentos e aplicações em que não se conheça a distribuição anual de condições atmosféricas, como planejamento, por exemplo. Nestes casos, pode-se usar os resultados de radiação apenas em termos proporcionais para caracterizar a distribuição espacial relativa da radiação solar.

Além de limitar a leitura dos resultados, é necessário desconsiderar possíveis interações entre épocas do ano (correlatas a diferentes dinâmicas diurnas de insolação) e as condições atmosféricas. O montante anual de radiação solar anual incidente (R_{yr}) será então a média dos resultados obtidos para cada tipo de dia ($R_{yr,cl}$, $R_{yr,pn}$, $R_{yr,nb}$) ponderada pelos respectivos números de dias de ocorrência ao longo do ano (n_{nb} , n_{pn} e n_{cl}), como na Equação 3.3:

$$R_{yr} = (n_{nb} R_{nb} + n_{pn} R_{pn} + n_{cl} R_{cl}) / 365 \quad (3.3)$$

As componentes R_{nb} , R_{pn} e R_{cl} são distribuídas no espaço de acordo com a topografia, de modo que existe implicitamente uma função T_{xy} atuando na espacialização da radiação incidente diferentemente em cada situação da atmosfera. Para usar resultados obtidos sob uma única condição, como por exemplo, dias claros, é necessário considerar que há um fator de ajuste para a radiação em dias nublados e parcialmente nublados, respectivamente k_{nb} e k_{pn} , em relação à radiação em dias claros. A favor desta premissa está o fato de que a radiação em dias claros em certa medida será sempre superior àquela incidente em dias nublados, portanto, com maior peso de cada dia individual no

cômputo anual. A radiação anual seria calculada modificando-se a Equação 3.3 para que possa ser simplificada:

$$R_{yr} = (n_{nb} k_{nb} R_{cl} + n_{pn} k_{pn} R_{cl} + n_{cl} R_{cl}) / 365 \quad (3.4)$$

$$R_{yr} = R_{cl} (n_{nb} k_{nb} + n_{pn} k_{pn} + n_{cl}) / 365 \quad (3.5)$$

Dada uma área em que haja uma uniformidade espacial no padrão sazonal de distribuição de dias nublados, parcialmente nublados e claros, considera-se a distribuição relativa de n_{nb} , n_{pn} e n_{cl} como uma característica climatológica local. Portanto, um fator (k_{aa}) local de proporcionalidade entre a radiação anual R_{yr} e R_{cl} seria dado por:

$$k_{aa} = (n_{nb} k_{nb} + n_{pn} k_{pn} + n_{cl}) / 365 \quad (3.6)$$

Isso permite que a componente atmosférica anual seja representada por uma constante de proporcionalidade que caracteriza uma região homogênea em termos de padrão anual de nebulosidade. Porém, todas as premissas exigidas para tal simplificação trazem possíveis desvios em relação aos resultados obtidos com representação da atmosfera distribuída nas três condições. Para avaliar este efeito da simplificação das condições atmosféricas, ainda que não se consideram interações com sua distribuição sazonal, foram aplicadas análises de correlação dos resultados anuais com dias claros somente em relação à radiação anual obtida com diferentes proporções de dias nublados e parcialmente nublados. Com os resultados da análise, foi possível estimar a aderência, os desvios e os erros da adoção de parâmetros de uma atmosfera constantemente clara, em relação à uma parametrização variada, ainda que de maneira simplificada.

3.3.5. Efeito da latitude

Os dados de radiação solar anual foram calculados nas diferentes latitudes em que se encontram as áreas 1 a 3 (Figura 3.1). A sensibilidade da radiação solar à latitude foi analisada segundo sua distribuição nas áreas planas e montanhosas, separadamente. Assim, foram selecionadas as classes de declividade do terreno plano (0% a 3%) e

montanhoso (45% a 75%) e posteriormente, por meio de histogramas, foi possível observar a distribuição da radiação solar para tais classes de declividade nas latitudes das áreas 1, 2 e 3 (Figura 3.1).

Além da observação direta das diferenças em níveis absolutos entre as latitudes testadas, foram avaliadas as mudanças na relação com as características do relevo (segundo a metodologia descrita no item 3.3.3). Além disso, foi também avaliada a relação da radiação solar anual com a declividade e a orientação de vertentes em cada latitude testada.

3.3.6. Relação da radiação solar no crescimento de *Eucalyptus spp.*

A radiação solar anual incidente nos talhões foi calculada de acordo com os parâmetros de funcionamento do algoritmo determinados no item 3.3.1. Os dados de inventário florestal foram organizados conforme o número de talhões a serem analisados, os quais foram dispostos em ordem crescente de 1 a 154. A cada talhão foram associados os dados inventariados correspondentes a material genético, idade, tipo de solo, espaçamento e produtividade.

A correção geométrica da posição dos talhões em relação aos dados Topodata foi feita com base na imagem de curvatura horizontal. Os pontos foram obtidos em locais de cruzamento das linhas de drenagem, distribuídos ao longo de todas as direções (Norte, Sul, Leste e Oeste).

Para contornar possíveis imprecisões da correção geométrica, efeitos de borda ou qualquer contaminação por áreas vizinhas, foi aplicado um operador de distância para remoção de uma faixa periférica no cômputo dos dados de cada talhão (Figura 3.4). Foram testadas larguras de 30m e 60m, com base nas modificações das estatísticas descritivas da radiação solar, sobretudo a redução do coeficiente de variação dentro de cada talhão, além da observação de sobreposições com a curvatura horizontal e com outras representações do relevo. Neste processo, a distância de 60 metros apresentou melhores resultados e promoveu redução de aproximadamente 10% da área total dos talhões. Ressalta-se que alguns talhões foram eliminados após o processo de remoção da faixa com largura de 60m.

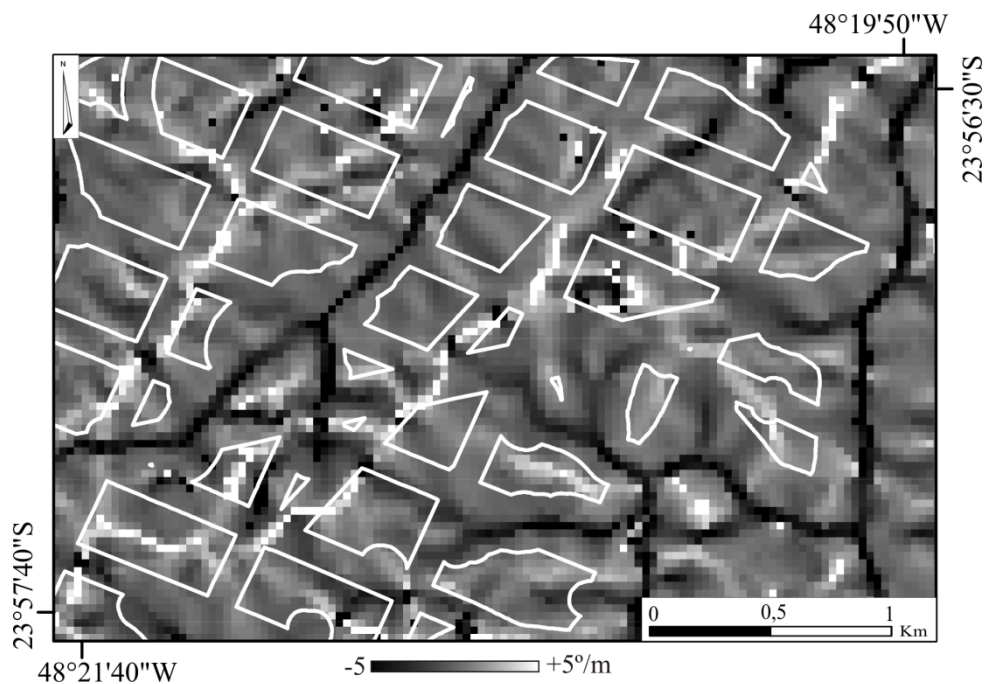


Figura 3.4 - Imagem de curvatura horizontal e área dos talhões após redução da largura de 60 m.

O conjunto total de dados florestais foi dividido em subconjuntos na busca de populações uniformes em termos dos dados históricos disponíveis para este estudo de caso. A maioria dos dados corresponde a talhões de *Eucalyptus saligna* (ESA), que em decorrência foi o material genético selecionado para o estudo (Figura 3.5). A relação entre os dados de produtividade e a radiação solar foi obtida para os talhões com menor variação da radiação solar anual (coeficiente de variação <1%), agrupados em conjuntos cujos demais condicionantes de crescimento se mostrassem homogêneos. Estes conjuntos foram determinados por intervalos de diferenças significativas obtidos de testes de comparação de médias da variável produtividade para os condicionantes agrônômicos espaçamento, tipos de solos e suas combinações. A relação entre os dados de produtividade e radiação solar anual foi fornecida pelo grau de correlação entre as variáveis, estimada por análise de regressão. Ressalta-se que a análise foi realizada apenas para os subconjuntos que apresentaram no mínimo 3 talhões.

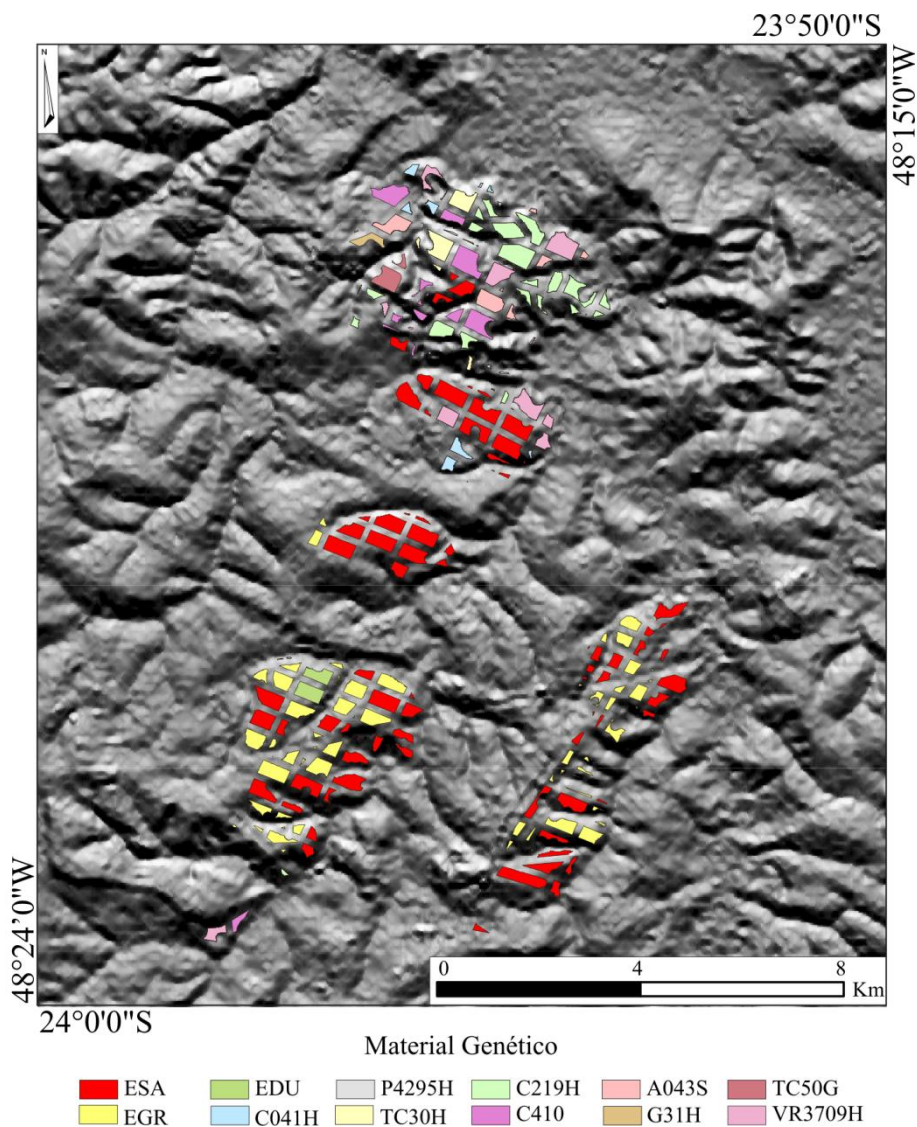


Figura 3.5 - Relevo sombreado (Sol de Norte, a 45° de elevação e MDE com exagero vertical de 3x): Localização e distribuição do material genético de *Eucalyptus spp.* presente nos talhões: *Eucalyptus Saligna* (ESA), *Eucalyptus Grandis* (EGR) e *Eucalyptus Durni* (EDU).

As análises de regressão foram acompanhadas de testes de comparação de médias para síntese dos dados e análise do grau de influência de grupos de áreas mais iluminadas e menos iluminadas na resposta da produtividade à radiação solar anual. Os esquemas de agrupamento seguiram uma sequência de quantis sucessivamente menores, de mediana a quartis, com análises de variância dos contrastes entre os grupos extremos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados neste capítulo foram divididos em três partes principais. A primeira parte consiste na observação do efeito das variações dos parâmetros de funcionamento do modelo e dos resultados gerais de radiação solar nas três áreas escolhidas para conhecimento de sua distribuição. A etapa seguinte descreve as análises das relações entre relevo, atmosfera e latitude com a radiação solar anual. Por fim, a partir das análises obtidas nas etapas anteriores apresentam-se os resultados experimentais da relação entre a radiação solar anual e o crescimento vegetal de *Eucalyptus spp.*

4.1. Caracterização da radiação solar

4.1.1. Parâmetros de funcionamento do modelo de radiação solar

A definição dos parâmetros de funcionamento do modelo de radiação solar consistiu na avaliação da sensibilidade da radiação aos níveis de resolução da caracterização da atmosfera (*skysize*) e da descrição do horizonte (*viewshed*). A Tabela 4.1 corresponde a radiação solar anual média e seus desvios observados nos testes de análise dos parâmetros de funcionamento do modelo. Segundo estes resultados, as diferenças entre os valores médios de radiação solar do teste base (1) com os testes 2 e 3 são correspondentes a 0,08697% e -0,00649%, respectivamente.

A comparação por análise visual destes resultados (Figura 4.1) mostrou que as principais diferenças de distribuição da radiação solar entre os testes, apesar de serem pequenas (máximo de 17,21 kWh/m², ante média em torno de 1,6MWh/m²), mostraram-se associadas às condições do relevo e apresentaram as maiores variações nas áreas montanhosas. Apesar do aumento da resolução do *skysize* ter demonstrado maior precisão do modelo para o cálculo da radiação solar anual nas áreas montanhosas (ver Figura 4.1 - A e B), o tempo de operação do algoritmo aumentou em aproximadamente 162% com o maior detalhamento da resolução. Diante do pequeno ganho em relação ao aumento do custo computacional, para os demais processamentos foi adotado *skysize* de 200 que, de acordo com o que recomendam os resultados de Fu e Rich (1999b) e os

objetivos deste estudo, representa uma resolução satisfatória para caracterizar a distribuição da radiação difusa na abóbada celeste.

Para os testes de *viewshed* foi possível observar que com o aumento do conjunto de direções, as áreas montanhosas apresentaram-se mais detalhadas (ver Figura 4.1 - A e C), o que indica maior precisão do cálculo da radiação solar nestas condições. Apesar disso, o tempo de operação do algoritmo reduziu em aproximadamente 82% ao se utilizar o menor conjunto de direções. Portanto, em virtude das mínimas diferenças visuais e dos dados e resultados observados, foi adotado o conjunto mínimo de direções, correspondente a 16, que atendem aos objetivos da pesquisa e, de acordo com Fu e Rich (1999b), tornam o processamento computacional menos intensivo.

Tabela 4.1 - Radiação solar anual obtida dos testes de análise dos parâmetros de funcionamento do modelo.

Teste	Skysize	Viewshed	Média anual (W.h/m ²)	Desvio Padrão
1	200	16	1.643.648	213241,9
2	400	16	1.642.219	213367,3
3	200	32	1.643.754	213296,2

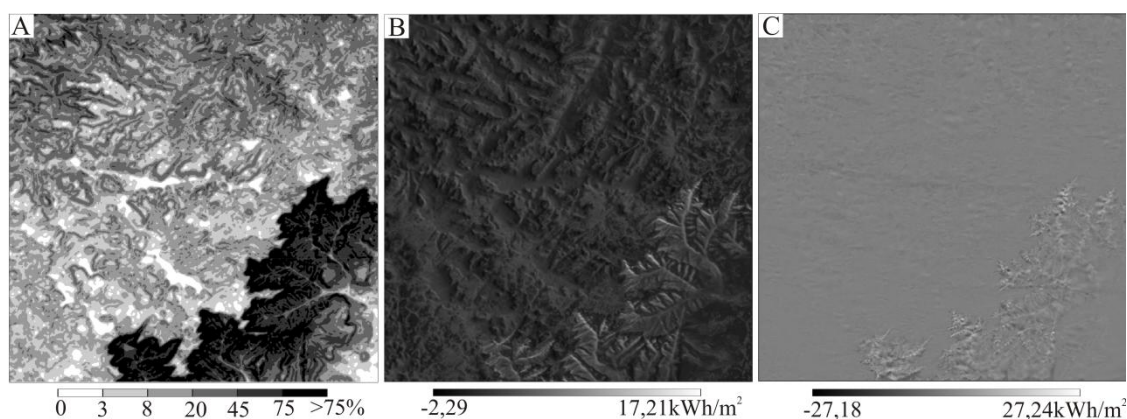


Figura 4.1 - Comparação das condições do relevo com as diferenças de radiação solar anual para níveis de *skysize* e *viewshed* na área de estudo 3 (Subtropical). Classes de declividade do terreno (A), imagem resultante da diferença entre a radiação solar anual dos testes 1 e 2 (B) e imagem resultante da diferença entre a radiação solar anual dos testes 1 e 3 (C).

4.1.2. Análise dos níveis de radiação solar e seus padrões de distribuição no terreno

O efeito das variáveis topográficas, declividade e orientação de vertentes, verificado pela análise visual dos dados foi evidente na distribuição da radiação solar no terreno (Figura 4.2). Nas áreas com maiores declividades a distribuição da radiação solar se mostrou mais variável do que nas áreas planas, onde o efeito devido à orientação foi evidenciado pela mudança de brilho entre vertentes nas orientações N e S.

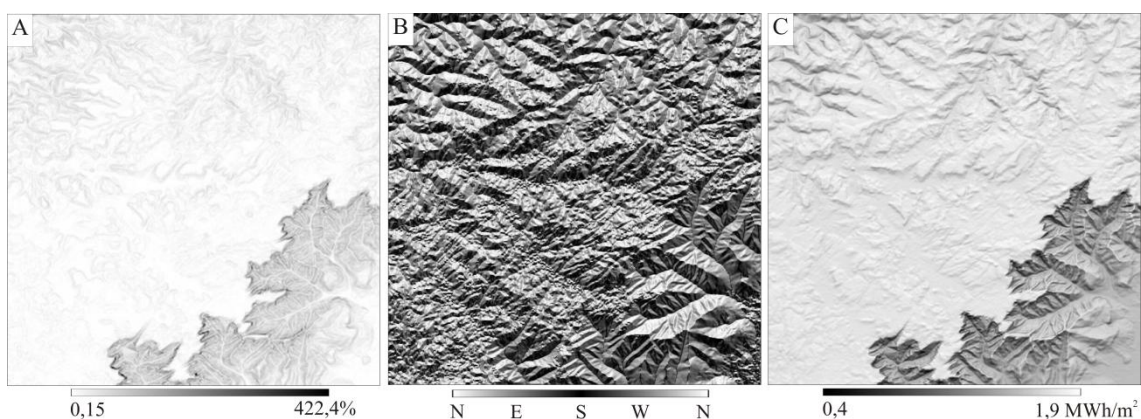


Figura 4.2 - Relação da radiação solar anual com as características do relevo. Declividade (A), orientação de vertentes (B) e radiação solar anual (C) na área de estudo 3 (Subtropical).

A análise dos níveis típicos da radiação solar e de seus padrões de distribuição, feita nas áreas de estudo 1 a 3 para períodos diário, mensal, semestral e anual, apresentou as maiores variações de radiação na área subtropical em todos os resultados. A radiação solar calculada para um dia específico variou de 120 a 6830 W.h/m². No solstício de verão foram identificados os maiores níveis de radiação solar na área subtropical (Figura 4.3), apesar da diferença de latitude em relação a declinação solar, aproximadamente 5°, ser compatível com aquela da área tropical. No caso do dia de equinócio, na área equatorial, embora a diferença entre latitude e declinação solar seja quase nula, os níveis de radiação solar foram medianos. Isso mostra a complexidade do cálculo de radiação solar, em que a relação latitude-declinação constitui componente importante, mas não determinante na integral diurna dos cossenos do ângulo de incidência, que corresponde à trajetória aparente do disco solar na abóbada celeste e sua

duração: os dias de verão são mais longos na medida em que se afasta do Equador, onde sua duração é de 12 horas, invariavelmente.

Nas três áreas indistintamente, a distribuição da radiação solar pelo relevo foi mais perceptível no solstício de inverno devido à pequena elevação solar (Figura 4.3), que favoreceu uma maior variação dos ângulos de incidência dos raios solares no terreno. O efeito contrário foi verificado no solstício de verão, quando a declinação no hemisfério Sul desfavorece grandes variações na condição de incidência. Para o dia de equinócio, quando a distribuição da radiação solar foi intermediária entre aquelas obtidas nos dias de solstício, destaca-se que em virtude da dinâmica celeste e, portanto da incidência dos raios solares aproximadamente perpendiculares à superfície, na região equatorial a radiação solar neste dia se distribuiu de forma relativamente homogênea no terreno (Figura 4.3).

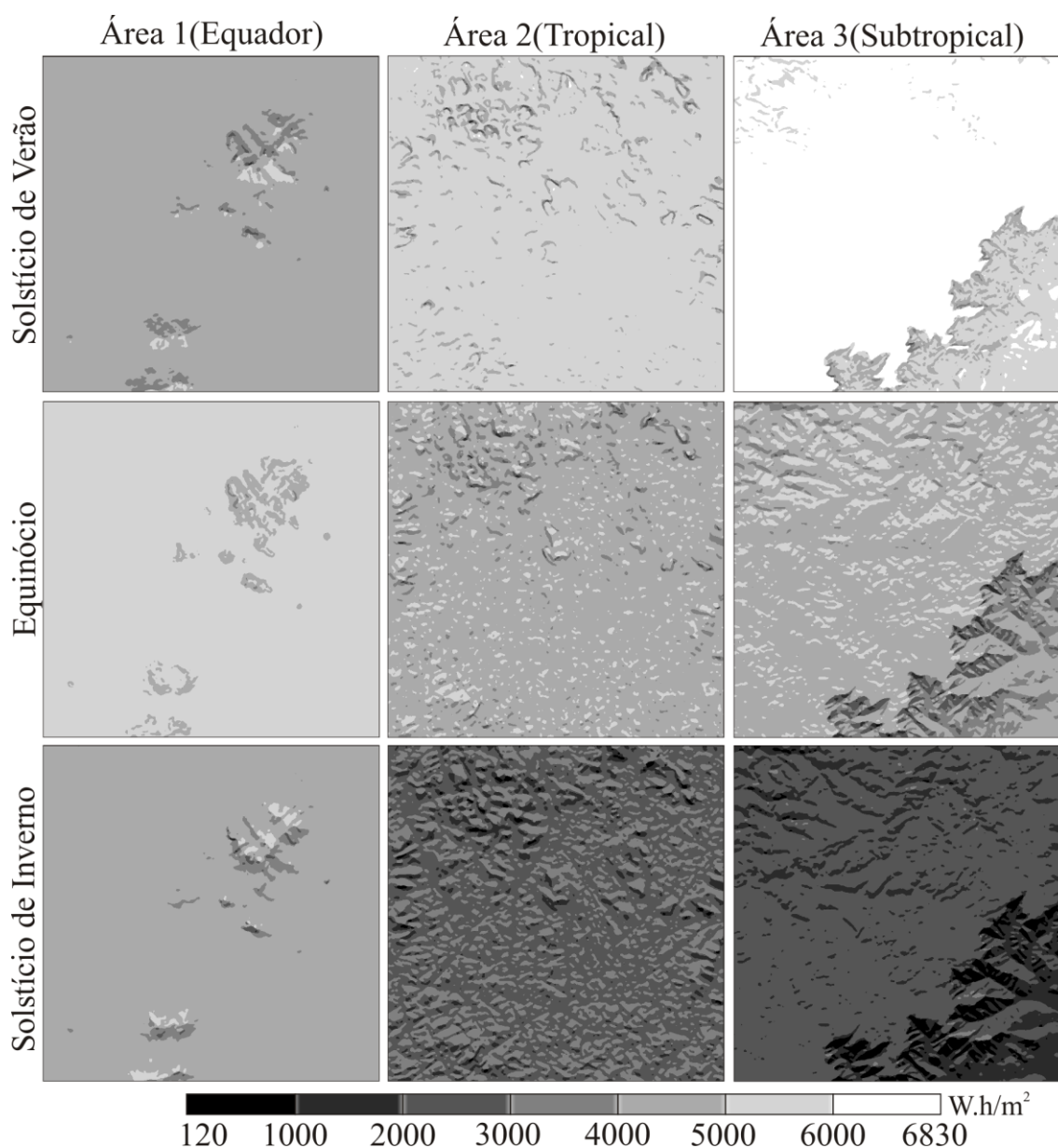


Figura 4.3 - Radiação solar total diária para o solstício de inverno, equinócio e solstício de verão nas três áreas de estudo.

A radiação solar mensal apresentou variações de 3,7 a 206 kW.h/m². Para as três áreas, a correlação entre a radiação solar diária com a radiação mensal apresentou r^2 acima de 0,982, o que demonstra que as variações dos níveis de radiação solar mensal (Figura 4.4) foram equivalentes às variações da radiação solar diária, as quais estão relacionadas com a localização, dinâmica celeste e características do relevo. Os resultados foram semelhantes ao descrito por Kumar et al. (1997). No mês de Dezembro incidiu na área de estudo os maiores níveis de radiação solar e esta foi espalhada de forma uniforme em

todas as orientações, especialmente nas áreas planas. Além disso, as vertentes voltadas para o Sul foram mais iluminadas nos meses de verão em virtude das horas do dia e também da posição do Sol que reduz o efeito de sombra nestes locais.

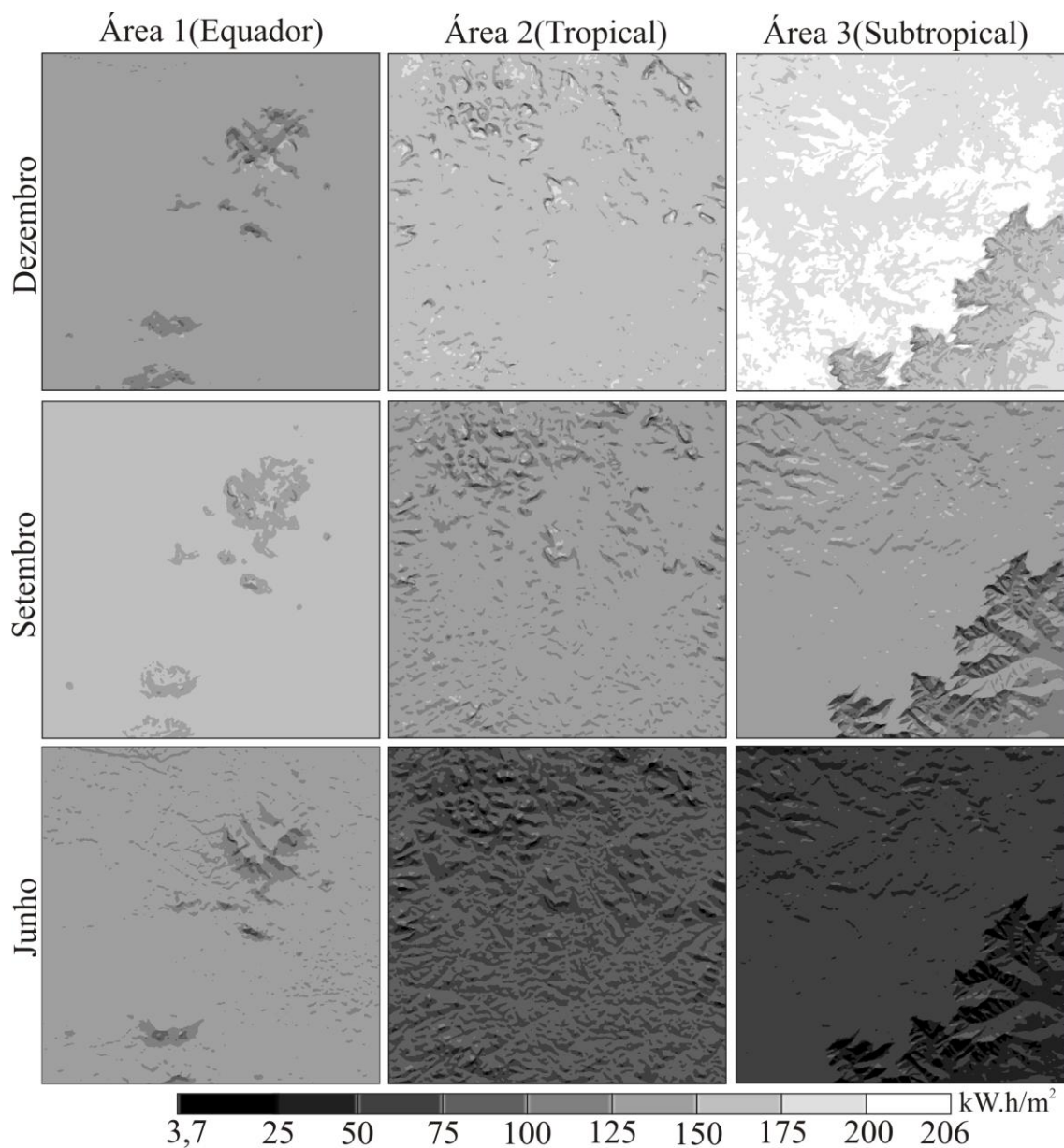


Figura 4.4 - Radiação solar total mensal para junho, setembro e dezembro nas três áreas de estudo.

Nota-se também que a radiação solar é mais sensível ao relevo durante o mês de junho (inverno) em comparação com os meses de dezembro (verão) e setembro (primavera) (ver Figura 4.4). Isto se deve porque o efeito da orientação das vertentes é mais

importante durante o inverno devido à baixa elevação do Sol, em função da relação entre a declinação solar e a latitude local (TIAN et al., 2001). Ressalta-se que apesar das diferenças visuais entre radiação solar diária e mensal, em função do intervalo de fatiamento adotado, a radiação solar mensal correspondeu ao produto da radiação de um dia com o total de dias no mês, o que equivale a aproximadamente 30 vezes os níveis de radiação solar diária (comparar Figura 4.3 e Figura 4.4).

O intervalo de variação da radiação solar semestral foi de 56 a 1156 MW.h/m². Os mapas semestrais (Figura 4.5) também apresentaram maior variação dos níveis de radiação solar na área subtropical em contraste com a área equatorial. No semestre outonal, os ângulos de incidência dos raios solares no terreno são mais variáveis (ver item 2.1.2), motivo pelo qual as feições do relevo foram mais perceptíveis neste período. O efeito inverso foi notável no semestre primaveril por causa da variação dos ângulos de incidência dos raios solares na superfície ser menor.

Nas áreas tropical e subtropical a radiação solar foi relativamente maior no semestre primaveril do que no outonal, enquanto que na área equatorial observou-se uma variação entre os semestres relativamente menor (Figura 4.5). Este comportamento é explicado por dois mecanismos. Além de a variação da duração dos dias ser significativa ao longo do ano nas regiões afastadas do Equador, com maior duração no semestre primaveril do que no outonal, como descrito no item 2.1.2, há uma grande diferença na relação latitude-declinação solar entre os dois semestres. Na região equatorial, por sua vez, a duração dos dias e das noites ao longo do ano apresentam-se constante e equivalente a 12 horas e há uma simetria na distribuição da diferença latitude-declinação solar entre os dois períodos.

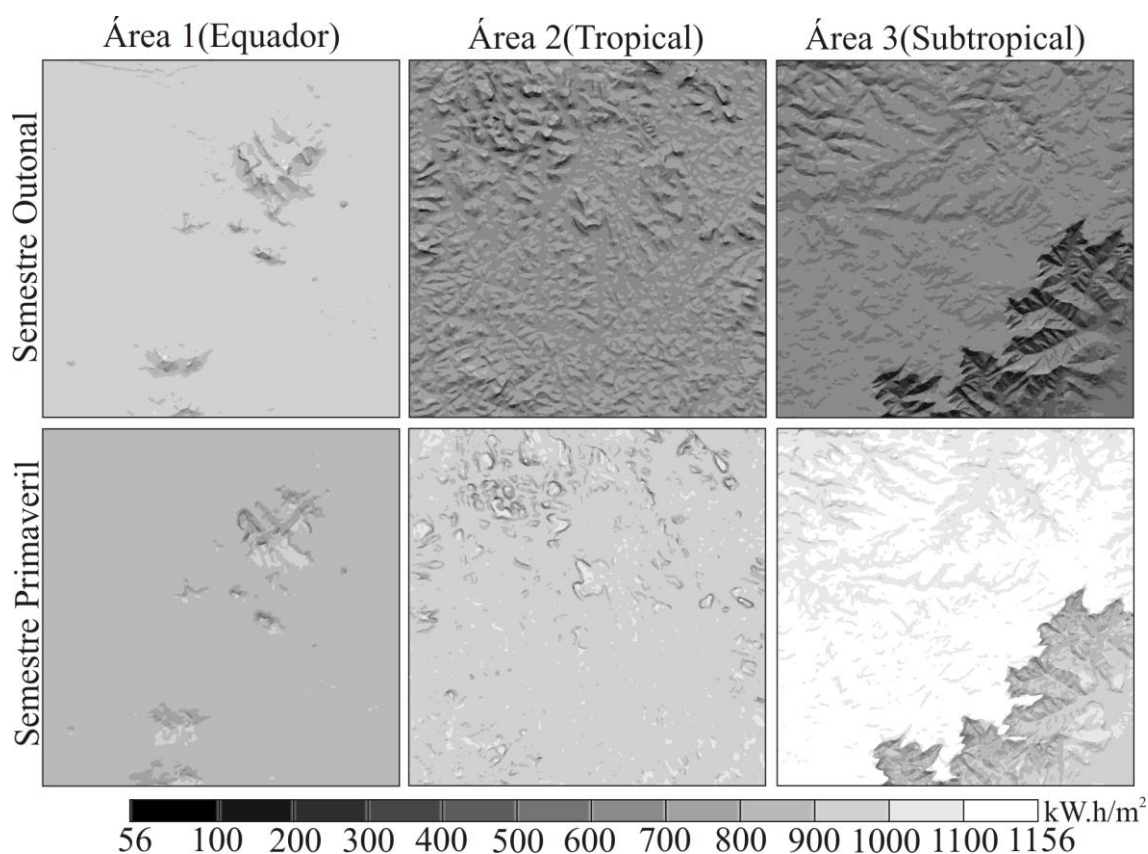


Figura 4.5 - Radiação solar total semestral para os períodos primavera e outono nas três áreas de estudo.

A radiação solar anual apresentou variações de 405 a 2002 kWh/m². A razão entre os níveis máximos e mínimos de radiação solar para os períodos anual, semestral e diário correspondeu a aproximadamente 5, 20 e 57, respectivamente. As principais diferenças na distribuição dos níveis de radiação anual (Figura 4.6) em comparação a radiação obtida nos períodos diário, mensal e semestral ocorreram em função da dinâmica celeste que ocasiona variações significativas da incidência dos raios solares no terreno. Por causa destas características, em períodos mais curtos a distribuição da radiação torna-se relativamente particularizada, como pode ser observado mais claramente na área equatorial, onde as vertentes Norte e Sul são contrastantes apenas no período semestral em comparação ao período anual (comparar Figura 4.5 e Figura 4.6).

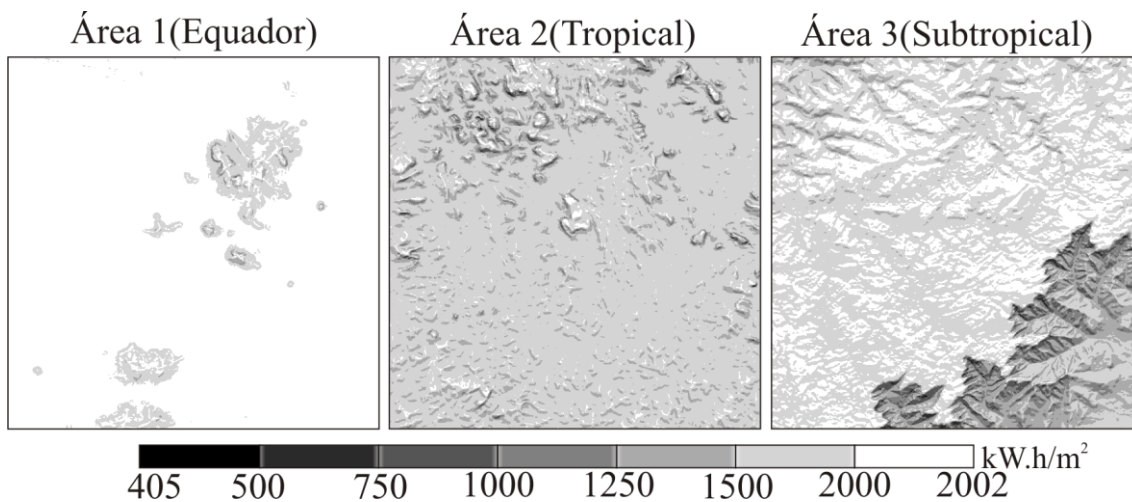


Figura 4.6 - Radiação solar total anual nas três áreas de estudo.

A radiação solar obtida em períodos curtos oferece variações importantes no terreno, o que possibilita sua aplicação em estudos que necessitem de detalhes da distribuição da radiação solar, como por exemplo na correção do efeito topográfico para o cálculo de biomassa (BARBOSA et al., 2014) e também na classificação do uso e cobertura da terra de imagens ópticas (MOREIRA et al., 2014). Estes estudos utilizaram dados momentâneos da radiação solar com o intuito de corrigir o efeito da topografia sob as informações desejáveis. Para períodos maiores, como por exemplo mensalmente, a distribuição da radiação solar no terreno tem colaborado na estimativa do potencial de evapotranspiração (MÉSZÁROS; MIKLÁNEK, 2006), com nível máximo de radiação solar entre os meses de março, abril e maio de 150 kW.h/m^2 bem como na estimativa de temperaturas em escala local (FU; RICH, 2002; XIN; CHENCHAO, 2008).

Neste sentido, a radiação solar tem alto potencial de aplicação nos estudos voltados para a agricultura e florestas, como por exemplo, por ser um condicionante do balanço energético e portanto uma importante variável nos processos físicos e biológicos destas culturas, principalmente (FU; RICH, 2002). Como exemplo, é suposto que a avaliação da radiação solar incidente em culturas temporárias pode ser feita para o período da cultura de interesse, pois se esperam maiores variações da distribuição da radiação no terreno do que no período anual. Em contrapartida, para culturas florestais, com ciclo produtivo anual, a relação com a radiação solar pode ser observada para o período anual.

Com o intuito de simplificar as análises seguintes, foi considerada a radiação solar anual para atendimento dos demais objetivos do estudo. A descrição em detalhe do efeito do relevo e da latitude na distribuição da radiação solar anual pode ser vista nos itens 4.2.1 e 4.2.3, respectivamente.

4.2. Comportamento da radiação solar em relação ao relevo, atmosfera e latitude

Selecionado na etapa anterior os parâmetros de operação do algoritmo, neste capítulo serão analisados os parâmetros que influenciam nos níveis e padrões de distribuição da radiação solar no terreno. Os efeitos causados pelo relevo, atmosfera e latitude serão observados e relacionados com a radiação solar calculada para o período anual. Estes efeitos serão considerados devido à importância das características do relevo (declividade e orientação de vertentes) e da latitude na distribuição da radiação solar, bem como da influência da condição atmosférica no total de radiação solar incidente no terreno.

4.2.1. Relação da radiação solar com o relevo

A distribuição da radiação solar no terreno apresentou mudanças conforme a declividade do relevo observado, que condiciona a relação entre os níveis observados e a orientação de vertentes. Devido à localização da área de estudo no hemisfério Sul e à dinâmica anual do movimento da Terra em torno do Sol, as vertentes voltadas para Norte são mais iluminadas ao longo do ano do que as vertentes voltadas para Sul, como verificado por Kumar et al. (1997). Por este motivo presume-se que a radiação solar máxima esteja associada às vertentes voltadas para o Equador (Norte, para a área de estudo) e as mínimas voltadas para o Pólo (Sul, para a área de estudo). A amplitude de variação da radiação solar aumentou com a declividade do terreno em função das alterações observadas nos valores máximos e mínimos (Figura 4.7).

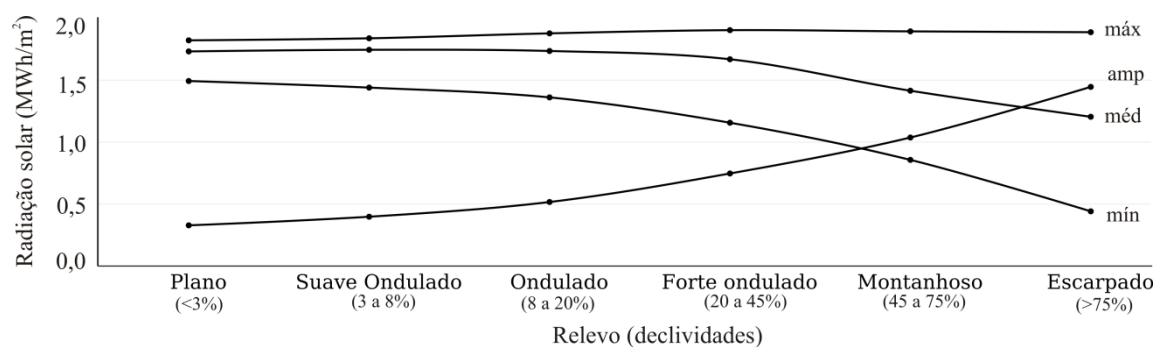


Figura 4.7 - Níveis máximos, médios e mínimos e amplitude da radiação solar anual em função do relevo do terreno na área de estudo 3 (Subtropical). Dados apresentados na Tabela A.1 do Apêndice A.

A sensibilidade da distribuição da radiação solar à orientação de vertentes aumentou com a declividade, o que comprova que o efeito do relevo na distribuição da radiação solar nas áreas planas proporciona menor variação da energia incidente entre as diferentes orientações em comparação com as áreas montanhosas (Figura 4.7). Foi possível verificar um aumento da radiação solar máxima e uma diminuição das mínimas do relevo plano a escarpado, com maiores variações a partir do relevo forte ondulado (20 a 45%). No estudo de Buffo et al. (1972) a variação da radiação solar nas diferentes declividades aumentou a medida que estas foram se tornando montanhosas. Os resultados também foram semelhantes ao observado no estudo de Kumar et al. (1997), onde os dados de radiação solar tiveram maior variação nas diferentes orientações para as declividades acima de 20° (~36%).

Os máximos valores de radiação solar tiveram maior variação nas vertentes orientadas para o Sul do que aquelas orientadas para o Norte. Esta diferença pode ser explicada pela variação do cosseno do ângulo de radiação solar ($\cos \theta_0$), o qual é diretamente proporcional à distribuição da radiação em uma superfície (DUBAYAH; RICH, 1995). A variação de $\cos \theta_0$ apresenta uma diferença de sensibilidade para os valores mínimos e máximos da radiação solar na superfície em função da derivada do cosseno do ângulo de radiação solar ($-\sin \theta_0$). Quando $\cos \theta_0$ vale zero, a variação (sua derivada) atinge seu máximo módulo, de 1,0 (+1 ou -1); quando $\cos \theta_0$ vale 1,0, sua derivada é nula (Figura 4.8). Assim, pequenas mudanças no ângulo de incidência alteram bastante os

níveis de radiação das áreas menos iluminadas, ao contrário das áreas mais iluminadas, que tendem a mostrar pouca alteração.

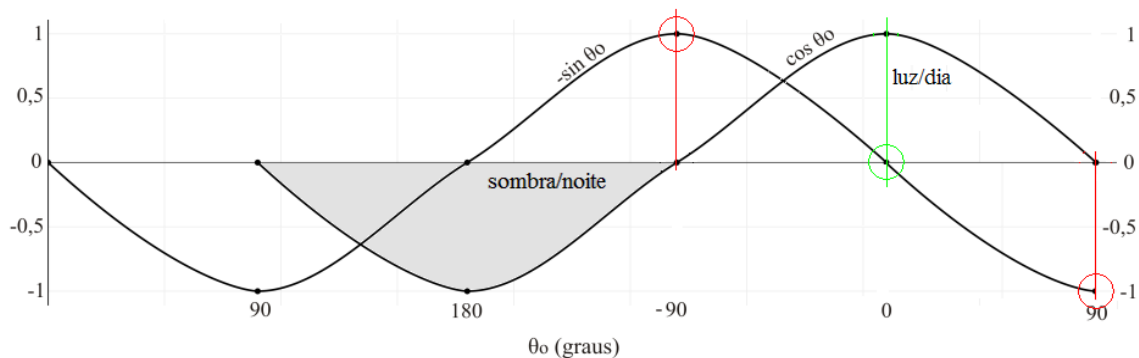


Figura 4.8 - Comportamento do cosseno do ângulo de radiação solar ($\cos \theta_0$) e sua variação, representada pela função derivada, igual a $(-\text{sen } \theta_0)$.

A importância da distribuição dos valores máximos e mínimos da radiação solar foi verificada no estudo de Brunori et al. (1995), realizado no deserto do Negev em Israel na latitude $31^{\circ}21' N$, que demonstraram que árvores plantadas em orientações diferentes apresentaram variações de crescimento em virtude das mudanças de insolação nas vertentes e nas latitudes. As árvores que estavam plantadas nas vertentes orientadas para Norte tiveram maior crescimento do que as orientadas para Sul e Oeste por causa da menor exposição à luz direta no relevo na orientação Norte, o que proporcionou a redução do estresse hídrico causado pelas altas temperaturas, com a redução dos níveis de evapotranspiração e portanto melhores condições de crescimento.

4.2.2. Efeito das condições atmosféricas na distribuição da radiação solar

As variações entre os dados adquiridos da estação meteorológica de Cuiabá para as condições de céu claro, parcialmente nublado e nublado foram observadas em registros momentâneos, correspondentes a períodos de 30 minutos. Ao se analisarem dados sazonais, extraídos do Atlas de Energia Solar, os valores médios se aproximaram daqueles observados para as condições de céu parcialmente nublado (Figura 4.9). Em situações com períodos mais longos, a configuração dos parâmetros atmosféricos se aproximou do *default* do programa *Solar Analyst*, o qual apresenta valores correspondentes à condição atmosférica de *clear sky*, conforme definido por Fu e Rich (2000). Neste sentido, supõe-se que a exatidão de estimativa da radiação solar para

períodos curtos depende de dados que possibilitem caracterizar os parâmetros atmosféricos detalhadamente. Ressalta-se que a comparação dos resultados médios de radiação solar obtidos dos dados *default* com os dados de céu parcialmente nublado apresentou variação de aproximadamente 1%.

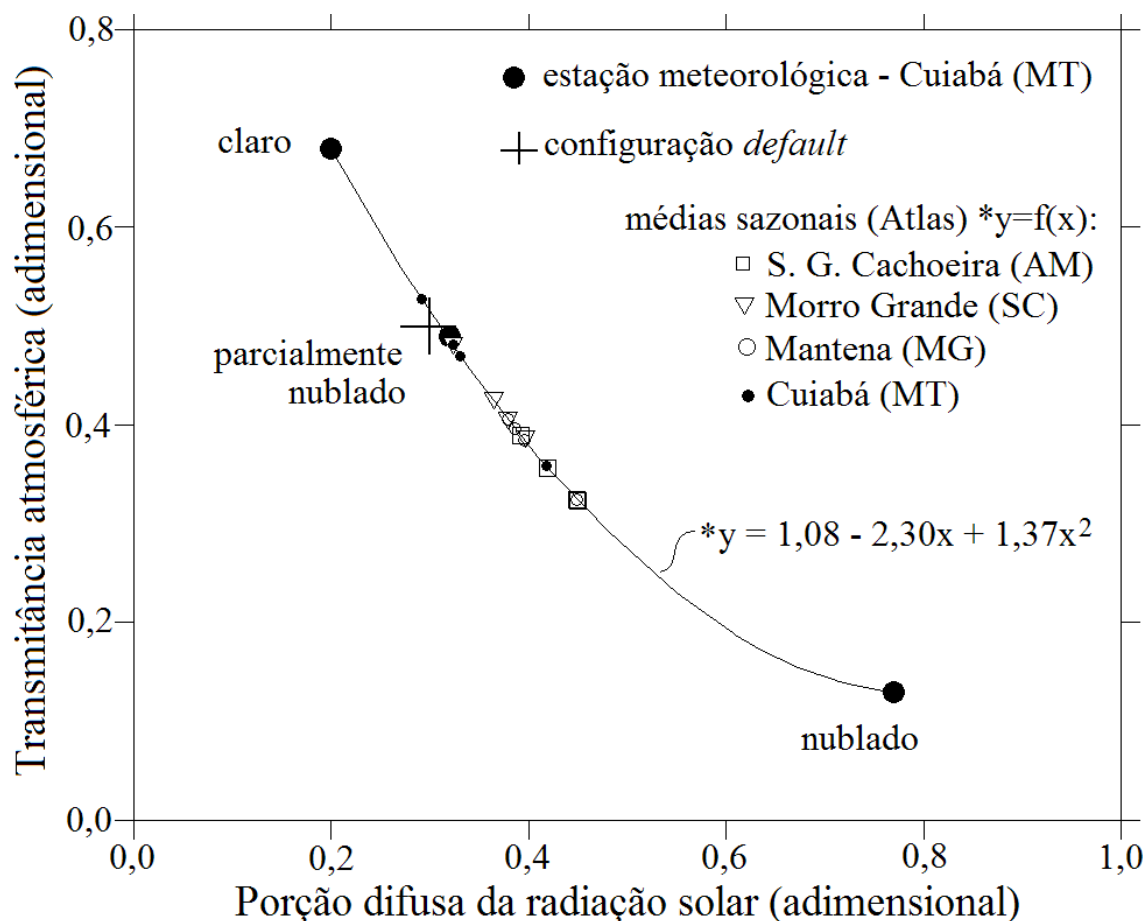


Figura 4.9 - Diferentes combinações de dados atmosféricos para o cálculo da radiação solar (transmitância e porção difusa): estação meteorológica de Cuiabá (ALVES et al., 2013); Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al., 2006), com transmitância estimada; e parâmetros de configuração *default* do *Solar Analyst* (FU; RICH, 2000).

Os níveis da radiação solar anual, conforme a padronização das condições atmosféricas de Alves et al. (2013), reduziram com o aumento da nebulosidade (Figura 4.10) e a sensibilidade da distribuição da radiação ao relevo, tanto em termos de declividade quanto de orientação de vertentes, passou a ser menor em comparação aos dias claros. No relevo montanhoso, foi possível notar a proximidade do nível mínimo de radiação

solar incidente na condição de céu claro com o nível máximo incidente na condição de céu nublado (Figura 4.10). Além disso, foi verificado que as principais diferenças entre as condições atmosféricas apresentaram-se nas áreas montanhosas e os níveis mínimos entre estas condições se aproximaram com o aumento da declividade, o que indica que com o aumento da nebulosidade as áreas mais iluminadas apresentaram maior redução de radiação solar do que as áreas menos iluminadas.

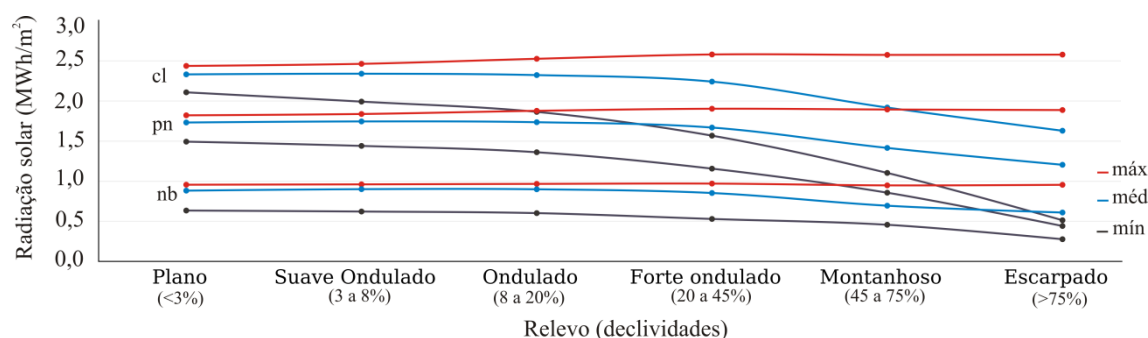


Figura 4.10 - Níveis máximos (máx), médios (méd) e mínimos (mín) da radiação solar anual em função do relevo para as condições atmosféricas de céu claro (cl), parcialmente nublado (pn) e nublado (nb). Dados apresentados nas Tabelas A.2, A.3 e A.4 do Apêndice A.

A amplitude de radiação solar diminuiu proporcionalmente à declividade (Figura 4.11), o que indica que o aumento da nebulosidade ocasiona uma redução do efeito do relevo. A variação da amplitude, nas condições de céu nublado, reduziu em 52,5% do relevo montanhoso ao plano enquanto que na condição de céu parcialmente nublado e céu claro em 77,3% e 84,1%, respectivamente. A menor variação nos dias nublados, possivelmente, ocorreu devido à relação de proporcionalidade entre a radiação direta e a radiação difusa ser menor em comparação aos dias claros (Tabela 4.2). Neste sentido, como descrito por Dubayah e Rich (1995), sob condições de céu com pouca nebulosidade, a radiação direta de ondas curtas é a componente mais importante da radiação global incidente no terreno, por causa de sua maior contribuição no cálculo e distribuição dos níveis de radiação em função das características do relevo.

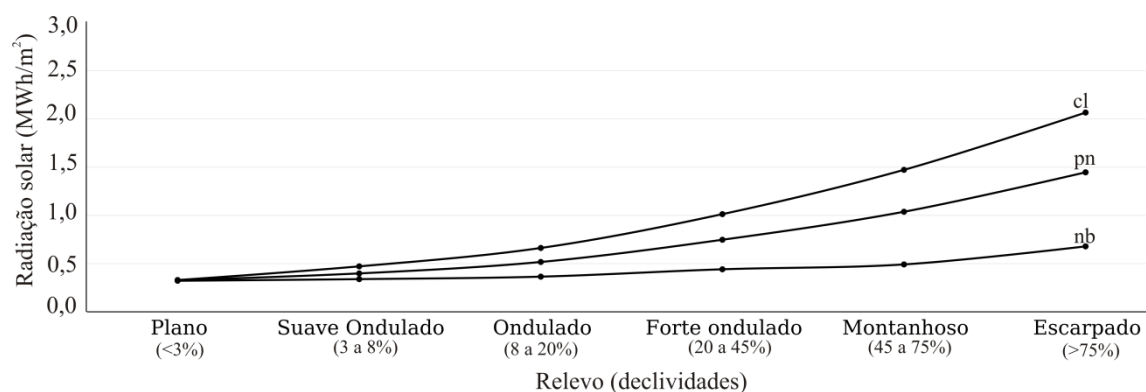


Figura 4.11 - Amplitudes de radiação solar anual em função do relevo para as condições atmosféricas de céu claro (cl), parcialmente nublado (pn) e nublado (nb). Dados apresentados nas Tabelas A.2, A.3 e A.4 do Apêndice A.

A comparação da distribuição da radiação solar direta e difusa na superfície (Figura 4.12) mostrou que a radiação solar difusa em dias claros se distribuiu de forma relativamente mais uniforme no terreno e correspondeu a aproximadamente 20% da radiação solar direta.

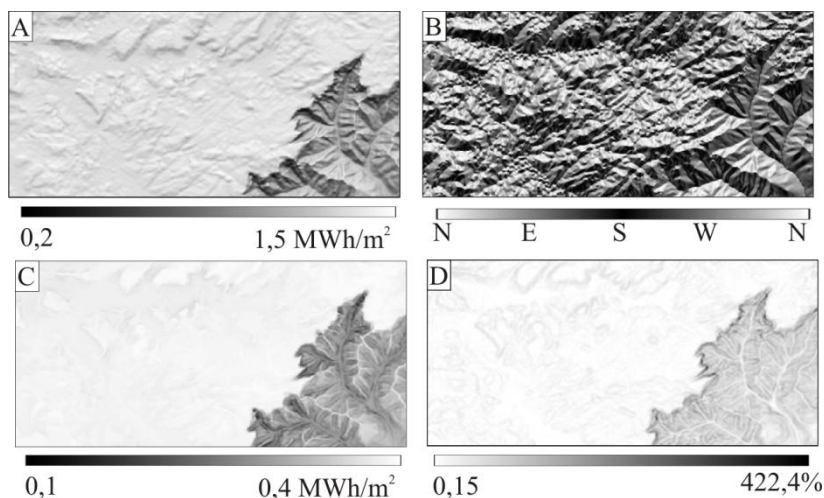


Figura 4.12 - Radiação solar anual direta (A), orientação de vertentes (B), radiação solar anual difusa (C) e declividade (D).

Kumar et al. (1997) obtiverem, em seus estudos, valores de radiação difusa entre 8 e 11% da radiação solar direta e nos meses de verão, aproximadamente 7% da radiação total incidente na superfície correspondeu a porção difusa enquanto que nos meses de inverno este valor passou a ser 11%. Os autores também sugeriram que a distribuição da radiação solar difusa foi pouco influenciada pela declividade e orientação de vertentes,

ao contrário do que foi verificado neste estudo ao comparar a relação entre as porções de radiação com as características do relevo (Figuras 4.12 e 4.13). A radiação solar difusa teve maior correlação com a declividade do que com a orientação de vertentes, enquanto que a radiação direta apresentou maior correlação com a orientação de vertentes. Neste sentido, verifica-se que a distribuição da radiação direta é respondida pela orientação das vertentes ao contrário da radiação difusa que se distribui conforme a declividade e não representa uma direção no terreno. Em virtude deste comportamento, sugere-se que os aspectos azimutais tanto do terreno quanto da radiação estejam relacionados com a direção da radiação solar, em contraposição ao termo declividade que se relaciona com os ângulos zenitais. Para efeito de simplificação, será utilizado o termo direcionalidade na representação da distribuição da radiação solar em função da orientação de vertentes.

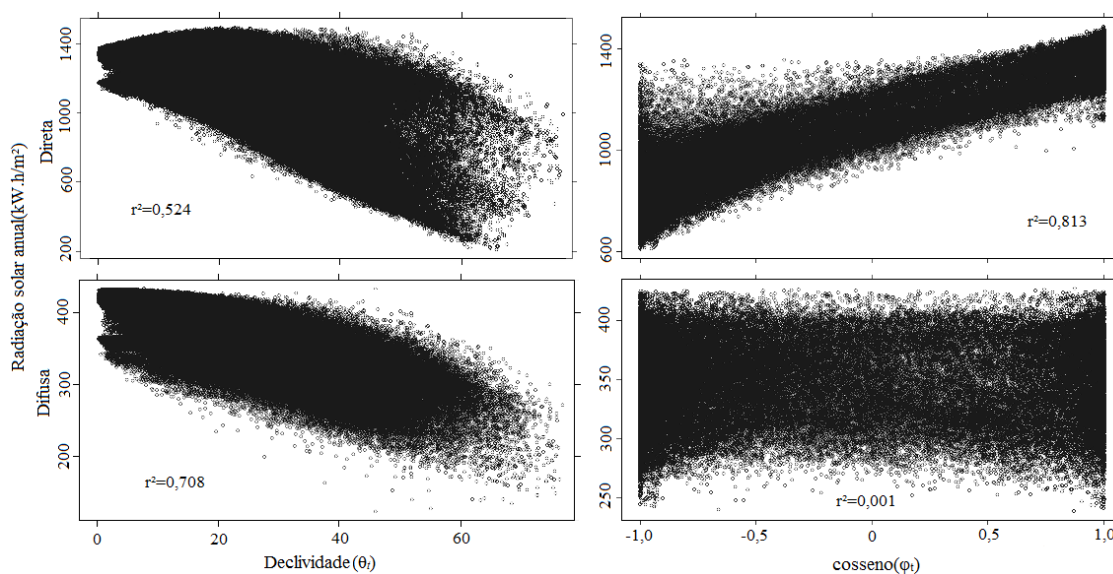


Figura 4.13 - Relações dos totais anuais de radiação solar, referentes à porção difusa e direta, com a declividade (θ_i) e o cosseno da orientação de vertentes (φ_i).

Os resultados da radiação solar anual nas condições de céu parcialmente nublado e nublado quando comparados com as condições de céu claro mostraram correlação entre os mapas. A comparação entre os resultados para diferentes condições atmosféricas estão apresentadas na Tabela 4.2. Como esperado, ocorreu uma relação de proporcionalidade da radiação solar incidente na superfície em condições de céu nublado e parcialmente nublado com a radiação em condições de céu claro. Em média a

radiação solar em condições de céu nublado correspondeu a 38,3% da radiação solar em céu claro (I.C. de 90% de 30,9% a 43,0%), enquanto que a radiação solar em condições de céu parcialmente nublado correspondeu a 74,5% da radiação solar em céu claro (I.C. de 90% de 71,3% a 76,5%). Neste sentido, é possível dizer que a radiação solar anual incidente na superfície terrestre foi dependente das condições topográficas locais de maneira consistente, entre as diferentes condições atmosféricas testadas. Em termos práticos, é razoável supor que o uso de parâmetros de dias claros produz resultados espacialmente correlacionados à distribuição da radiação solar em anos de dias variáveis, apesar da redução do total de energia anual incidente com o aumento da frequência de dias nublados (Figura 4.14). Para Batlles et al. (2008), a radiação solar global diária estimada em áreas com topografia variável, em diferentes condições atmosféricas, apresentou melhor desempenho para as condições de céu claro, com pouca nebulosidade, em virtude da pouca influência de nuvens na distribuição da radiação solar. No entanto, ressalta-se que se espera menor correlação entre os resultados sob atmosferas diferentes quando se observam períodos menores, em virtude da geometria de iluminação mais restrita.

Tabela 4.2 - Comparações entre resultados médios de radiação solar anual sob diferentes condições atmosféricas.

¹ Condição	% difusa Incidente	r ² (%) (base céu claro)	Erro estimativo (kW.h/m ²)	² Desvio relativo (%)
Céu claro	16,5	100	0	0
Parcialmente nublado	25,8	98,3	27,5	1,7
Nublado	68,4	68,9	64,7	7,7

Fonte: (¹) Dados de Alves et al., (2013). (²) Em relação à média de radiação obtida com a respectiva parametrização da atmosfera.

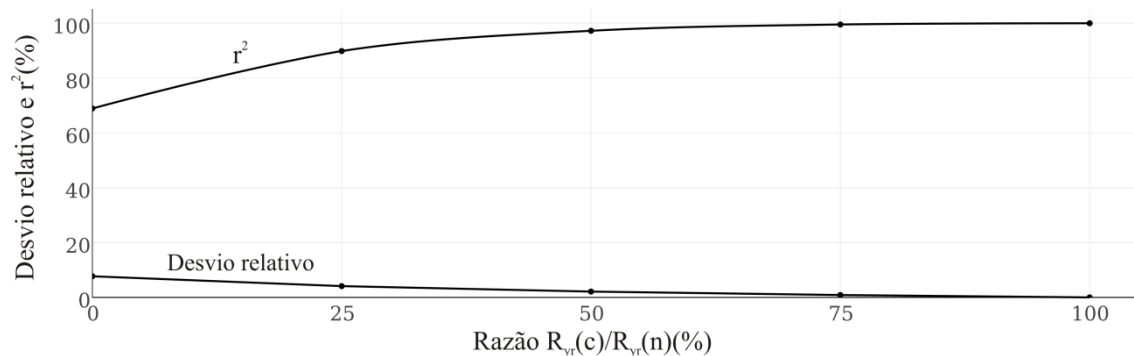


Figura 4.14 - Dados da correlação entre o total de radiação em um ano de dias claros em relação ao total em anos com frações variáveis em dias nublados.

4.2.3. Distribuição da radiação solar em latitudes variadas

A radiação solar anual demonstrou comportamento distinto na região equatorial, tropical e subtropical nas condições de relevo plano e montanhoso (Figura 4.15). Os níveis de radiação solar reduziram com o aumento da latitude, como pode ser visto mais claramente nas áreas planas, enquanto que sua distribuição apresentou-se mais variável no relevo montanhoso do que no relevo plano. Devido à dinâmica celeste e consequente predominância do Sol em torno do Equador, na região equatorial há os maiores níveis de radiação solar com distribuição no terreno uniforme e simétrica, oposta à dinâmica assimétrica observada nas outras áreas, com destaque para a distribuição levemente bimodal na área tropical (Figura 4.15).

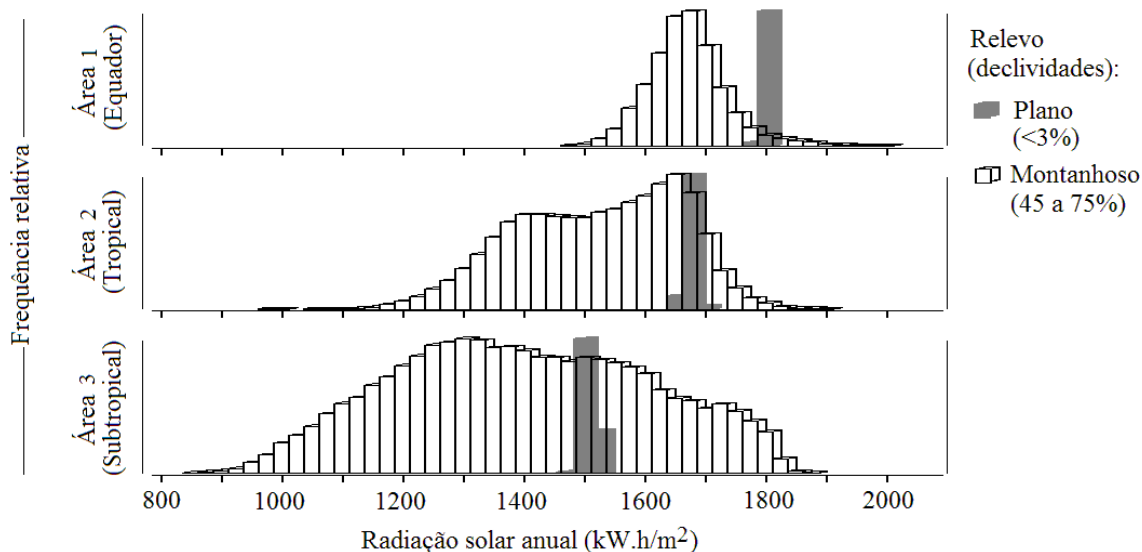


Figura 4.15 - Níveis de radiação solar anual nas condições de relevo plano e montanhoso para as áreas de estudo 1, 2 e 3, localizadas nas regiões equatorial, tropical e subtropical, respectivamente.

Com o aumento das latitudes, os níveis máximos de radiação solar anual apresentaram aumento discreto em comparação com a diminuição dos níveis mínimos (Figuras 4.16 a 4.18) e na área equatorial a amplitude entre os níveis foi relativamente menor em relação a área subtropical. Os níveis mínimos e máximos de radiação solar para as condições do relevo mostraram-se relativamente próximos nas declividades mais baixas, com amplitude de 22,2% em relevo plano, na área subtropical, a qual foi atingida na área equatorial apenas em relevo ondulado. Portanto, as variações ocasionadas pela orientação de vertentes requerem declividades tanto menores quanto maior for a latitude da área estudada.

Os resultados são semelhantes aos relatados no estudo de Buffo et al. (1972) e Kumar et al. (1997). Para ambos, os maiores níveis de radiação solar nas diversas vertentes e declividades ocorreram nas menores latitudes, especificamente no Equador. No primeiro estudo, as variações entre os valores das vertentes Norte e Sul aumentaram com o aumento da declividade e também com o aumento da latitude, de maneira que no Equador as diferenças foram mais notáveis a partir de 30° (~58%) de declividade enquanto que na latitude 30°N iniciaram-se a partir de 15° (~27%) de declividade.

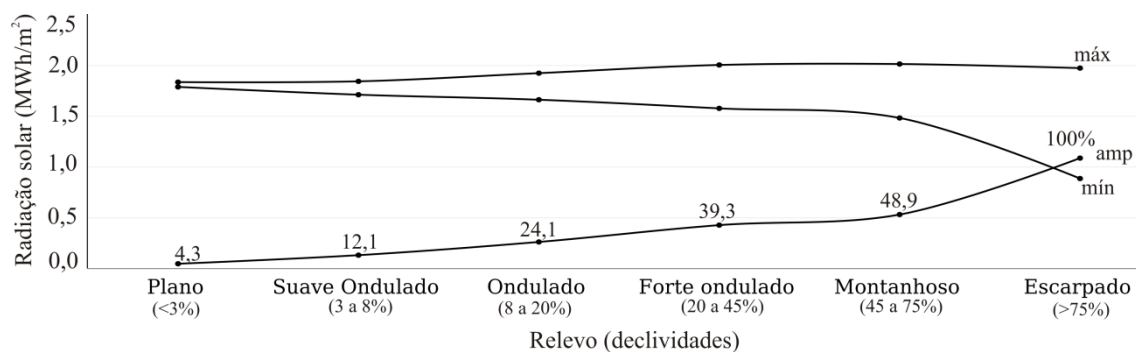


Figura 4.16 - Níveis máximos, mínimos e amplitude de radiação solar anual em função do relevo do terreno, na área de estudo 1 (Equatorial). Dados apresentados na Tabela A.5 do Apêndice A.

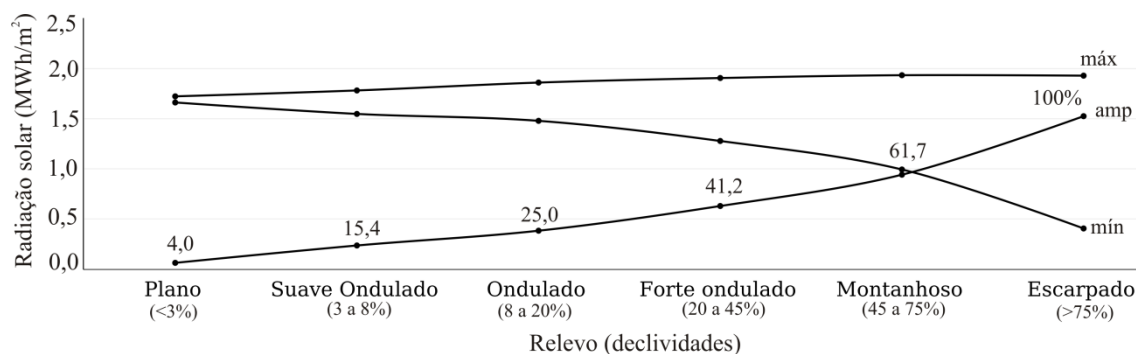


Figura 4.17 - Níveis máximos, mínimos e amplitude de radiação solar anual em função do relevo do terreno, na área de estudo 2 (Tropical). Dados apresentados na Tabela A.6 do Apêndice A.

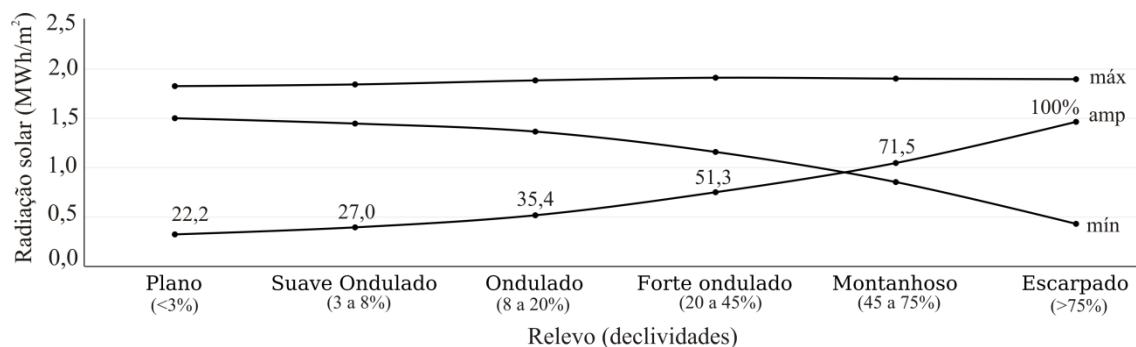


Figura 4.18 - Níveis máximos, mínimos e amplitude de radiação solar anual em função do relevo do terreno, na área de estudo 3 (Subtropical). Dados apresentados na Tabela A.1 do Apêndice A.

Ainda de acordo com a dinâmica celeste, em função de sua assimetria nas regiões subtropicais, nota-se também a direcionalidade da distribuição de radiação solar na

superfície, relacionada com a interação da radiação solar com os ângulos do terreno (declividade e orientação de vertentes), e a distribuição relativamente homogênea na área equatorial (Figura 4.19). De acordo com os resultados e análise visual da interação da radiação solar anual com a declividade (Figura 4.20), foi possível observar uma forte correlação entre os dados na região equatorial. A nuvem de dispersão dos dados sugere um forte controle por uma relação não linear e portanto uma possível relação da radiação solar com o cosseno da declividade, por isto supõe-se que nesta região a distribuição da radiação solar no terreno seja correlacionada ao cosseno da declividade.

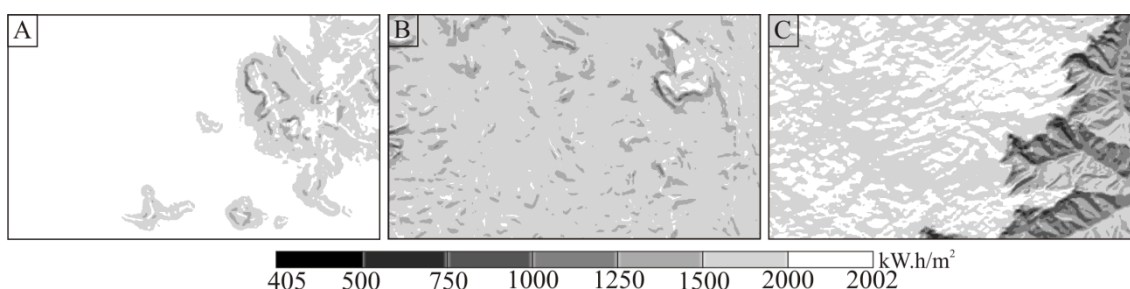


Figura 4.19 - Totais de radiação solar anual nas áreas de estudo 1-região equatorial (A), 2-região tropical (B) e 3-região subtropical (C).

A relação da radiação solar com a orientação de vertentes apresentou maior correlação nas latitudes maiores e indicou que as variações da distribuição da radiação solar no terreno são ocasionadas pela posição das vertentes (Figura 4.20). Esta relação é similar ao verificado no estudo de TIAN et al. (2001), onde a variação sazonal da radiação solar direta relativa a radiação solar incidente em uma superfície horizontal, em um terreno com face voltada para Norte e inclinação de 15° , aumentou com o aumento da latitude.

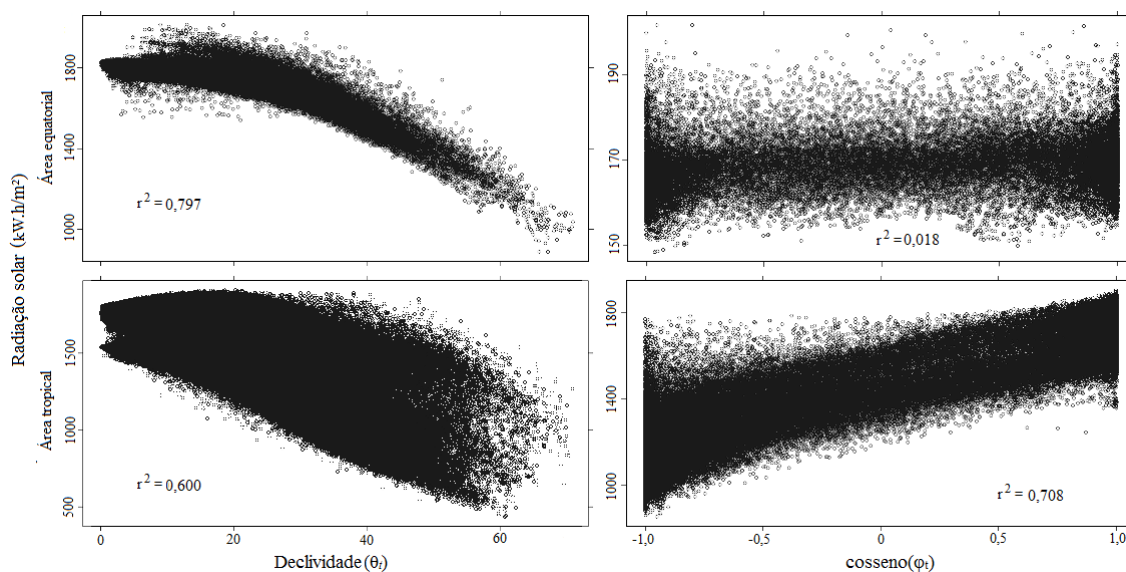


Figura 4.20 - Relações dos totais anuais de radiação solar com a declividade (θ_i) e o cosseno da orientação de vertentes (ϕ_i), nas áreas 1 (equatorial) e 3 (subtropical).

4.3. Relação da radiação solar anual com o crescimento de *Eucalyptus spp.*

A radiação solar anual incidente na área de estudo 4 variou de 1,90 a 2,51 MW.h/m² (Figura 4.21A). O comportamento da distribuição da radiação solar em relação às características do relevo apresentou maior amplitude entre os níveis máximos e mínimos no relevo forte ondulado, como esperado e descrito em detalhes no item 4.2.1.

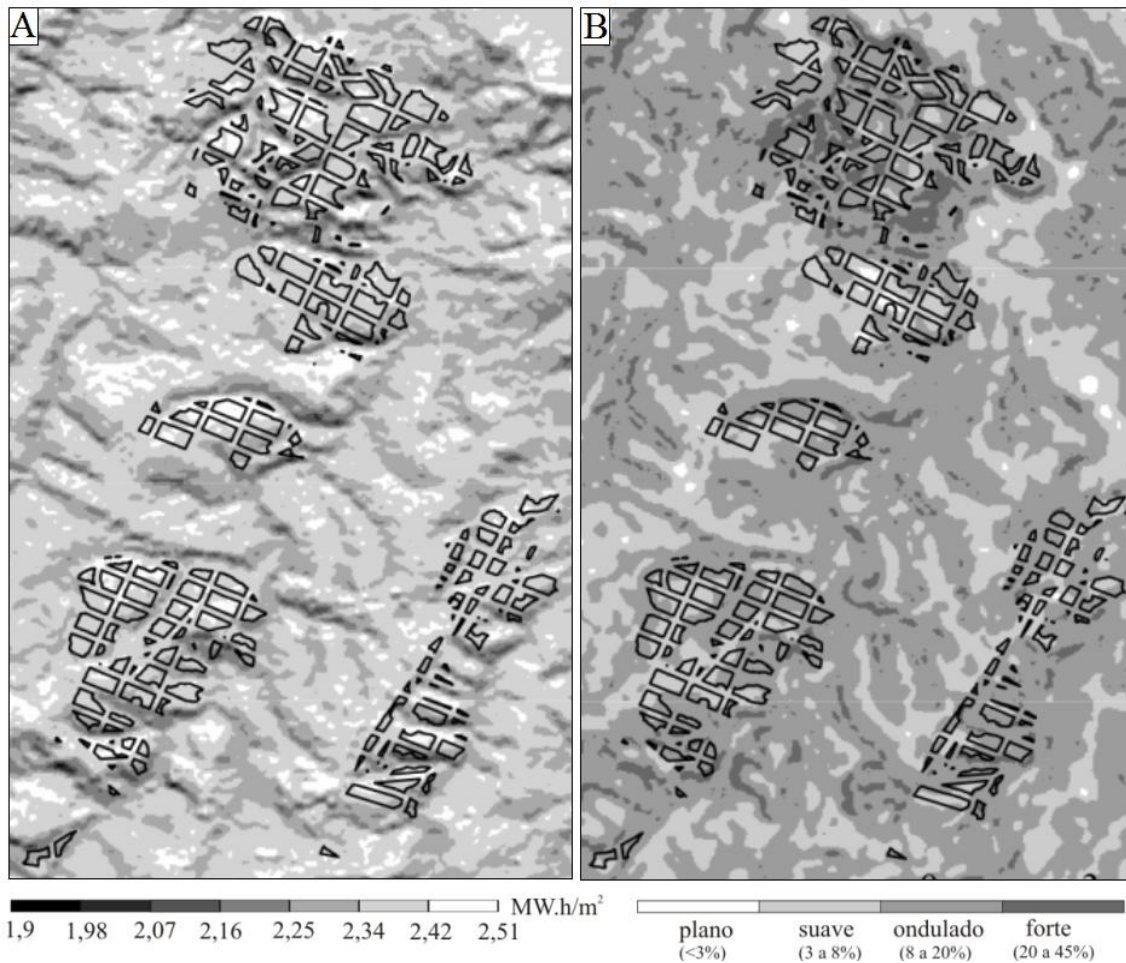


Figura 4.21 - Níveis de radiação solar anual (A) e classes de declividade do terreno (B) na área de estudo 4 e nos talhões de *Eucalyptus spp.*

A média da radiação solar anual incidente apenas nos talhões foi igual a 2,37 MW.h/m² e os valores mínimos e máximos de radiação solar variaram de 2,08 a 2,49 MW.h/m². Apesar da área de estudo estar localizada em relevo plano a forte ondulado (Figura 4.21B), a variação da radiação solar apenas nos talhões (~16,7%) foi relativamente uniforme, provavelmente, em virtude da área de plantio selecionada ser predominante em relevo suave a ondulado (ver Figura 4.21 e item 4.2.1). Ainda, supõe-se que a localização da área de estudo em região tropical também tenha influenciado na uniformidade da distribuição da radiação solar nos talhões. Isto porque, de acordo com os resultados obtidos no item 4.2.3, na área tropical, em relevo suave e ondulado a amplitude de radiação solar foi de 15,4% e 25%, respectivamente. Já na área

subtropical, a amplitude de 22,2% foi atingida em relevo plano. Por isto, em região tropical a distribuição da radiação solar no terreno apresenta menor sensibilidade às condições do relevo em comparação com a região subtropical.

Os talhões com material genético *Eucalyptus Saligna*, com coeficiente de variação da radiação solar anual abaixo de 1% (Figura 4.22), apresentaram média de radiação solar de 2,39 MW.h/m² e variação entre os valores mínimos e máximos de aproximadamente 3,68%. Ainda, foi possível verificar que a produtividade nestes talhões variou em 154% do nível mínimo ao máximo. Portanto, em função da uniformidade da distribuição da radiação solar nos talhões selecionados em contraposição a variação entre os níveis de produtividade nestes mesmos talhões, supõe-se que a relação entre a radiação solar anual e a produtividade, neste caso, apresentou baixo grau de correlação entre as variáveis devido à pequena amplitude da radiação solar.

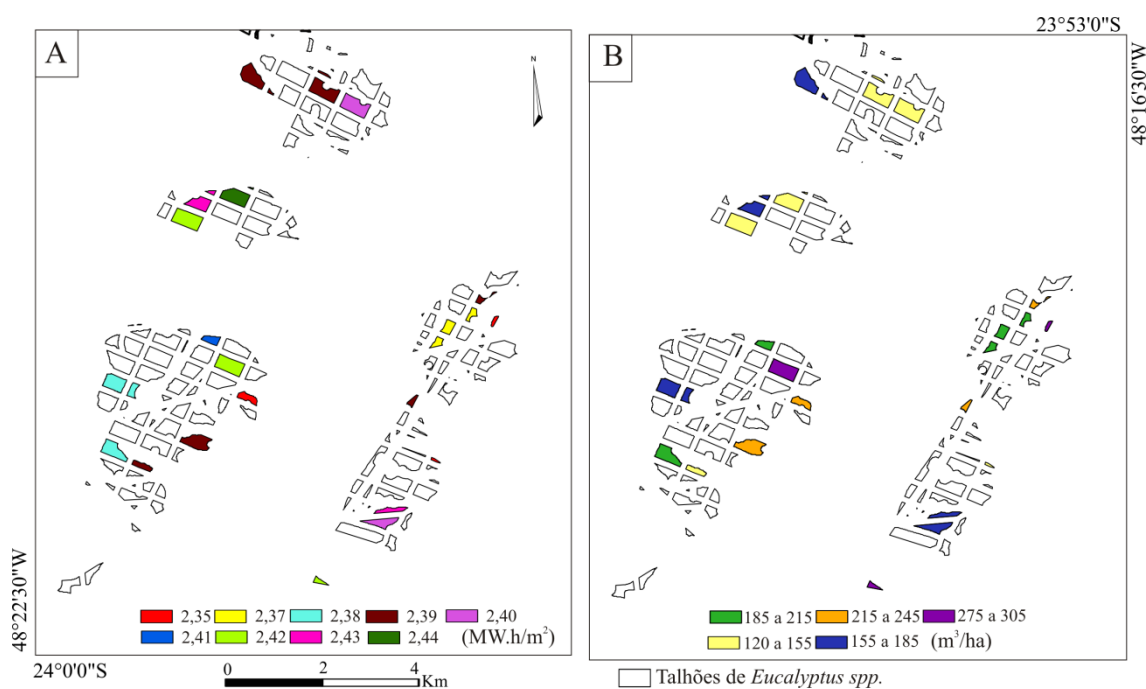


Figura 4.22 - Radiação solar anual média (A) e produtividade (B) dos talhões de *Eucalyptus Saligna* com coeficiente de variação da radiação solar anual menor do que 1%.

A produtividade dos talhões apresentou diferenças significativas (p-valor <1%) para os condicionantes de crescimento espaçamento, solos e suas combinações. Por isto, a correlação entre a produtividade e a radiação solar anual média foi feita separadamente para grupos homogêneos de solos, espaçamento e a combinação destes dois

condicionantes. Os resultados obtidos da análise de regressão entre a produtividade e radiação solar anual média, para os grupos de espaçamento e solos, foram não significativos em todas as situações. O máximo valor do coeficiente de determinação (r^2) foi correspondente a 0,5754, obtido para um subconjunto de 3 amostras, e os coeficientes da equação de regressão também foram não significativos. A equação de regressão linear apresentou coeficiente angular máximo de 0,0021 e em alguns resultados seu valor foi negativo. Já o coeficiente linear apresentou valores muito altos em comparação aos baixos valores do coeficiente angular, com intervalo de variação aproximado, em módulo, de 205 a 4899. Da mesma maneira, a correlação entre produtividade e a radiação solar anual média obtida da combinação entre os grupos mostrou baixa correlação e, portanto não foi significativa.

Por fim, a relação entre a produtividade e a radiação solar anual média para os subconjuntos de talhões mais iluminados e menos iluminados também não se apresentou significativa, embora os resultados obtidos por Brunori et al. (1995) tenham revelado que o efeito da orientação de vertentes na incidência de radiação solar no terreno foi significativo no crescimento de duas espécies de *Eucalyptus* em Israel. Neste estudo, as árvores foram plantadas em vertentes Norte, Sul, Leste e Oeste e em declividades variáveis de acordo com a profundidade dos solos do local. As árvores selecionadas foram medidas diretamente e através de equações alométricas e modelos estimativos de biomassa, o crescimento foi estimado para os anos de 1991 e 1993 em pontos localizados. As árvores plantadas nas vertentes Norte tiveram crescimento significativamente maior do que aquelas plantadas nas vertentes Oeste e Sul. O maior crescimento das árvores nas vertentes voltadas para o Norte foi explicado pelas condições microclimáticas locais. Para os autores, as árvores plantadas nas vertentes Norte tiveram menor exposição à luz direta o que reduziu o estresse causado por altas temperaturas e por consequência proporcionou melhores condições de crescimento. Como diferencial à presente pesquisa, além da situação localizada das amostras (em contraposição ao total de talhões), ressalta-se que a localização das amostras de Brunori et al. (1995) obedeceu a uma seleção de pontos com diferenças expressivas de radiação solar.

Diante da ampla variação de produtividade observada entre os talhões, considera-se que outras variáveis ambientais (GUISAN; ZIMMERMANN, 2000) não controladas, teriam sido preponderantes na variação dos dados de crescimento de *Eucalyptus Saligna*, da mesma forma que os blocos estabelecidos em condições homogêneas das variáveis agronômicas (solo, espaçamento, espécie) mostraram diferenças significativas. Como exemplo, no estudo de Morais (2006) para um mesmo material genético o espaçamento influenciou no número de tratos culturais a serem efetuados e por consequência na taxa de crescimento do eucalipto. Ressalta-se também que os possíveis impactos causados por chuvas e ventos bem como o manejo aplicado aos talhões, adotado de acordo com os tratos culturais, material genético, profundidade dos solos, umidade, areação e outras variáveis, possam ter influenciado no crescimento e desenvolvimento do *Eucalyptus Saligna*.

De modo geral os resultados da relação entre a radiação solar anual e a produtividade dos talhões diferiram do pressuposto por Ometto (1981). Para o autor, as folhas que recebem maior quantidade de radiação solar direta realizam o processo fotossintético com maior eficiência e, logo estão mais preparadas para a produção de matéria seca do que folhas expostas a menor quantidade de radiação solar. Portanto, teoricamente, a maior incidência de radiação solar nas árvores proporciona maior crescimento das mesmas. No entanto, o teste de sua correlação com a radiação solar obtida com a análise de dados SRTM permaneceu inconclusivo, porém a existência da relação não deve ser descartada em virtude das condições desfavoráveis deste estudo de caso. Mantém-se, assim, a expectativa de que outros estudos, com uma distribuição de amostras propositalmente mais favorável à observação de diferenças na radiação solar, permitam caracterizar esta correlação e avaliar adequadamente o potencial e as limitações dos dados SRTM para esta aplicação.

5 CONCLUSÕES

Os resultados do presente estudo afirmam a importância da utilização de MDE, através de suas derivadas declividade e orientação de vertentes, no cálculo e distribuição da radiação solar na superfície. A partir dos resultados foram obtidas as seguintes conclusões:

- a) As variações da distribuição da radiação solar no terreno diminuem com o aumento do período observado (diário, mensal, semestral e anual) devido a uma maior distribuição das condições da geometria de iluminação solar, que tende a uniformizar sua incidência;
- b) A medida que a declividade do terreno aumenta a amplitude dos níveis de radiação solar aumenta. Desta forma, as áreas montanhosas apresentam maior variação da distribuição da radiação solar em comparação às áreas planas;
- c) O aumento da nebulosidade diminui a sensibilidade da distribuição da radiação solar ao relevo e proporciona redução dos níveis de radiação solar no terreno, principalmente nas áreas mais iluminadas. Nas análises de distribuição da radiação solar em períodos mais curtos é necessária a utilização de parâmetros atmosféricos momentâneos, o que implica em variações significativas no cálculo da radiação solar. A integração dos parâmetros atmosféricos em períodos sazonais ou anuais origina valores mais estáveis de radiação solar;
- d) A variação da distribuição da radiação solar anual no terreno aumenta com o aumento da latitude (área equatorial, tropical e subtropical), com níveis uniformemente altos na área equatorial. O aumento de latitude corresponde a um decréscimo da média, causado pela redução dos níveis mínimos de radiação solar, principalmente nas áreas montanhosas, em comparação aos níveis máximos, que se mostraram relativamente estáveis;
- e) A produtividade dos talhões mostrou-se variável de acordo com condicionantes agrônomicos (espécie, espaçamento, solos e suas combinações). No entanto, as condições do estudo, sobretudo a uniformidade na distribuição da radiação solar

observada nos talhões, não permitiram uma avaliação conclusiva de sua correlação com a radiação solar estimada a partir dos dados SRTM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. C.; SANCHES, L.; NOGUEIRA, J. S.; SILVA, V. A. M. Effects of sky conditions measured by the clearness index on the estimation of solar radiation using a digital elevation model. **Atmospheric and Climate Sciences**, v. 3, n. 4, p. 618-626, 2013.

BARBOSA, J. M.; MELENDEZ-PASTOR, I.; NAVARRO-PEDREÑO, J.; BITENCOURT, M. D. Remotely sensed biomass over steep slopes: An evaluation among successional stands of the Atlantic Forest, Brazil. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 88, p. 91-100, 2014.

BARBOUR, M. G.; BURK, J. H.; PITTS, W. D. Terrestrial plant ecology. In: _____. **Light and photosynthesis**. Menlo Park: The Benjamin/Cummings Publishing Company, 1980. cap. 13, p. 300-330. ISBN (0 8053 0540 8).

BASTOS, T. X. **O clima da Amazonia brasileira segundo Koppen**. Belém: EMBRAPA-CPATU, 1982. 4p. Pesquisa em andamento, 87. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/381629>>. Acesso em: 21 jul. de 2014.

BATLLES, F. J.; BOSCH, J. L.; TOVAR-PESACADOR, J.; MARTÍNEZ-DURBÁN, M.; ORTEGA, R.; MIRALLES, I. Determination of atmospheric parameters to estimate global radiation in areas of complex topography: Generation of global irradiation map. **Energy Conversion and Management**, v. 49, n. 2, p. 336-345, 2008.

BISPO, P. C.; SANTOS, J. R.; VALERIANO, M. M.; TOUZI, R.; SEIFERT, F. M. Integration of polarimetric PALSAR attributes and local geomorphometric variables derived from SRTM for forest biomass modeling in central Amazonia. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 40, n. 1, p. 1-16, 2014.

BISPO, P. C.; VALERIANO, M. M.; SANTOS, J. R. Effects of the geomorphometric characteristics of the local terrain on floristic composition in the central Brazilian Amazon. **Austral Ecology**, v. 37, n. 4, p. 491-499, 2012.

BÖHNER, J.; ANTONIC´, O. Land-Surface Parameters Specific to Topo-Climatology. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. **Developments in Soil Science: geomorphometry concepts, software, applications**. Amsterdam: Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics University of Amsterdam, 2009. 765 p. ISBN: 978-0-12-374345-9. Cap. 8. p. 195-226.

BOLCH, T.; KAMP, U.; OLSENHOLLER, J. Using ASTER and SRTM DEMs for studying geomorphology and glaciation in high mountain areas. In: EARSel SYMPOSIUM ON NEW STRATEGIES FOR EUROPEAN REMOTE SENSING , 24., 2004, Dubrovnik, Croatia. **Proceedings...** Dubrovnik: Millpress, 2005. p. 119-128. ISBN 90 -5966- 003-X.

BRASIL. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Topodata**: banco de dados geomorfométricos do Brasil. Variáveis geomorfométricas locais. São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em: 08 fev. de 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Panorama sobre a desertificação no Estado do Espírito Santo**. Brasília, 2005. 89 p. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sedr_desertif/_arquivos/panorama_espiritosanto.pdf>. Acesso em: 21 jul. de 2014.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Atlas de Saneamento**. Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/atlas_saneamento/default_saneamento.shtm>. Acesso em: 21 jul. de 2014.

BRUNORI, A.; NAIR, P. K. R.; ROCKWOOD, D. L. Performance of two Eucalyptus species at different slope positions and aspects in a contour-ridge planting system in the Negev Desert of Israel. **Forest Ecology and Management**, v. 75, n. 1-3, p. 41-48, 1995.

BUFFO, J.; FRITSCHEN, L. J.; MURPHY, J. L. **Direct solar radiation on various slopes from 0 to 60 degrees north latitude**. Portland: Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, 1972, 74p. Disponível em: <http://www.fs.fed.us/pnw/pubs/pnw_rp142.pdf>. Acesso em: 14 jan. de 2014.

CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. **Computers & Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.

CANAVESI, V. **Aplicação de dados Hyperion EO-1 no estudo de plantações de Eucalyptus spp.** 2008. 124p. (INPE-15316-TDI/1360). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.01.14.06>>. Acesso em: 27 fev. 2015.

CASTRO, P. R. C. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. 249p.

COULSON, K. L. **Solar and terrestrial radiations: methods and measurements**. New York: Academic, 1975. 322 p.

CUTLER, M. E. J.; BOYD, D. S.; FOODY, G. M.; VETRIVEL, A. Estimating tropical forest biomass with a combination of SAR image texture and Landsat TM data: an assessment of predictions between regions. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 70, p. 66 - 77, 2012.

DEILAMI, K.; KHAJEH, S.; BOLHASSANI, N.; JAZIREEYAN, I. Application of ASTER satellite in digital elevation model generation : a review. **Research Journal of Environmental and Earth Sciences**, v. 4, n. 12, p. 1033-1037, 2012.

DOZIER, J.; FREW, J. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, n. 5, p. 963-969, 1990.

DUBAYAH, R.; RICH, P. M. Topographic solar radiation models for GIs. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 9, n. 4, p. 405-419, 1995.

DUBAYAH, R. Estimating net solar radiation using Landsat Thematic Mapper and digital elevation data. **Water Resources Research**, v. 28, n. 9, p. 2469-2484, 1992.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. New York: John Wiley & Sons, 1980. 919 p.

EASTMAN, J. R. **IDRISI Selva: Manual**. Versão 17.0. Worcester: Clark University. 2012. 322p.

ELACHI, C.; ZYL, J. V. **Introduction to the physics and techniques of remote sensing**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 552 p. ISBN (0-471-47569-6).

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

ENGLHART, S.; KEUCK, V.; SIEGERT, F. Aboveground biomass retrieval in tropical forests — the potential of combined X- and L-band SAR data use. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 5, p. 1260 - 1271, 2011.

ESRI. **ArcInfo: Using ArcGIS Desktop**. Versão 9.3. Redlands: Environmental Systems Research Institute. 2006. 435 p.

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, p.1-33, 2007.

FLORINSKY, I. V.; KURYAKOVA, G. A. Influence of topography on some vegetation cover properties. **Catena**, v. 27, n. 2, p. 123-141, 1996.

FRANCEZ, L. M. B.; SOUZA, D. V.; TAKEHANA, C. L. I.; BARROS, P. L. C. **Manual para análise de inventário florestal e equação de volume em projetos de manejo florestal sustentável – PMFS**. Belém: Secretaria de Estado de Meio Ambiente. 2010. 66p.

FU, P.; RICH, P. M. A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 37, n. 1-3, p. 25-35, 2002.

FU, P.; RICH, P. M. **The Solar Analyst user manual**. Versão 1.0. Vermont: Helios Environmental Modeling Institute (HEMI). 2000. 49p.

FU, P., RICH, P. M. **TopoView user manual**. Vermont: Helios Environmental Modeling Institute (HEMI). 1999a. 48 p.

FU, P., RICH, P. M. Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. In: ANNUAL ESRI USER CONFERENCE, 19., 1999b, San Diego, USA. **Proceedings**... San Diego: ESRI, 1999b. 33p.

GALLANT, J. C., WILSON, J. P. Primary topographic attributes. In: WILSON, J. P.; GALLANT, J.C. (Ed) **Terrain analysis: principles and applications**. 1.ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000. cap. 3, p.51-85. ISBN (0-471-32188-5).

GATES, D. M. **Biophysical ecology**. New York: Springer, 1980. 611p. ISBN (0-387-90414-X).

GEDDES, A. E. M. **Meteorology: an introductory treatise**. 2. ed. London and Glasgow: Blackie & Son Limited, 1939. 398 p.

GLOBAL MAPPER LLC. **Global mapper user's manual**. Versão 13.0. Hallowell: Blue Marble Geographics. 2011. 364p. Disponível em: <http://www.globalmapper.com/helpv13/Help_Main.html>. Acesso em: 28 jan. 2015.

GUISAN, A.; ZIMMERMANN, N. E. Predictive habitat distribution models in ecology. **Ecological Modelling**, v. 135, n. 2-3, p. 147-186, 2000.

GUO, L.; CHEHATA, N.; MALLET, C.; BOUKIR, S. Relevance of airborne lidar and multispectral image data for urban scene classification using Random Forests. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, n. 1, p. 56-66, 2011.

GUTH, P. L. Geomorphometric comparison of ASTER GDEM and SRTM. In: A SPECIAL JOINT SYMPOSIUM OF ISPRS TECHNICAL COMMISSION IV & AUTOCARTO IN CONJUNCTION WITH ASPRS/CaGIS 2010 FALL SPECIALTY CONFERENCE, 2010, Orlando, Florida. **Proceedings**... Orlando: ISPRS, 2010. 10p.

HETRICK, W.; RICH, P.; WEISS, S. Modeling insolation on complex surfaces. In: ANNUAL ESRI USER CONFERENCE, 13., 1993, Redlands, California. **Proceedings**... Redlands: Environmental Systems Research Institute, 1993. p. 447-458.

HIRANO, A.; WELCH, R.; LANG, H. Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. **International Journal of Remote Sensing**, v.57, n. 5-6, p. 356-370, 2003.

HIRT, C.; FILMER, M. S.; FEATHERSTONE, W. E. Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4.1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia. **Australian Journal of Earth Sciences**, v. 57, n. 3, p. 337-347, 2010.

HOFIERTA, J.; ŠÚRI, M. The solar radiation model for open source GIS: implementation and applications. In: OPEN SOURCE GIS - GRASS USERS CONFERENCE, 2002, Trento, Italy. **Proceedings ...** Trento: University of Trento, 2002. p. 1-19.

IQBAL, M. **An Introduction to solar radiation**. Toronto: Academic, 1983. 390 p. ISBN (0-12-373752-4).

IVERSON, L. R.; BROWN, S.; PRASAD, A.; MITASOVA, H.; GILLESPIE, A. J. R.; LUGO, A. E. Use of GIS for estimating potential and actual forest biomass for continental South and Southeast Asia. In : DALE, V. H. (Ed). **Effects of land-use change on atmospheric CO₂ concentrations: South and Southeast Asia as a case study**. New York: Springer, 1994. cap. 3, p. 67– 116. ISBN (978-1-4613-8365-9). Disponível em: < http://www.fs.fed.us/global/iitf/pubs/bc_iitf_1994_iverson001.PDF> Acesso em: 01 fev.2014

JACKSON, M. T. Effect of microclimate on spring flowering phenology. **Ecology**, v. 47, n. 3, p. 407-415, 1966.

JACOVIDES, C. P.; HADJIOANNOU, L.; PASHIARDIS, S.; STEFANO, L. On the diffuse fraction of daily and monthly global radiation for the Island of Cyprus. **Solar Energy**, v. 56, n. 6, p. 565-572, 1996.

JIMÉNEZ FERNÁNDEZ, D. C. **Avaliação de algoritmos e modelos digitais de elevação para extração automática da drenagem**. 2011. 112 p. (sid.inpe.br/mte-m19/2011/05.01.13.51-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39K8BSL>>. Acesso em: 11 fev. 2015.

KELLNDORFER, J.; WALKER, W.; PIERCE, L.; DOBSON, C.; FITESB, J. A.; HUNSAKER, C.; VONA, J.; CLUTTER, M. Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets. **Remote Sensing of Environment**, v.93, n. 3, p. 339-358, 2004.

KLUCHER, T. M. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. **Solar Energy**, v. 23, n. 2, p. 111-114, 1979.

KUMAR, L.; SKIDMORE, A. K.; KNOWLES, E. Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 11, n. 5, p. 475 - 497, 1997.

LEÃO, R. M. **A floresta e o homem**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo (Edusp), 2000. 434 p. ISBN (85-314-0543-2)

LINGAMGUNTA, C.; VEZIROGLU, T. N. A universal relationship for estimating daily clear sky insolation. **Energy Conversion and Management**, v. 45, n.15-16, p. 2313–2333, 2004.

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The interrelationship and of direct, diffuse and characteristic distribution total solar radiation. **Solar Energy**, v.4, n.3, p.1-19, 1960.

LU, D. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 7, p. 1297-1328, 2006.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agrônômica Ceres Ltda, 1980. 251 p.

MARTÍNEZ-DURBÁN, M.; ZARZALEJO, L. F.; BOSCH, J. L.; ROSIEK, S.; POLO, J.; BATLLES, F. J. Estimation of global daily irradiation in complex topography zones using digital elevation models and meteosat images: Comparison of the results. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 9, p. 2233–2238, 2009.

MÉSZÁROŠ, I.; MIKLÁNEK, P. Calculation of potential evapotranspiration based on solar radiation income modeling in mountainous areas. **Biologia**, v. 61, n. S19, p. 284-288, 2006.

MINITAB. **Meet MINITAB**. Versão 14. State College: Minitab Inc. 2003. 133p.

MOORE, I. D.; GESSLER, P. E.; NIELSEN, G. A.; PETERSON, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, n. 2, p.443-452, 1993.

MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo: SBS, 2000. 111p.

MORAIS, V. M. **Dinâmica de crescimento de eucalipto clonal sob diferentes espaçamentos, na região noroeste do estado de Minas Gerais**. 2006. 63 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006. Disponível em: <<http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/3766>>. Acesso em: 01 dez. 2014.

MOREIRA, E. P.; VALERIANO, M. M. Application and evaluation of topographic correction methods to improve land cover mapping using object-based classification. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 32, p. 208-217, 2014.

NELSON, B. W.; MESQUITA, R.; PEREIRA, J. L. G.; SOUZA, S. G. A.; BATISTA, G. T.; COUTO, L. B. Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 117, n. 1-3, p. 149-167, 1999.

NIKOLAKOPOULOS, K. G.; KAMARATAKIS, E. K.; CHRYSOULAKIS, N. SRTM vs ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete, Greece. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 21, p. 4819 - 4838, 2006.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. London: Methuen & Co Ltd, 1978. 372 p. ISBN (0-416-04432-8).

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda, 1981. 425 p.

OVERMAN, J. P. M.; WITTE, H. J. L.; SALDARRIAGA, J. G. Evaluation of regression models for above-ground biomass determination in Amazon rainforest. **Journal of Tropical Ecology**, v. 10, n. 2, p. 207-218, 1994.

PANDOLFO, C.; BRAGA, H. J.; SILVA JR, V. P.; MASSIGNAM, A. M.; PEREIRA, E. S.; THOMÉ, V. M. R.; VALCI, F.V. **Atlas climatológico digital do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: Epagri, 2002. CD-Rom.

PARRESOL, B. R. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. **Forest Science**, v. 45, n. 4, p. 573-593, 1999.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. 60p.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Versão 3.0.1. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2013. 3551 p.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 57, n. 4, p.241-262, 2003.

RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; SALAS, J.; AGUADO, I. Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types. **IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 5, p. 1056 -1061, 2003.

RICH, P. M.; WOOD, J.; VIEGLAIS, D. A.; BUREK, K.; WEBB, N. **Guide to HemiView**: software for analysis of hemispherical photography. Cambridge: Delta-T Devices, Ltd. 1999. 79 p.

RODRIGUEZ, E.; MORRIS, C. S.; BELZ, J. E. A global assessment of the SRTM performance. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 72, n. 3, p. 249-260, 2006.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; LEITE, H. G.; COMERFORD, N. B.; NOVAIS, R. F. de. Estimativa de biomassa de plantios de Eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, v. 32, n. 4, p. 697-706, 2008.

SARKER, L. R.; NICHOL, J. E. Improved forest biomass estimates using ALOS AVNIR-2 texture indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 4, p. 968-977, 2011.

SEGURA, M.; KANNINEN, M. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. **Biotropica**, v. 37, n. 1, p. 2-8, 2005.

SETZER, J. **Contribuição para o estudo do clima do Estado de São Paulo**. São Paulo: Escolas Profissionais Salesianas, 1946. 239 p.

SILVA, M. A. V. **Meteorologia e climatologia**. 2. ed. Brasília: INMET, 2001. 515p.

SILVEIRA, C. T. **Análise digital do relevo na predição de unidades preliminares de mapeamento de solos: integração de atributos topográficos em sistemas de informações geográficas e redes neurais artificiais**. 2010. 152p. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SLATER, P. N. **Remote sensing, optics and optical systems**. London: Addison-Wesley, 1980. 575 p. ISBN (0-201-07250-5).

SOARES, C. P. B.; NETO, F de P.; SOUZA, A. L de. **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa: Editora UFV, 2006. 276 p.

TEMPS, R. C.; COULSON, K. L. Solar radiation incident upon slopes of different orientations. **Solar Energy**, v. 19, n. 2, p. 179 - 184, 1977.

TIAN, Y. Q.; DAVIES-COLLEY, R. J.; GONG, P.; THORROLD, B. W. Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.109, n.1, p. 67-74, 2001.

TOUTIN, T.; GRAY, L. State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 55, n. 1, p. 13-33, 2000.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. 1. ed. São Paulo: Nobel, 1980. 374 p. ISBN (85-213-0007-7).

VALERIANO, M. M. Cálculo do fator topográfico de iluminação solar para modelagem ecofisiológica a partir do processamento de Modelos Digitais de Elevação (MDE). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 5933-5940. ISBN 978-85-17-00056-0. Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQRTRW/39ULK4H>>. Acesso em: 01 dez. 2013.

VALERIANO, M. M. **Topodata**: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008. 72 p. (INPE-15318-RPE/818).

VALERIANO, M. M.; PICINI, A. G. Uso de sistema de informação geográfica para a geração de mapas de médias mensais de temperatura do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, n. 2, p. 255-262, 2000.

VALIATI, M. I.; RICIERI, R. P. Estimativa da irradiação solar global com partição mensal e sazonal para a região de Cascavel – PR. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.1, p.76-85, 2005.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, 2000. 448 p. ISBN (85-7269-073-5).

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. Primary topographic attributes. In:_____. **Terrain analysis: principles and applications**. 1.ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000. cap. 1, p.1-26. ISBN (0-471-32188-5).

XIN, Y.; CHENCHAO, X. Terrain-based revision of an air temperature model in mountain areas. In: ZHOU, Q.; LEES, B. (Ed). **Advances in digital terrain analysis**. Berlin: Springer, 2008. cap. 5, p. 425-442. ISBN (978-3-540-77799-1).

YANG, L.; MENG, X.; ZHANG, X. SRTM DEM and its application advances. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 14, p. 3875-3896, 2011.

ZHAO, S.; CHENG, W.; ZHOU, C.; CHEN, X.; ZHANG, S.; ZHOU, Z.; LIU, H.; CHAI, H. Accuracy assessment of the ASTER GDEM and SRTM3 DEM: an example in the Loess Plateau and North China Plain of China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 23, p. 8081-8093, 2011.

ZHENG, D.; RADEMACHER, J.; CHEN, J.; CROW, T.; BRESEE, M.; MOINE, J. L.; RYU, S. R. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. **Remote Sensing of Environment**, v. 93, n. 3, p. 402-411, 2004.

APÊNDICE A

A.1 Tabelas

Tabela A.1 - Níveis máximos, médios, mínimos e amplitude de radiação solar anual em função do relevo do terreno, na área de estudo 3 (Subtropical).

Relevo (Declividades)	Níveis (W.h/m ²)			
	Mínimos	Máximos	Médios	Amplitude
Plano (<3%)	1.501.331	1.826.190	1.736.830	324.858,5
Suave Ondulado (3 a 8%)	1.447.209	1.843.323	1.749.553	396.114
Ondulado (8 a 20%)	1.365.818	1.884.344	1.739.671	518.526,3
Forte ondulado (20 a 45%)	1.159.714	1.911.415	1.673.054	751.701,1
Montanhoso (45 a 75%)	854.862,5	1.902.560	1.418.842	1.047.698
Escarpado (> 75%)	431.786,5	1.896.431	1.206.836	1.464.644

Tabela A.2 - Níveis máximos, médios, mínimos e amplitude de radiação solar anual em função do relevo do terreno para a condição atmosférica de céu claro (cl), na área de estudo 3 (Subtropical).

Relevo (Declividades)	Níveis (W.h/m ²)			
	Mínimos	Máximos	Médios	Amplitude
Plano (<3%)	2.108.403	2.437.799	2.332.219	329.396
Suave Ondulado (3 a 8%)	1.992.663	2.463.713	2.340.577	471.050,5
Ondulado (8 a 20%)	1.864.657	2.526.636	2.323.419	661.978,9
Forte ondulado (20 a 45%)	1.568.092	2.580.668	2.241.930	1.012.576
Montanhoso (45 a 75%)	1.103.487	2.575.256	1.918.797	1.471.769
Escarpado (> 75%)	513.179	2.578.710	1.629.516	2.065.531

Tabela A.3 - Níveis máximos, médios, mínimos e amplitude de radiação solar anual em função do relevo do terreno para a condição atmosférica de céu parcialmente nublado (pn), na área de estudo 3 (Subtropical).

Relevo (Declividades)	Níveis (W.h/m ²)			
	Mínimos	Máximos	Médios	Amplitude
Plano (<3%)	1.493.351	1.821.872	1.732.340	328.521,4
Suave Ondulado (3 a 8%)	1.440.319	1.838.260	1.745.460	397.941
Ondulado (8 a 20%)	1.361.322	1.878.086	1.735.814	516.764,1
Forte ondulado (20 a 45%)	1.156.788	1.903.868	1.669.031	747.079,8
Montanhoso (45 a 75%)	856.879,3	1.894.198	1.415.127	1.037.318
Escarpado (> 75%)	441.508,9	1.887.563	1.204.785	1.446.054

Tabela A.4 - Níveis máximos, médios, mínimos e amplitude de radiação solar anual em função do relevo do terreno para a condição atmosférica de céu nublado (nb), na área de estudo 3 (Subtropical).

Relevo (Declividades)	Níveis (W.h/m²)			
	Mínimos	Máximos	Médios	Amplitude
Plano (<3%)	634.402,5	956.333,1	882.558,1	321.930,6
Suave Ondulado (3 a 8%)	621.966,6	960.822,5	900.823,7	338.855,9
Ondulado (8 a 20%)	602.168,6	966.774,5	899.518,7	364.605,9
Forte ondulado (20 a 45%)	529.477,1	970.474,9	852.837,8	440.997,8
Montanhoso (45 a 75%)	456.911,2	948.110,4	694.570,9	491.199,2
Escarpado (> 75%)	276.709,8	955.158,8	609.621,2	678.449,1

Tabela A.5 - Níveis máximos, médios, mínimos e amplitude de radiação solar anual em função do relevo do terreno, na área de estudo 1 (Equatorial).

Relevo (Declividades)	Níveis (W.h/m²)			
	Mínimos	Máximos	Médios	Amplitude
Plano (<3%)	1.788.962	1.836.158	1.821.260	47.195,75
Suave Ondulado (3 a 8%)	1.712.217	1.843.784	1.817.502	131.566,1
Ondulado (8 a 20%)	1.662.714	1.924.538	1.808.130	261.824,5
Forte ondulado (20 a 45%)	1.577.630	2.005.118	1.762.552	427.487,3
Montanhoso (45 a 75%)	1.482.886	2.014.549	1.689.814	531.662,5
Escarpado (> 75%)	886.537,4	1.974.148	1.494.846	1.087.611

Tabela A.6 - Níveis máximos, médios, mínimos e amplitude de radiação solar anual em função do relevo do terreno, na área de estudo 2 (Tropical).

Relevo (Declividades)	Níveis (W.h/m²)			
	Mínimos	Máximos	Médios	Amplitude
Plano (<3%)	1.662.262	1.723.426	1.699.084	61.163,38
Suave Ondulado (3 a 8%)	1.547.834	1.782.334	1.693.092	234.500,1
Ondulado (8 a 20%)	1.478.991	1.860.940	1.687.539	381.948,6
Forte ondulado (20 a 45%)	1.277.877	1.906.392	1.650.119	628.515,3
Montanhoso (45 a 75%)	993.245,3	1.934.451	1.546.194	941.205,2
Escarpado (> 75%)	404.559,4	1.929.975	1.346.990	1.525.416