

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA

ESTIMATIVA E MAPEAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE EM
SUPERFÍCIES COM TOPOGRAFIA HETEROGÊNEA NA ZONA DE PRODUÇÃO
VITIVINÍCOLA SERRA GAÚCHA

Eliseu José Weber
Engenheiro Agrônomo
Mestre em Sensoriamento Remoto/UFRGS

Tese apresentada como um dos requisitos
à obtenção do Grau de Doutor em Fitotecnia
Ênfase em Agrometeorologia

Porto Alegre (RS), Brasil
Maio de 2011

CIP - Catalogação na Publicação

Weber, Eliseu José

Estimativa e mapeamento da radiação solar
incidente em superfícies com topografia heterogênea
na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha / Eliseu
José Weber. -- 2011.
145 f.

Orientadora: Denise Cybis Fontana.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia, Porto Alegre, BR-RS, 2011.

1. Radiação solar. 2. Topografia. 3. Sistemas de
Informação Geográfica. I. Fontana, Denise Cybis,
orient. II. Título.

ELISEU JOSÉ WEBER
Engenheiro Agrônomo - UFRGS
Mestre em Sensoriamento Remoto - UFRGS

TESE

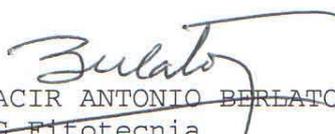
Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

DOUTOR EM FITOTECNIA

Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

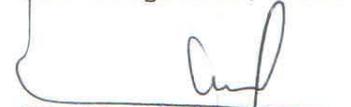
Aprovado em: 24.05.2011
Pela Banca Examinadora


DENISE CYBIS FONTANA
Orientadora - PPG Fitotecnia

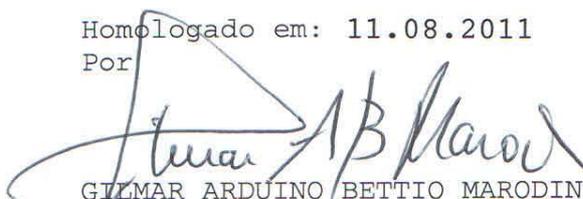

MOACIR ANTONIO BERLATO
PPG Fitotecnia


HOMERO BERGAMASCHI
PPG Fitotecnia


ULISSES FRANZ BREMER
PPG Geografia/UFRGS


JORGE TONIETTO
EMBRAPA Uva e Vinho
Bento Gonçalves/RS

Homologado em: 11.08.2011
Por


GILMAR ARDUINO BETTIO MARODIN
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia


PEDRO ALBERTO SELBACH
Diretor da Faculdade
de Agronomia

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende” (Leonardo da Vinci)

Dedico a Eliana, minha companheira epicurista, que me incentivou constantemente nestes anos, com quem divido a alegria desta conquista.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo carinho, apoio e sabedoria, a quem devo a convicção de que o estudo é a melhor forma de realização, apesar da vida lhes ter privado dessa oportunidade;

À minha orientadora, professora Denise Cibys Fontana, pelo estímulo e pela confiança depositada ao proporcionar total liberdade na escolha do tema e na execução da pesquisa, bem como pela determinação pessoal em me acompanhar até o final, enfrentando dolorosa situação familiar com a força que só as mulheres têm;

Ao PPG em Fitotecnia, seus professores, funcionários e colegas, bem como à Faculdade de Agronomia, onde também fiz minha graduação, pela oportunidade de desenvolvimento pessoal e intelectual;

Aos professores Homero Bergamaschi, Moacir Antônio Berlatto e Jorge Ricardo Ducati, pela participação na banca de qualificação e pelas valiosas contribuições dadas ao projeto de pesquisa;

Ao amigo Gabriel Selbach Hoffmann, pelo precioso auxílio em atividades de campo, além da troca de idéias em diversos momentos ao longo do trabalho;

Ao professor Heinrich Hasenack, pelas sugestões e contribuições, bem como o acesso à estrutura física do Laboratório de Geoprocessamento do Centro de Ecologia da UFRGS para o processamento dos mapas finais de radiação;

Ao colega Lúcio Lucatelli, pela ajuda na organização do processamento dos mapas finais de radiação, fundamental para conclusão do trabalho em tempo hábil;

A Cristiano Sumariva, pela programação de rotinas de conversão dos resultados para planilhas e arquivos TIFF, as quais me pouparam de longas e tediosas horas de trabalho manual;

Ao pesquisador Jorge Tonietto, da Embrapa Uva e Vinho, pelo desafio proposto e pela disponibilização de dados da estação meteorológica da Embrapa Uva e Vinho;

Ao pesquisador Carlos Alberto Flores, da Embrapa Clima Temperado, cujo interesse na aplicação prática dos resultados desta pesquisa foi uma motivação a mais para sua execução;

E aos meus amigos, colegas de curso e de trabalho e a muitas outras pessoas que não foram nominalmente citadas, mas que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho.

ESTIMATIVA E MAPEAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE EM SUPERFÍCIES COM TOPOGRAFIA HETEROGÊNEA NA ZONA DE PRODUÇÃO VITIVINÍCOLA SERRA GAÚCHA¹

Autor: Eliseu José Weber
Orientador: Denise Cybis Fontana

RESUMO

A radiação solar exerce papel determinante nos processos de troca de energia entre a atmosfera e a superfície terrestre e afeta todos os processos físicos, químicos e biológicos nos ecossistemas. Em áreas com topografia heterogênea a radiação incidente varia em função da altitude, da declividade e da orientação da superfície, bem como da posição da mesma em relação a superfícies vizinhas. Para estimar a radiação solar nessas condições, além da atenuação atmosférica, é necessário considerar a situação topográfica da superfície e sua interação com a radiação incidente. O objetivo geral deste estudo foi efetuar e avaliar a estimativa e o mapeamento da radiação solar incidente na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha, considerando simultaneamente a influência da atmosfera e da topografia. Foram utilizados dados de radiação solar global média decendial de 4 estações meteorológicas, um Modelo Digital de Elevação, receptores GPS e programas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). A atmosfera foi caracterizada pela fração difusa (K_d), estimada por meio de três relações empíricas a partir do índice de claridade (K_t), e pela transmitância direta, calculada por diferença e corrigida de três formas para o menor caminho óptico com base no ângulo zenital médio. A radiação incidente na superfície foi estimada para períodos decendiais, empregando o algoritmo *Solar Analyst* e os parâmetros atmosféricos acima citados. As estimativas foram verificadas com os registros das estações meteorológicas da área de estudo. O melhor desempenho foi obtido com K_d estimado pelo coeficiente linear da equação de Ångström, ajustado para a região, e transmitância direta corrigida pelo ângulo zenital médio excluindo as elevações do Sol inferiores a 10° no outono-inverno. O coeficiente de determinação entre os dados estimados e registrados foi de 0,8511, com uma subestimativa média de 4,59%. Os mapas estimados mostraram que o campo de radiação apresenta uma alta variabilidade espacial e temporal, em decorrência da topografia heterogênea. A irradiação global anual na área de estudo apresentou uma amplitude de 425 MJ.m^{-2} a 5.045 MJ.m^{-2} . A variabilidade espacial foi menor na primavera e no verão e aumentou no outono e no inverno, com maiores variações observadas em encostas sul. A radiação direta foi a mais afetada pelas características topográficas da superfície, constituindo a maior determinante da variabilidade da radiação global estimada em superfícies com topografia heterogênea. A metodologia utilizada possibilitou estimar a radiação solar incidente com acurácia e com alta resolução espacial.

¹ Tese de Doutorado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil. (145 p.). Maio, 2011.

ESTIMATION AND MAPPING OF SOLAR RADIATION ON SURFACES WITH HETEROGENEOUS TOPOGRAPHY IN THE SERRA GAÚCHA WINE PRODUCTION ZONE²

Author: Eliseu José Weber
Adviser: Denise Cybis Fontana

ABSTRACT

Solar radiation exerts major influence on energy exchange processes between atmosphere and Earth surface, and affects all the physical, chemical and biological processes in ecosystems. In areas with heterogeneous topography, incident radiation depends on elevation, slope, orientation, and position of the surface related to neighboring surfaces. Under such conditions, beside atmospheric attenuation, also surface topography and its effects on incident radiation must be taken into account to estimate solar radiation. The aim of this study was to estimate the solar radiation and to generate radiation maps of the Serra Gaúcha wine production zone, accounting simultaneously for the influence of atmosphere and topography. Long term 10-day average global solar radiation data measured at four meteorological stations, a Digital Elevation Model, GPS receivers and Geographic Information Systems (GIS) software were used. Atmosphere was characterized by its diffuse fraction (K_d) and direct transmittance. K_d was estimated by three empirical relationships based on the clearness index (K_t). Direct transmittance was calculated by difference from K_d and corrected for the smallest optical path based on the mean zenith angle applied in three different ways. Incident radiation was estimated for decennial periods, using the Solar Analyst software and the above mentioned atmospheric parameters. Solar radiation estimates were validated with average data measured at meteorological stations within the study area. The best performance was obtained with K_d estimated by the linear coefficient of the Ångström equation fitted for the region, and direct transmittance corrected by the mean zenith angle excluding Sun elevations below 10° in autumn-winter. The determination coefficient between estimated and measured data was 0.8511, and an underestimation of 4.59% was found. The estimated maps showed that the radiation field has a high spatial and temporal variability due to heterogeneous topography. The annual global irradiation over the study area ranged from 425 MJ.m^{-2} to $5,045 \text{ MJ.m}^{-2}$. The spatial variability was lower in spring and summer, and increased in autumn and winter, with larger variations observed in south facing slopes. The direct radiation was the component most affected by topography, constituting a major driver of the global radiation variability on surfaces with heterogeneous topography in Serra Gaúcha. The proposed methodology allowed estimates of incident solar radiation with high accuracy and high spatial resolution.

² Doctoral thesis in Agronomy, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brazil. (145 p.). May, 2011.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Radiação solar	5
2.2. Interação da radiação solar com a atmosfera	6
2.3. Medição da radiação solar	9
2.4. Estimativas de radiação	11
2.4.1. Uso direto de dados de estações vizinhas	12
2.4.2. Interpolação	12
2.4.3. Dados de satélites.....	14
2.4.4. Modelos de radiação	16
2.4.4.1. Modelos empíricos	16
2.4.4.2. Modelos físicos	18
3 MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1. Caracterização da área de estudo	25
3.1.1. Localização	25
3.1.2. Clima.....	28
3.1.3. Geologia.....	30
3.1.4. Relevo	31
3.1.5. Solos.....	32
3.1.6. Vegetação.....	33
3.1.7. Histórico recente	34
3.2. Material	36
3.2.1. Dados de estações meteorológicas.....	36
3.2.2. Dados cartográficos	38
3.2.3. Programas	41
3.2.4. Equipamento para fotografias hemisféricas.....	42
3.2.5. Receptores GPS	43

	Página
3.3. Metodologia.....	43
3.3.1. Estruturação da base topográfica.....	43
3.3.2. Estimativa da radiação solar incidente.....	46
3.3.2.1. Propriedades ópticas da atmosfera.....	47
3.3.2.2. Obstrução do horizonte.....	54
3.3.2.3. Cálculo da radiação solar direta.....	58
3.3.2.4. Cálculo da radiação solar difusa.....	63
3.3.2.5. Cálculo da radiação global.....	67
3.3.3. Verificação dos resultados.....	67
3.3.3.1. Obstrução do horizonte.....	67
3.3.3.2. Estimativa da radiação solar global.....	70
3.3.4. Cálculo dos mapas de radiação.....	71
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72
4.1. Propriedades ópticas da atmosfera.....	72
4.1.1. Índice de claridade.....	72
4.1.2. Fração difusa.....	77
4.1.3. Transmitância direta.....	80
4.2. Obstrução do horizonte.....	84
4.3. Estimativas de radiação solar global.....	103
4.3.1. Possíveis causas de erros.....	108
4.3.1.1. Erros relacionados ao algoritmo.....	108
4.3.1.2. Erros relacionados aos parâmetros atmosféricos.....	111
4.3.1.3. Erros relacionados aos parâmetros topográficos.....	114
4.4. Mapas de radiação e insolação.....	115
4.5. Considerações finais.....	128
5 CONCLUSÕES.....	131
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	132

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Coordenadas geográficas das estações meteorológicas utilizadas, período de coleta dos dados de radiação solar global e número de observações úteis (mínimo, máximo e média) entre as 36 séries (decêndios) de dados, segundo Cargnelutti Filho <i>et al.</i> (2007).....	36
2. Estimativa dos parâmetros média (μ^{\wedge}) e desvio-padrão (σ^{\wedge}) da radiação solar global média decencial ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) de quatro estações meteorológicas na Serra Gaúcha e entorno (Cargnelutti Filho <i>et al.</i> , 2007).....	37
3. Nomenclatura Internacional da folha, MI (Mapa Índice), Nome Regional e forma disponível das 30 cartas topográficas da DSG na escala 1:50.000 necessárias para cobrir a zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha e a estação meteorológica de Vacaria. 40	
4. Identificação, município, local, coordenadas geográficas e UTM (Datum WGS84) e altitude dos pontos visitados para aquisição de fotografias hemisféricas.....	68
5. Parâmetros estatísticos para o índice de claridade (Kt) em quatro estações meteorológicas na Serra Gaúcha e entorno.	75
6. Fração aberta do céu em 16 pontos na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha, determinada por fotografia hemisférica e estimada por diagrama de obstrução.	84
7. Medidas de erro e coeficiente de determinação entre a radiação solar global média decencial ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) estimada com o algoritmo <i>Solar Analyst</i> , a partir da fração difusa (Kd) obtida por três relações empíricas e três formas de correção da transmitância direta (τ_{dir}) para o zênite, e registrada em quatro estações meteorológicas na Serra Gaúcha e entorno.	103
8. Parâmetros estatísticos da radiação solar global (MJ.m^{-2}) estimada em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha para diferentes períodos.....	118

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Distribuição espectral da radiação solar no topo da atmosfera e ao nível médio do mar comparadas à emissão de corpo negro a 5.770 K (Martins <i>et al.</i> , 2004; Varejão-Silva, 2006, modificados).....	7
2. Processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre. Os valores numéricos representam a fração aproximada de energia em cada processo (Pereira <i>et al.</i> , 2006, modificado).....	9
3. Representação esquemática dos fatores envolvidos na geometria de incidência do Sol sobre uma superfície inclinada (α_i : ângulo de incidência; β : inclinação da superfície; G_a : ângulo azimutal da superfície; θ : ângulo zenital solar; α : ângulo azimutal solar) (Chrysoulakis <i>et al.</i> , 2004).	21
4. Representação esquemática dos efeitos de sombreamento direto e por obstrução causados pela topografia (α_i : ângulo de incidência do Sol; N_s : Normal à superfície inclinada) (Zakšec <i>et al.</i> , 2005).	23
5. Localização da zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha e estações meteorológicas com registro de radiação solar de longo prazo no Rio Grande do Sul.	26
6. Localização dos municípios que integram a zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha e regiões fisiográficas (Fortes, 1979) nas quais estão inseridos.....	27
7. Temperatura média mensal e precipitação pluvial média mensal em Bento Gonçalves, RS (1961 - 1990).	28
8. Vista geral do relevo da região (Sarmento, 2010).....	32
9. Padrão típico de uso do solo da região, com exploração agrícola nas áreas menos íngremes (várzeas e patamares dos derrames) e remanescentes de florestas nativas nas áreas mais acidentadas (Sarmento, 2010).	34
10. Localização das 30 cartas topográficas da DSG em escala 1:50.000 necessárias para cobrir a zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha e a estação meteorológica de Vacaria (verde: disponíveis como Modelo Digital de Elevação; branco: disponíveis como arquivos vetoriais).	39
11. Conjunto de câmera fotográfica e lente grande angular, montado sobre tripé.	43

	Página
12. Modelo Digital de Elevação correspondente às 30 cartas da DSG e localização das quatro estações meteorológicas utilizadas (cruzetas = referências de coordenadas UTM; linhas pretas = articulação das cartas; linhas brancas = limites da zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha).....	45
13. Visualização em perspectiva do Modelo Digital de Elevação contínuo correspondente às 30 cartas utilizadas, sentido sudoeste-nordeste.....	45
14. Ângulo zenital médio para a latitude de 29° S, calculado para o dia central do decêndio com intervalos de 15 min (θ_{μ} = média de todos os ângulos zenitais, $\theta_{\mu} < 80^{\circ}$ = média dos ângulos zenitais inferiores a 80°) e respectivo cosseno.....	53
15. Representação das 32 direções utilizadas para o cálculo do ângulo do horizonte efetivo de um ponto: (a) na rosa dos ventos; (b) em um <i>pixel</i> no Modelo Digital de Elevação.	55
16. Esquema do cálculo do ângulo do horizonte de um ponto (Fu & Rich, 2000).	55
17. Interpolação dos ângulos do horizonte para as demais direções a partir dos ângulos calculados nas direções especificadas (Fu & Rich, 2000).	56
18. Representação da obstrução do horizonte através de coordenadas hemisféricas (Fu & Rich, 2000; Gál <i>et al.</i> , 2009).	56
19. Diagrama de obstrução calculado para um ponto na área de estudo.	58
20. Percurso do Sol calculado para a latitude de 29° S, do solstício de verão ao solstício de inverno.	60
21. Sobreposição do diagrama de obstrução de um ponto na área de estudo ao percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno.	61
22. Mapa de setores do céu, gerado a partir de 32 divisões zenitais e 32 divisões azimutais.	64
23. Sobreposição do diagrama de obstrução de um ponto na área de estudo ao mapa de setores do céu.	65
24. Nivelamento do equipamento para obtenção das fotografias hemisféricas.....	69
25. Radiação solar global média decendial ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$) incidente no topo da atmosfera (R_a) e registrada em quatro estações meteorológicas na Serra Gaúcha e entorno.	73
26. Índice de claridade (K_t) médio decendial calculado para quatro estações meteorológicas na Serra Gaúcha e entorno.	73
27. Fração difusa (K_d) média decendial estimada para a zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha a partir de K_t , com as relações empíricas de Erbs <i>et al.</i> (1982) e UO Solar Monitoring Lab (1999), e a partir do coeficiente linear da equação de Ångstrom ajustada por Conceição & Mandelli (2006).....	77

28. Transmitância direta (τ_{dir}) para a zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha, calculada a partir de K_d estimada por meio de três relações empíricas, corrigida pelo cosseno do ângulo zenital médio (θ_{μ} = média de todos os ângulos zenitais, $\theta_{\mu < 80^{\circ}}$ = média dos ângulos zenitais inferiores a 80° , $\theta_{\mu < 80^{\circ} \varepsilon}$ = média de todos os ângulos zenitais na primavera-verão e dos ângulos zenitais inferiores a 80° no outono-inverno).....	81
29. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 1 (estação meteorológica da FEPAGRO), Caxias do Sul/RS.....	86
30. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 2 (estação meteorológica da FEPAGRO), Farroupilha/RS.	87
31. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 3 (estação meteorológica da FEPAGRO), Vacaria/RS.	88
32. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 4, (estação meteorológica da FEPAGRO), Veranópolis/RS.	89
33. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 5 (estação meteorológica automática da Embrapa Uva e Vinho), Bento Gonçalves/RS.	90
34. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 6, Farroupilha/RS.	91
35. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 7, Farroupilha/RS.	92
36. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 8, Farroupilha/RS.	93
37. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 9, Farroupilha/RS.	94
38. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 10, Farroupilha/RS.	95
39. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 11, Carlos Barbosa/RS.	96
40. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 12, Caxias do Sul/RS.	97

41. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 13, Caxias do Sul/RS.	98
42. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 14, Ipê/RS.....	99
43. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 15, Veranópolis/RS.	100
44. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 16, Vila Flores/RS... ..	101
45. Erro médio proporcional (MBE%) entre a radiação solar global média decendial ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) estimada e registrada em quatro estações meteorológicas na Serra Gaúcha e entorno (ER = Erbs <i>et al.</i> , 1982; UO = UO Solar Monitoring Lab, 1999; CM = Conceição & Mandelli, 2006; $\theta\mu$ = média de todos os ângulos zenitais, $\theta\mu < 80^\circ$ = média dos ângulos zenitais inferiores a 80° , $\theta\mu < 80^\circ \varepsilon$ = média de todos os ângulos zenitais na primavera-verão e dos ângulos zenitais inferiores a 80° no outono-inverno).	105
46. Relação entre a radiação solar global média decendial ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) estimada e registrada em quatro estações meteorológicas na Serra Gaúcha e entorno (ER = Erbs <i>et al.</i> , 1982; UO = UO Solar Monitoring Lab, 1999; CM = Conceição & Mandelli, 2006; $\theta\mu$ = média de todos os ângulos zenitais, $\theta\mu < 80^\circ$ = média dos ângulos zenitais inferiores a 80° , $\theta\mu < 80^\circ \varepsilon$ = média de todos os ângulos zenitais na primavera-verão e dos ângulos zenitais inferiores a 80° no outono-inverno).	106
47. As três origens da radiação solar global incidente em uma superfície inclinada: (1) irradiância direta oriunda do Sol; (2) irradiância difusa oriunda do céu, onde parte da abóbada pode estar obstruída; (3) irradiância direta e difusa refletida pela vizinhança (Dubayah & Loechel, 1997).....	110
48. Radiação solar global (MJ.m^{-2}) anual em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha.	117
49. Distribuição de frequências (%) dos valores estimados de radiação solar global anual (MJ.m^{-2}) em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha ($n = 8.916.464 \text{ pixels}$).	118
50. Radiação solar direta (MJ.m^{-2}) anual em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha.	120
51. Radiação solar difusa (MJ.m^{-2}) anual em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha.	121
52. Insolação anual (horas) em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha.	122

53. Relação entre valores anuais de radiação solar global (MJ.m^{-2}) e (a) radiação direta (MJ.m^{-2}), (b) radiação difusa (MJ.m^{-2}) e (c) insolação (horas) em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha ($n = 8.916.464 \text{ pixels}$). 123
54. Radiação solar global (MJ.m^{-2}) em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha em diferentes períodos: (a) verão, (b) outono, (c) inverno, (d) primavera. 125
55. Distribuição de frequências (%) dos valores de radiação solar global (MJ.m^{-2}) incidente em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha em diferentes períodos: (a) verão; (b) outono; (c) inverno ; (d) primavera. 126

RELAÇÃO DE ABREVIATURAS

CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DO	Denominação de Origem
DSG	Diretoria de Serviço Geográfico do Exército
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESRI	Environmental Systems Research Inc.
FEPAGRO	Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária
GDEM	Global Digital Elevation Model
GPS	Global Positioning System
HEMI	Helios Environmental Modeling Institute
IG	Indicação Geográfica
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IP	Indicação de Procedência
MBE	Mean Bias Error
MI	Mapa Índice
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OIV	Organização Internacional do Vinho
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
ROL	Radiação de ondas longas
RMSE	Root Mean Square Error
SAD69	South American Datum 1969

SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SWERA	Solar and Wind Energy Resource Assessment
TIN	Triangulated Irregular Network
UTM	Universal Transversa de Mercator

RELAÇÃO DE SÍMBOLOS

α	Ângulo azimutal solar
β	Inclinação da superfície
θ	Ângulo zenital solar
φ	Latitude do local
δ	Declinação solar
σ	Desvio-padrão
μ	Média
a_i	Ângulo de incidência
$\text{AngIn}_{\theta,\alpha}$	Ângulo de incidência entre o centróide de um setor do percurso do Sol ou de um setor do céu e o eixo normal à superfície
\bar{d}	Distância média entre a Terra e o Sol
d	Distância entre o Sol e a Terra na época considerada
D	Dia Juliano
Div_{azi}	Número de divisões azimutais para os setores do céu
Dur	Intervalo de tempo para análise
G_a	Azimute da superfície
G_z	Ângulo zenital da superfície
H	Ângulo horário no momento do nascer astronômico do Sol
K_d	Fração difusa
K_t	Índice de claridade
$m(\theta)$	Caminho óptico relativo

n	Número de horas de brilho solar na superfície
N	Número máximo possível de horas de brilho solar
N_s	Normal à superfície inclinada
R_a	Irradiância solar no topo da atmosfera
R_{dif}	Radiação solar difusa
R_{dir}	Radiação direta
R_g	Radiação solar global
S	Constante solar
$SkyGap_{\theta,\alpha}$	Fração aberta para um setor do céu
$SunDur_{\theta,\alpha}$	Tempo de incidência da radiação direta oriunda de um setor do percurso do Sol
$SunGap_{\theta,\alpha}$	Fração aberta do céu para um setor do percurso do Sol
$Weight_{\theta,\alpha}$	Proporção da radiação difusa originária de um dado setor do céu em relação ao total de setores considerados
τ_{dir}	Transmitância direta

1 INTRODUÇÃO

O Sol constitui a principal fonte de energia para a manutenção da vida na Terra. A radiação solar exerce papel determinante nos processos de troca de energia entre a atmosfera e a superfície terrestre e afeta todos os processos físicos, químicos e biológicos nos ecossistemas. Conhecer a magnitude e a distribuição espacial e temporal da radiação solar na superfície é crucial para entender e prever a evolução de diversos componentes do sistema Terra. Sua variabilidade e heterogeneidade espacial e temporal determinam a dinâmica da temperatura e da umidade do ar e do solo, a fotossíntese e a evapotranspiração, entre muitos outros processos que têm impacto direto nas atividades humanas.

A radiação solar é de grande relevância para áreas tão diversas quanto a engenharia e a arquitetura, a meteorologia e a climatologia, a ecologia, o gerenciamento ambiental e as ciências ambientais em geral e, obviamente, para a produção de alimentos. Neste caso, a radiação global constitui dado de entrada para modelos de estimativa da evapotranspiração potencial e real, balanço hídrico e água disponível no solo. Dados de radiação ou variáveis a ela relacionadas também podem ser empregados em zoneamentos, em modelos de crescimento de culturas e de previsão da fenologia, para recomendação de tratamentos culturais, determinação do ponto de colheita, estimativa de rendimento de colheita, desenvolvimento e operação de sistemas de irrigação e de secagem de grãos, entre outras.

Mais recentemente, com as limitações cada vez mais evidentes nos recursos naturais e o incremento mundial na demanda por energia, a radiação solar também passou

a despertar maior interesse para essa finalidade. Virtualmente ilimitada e considerada por muitos como a alternativa do futuro, a radiação solar tem sido foco de muitos estudos voltados ao seu aproveitamento termal e fotovoltaico. Exemplos como os da Alemanha, que vem investindo sistematicamente nessa forma de energia, a ponto de se tornar o maior produtor mundial de energia fotovoltaica em 2010, começam a se multiplicar.

Seja qual for o propósito, o conhecimento da disponibilidade de radiação solar na superfície é fundamental para projetos voltados ao seu máximo aproveitamento. Contudo, nas últimas décadas verificou-se uma deterioração da rede de observação meteorológica, reduzindo a cobertura, frequência e consistência dos registros de radiação solar. Esse fenômeno ocorreu não apenas no Brasil, mas também em países desenvolvidos como os Estados Unidos. O incremento na demanda por dados de radiação frente à carência de registros tem levado a iniciativas para o desenvolvimento e disponibilização de bases espaciais de dados solarimétricos. Entre elas pode-se citar o projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*), financiado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA).

Todavia, a maioria das bases de dados disponíveis ainda apresenta baixa resolução espacial, geralmente na ordem de quilômetros, e expressa a radiação incidente em superfícies horizontais. Essas características limitam sua aplicação para estudos em escala local, principalmente em regiões com relevo complexo. Em áreas com topografia heterogênea a radiação incidente varia em função da altitude, da declividade e da orientação da superfície, bem como da posição da mesma em relação a superfícies vizinhas. Controlando o campo de radiação solar, a topografia local influencia os padrões espaciais e temporais de todas as variáveis relacionadas. Nessa situação torna-se necessário desenvolver modelos que, além de considerar a atenuação causada pela atmosfera, possibilitem reproduzir a superfície real e descrever sua interação com a radiação solar incidente.

O acoplamento de modelos de radiação às capacidades analíticas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) abre novas possibilidades para a estimativa de radiação em superfícies com diferentes situações topográficas. A partir de Modelos Digitais de Elevação, torna-se possível computar simultaneamente a altitude, a inclinação e a orientação da superfície, introduzindo assim a variação espacial da topografia na estimativa da radiação incidente. Essa abordagem apresenta muitas vantagens para estudos em escala local, pois tem o potencial de detalhar substancialmente o conhecimento da dinâmica e dos padrões espaciais e temporais dos campos de radiação solar, particularmente em terrenos complexos.

Para determinadas culturas, como na viticultura, conhecer a disponibilidade de radiação solar em superfícies com diferentes inclinações e orientações é de fundamental importância para a definição de estratégias, especialmente onde a cobertura de registros é escassa. Em áreas com topografia heterogênea, a estimativa da radiação solar incidente na superfície torna-se ainda mais relevante, constituindo valioso subsídio para definir os procedimentos agronômicos adequados, buscando melhorar a eficiência produtiva do cultivo e a qualidade do produto.

O objetivo geral deste estudo foi efetuar e avaliar a estimativa e o mapeamento da radiação solar incidente na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha, considerando simultaneamente a influência da atmosfera e da topografia. Constituíram objetivos específicos os seguintes:

- Elaborar um Modelo Digital de Elevação para a zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha a partir da melhor cartografia disponível;
- Estimar a obstrução do horizonte a partir do Modelo Digital de Elevação e avaliar a estimativa para diferentes situações topográficas;

- Estudar relações empíricas com potencial de aplicação para estimar as propriedades ópticas médias da atmosfera na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha, a partir de registros de radiação solar global de estações meteorológicas;
- Estimar a radiação solar incidente em diferentes topografias, considerando as propriedades ópticas da atmosfera, a altitude, a orientação, a declividade e a obstrução do horizonte;
- Verificar a estimativa da radiação solar global com base nos registros de longo prazo de estações meteorológicas;
- Gerar mapas decendiais e anuais de radiação solar global, direta e difusa para a zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha, considerando as características topográficas da superfície, com resolução espacial de 30 m.

Os objetivos foram propostos tendo como base a hipótese de que é possível gerar estimativas de radiação solar com alta resolução espacial a partir de registros esparsos de estações meteorológicas e de características topográficas mensuráveis.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Radiação solar

O Sol mede aproximadamente 696.000 km de raio, tem uma massa de $1,989 \times 10^{30}$ kg e situa-se a uma distância média da Terra de $1,5 \times 10^8$ km. Sua composição química é constituída basicamente de hidrogênio e hélio, nas proporções de 75% e 24,25% da massa total, respectivamente. Como muitas outras estrelas, é uma esfera de gás incandescente em cujo núcleo ocorrem intensas reações termonucleares que liberam enormes quantidades de energia na forma de radiação eletromagnética. Usualmente o Sol é considerado um corpo negro, mas a presença de zonas com diferentes temperaturas e a ocorrência de perturbações faz com que o espectro solar seja um pouco diferente do espectro de um corpo negro à mesma temperatura, como mostra a FIGURA 1 (Varejão-Silva, 2006).

O Sol emite radiação em praticamente todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético, mas devido à temperatura de aproximadamente 5.770 K da fotosfera, a maior parte da energia radiante está concentrada próximo da região do visível. Da energia total emitida, 99,9% se encontra na faixa entre 150 e 4.000 nm de comprimentos de onda, conhecida como domínio da radiação solar (Varejão-Silva, 2006), e 99% entre 220 nm e 4.000 nm, região denominada de ondas curtas. Deste total, cerca de 46% está distribuída no visível, 45% na faixa do infravermelho e 9% na faixa do ultravioleta (Vilela, 2010).

A integração da curva de distribuição espectral da radiação solar incidente perpendicularmente no topo da atmosfera corresponde ao que é denominado de “constante solar” (S). A constante solar é definida como a quantidade de energia proveniente do Sol

interceptada por uma superfície plana, perpendicular à direção dos raios solares, situada à distância média entre a Terra e o Sol, por unidade de área e por unidade de tempo, sem os efeitos atenuantes da atmosfera. Atualmente os valores da constante solar apresentam pequenas variações, conforme a fonte e a unidade, tais como 1,98 a 2,0 cal.cm⁻².min⁻¹ ou 1.360 a 1.367 W.m⁻², por exemplo. Diferente da constante solar, a radiação incidente no topo da atmosfera (*R_a*) corresponde à irradiância em uma superfície plana, fora da atmosfera, porém tangente à circunferência do Globo. Ela varia durante o ano em função do movimento da Terra ao longo de sua órbita elíptica e depende da latitude (φ), da declinação solar (δ) e do ângulo zenital do Sol (θ) (Fu & Rich, 2000; Varejão-Silva, 2006).

2.2. Interação da radiação solar com a atmosfera

Quando a radiação solar penetra na atmosfera terrestre, parte da energia incidente nas camadas superiores é refletida de volta para o espaço. À medida que atravessa a atmosfera, o restante continua sendo atenuado por outros processos físicos de interação com os constituintes atmosféricos. Os principais processos são a absorção por diferentes gases na atmosfera, o espalhamento molecular (Rayleigh) e o espalhamento por aerossóis (Mie), devido à presença de partículas. Os efeitos desses processos na atenuação atmosférica são variáveis com o tempo, conforme mudam as condições atmosféricas e a massa de ar.

A absorção por moléculas da atmosfera é um processo seletivo que converte energia incidente em calor, principalmente por vapor d'água, oxigênio, ozônio e dióxido de carbono. Vários outros gases também absorvem radiação, mas seus efeitos são negligíveis para a maior parte dos propósitos práticos. O espalhamento Rayleigh ocorre quando a radiação interage com moléculas ou partículas na atmosfera, cujo diâmetro é bem menor que o comprimento de onda da radiação incidente. É causado tanto por moléculas de gases atmosféricos quanto por fumaça, neblina e fumos. O processo é inversamente proporcional

à quarta potência do comprimento de onda, de forma que o espalhamento no azul visível ($0,5 \mu\text{m}$) é 16 vezes maior que na região do infravermelho próximo ($1 \mu\text{m}$), o que explica a cor azul do céu em dias claros. Já o espalhamento Mie ocorre quando as partículas existentes na atmosfera possuem diâmetros essencialmente de mesmo diâmetro que o comprimento de onda da radiação incidente. É causado principalmente por vapor d'água e poeira em suspensão na atmosfera, e sua intensidade depende do tamanho e da distribuição vertical dos particulados (Kumar *et al.*, 1997).

Em virtude da atenuação causada pelos seus constituintes, uma parte da radiação incidente no topo da atmosfera não chega à superfície do planeta. A radiação que incide na superfície vindo diretamente da direção do Sol é chamada de radiação direta, enquanto aquela afetada pelo espalhamento, vinda de várias direções, constitui a radiação difusa. Como alguns comprimentos de onda são atenuados pelos constituintes atmosféricos em maior intensidade que outros, a composição espectral da radiação solar na superfície terrestre é diferente daquela incidente no topo da atmosfera (FIGURA 1).

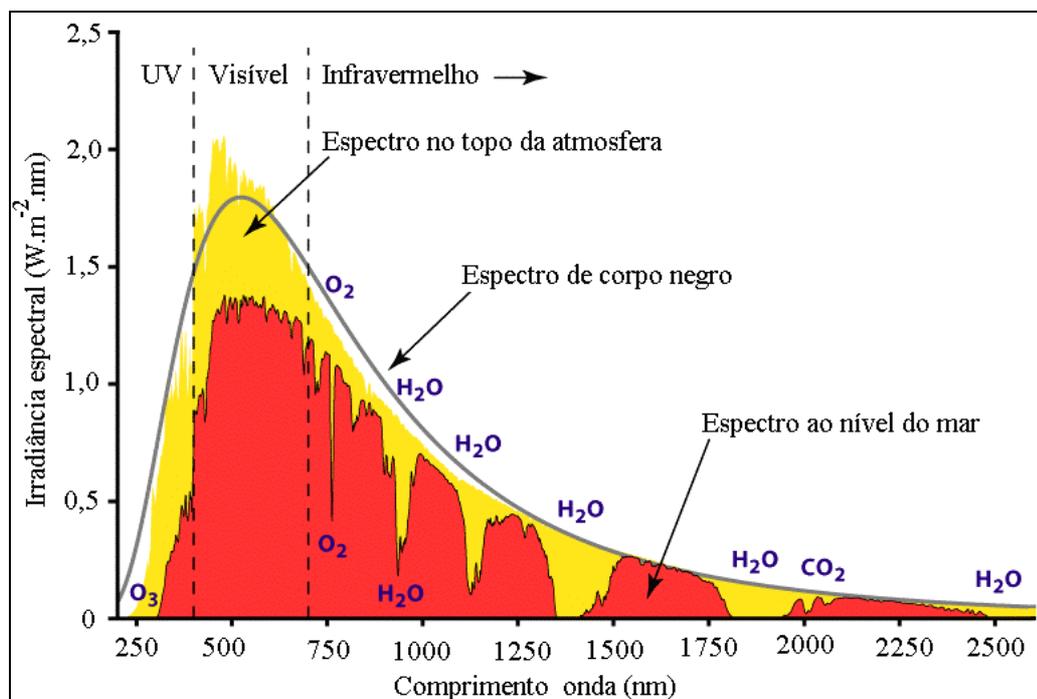


FIGURA 1. Distribuição espectral da radiação solar no topo da atmosfera e ao nível médio do mar comparadas à emissão de corpo negro a 5.770 K (Martins *et al.*, 2004; Varejão-Silva, 2006, modificados).

Parte da radiação incidente na superfície é refletida de volta para a atmosfera e parte é absorvida. A razão entre a energia refletida e a energia total incidente depende das características da superfície e é denominada de albedo. A energia absorvida pela superfície promove seu aquecimento, o qual desencadeia os processos atmosféricos que caracterizam os diversos climas da Terra e possibilitam a vida no planeta. Considerando todos os processos, a radiação solar fornece anualmente para a atmosfera terrestre cerca de $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia, o que corresponde a aproximadamente 10.000 vezes o consumo mundial de energia no mesmo período (CRESESB, 2004; Vilela, 2010).

O sistema superfície-atmosfera está constantemente absorvendo radiação solar e emitindo sua própria radiação para o espaço. Em uma média de longo prazo, as taxas de absorção e de emissão são aproximadamente iguais, de modo que o sistema se encontra muito próximo do equilíbrio radiativo. A FIGURA 2 representa esquematicamente os principais processos de interação da radiação solar e da radiação térmica no sistema superfície-atmosfera. As nuvens, gases, partículas atmosféricas e a superfície refletem cerca de 30% da radiação solar incidente. Os 70% restantes são absorvidos, produzindo aquecimento do sistema e causando evaporação de água (calor latente) ou aquecimento (calor sensível). A energia absorvida pelo sistema superfície-atmosfera é depois reemitida na faixa do infravermelho (4 a 100 μm), denominada de radiação de ondas longas (ROL).

O fluxo de ROL emitido pela superfície é absorvido pelos constituintes atmosféricos (vapor d'água, dióxido de carbono, metano, ozônio, óxido nítrico, compostos de clorofluorcarbono), que reemitem essa radiação em todas as direções, inclusive para a superfície e para o espaço exterior. A absorção e a emissão por esses gases nas várias camadas atmosféricas reduzem a perda de ROL emitida pela superfície, que escaparia para o espaço exterior, e constitui o chamado efeito-estufa (Pereira *et al.*, 2006).

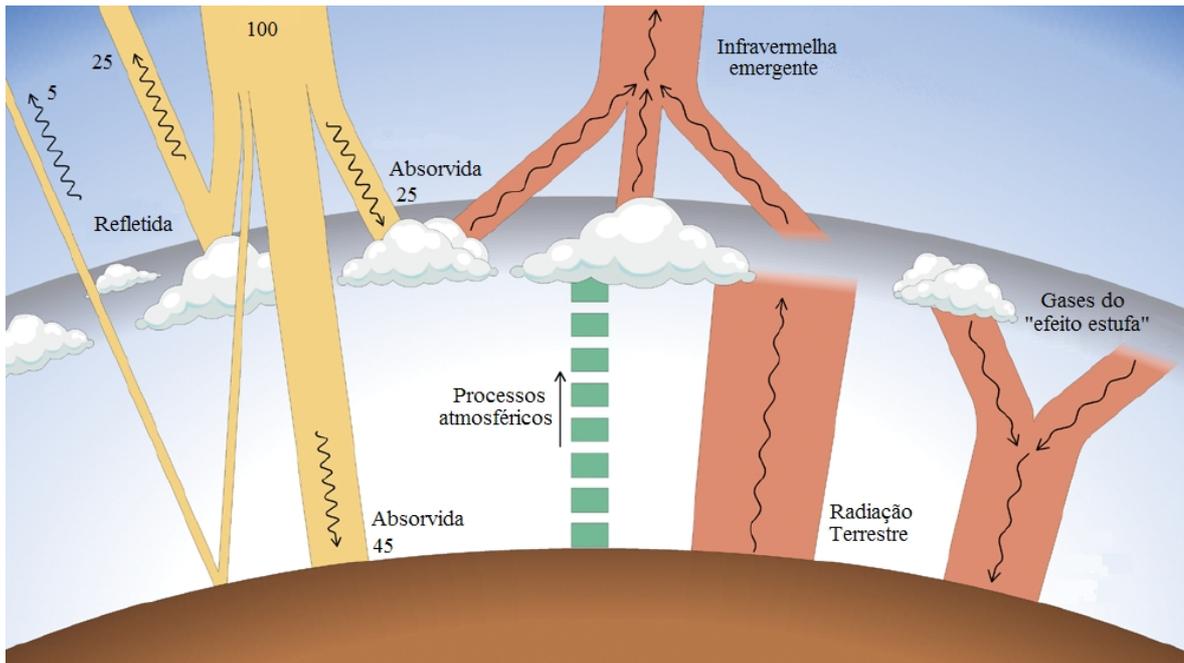


FIGURA 2. Processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre. Os valores numéricos representam a fração aproximada de energia em cada processo (Pereira *et al.*, 2006, modificado).

2.3. Medição da radiação solar

A medição da radiação solar envolve várias grandezas e diversos tipos de instrumentos, dando-se ênfase aqui à radiação global. O fluxo solar radiante incidente na superfície, por unidade de área e por unidade de tempo, é denominado de irradiância solar global (ou total). Já o montante por unidade de área, durante um determinado período, é denominado de irradiação solar global (Hofierka & Šúri, 2002; Chrysoulakis *et al.*, 2004).

A radiação solar global é medida em estações meteorológicas de superfície, através de instrumentos que registram a radiação de ondas curtas incidente em um hemisfério orientado para o zênite, chamados genericamente de radiômetros. A maioria dos radiômetros mede a radiação solar sobre uma faixa do espectro compreendida entre 280 e 2.800 nm, o que abrange 97% da distribuição espectral do Sol (Giacomelli, 1998).

Existem vários tipos e modelos de radiômetros. Os piranômetros usam uma termopilha, que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies, uma pintada de preto e outra pintada de branco, provocando um diferencial de potencial que, ao ser

medido, permite determinar o valor instantâneo da energia solar, ou seja, a irradiância. Alguns piranômetros utilizam uma célula fotovoltaica de silício monocristalino, que apresenta um custo inferior, mas resulta em menor precisão nas medidas. Os piranômetros são considerados instrumentos de referência, geralmente referidos como de primeira classe (precisão de 2%) e algumas vezes de segunda classe (precisão de 5%) (CRESESB, 2004).

Os actinógrafos têm seu princípio de funcionamento baseado na capacidade de um par bimetálico de se encurvar quando aquecido pela incidência de radiação solar. A diferença nos coeficientes de dilatação dos dois metais resulta em uma expansão diferencial, cuja deformação é transmitida a um sistema de alavancas. Este provoca o deslocamento de uma pena sobre um gráfico de papel em um tambor giratório, obtendo-se, assim, registros diários ou semanais de irradiância. A integração da área sob a curva, entre dois horários, permite quantificar a irradiação no período respectivo. Os actinógrafos são geralmente referidos como instrumentos de terceira classe, com precisão na faixa de 15 a 20% (Sentelhas *et al.*, 1997; Dallacort *et al.*, 2002), mas Ceballos *et al.* (1992) relataram erros em torno de 5% ao calibrar actinógrafos com leituras de piranômetros. Os registros de radiação solar global de longo prazo obtidos em estações meteorológicas no Rio Grande do Sul foram feitos predominantemente com actinógrafos.

Os instrumentos para a medição da irradiância solar são relativamente dispendiosos e necessitam de atenção e manutenção para seu correto funcionamento. Por essas razões o número de estações meteorológicas com registros de radiação é limitado, e os dados frequentemente necessitam de algum processamento antes de serem utilizados (Muneer *et al.*, 2002; Chrysoulakis *et al.*, 2004). A razão entre o número de estações que registram radiação global diária e estações que registram temperatura e precipitação pluvial varia muito entre países. É bastante alta em alguns países da Europa, como 1:10 na Alemanha (Oesterle, 2001) e 1:20 na República Tcheca e Áustria, e baixa em outros, chegando a uma razão de apenas 1:500 quando considerada a média mundial (Thornton *et al.*, 1997). Além

do número reduzido de estações, registros contínuos de radiação solar global também são escassos, provavelmente porque observações suficientemente precisas demandam um alto nível de manutenção dos instrumentos (Trnka *et al.*, 2005).

Cargnelutti Filho *et al.* (2007), por exemplo, analisaram dados decendiais de radiação solar global de 22 estações meteorológicas no Rio Grande do Sul e encontraram um número de observações variável. Para um período de 47 anos de observações o número mínimo de observações encontrado foi de 13 e o máximo de 43. As séries de dados foram homogêneas em 79% dos casos, com alguns problemas de heterogeneidade nos municípios de Júlio de Castilhos, Ijuí, Rio Grande e Quaraí. A distribuição normal foi a mais adequada para representar a radiação solar global média decendial, bastando estimar os parâmetros desta distribuição (média e desvio padrão) para os cálculos de probabilidade dentro de limites de intervalo desejados.

A distribuição espacial das 22 estações meteorológicas resulta em uma cobertura escassa do território do estado, especialmente em algumas regiões, como o extremo sul e a região da campanha, por exemplo. A escassez de dados contrasta com a demanda crescente por informações confiáveis e espacialmente detalhadas sobre a radiação solar, tanto para aplicações na agropecuária quanto para fins energéticos ou para estudos urbanos. Todavia, apesar do número limitado de instrumentos e de problemas de continuidade nas medições, os registros de actinógrafos dessas estações meteorológicas constituem os melhores dados disponíveis de radiação solar global de longo prazo.

2.4. Estimativas de radiação

Quando não existem registros disponíveis de radiação solar para uma determinada área de interesse torna-se necessário fazer uso de estimativas. Existe uma grande variedade de métodos e, eventualmente, se verifica uma sobreposição parcial entre as abordagens. De forma geral, é possível resumir os métodos para estimativas de radiação em quatro grupos:

o uso direto de dados de uma estação vizinha, a interpolação a partir de dados de várias estações vizinhas, o uso de dados de satélites e o emprego de modelos de radiação.

2.4.1. Uso direto de dados de estações vizinhas

Quando a demanda é apenas um dado numérico para suprir aplicações como o cálculo de balanço hídrico ou projetos de engenharia, o uso direto dos dados de estações meteorológicas vizinhas é a alternativa mais simples. Entretanto, fatores como o relevo, o regime de precipitação pluvial, a temperatura e a nebulosidade podem ser muito diferentes mesmo entre regiões próximas. Portanto, não é somente a simples distância que deve ser considerada. É preciso levar em conta as características da região em questão e da região onde se situam as estações vizinhas, a fim de avaliar a viabilidade de uso dos seus dados e escolher a estação com maior similaridade com o local em estudo.

Em algumas regiões o limiar de distância para uma precisão aceitável de dados de radiação global obtidos de uma estação meteorológica vizinha pode ser grande, como demonstrado por Hunt *et al.* (1998), que estimou em mais de 385 km para a província de Ontário, no Canadá. Estudos conduzidos nas condições européias sugerem limiares de distâncias menores, dependendo da topografia e de outros fatores, limitando assim a possibilidade de utilizar dados de estações vizinhas. Para a Europa Central, por exemplo, o limiar de distância estimado se situa entre 100 e 200 km, dependendo da localização da estação e da época do ano, e leva em conta a precisão dos piranômetros (5%) usados pelos serviços meteorológicos na área de estudo (Trnka *et al.*, 2005).

2.4.2. Interpolação

Em casos onde há necessidade de obter dados de radiação para uma área mais ampla torna-se necessário lançar mão de outros métodos para gerar estimativas, como a interpolação. Métodos de interpolação espacial são empregados para predizer valores em locais desconhecidos a partir de um conjunto de pontos onde a propriedade sob investigação é conhecida, pressupondo-se uma dependência espacial. Diversas técnicas de

interpolação podem ser empregadas para derivar bases espaciais de radiação a partir de medidas obtidas em estações meteorológicas. Os métodos abrangem, principalmente, interpolação linear ponderada pelo inverso da distância, funções de base radial e geoestatística, também denominada de *kriging* ou krigagem (Šúri & Hofierka, 2004; Miller *et al.*, 2008). No Rio Grande do Sul, Cargnelutti Filho *et al.* (2007) usaram o método *kriging* para interpolar a radiação solar global média decendial a partir dos dados de 22 estações meteorológicas, obtendo mapas de isolinhas de radiação.

As diferenças entre os métodos de interpolação estão relacionadas, principalmente, à forma de determinar a influência dos pontos de valores conhecidos. A ponderação pelo inverso da distância é uma técnica determinística que assume para cada ponto uma influência local que diminui com a distância, de forma que o valor em qualquer local desconhecido é estimado pela média ponderada pelo inverso da distância dos valores conhecidos da vizinhança. O grau com o qual cada amostra influencia a estimativa é determinada pela potência aplicada ao inverso da distância. As funções de base radial constituem uma série de interpoladores, também determinísticos, para calcular superfícies suaves a partir de dados amostrais esparsos. Conceitualmente, o processo envolve o ajuste de uma membrana flexível aos pontos de dados, minimizando a curvatura total da superfície, e difere do inverso da distância porque possibilita interpolar valores acima do máximo e abaixo do mínimo medidos. A geoestatística, ou *kriging*, usa o variograma, um modelo estrutural que relaciona posição, direção e a diferença quadrática entre os valores dos pontos conhecidos, para quantificar a autocorrelação espacial nos dados. Ele considera também a configuração espacial, de forma que pontos agrupados recebem peso menor que pontos isolados a uma mesma distância (Miller *et al.*, 2008).

Apesar da inegável utilidade dos diferentes métodos de interpolação, assim como ocorre no caso do uso direto de dados de estações vizinhas, a confiabilidade é altamente dependente das características da área de estudo e dos locais onde se situam as estações

utilizadas como referência para a interpolação. As técnicas de interpolação podem fornecer estimativas confiáveis sobre áreas homogêneas e com propriedades topoclimáticas similares, mas a confiabilidade tende a decrescer sensivelmente em terrenos com topografia complexa e em zonas costeiras. Nestes casos a simples interpolação ou a extrapolação de dados de radiação solar de um ponto para áreas mais extensas geralmente não é apropriada, porque a maior parte dos sítios é afetada por fortes variações locais (Tovar-Pescador *et al.*, 2006). Além disso, via de regra ocorre uma perda na acurácia porque a interpolação tende a introduzir uma suavização (Häntzschel *et al.*, 2005).

Conforme Pereira *et al.* (2006), embora os dados de radiação obtidos através de radiômetros apresentem, na grande maioria das vezes, níveis de confiabilidade superiores àqueles que podem ser obtidos através de satélites ou de modelos radiativos, o mesmo não pode ser generalizado para os resultados de interpolações entre os radiômetros. Perez *et al.* (1997) demonstraram que, quando as distâncias entre os radiômetros de uma rede de observação forem superiores a 45 km, os dados interpolados de totais diários de irradiação apresentam níveis de confiabilidade inferiores às estimativas obtidas com modelos que utilizam imagens de satélite. Resultado similar foi obtido por Guarnieri *et al.* (2006) em um estudo empregando dados obtidos em 16 plataformas de coleta de dados operadas pelo CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) na região Sudeste do Brasil.

2.4.3. Dados de satélites

Além dos instrumentos nas estações meteorológicas, a radiação solar incidente na superfície também pode ser quantificada com o auxílio de satélites de observação da Terra. Valores de irradiância espacialmente contínuos podem ser derivados diretamente de satélites meteorológicos geoestacionários, que calculam para cada porção da superfície terrestre um montante de energia. O processamento de dados de satélite produz dados

menos precisos que as medições de radiômetros, mas tem a vantagem de ter uma alta frequência temporal e uma cobertura espacial mais extensa.

A segunda geração de satélites Meteosat, por exemplo, tem uma resolução temporal de 15 min e uma resolução espacial de 2,5 km no nadir, e fornece dados de radiação e de temperatura. Há também o satélite japonês GMS-52, que fornece informação de radiação visível obtida com resolução espacial de 6 km (Pereira *et al.*, 2006). Outros satélites, como o GOES, também possuem resolução temporal similar, mas apresentam resolução espacial inferior, geralmente maior que 10 km.

Apesar do incremento na resolução espacial do Meteosat e GMS-52 em relação a satélites geoestacionários de geração anterior, algumas aplicações demandam uma resolução espaço-temporal maior. Em áreas de topografia complexa a utilidade das estimativas de radiação baseadas em satélites ainda é limitada porque, em terrenos acidentados, diferentes valores de irradiância podem ocorrer em um único *pixel* da imagem. A irradiância estimada pela imagem de satélite para um *pixel* é um valor médio que não descreve completamente a variabilidade *intra-pixel* causada pela topografia. Contudo, vários estudos têm mostrado a utilidade de dados de satélites em fornecer informação auxiliar para interpolação ou para estimativas de radiação, inclusive em regiões montanhosas (D'Agostino & Zelenka, 1992; Beyer *et al.* 1997; Dubayah & Loechel, 1997; Lopes *et al.*, 2007) ou para alimentar modelos de simulação (Tovar-Pescador *et al.*, 2006).

Atualmente existem bases de dados públicas derivadas de imagens de satélites, contendo diversas estimativas relacionadas à radiação solar, entre as quais o Helioclim-1 (<http://www.soda-is.org>) e os produtos gerados pelo Projeto SWERA (<http://swera.unep.net/>). O repositório da NASA (<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>) também disponibiliza dados de energia solar com resolução espacial de 1° para todo o Globo. Entretanto, os produtos orbitais disponíveis ainda possuem baixa resolução espacial, geralmente expressam a radiação incidente em uma superfície horizontal e têm precisão

inferior aos radiômetros, mas constituem uma alternativa importante para os locais onde não há registros destes instrumentos.

2.4.4. Modelos de radiação

O desenvolvimento de modelos para estimativa da radiação solar apresentou um notável incremento na última década. Os modelos podem ser classificados em empíricos e físicos, conforme a abordagem adotada para caracterizar os fatores relacionados com a irradiância solar em uma superfície.

2.4.4.1. Modelos empíricos

Os modelos empíricos utilizam formulações baseadas em medidas de radiação incidente na superfície e nas condições atmosféricas locais. A abordagem mais frequente é baseada em relações empíricas que requerem o desenvolvimento de um conjunto de equações para estimar a radiação solar a partir de variáveis meteorológicas comumente medidas. O número de equações já testadas e publicadas é relativamente grande, o que dificulta a escolha do modelo mais apropriado para um propósito particular ou para um determinado sítio (Myers, 2003; Pereira *et al.*, 2006).

Os modelos empíricos têm como vantagem a facilidade de obtenção dos dados necessários para estabelecer as relações, pois geralmente são utilizadas variáveis comumente medidas na maior parte das estações meteorológicas de superfície, como o período de insolação, a cobertura de nuvens, a temperatura do ar ou a precipitação pluvial (Thornton *et al.*, 1997; Gul *et al.*, 1998; Winslow *et al.*, 2001; Kang *et al.*, 2002). Em contrapartida, esses modelos apresentam validade restrita à região ou às condições estudadas, necessitando um novo ajuste para emprego em outras condições. Em função desses aspectos, os modelos empíricos são mais recomendados para estudos em escala local (Trnka *et al.*, 2005).

Um dos modelos empíricos mais utilizados para estimar a radiação global é uma equação de regressão linear, geralmente referida como equação de Ångström. A forma

originalmente proposta por este autor, em 1924, baseava-se na relação entre a radiação global incidente na superfície e a radiação global incidente na superfície sob atmosfera real em um dia completamente limpo, considerada como a radiação global máxima. Devido à dificuldade na medição, em 1940 Prescott introduziu uma modificação substituindo a radiação incidente na superfície em dia completamente limpo pela radiação no topo da atmosfera, que pode ser facilmente calculada. A modificação deu origem à forma geral mais usada atualmente, referida como equação de Ångstrom ou de Ångstrom-Prescott, representada na equação 1 (Berlato, 1971; Fontana & Oliveira, 1996; Valiati & Ricieri, 2005; Conceição & Mandelli, 2006).

$$\frac{Rg}{Ra} = a + b \left(\frac{n}{N} \right) \quad (1)$$

Sendo:

Rg: radiação solar global incidente na superfície, em um plano horizontal

Ra: radiação solar global incidente no topo da atmosfera, em uma superfície horizontal paralela à superfície do solo

a: coeficiente linear

b: coeficiente angular

n: número de horas de brilho solar na superfície

N: número máximo possível de horas de brilho solar (duração astronômica do dia)

O coeficiente linear (*a*) e o coeficiente angular (*b*) da equação de Ångstrom são altamente dependentes do local e do período do ano, devendo ser ajustados para cada caso a partir de dados medidos de radiação solar global e de horas de brilho solar. Além de possibilitar a estimativa da radiação solar global a partir de dados mensurados mais facilmente, um dos méritos da equação de Ångstrom é que ela também possibilita derivar parâmetros relativos às propriedades ópticas da atmosfera. A razão de irradiação (*Rg/Ra*), também denominada de índice de claridade (*Kt*) ou índice de limpidez, expressa o efeito da

atmosfera de forma adimensional, fornecendo informação indireta sobre as condições atmosféricas da região para a qual a equação foi ajustada (Şahin *et al.*, 2001). Os dois coeficientes, por outro lado, têm significado físico, geralmente pouco explorado, que fica mais evidente quando Ra é passado para o lado direito como na equação 2.

$$Rg = \left[a + b \left(\frac{n}{N} \right) \right] \times Ra \quad (2)$$

Nesta forma da equação de Ångstrom constata-se que o coeficiente linear corresponde à transmitância difusa da atmosfera, ou seja, à porção do fluxo de radiação solar incidente no topo da atmosfera que chega à superfície na forma de radiação difusa. Em condições de céu totalmente encoberto, isto é, quando o número de horas de brilho solar na superfície tende a zero, o coeficiente linear representa o único componente da radiação solar global incidente na superfície (Gueymard *et al.*, 1995; Revfeim, 1997; Akpabio & Etuk, 2003).

O coeficiente angular, por sua vez, corresponde à transmitância direta em condições de céu claro, ou seja, a porção do fluxo de radiação solar incidente no topo da atmosfera que chega à superfície na forma de radiação direta quando o céu está totalmente limpo. Ele é modulado pelo número de horas de brilho solar na superfície, determinado principalmente pela nebulosidade (Souza & Alves, 1997). Quando o número de horas de brilho solar na superfície tende a se igualar ao número máximo possível de horas de brilho solar, a soma dos dois coeficientes representa a transmitância global máxima (Gueymard *et al.*, 1995; Akpabio & Etuk, 2003).

2.4.4.2. Modelos físicos

Os modelos físicos procuram estimar o fluxo de radiação solar na superfície utilizando parametrizações que representam a física envolvida na interação entre a radiação solar e os constituintes atmosféricos. As parametrizações baseiam-se em dados coletados

por estações na superfície ou por meio de satélites e permitem inferir as propriedades ópticas da atmosfera e, conseqüentemente, a contribuição de cada processo na transmitância atmosférica da radiação solar (Šúri & Hofierka, 2004; Miller *et al.*, 2008).

Os modelos físicos apresentam como vantagem o fato de serem válidos para qualquer região, constituindo uma abordagem teórica rigorosa que procura solucionar a equação de transferência radiativa para descrever matematicamente os processos físicos que ocorrem na atmosfera. A principal dificuldade na aplicação dessa categoria de modelos reside na obtenção dos dados necessários para a parametrização das interações entre a radiação solar e os constituintes atmosféricos. Entre esses dados pode-se citar o tipo, a quantidade e a distribuição de nuvens e o perfil dos constituintes atmosféricos, tais como aerossóis, vapor d'água, ozônio e outros gases (Sucharov & Rosa, 1994; Myers, 2003, Pereira *et al.*, 2006).

Devido à carência de dados, os modelos físicos têm sido aplicados em escala regional, continental e global, onde a resolução espacial é baixa e a parametrização torna-se menos problemática. Um exemplo é o Atlas Brasileiro de Energia Solar, cujo objetivo é divulgar o levantamento da disponibilidade de energia solar no território brasileiro, um dos produtos do projeto SWERA. O mapeamento do potencial energético solar utilizou o modelo de transferência radiativa Brasil SR (Martins *et al.*, 2005; Martins *et al.*, 2007), alimentado com dados climatológicos e informações extraídas de 10 anos de imagens de satélites geostacionários da série GOES. A validação foi realizada com dados de radiação coletados em estações de superfície em diferentes pontos do território. Os resultados são disponibilizados na forma de mapas digitais georreferenciados com resolução espacial de 10 km (Pereira *et al.*, 2006).

Independente do método utilizado, os resultados das estimativas de radiação solar global geralmente expressam a radiação incidente no plano horizontal. Todavia, em áreas com topografia complexa, a variabilidade na altitude, na inclinação e na orientação da

superfície, bem como as sombras projetadas por feições topográficas vizinhas, resultam em fortes gradientes locais de radiação. Nessas condições a topografia desempenha um papel determinante na quantidade e na duração da radiação solar incidente, especialmente em latitudes médias ou elevadas, e seu efeito torna-se mais pronunciado no período de outono-inverno (Häntzschel *et al.*, 2005, Lefevre *et al.*, 2007). A consequência é uma alta heterogeneidade temporal e espacial nos balanços de energia e de água, afetando fatores como a variabilidade da temperatura do ar e do solo, da evapotranspiração, da umidade do solo e da quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (Tovar-Pescador *et al.*, 2006; Aguilar *et al.*, 2010).

De acordo com Gabrovec (1996), a abordagem mais comum nos modelos para determinação do regime de radiação em superfícies inclinadas considera os efeitos da inclinação e da orientação da superfície para a latitude desejada em uma determinada data, em diferentes horários ao longo do dia. Os principais fatores envolvidos na geometria de incidência Sol sobre uma superfície inclinada nesse contexto são mostrados esquematicamente na FIGURA 3.

Alguns modelos procuram separar a radiação direta e a radiação difusa, uma vez que elas são afetadas de forma diferente pelas características topográficas da superfície. A radiação direta depende tanto da inclinação quanto da orientação da superfície, enquanto a difusa é afetada apenas pela inclinação. Scola *et al.* (2003), por exemplo, usaram três modelos para estimar a radiação global em uma superfície com inclinação de $22,85^\circ$ para o norte, a partir de medidas feitas na horizontal em Botucatu ($22^\circ 51' S$). A radiação difusa e a direta foram quantificadas por meio de relações empíricas com o índice de claridade. As maiores diferenças entre os modelos testados foram observadas no inverno, quando a inclinação dos raios solares é mais acentuada. As modificações introduzidas nos modelos, mediante o uso de relações empíricas para quantificar a radiação difusa e a direta, melhoraram o ajuste dos resultados aos dados medidos.

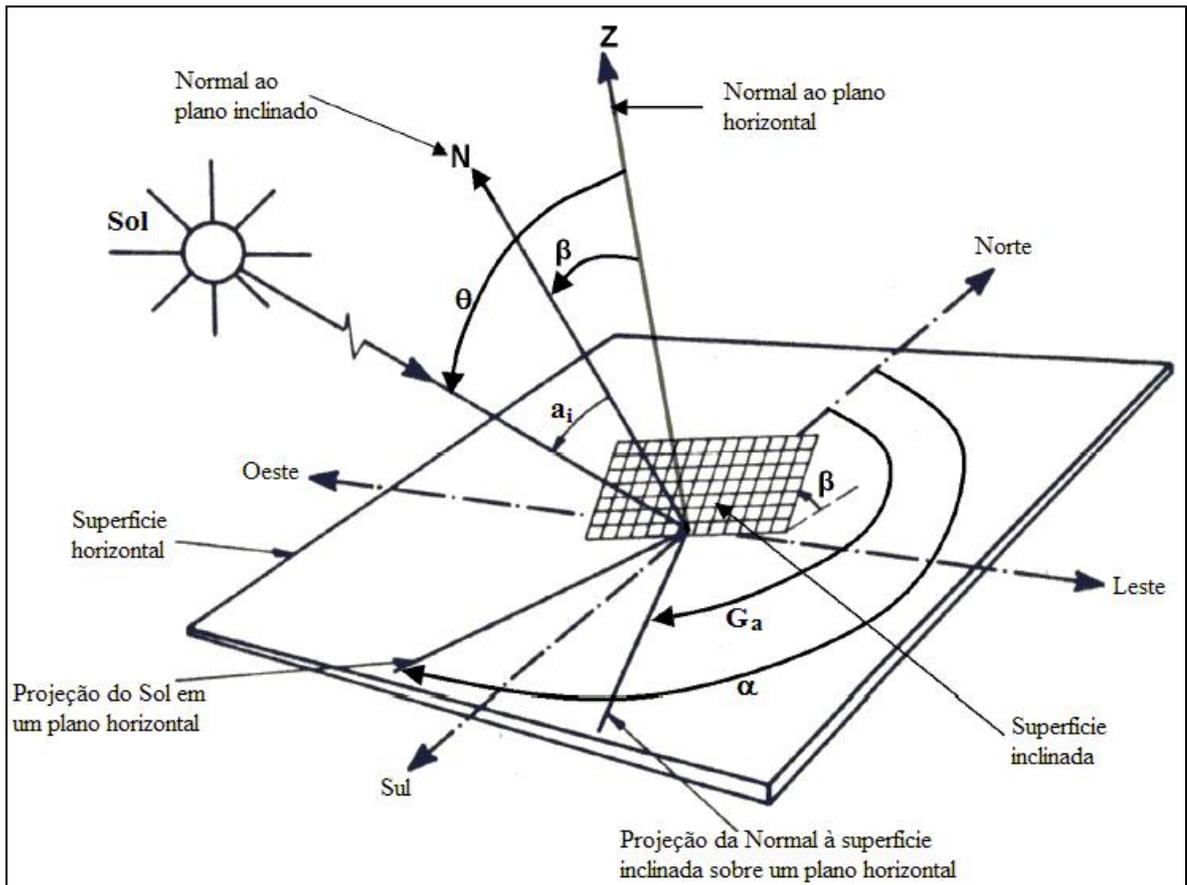


FIGURA 3. Representação esquemática dos fatores envolvidos na geometria de incidência do Sol sobre uma superfície inclinada (a_i : ângulo de incidência; β : inclinação da superfície; G_a : ângulo azimutal da superfície; θ : ângulo zenital solar; α : ângulo azimutal solar) (Chrysoulakis *et al.*, 2004).

Turco & Rizzatti (2006) também estimaram a radiação global em superfícies inclinadas a partir de medidas feitas na horizontal em Jaboticabal ($21^{\circ} 15' 22''$ S), porém utilizaram oito combinações de orientação e de inclinação da superfície. O modelo utilizado apresentou desempenho satisfatório para estimar a radiação global, exceto para as superfícies de maior inclinação (20°) nas direções norte e sul, no período do inverno. Quando considerados apenas dias de céu limpo o desempenho foi satisfatório em todas as situações, o que pode ser explicado pelo fato de que a radiação difusa não ter sido computada.

Souza *et al.* (2010) estimaram a radiação solar global diária em superfícies com três diferentes inclinações a partir de medidas feitas na horizontal em Botucatu ($22^{\circ} 51'$ S). Os autores empregaram cinco modelos isotrópicos, quantificando a radiação direta e a difusa e

caracterizando as condições de cobertura do céu por meio de intervalos do índice de claridade. Em todos os modelos, a dispersão das estimativas em relação aos dados medidos aumentou com a transparência atmosférica e com a inclinação da superfície, devido à maior radiação refletida e à obstrução do plano horizontal pela própria inclinação da superfície, ambos não considerados nos cálculos.

Geralmente os modelos para estimar a radiação global em superfícies inclinadas são empregados para um número limitado de locais e situações. Todavia, avanços na tecnologia de computadores e a difusão de programas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) tornaram possível estimar a variação espacial da radiação provocada pela topografia em áreas maiores, a partir de Modelos Digitais de Elevação. Algoritmos para computar a radiação solar considerando a altitude, a inclinação e a orientação do terreno se encontram disponíveis para vários programas de SIG.

Alguns algoritmos, além da geometria de incidência da radiação solar, consideram também a obstrução do horizonte causada por elevações vizinhas, conforme representado esquematicamente na FIGURA 4. Outros permitem ainda incorporar os efeitos de interação da radiação incidente com a atmosfera, bem como a quantificação da radiação direta e da radiação difusa (Hetrick *et al.* 1993; Dubayah & Rich, 1995; Fu *et al.*, 1995; Gabrovec, 1996; Kumar *et al.*, 1997; Fu & Rich, 2000; Hofierka & Šúri, 2002; Kang *et al.*, 2002; Šúri & Hofierka, 2004; Häntzschel *et al.*, 2005; Zakšec *et al.*, 2005; Mészáros & Miklánek, 2006; Wang *et al.*, 2006).

Modelos implementados em SIG permitem a obtenção de estimativas de radiação solar espacialmente contínuas, com alta resolução espacial e temporal (Chrysoulakis *et al.*, 2004). Contudo, a qualidade dos resultados é influenciada pela resolução espacial e pela acurácia do Modelo Digital de Elevação disponível (Thompson *et al.*, 2001; Kang *et al.*; 2002; Häntzschel *et al.*, 2005; Ruiz-Arias *et al.*, 2009). Em alguns países, Modelos Digitais de Elevação de alta resolução espacial (10 a 50 m) são produzidos e disponibilizados por

órgãos governamentais, mas para grandes porções do Globo eles ainda inexistem com o detalhamento necessário (Toutin, 2001; Chrysoulakis *et al.*, 2004).

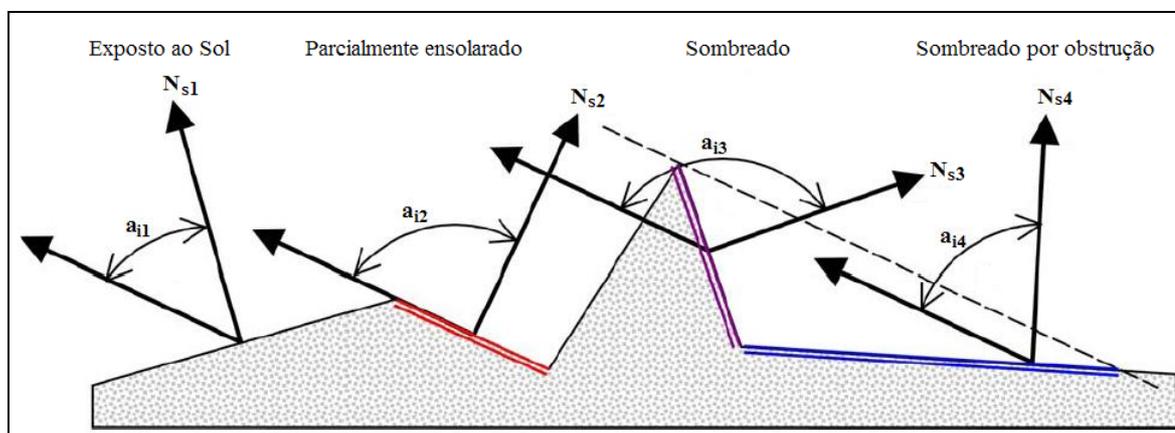


FIGURA 4. Representação esquemática dos efeitos de sombreamento direto e por obstrução causados pela topografia (a_i : ângulo de incidência do Sol; N_s : Normal à superfície inclinada) (Zakšec *et al.*, 2005).

A maior iniciativa para aquisição e disponibilização de dados altimétricos para todo o Globo foi o programa SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Os dados são disponibilizados gratuitamente e cobrem a maior parte da superfície emersa da Terra entre as latitudes 60° N e 56° S, com resolução espacial de aproximadamente 90 m (Santos *et al.*, 2006). Para os casos que demandam resolução espacial mais fina, outra fonte de dados de altimetria é o produto GDEM (*Global Digital Elevation Model*), elaborado a partir de imagens orbitais estereoscópicas do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*). Os dados altimétricos do GDEM também são gratuitos e cobrem a superfície terrestre entre as latitudes de 83° N e 83° S, com resolução espacial de cerca de 30 m.

Outra possibilidade é a utilização de informações cartográficas disponíveis para gerar Modelos Digitais de Elevação por interpolação a partir de curvas de nível, desde que a escala dos originais seja compatível com a resolução espacial desejada. Este é o caso do

Rio Grande do Sul, estado integralmente coberto por cartas na escala 1:50.000, nas quais a topografia é representada por curvas de nível com equidistância vertical de 20 m.

Resguardadas as propriedades do Modelo Digital de Elevação, que dependem dos dados disponíveis em cada região, os modelos para estimativa de radiação em superfícies inclinadas em SIG adotam procedimentos similares para avaliar as interferências topográficas. Segundo Kang *et al.* (2002), as diferenças mais relevantes residem nos métodos empregados para computar os efeitos da atmosfera, com variações na quantidade e na complexidade de parâmetros, na forma de sua obtenção e no uso para calcular a radiação incidente. Abordagens físicas rigorosas tendem a requerer maior número de parâmetros, cuja obtenção não raramente enfrenta obstáculos. De outro lado, abordagens generalistas usam número reduzido de parâmetros, que podem ser derivados de registros de estações de superfície ou de dados de satélites. Alguns algoritmos aplicam os parâmetros na forma de valores médios para toda a área de estudo, enquanto outros necessitam de estimativas *pixel a pixel*.

Para Dubayah & Loechel (1997), a dificuldade em obter os parâmetros necessários é uma das razões que limita a disseminação e uso de tais modelos. Nesse contexto, é preferível optar por algoritmos que necessitam poucos parâmetros, a fim de viabilizar a obtenção de mapas de radiação incidente em superfícies com topografia heterogênea. Ainda que implique em generalizações, empregar parâmetros de obtenção simples e robusta torna esses modelos de aplicação mais fácil em diferentes regiões, especialmente no caso do Brasil, onde os dados necessários têm disponibilidade e cobertura espacial e temporal limitadas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área de estudo

3.1.1. Localização

A área de estudo compreende a zona de produção vitivinícola denominada de Serra Gaúcha, localizada na porção nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, aproximadamente entre as latitudes 28° 30' S e 29° 30' S e longitudes 50° 40' W e 52° 05' W (FIGURA 5). De acordo com o artigo 117 da Seção I do Decreto nº 99.066, de 08 de março de 1990, “Zona de Produção é a região geográfica formada por parte ou totalidade de um ou mais municípios, na mesma Unidade da Federação, onde existem a cultura da videira e a industrialização da uva (Lei nº7.678, art. 42, parágrafo único)”.

Segundo Hoffmann *et al.* (2005), a delimitação geográfica da zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha abrangia originalmente os limites político-administrativos de 31 municípios. Posteriormente, com a emancipação do distrito de Pinto Bandeira do município de Bento Gonçalves, esse número aumentou para 32. De acordo com a divisão proposta por Fortes (1979), os municípios da zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha estão distribuídos em três regiões fisiográficas: Encosta Inferior do Nordeste, Encosta Superior do Nordeste e Campos de Cima da Serra. A maior parte dos municípios se encontra total ou parcialmente sobre a Encosta Superior do Nordeste (FIGURA 6).

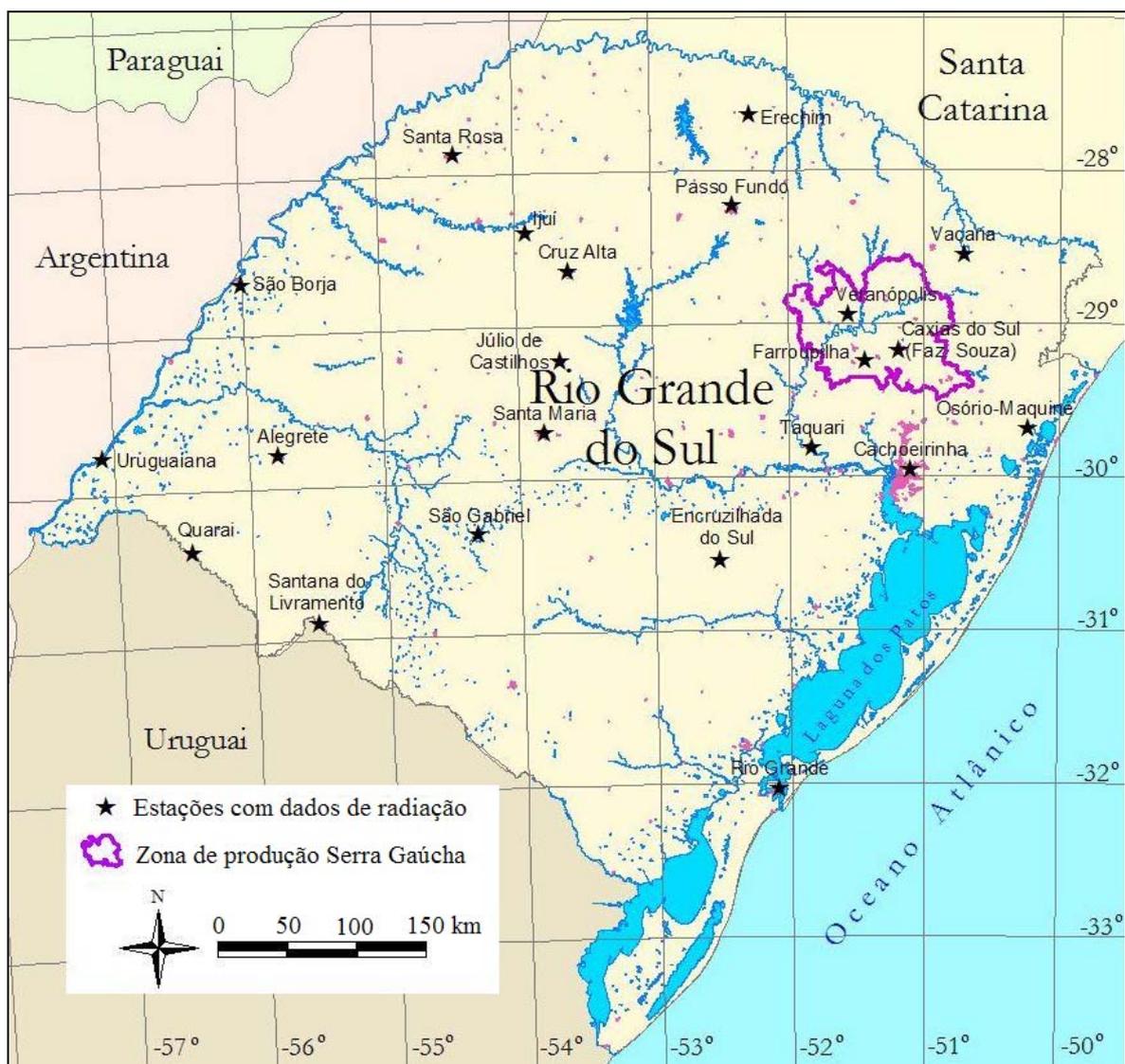


FIGURA 5. Localização da zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha e estações meteorológicas com registro de radiação solar de longo prazo no Rio Grande do Sul.

A Serra Gaúcha é a principal região produtora de vinhos finos do Rio Grande do Sul e a maior região vitícola do Brasil, com cerca de 32.000 ha ocupados com vinhedos, dos quais aproximadamente 5.420 ha são variedades viníferas (Mello & Machado, 2008). O Estado concentra 90% da produção nacional de vinhos, suco de uvas e outros derivados, com 60,2% da área total plantada com videiras no país, somando 50.389 ha de vinhedos. A produção de vinhos finos no Rio Grande do Sul totalizou 24,8 milhões de litros em 2010, representando cerca de 5,98% do volume de todos os produtos em nível nacional (Mello,

2011). Neste item, além da Serra Gaúcha, se destacam também as novas regiões produtoras da Campanha, da Serra do Sudeste e dos Campos de Cima da Serra.

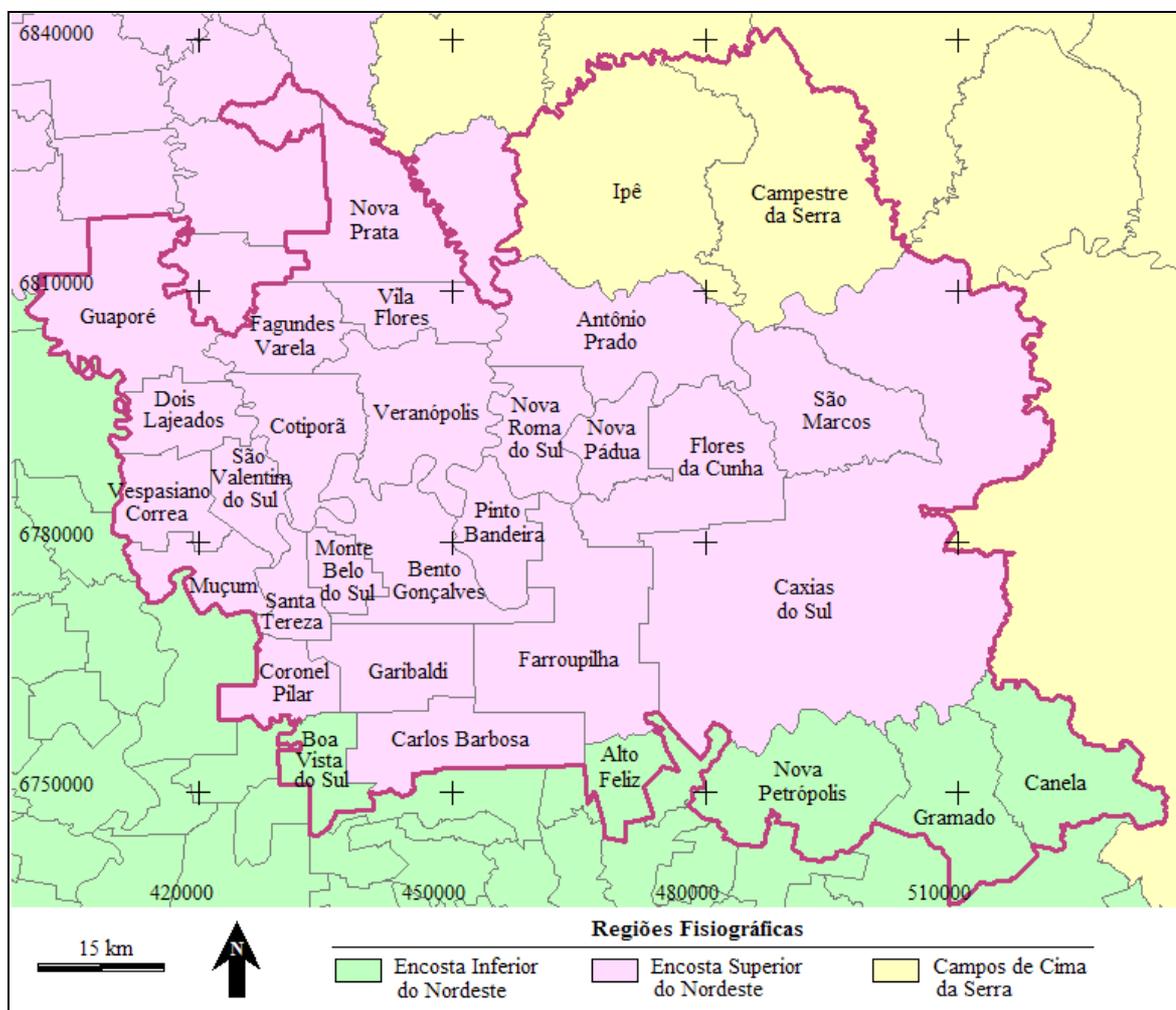


FIGURA 6. Localização dos municípios que integram a zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha e regiões fisiográficas (Fortes, 1979) nas quais estão inseridos.

Com sua origem vinculada à imigração italiana, a viticultura da Serra Gaúcha é uma atividade de pequenas propriedades, com média de 15 ha de área total e 2,5 ha de vinhedos, topografia acidentada, pouca mecanização e predomínio da mão-de-obra familiar (Protas *et al.*, 2002; Protas *et al.*, 2006). Além da importância econômica, a atividade tem também grande relevância social, com mais de 20.000 famílias envolvidas com a produção vitivinícola (Felten, 2011).

3.1.2. Clima

Segundo a classificação climática de Köppen, a Serra Gaúcha apresenta um clima do tipo Cfb (Moreno, 1961), subtropical com verão ameno. Tonietto & Carbonneau (1999) enquadram a região em um sistema mundial de classificação climática multicritério como um clima vitícola do tipo IS00 IH4 IF2, úmido, temperado quente, de noites temperadas.

De acordo com as normais climatológicas da estação de Bento Gonçalves (Embrapa, 2008), situada aproximadamente no centro da área de estudo, a temperatura média anual é de 17,2°C, sendo janeiro o mês mais quente, com temperatura média de 21,8°C, e junho o mais frio, com temperatura média de 12,8°C. A precipitação pluvial total anual é de 1.736 mm, sendo maio o mês com menor precipitação acumulada, com 107 mm, e setembro o mais chuvoso, com precipitação acumulada de 185 mm (FIGURA 7).

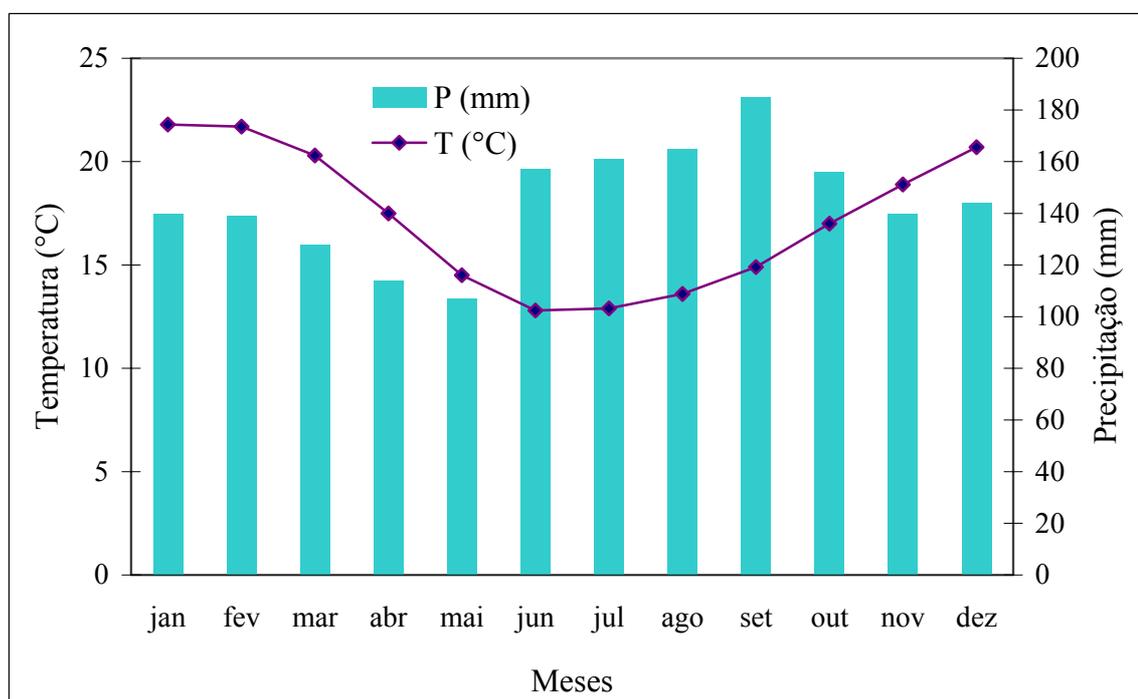


FIGURA 7. Temperatura média mensal e precipitação pluvial média mensal em Bento Gonçalves, RS (1961 - 1990).

Segundo Nimer (1989), o clima da Serra Gaúcha caracteriza-se pela homogeneidade pluviométrica e pela unidade no domínio do “clima mesotérmico do tipo temperado”, devido às condições do relevo, da localização e da dinâmica da circulação

atmosférica. A temperatura na Serra Gaúcha é condicionada, sobretudo, pelo relevo. Na maior parte da área as médias mensais situam-se entre 16°C e 18°C, mas nas áreas mais elevadas do Planalto podem ser inferiores a 10°C nos meses de inverno. Enquanto a temperatura apresenta claramente uma sazonalidade, com verão e inverno bem definidos, a amplitude da variação anual da precipitação pluvial mensal não caracteriza um período chuvoso e outro seco (FIGURA 7).

A Serra Gaúcha, como o restante do estado do Rio Grande do Sul, encontra-se na primavera e no verão sob domínio da Massa Tropical Marítima, responsável por chuvas intensas e de curta duração. No outono-inverno, aumenta a frequência dos anticiclones migratórios polares associados à Massa Polar Marítima, trazendo chuvas de duração mais prolongada (Hasenack & Ferraro, 1989). Nesse período as geadas são frequentes, embora possam ocorrer também no outono e na primavera. A penetração da massa de ar Polar Atlântica, muito fria e úmida, também pode provocar, ao elevar-se sobre as áreas de maior altitude, a precipitação ocasional de neve. É comum a ocorrência de granizo, fenômeno mais frequente no fim do inverno e na primavera, devido à passagem de frentes frias pela região, que podem vir associadas a áreas de alta instabilidade (Berlato *et al.*, 2000; Cunha *et al.*, 2001).

Do ponto de vista agroclimático, a precipitação pluvial e a temperatura são as variáveis mais relevantes para a viticultura na Serra Gaúcha. O excesso de precipitação e a temperatura relativamente elevada durante o ciclo vegetativo da videira favorecem a ocorrência de problemas fitossanitários. Além de aumentarem os custos com o controle fitossanitário dos vinhedos, essas condições também afetam a quantidade e a qualidade físico-química da uva para vinificação (Souza, 2005; Farias, 2009). A variabilidade interanual da precipitação pluvial e da temperatura resulta em safras com qualidade distinta em diferentes anos, e está relacionada, em parte, à ocorrência dos fenômenos El Niño e La Niña.

3.1.3. Geologia

A origem geológica da região da Serra Gaúcha integra a Formação Serra Geral da Série São Bento, na Bacia Rio do Paraná, cronologicamente pertencente aos períodos Triássico e Jurássico, estendendo-se até o Cretáceo Inferior, da era Mesosóica. A Formação Serra Geral constitui-se de uma sucessão de derrames de rochas efusivas, de composição predominantemente básica, compreendendo derrames de basalto, andesito, além de brechas vulcânicas e sedimentares, diques e soleiras de diabásio e corpos de arenitos interderrames. Mais de 60% do Estado do Rio Grande do Sul foi coberto por esses derrames, que atingiram ainda parte dos Estados de Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso, além do norte do Uruguai e o leste da Argentina e do Paraguai. No Rio Grande do Sul o derrame ocorre desde cotas inferiores a 100 m até aproximadamente 1.200 m de altitude (IBGE, 1986; IBGE, 1990).

A sequência inferior da Formação Serra Geral é constituída predominantemente de rochas efusivas básicas, comumente basaltos e fenobasaltos, com diques e corpos tabulares de diabásio associados. Ocasionalmente, entre as lavas, ocorrem lentes e camadas de arenitos interderrames de origem eólica, com estratificação cruzada tangencial e brechas constituídas por fragmentos de basalto e arenitos cimentados por lava basáltica. A espessura dos arenitos interderrames pode variar de alguns centímetros até dezenas de metros (IBGE, 1986).

A sequência superior dos derrames normalmente apresenta um domínio relativo de rochas efusivas de composição ácida, constituídas por riolitos, dacitos e basaltos pórfiros, entre outros (IBGE, 1986). As rochas riolíticas ocorrem principalmente nas partes mais elevadas, especialmente na região fisiográfica dos Campos de Cima da Serra (Flores *et al.*, 1999). Com menor expressão, verifica-se também na Serra Gaúcha pequenas ocorrências de sedimentos fluviais e paludais do Quaternário, principalmente nas várzeas dos rios e pequenos corpos d'água (Flores *et al.*, 1999).

Embora não exista uma associação entre a geologia e a viticultura na Serra Gaúcha, ela influi indiretamente na distribuição espacial dos vinhedos e nas características da produção à medida que contribui para a formação do relevo e constitui material de origem para a formação dos solos. De forma geral, na sequência inferior da Formação Serra Geral ocorrem solos de média ou alta fertilidade, característica desfavorável à qualidade dos vinhos. Nas porções intermediárias do relevo há uma certa predominância de solos rasos e pedregosos, cuja profundidade efetiva reduzida é favorável em anos de precipitação pluvial elevada. Na sequência superior, mais ácida, os solos tendem a apresentar maiores teores de matéria orgânica e de alumínio trocável, prejudiciais à qualidade (Flores, 2011).

3.1.4. Relevo

A Serra Gaúcha situa-se na unidade geomorfológica da Serra Geral, pertencente à região geomorfológica do Planalto das Araucárias, que por sua vez constitui uma subdivisão do domínio morfoestrutural das bacias e coberturas sedimentares, a qual corresponde de modo geral à província geológica do Paraná (IBGE, 1986). De maneira geral, o relevo é complexo, apresentando grandes variações de altitude, de declividade e de exposição solar (Sarmiento *et al.*, 2006).

A topografia é ondulada no topo e apresenta bordas escarpadas e recortadas, resultado do processo de dissecação verificado no Sul do Brasil, a partir de alterações climáticas, quando se desenvolveu uma rede de drenagem com maior capacidade de erosão vertical, o que preservou áreas mais elevadas, testemunhos de uma superfície anterior. Apresenta relevos conservados e dissecados de planaltos e suas escarpas, vigorosamente recortadas e festonadas pelo entalhe da drenagem, que secciona as várias sequências de derrames, deixando nas vertentes abruptas um sucessivo escalonamento de patamares estruturais (FIGURA 8), modelado conhecido regionalmente por “Região Serrana”.

As superfícies mais elevadas que resistiram ao processo de dissecação funcionam como divisores de águas para os inúmeros pequenos cursos d’água que correm para os

tributários do rio Caí, nas direções sul e sudeste, e para os tributários do rio das Antas, nas direções norte e noroeste (IBGE, 1986; Hoffmann *et al.*, 2005).



FIGURA 8. Vista geral do relevo da região (Sarmiento, 2010).

3.1.5. Solos

Em função dos diferentes materiais de origem e do relevo movimentado, a distribuição dos solos na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha forma um complexo com a predominância de solos rasos e pedregosos (Flores *et al.*, 1999). Entretanto, apesar da limitação imposta pelo relevo e pela pouca profundidade, as terras são intensamente utilizadas com culturas diversificadas, dada a fertilidade natural dos solos, relativamente elevada, e a estrutura de posse da terra, baseada em pequenas propriedades (IBGE, 1986).

Na porção correspondente à Encosta Inferior do Nordeste podem ocorrer Argissolos Vermelhos Distróficos típicos arênicos, Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos abrupticos, Argissolos Bruno-Acinzentados Alumínicos típicos, e Chernossolos Argilúvicos Férricos típicos associados a Neossolos Regolíticos ou Litólicos Eutróficos. Uma elevada proporção desses Chernossolos foi transformada em Cambissolos Háplicos

ou em Luvisolos Háplicos devido à erosão do horizonte A chernozêmico original causada pelo uso agrícola. Nas várzeas encaixadas dos rios Taquari e Caí e de seus afluentes ocorrem Chernossolos Háplicos Órticos típicos (Streck *et al.*, 2008).

Na porção correspondente à Encosta Superior do Nordeste, nos relevos mais acidentados, ocorrem Neossolos Litólicos e Neossolos Regolíticos Distróficos, Neossolos Litólicos Distro-úmbricos fragmentários típicos e Neossolos Regolíticos Distro-úmbricos lépticos ou típicos. Nas áreas de relevo ondulado, incluindo também a região fisiográfica dos Campos de Cima da Serra, são encontrados Cambissolos Húmicos Alumínicos típicos associados com Argissolos Bruno-Acinzentados Alíticos abruptos e Neossolos Litólicos, Cambissolos Háplicos Eutróficos e Distróficos, Latossolos Brunos e Nitossolos Brunos (IBGE, 1986; Streck *et al.*, 2008).

Devido à forma geométrica de divisão dos lotes no início da ocupação colonial, a ocupação da terra se deu de forma indiscriminada. Como consequência, a viticultura da Serra Gaúcha se encontra associada aos mais variados tipos de solos, de acordo com sua distribuição na paisagem e com a delimitação das propriedades rurais. A variabilidade espacial dos tipos de solos resulta em vinhos com características distintas em cada local, pois suas propriedades agem como reguladores dos elementos do clima (Flores, 2011).

3.1.6. Vegetação

A vegetação original da Serra Gaúcha é resultado não somente das condições atuais de ambiente, mas também das condições reinantes nos períodos glaciários e interglaciários do Quaternário (Ab'Saber, 1957). A região caracterizava-se, originalmente, pela Floresta Estacional Decidual nas áreas escarpadas do planalto e pela Floresta Ombrófila Mista, com bosques de *Araucária angustifolia* intercalados por campos, nos topos mais suaves (IBGE, 1986). Nas áreas de contato observa-se uma interpenetração das espécies entre as duas formações vegetais.

A vegetação original foi profundamente alterada pela intensa ação antrópica desenvolvida a partir de 1874, quando iniciou a colonização italiana. Os imigrantes italianos, assentados em pequenas propriedades rurais, promoveram a retirada da floresta e a implantação de policulturas, com destaque para o trigo, o milho, o feijão, a videira e ainda pequenas áreas de pastagem, empregando um manejo rudimentar (Hoffman *et al.*, 2005). Contudo, ainda restam algumas áreas de florestas nativas localizadas nas superfícies mais acidentadas e isoladas das escarpas do planalto (FIGURA 9), embora poucas possam ser consideradas florestas primárias em virtude de já ter havido algum tipo de exploração no passado.



FIGURA 9. Padrão típico de uso do solo da região, com exploração agrícola nas áreas menos íngremes (várzeas e patamares dos derrames) e remanescentes de florestas nativas nas áreas mais acidentadas (Sarmento, 2010).

3.1.7. Histórico recente

Segundo Hoffmann *et al.* (2005), a região experimentou várias mudanças significativas a partir de meados da década de 1990. As crises no setor vitivinícola e as mudanças implementadas na economia nacional em fins da década de 1980 e início de 1990, além avanço no conhecimento técnico, provocaram o processo que conduziu à quarta

e atual fase da vitivinicultura regional. Ela se caracteriza, entre outros aspectos, pelo surgimento de dezenas de pequenas vinícolas localizadas no meio rural, incremento na tecnificação da produção e busca de produtos distintos em características e em tipicidade, a fim de aumentar o valor agregado e, assim, garantir a manutenção da atividade.

Paralelamente, houve o ingresso do Brasil na Organização Internacional do Vinho (OIV) e ocorreu uma valorização do conceito de Indicação Geográfica (IG). A primeira IG implementada na região, e também a primeira do Brasil, foi o Vale dos Vinhedos (Tonietto & Mandelli, 2005), no município de Bento Gonçalves, na categoria de Indicação de Procedência (IP). Os resultados alcançados estimularam a continuidade dos estudos e dos investimentos com vistas ao aprimoramento da IG Vale dos Vinhedos para a categoria de Denominação de Origem (DO), processo que levou cerca de uma década até o pedido de reconhecimento oficial, em 2010. O Vale dos Vinhedos serviu de referência para o desenvolvimento de outras IP, como Pinto Bandeira (Tonietto *et al.*, 2006b), reconhecida em 2010, e Monte Belo do Sul, Altos Montes (Flores da Cunha) e Farroupilha, que se encontravam em processo de organização no período em que este estudo foi realizado.

O foco na tecnificação e na diferenciação da produção gerou uma demanda por conhecimento mais específico sobre o potencial natural de cada local, impulsionando vários estudos sobre clima, solo, relevo e outros fatores (Mandelli *et al.*, 2005; Sarmiento *et al.*, 2006; Tonietto *et al.*, 2006a; Tonietto *et al.*, 2006b; Flores *et al.*, 2007; Hasenack & Weber, 2007; Mandelli *et al.*, 2007; Weber *et al.*, 2008).

Em escala local a topografia influi na interação da superfície com os elementos climáticos, afetando a interceptação da radiação solar, a drenagem de ar, a variação da temperatura e da umidade do ar e do solo, entre outros. Como a Serra Gaúcha possui relevo movimentado, a caracterização do efeito da topografia sobre a disponibilidade e a distribuição espacial e temporal da radiação solar torna-se importante para orientar ações na busca de um melhor aproveitamento do potencial de cada local.

3.2. Material

O material utilizado consistiu de dados de radiação solar global de longo prazo, registrados por estações meteorológicas localizadas na área de estudo e no entorno, dados cartográficos disponíveis para a área de estudo, em meio analógico e digital, programas para processamento e análise de informações georreferenciadas, equipamento e acessórios para obtenção de fotografias hemisféricas e receptores GPS (*Global Positioning System*) de navegação. Cada um desses itens é detalhado a seguir.

3.2.1. Dados de estações meteorológicas

Foram utilizados dados de radiação solar global com partição decendial, registrados em quatro estações meteorológicas da Fundação Estadual de Pesquisas Agropecuárias (FEPAGRO) na área de estudo e no entorno (TABELA 1 e TABELA 2). Três estações situam-se dentro da área de estudo: Caxias do Sul (distrito de Fazenda Souza), Veranópolis e Farroupilha (FIGURA 5). A estação de Vacaria, apesar de encontrar-se fora da área de estudo, é importante porque as características topográficas da região fisiográfica onde ela se situa são semelhantes àquelas da porção nordeste da zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha. Esta porção está inserida na região fisiográfica dos Campos de Cima da Serra, abrangendo os municípios de Campestre da Serra, Ipê, norte de São Marcos e norte de Caxias do Sul, e seu relevo é distinto daquele das Encostas Inferior e Superior do Nordeste.

TABELA 1. Coordenadas geográficas das estações meteorológicas utilizadas, período de coleta dos dados de radiação solar global e número de observações úteis entre as 36 séries (decêndios) de dados, segundo Cargnelutti Filho *et al.* (2007).

Município	Coordenadas geográficas			Período	Número de observações		
	Altitude (m)	Latitude (S)	Longitude (W)		Min.	Máx.	Média
Caxias do Sul	787	29° 10' 25"	51° 12' 21"	1987-2003	16	17	16
Farroupilha	702	29° 14' 30"	51° 26' 20"	1963-1996	27	30	29
Vacaria	955	28° 30' 09"	50° 56' 12"	1966-1990	19	24	22
Veranópolis	705	28° 56' 14"	51° 33' 11"	1956-1999	29	32	30

TABELA 2. Estimativa dos parâmetros média (μ^{\wedge}) e desvio-padrão (σ^{\wedge}) da radiação solar global média decendial ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) de quatro estações meteorológicas na Serra Gaúcha e entorno (Cargnelutti Filho *et al.*, 2007).

Mês	Decêndio	Caxias do Sul		Farroupilha		Vacaria		Veranópolis	
		μ^{\wedge}	σ^{\wedge}	μ^{\wedge}	σ^{\wedge}	μ^{\wedge}	σ^{\wedge}	μ^{\wedge}	σ^{\wedge}
Janeiro	1	428	52	450	63	495	69	535	86
	2	403	60	450	87	491	75	526	89
	3	382	67	441	69	490	55	521	80
Fevereiro	1	380	82	436	68	489	56	497	72
	2	382	43	409	65	430	63	492	77
	3	363	65	412	84	438	82	480	80
Março	1	351	60	388	62	432	40	462	60
	2	348	51	360	72	393	74	429	73
	3	310	45	324	59	369	62	408	82
Abril	1	294	52	312	63	359	65	362	63
	2	239	45	279	51	339	50	336	72
	3	234	56	266	53	316	33	327	55
Maio	1	227	37	242	48	282	49	294	59
	2	202	27	224	40	268	45	261	46
	3	198	29	212	44	260	39	268	46
Junho	1	188	31	194	42	228	39	244	53
	2	173	26	192	37	216	38	227	49
	3	179	32	192	45	222	38	234	52
Julho	1	163	38	199	38	221	45	216	56
	2	197	39	208	32	239	47	240	53
	3	200	28	223	37	256	47	260	55
Agosto	1	210	37	223	47	256	50	268	64
	2	230	41	228	60	274	53	281	72
	3	245	32	242	43	287	46	316	66
Setembro	1	270	52	292	69	327	63	337	76
	2	274	47	277	71	306	69	322	76
	3	280	68	303	82	357	49	357	68
Outubro	1	322	49	346	59	400	78	416	83
	2	330	68	377	66	425	87	447	86
	3	371	63	364	69	455	80	471	102
Novembro	1	384	77	402	54	461	58	471	101
	2	422	64	425	62	474	62	525	97
	3	418	71	429	54	494	55	528	77
Dezembro	1	418	54	444	60	519	90	525	86
	2	428	53	446	73	529	57	526	94
	3	426	64	457	67	512	80	546	71

Procurou-se, dessa forma, obter uma melhor distribuição das estações com relação aos tipos de relevo, tendo-se duas estações associadas às altitudes intermediárias e em relevo mais movimentado (Farroupilha e Veranópolis) e duas estações associadas às áreas de maior altitude e em relevo mais suave (Caxias do Sul e Vacaria). O número de quatro

estações meteorológicas em relação à superfície total da área de estudo resulta em uma proporção equivalente à utilizada por Trnka *et al.* (2005) na estimativa de parâmetros atmosféricos e na modelagem da distribuição espacial da radiação solar em regiões de relevo complexo na Áustria e na República Tcheca.

3.2.2. Dados cartográficos

O mapeamento existente em melhor detalhamento e com cobertura contínua para toda a zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha é constituído pelas cartas topográficas da Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (DSG), em escala 1:50.000, na projeção Universal Transversa de Mercator (UTM). Nestas cartas a informação referente à topografia é representada por curvas de nível e por pontos cotados. As primeiras apresentam equidistância vertical de 20 m, enquanto os pontos indicam a altitude de topos de elevações, marcos geodésicos e de outros locais relevantes.

Para cobrir estritamente o perímetro da zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha são necessárias 22 cartas da DSG (FIGURA 10). Todavia, para gerar um Modelo Digital de Elevação é conveniente preencher retângulos completos em torno da área de interesse. Isso previne problemas no cálculo de variáveis topográficas devido a desníveis irreais entre *pixels* que possuem altitude e *pixels* que estão sem informação (com altitude igual a 0). Além disso, para análises de sombreamento o Modelo Digital de Elevação deve exceder as dimensões da área de estudo, a fim de que sombras causadas por elevações situadas fora dela possam ser computadas.

Assim, com vistas a cobrir um retângulo completo em torno da zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha, foram incluídas três cartas na direção leste e três na direção oeste. Da mesma forma, para cobrir o entorno da estação meteorológica de Vacaria, situada fora da área de estudo, foram incluídas mais duas cartas na direção norte, totalizando ao final 30 cartas (FIGURA 10). Desse total, 20 cartas já se encontravam disponíveis na forma de um Modelo Digital de Elevação, totalizando uma superfície de aproximadamente

1.348.961 hectares e cobrindo a maior parte da zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha, com uma resolução espacial de 30 m (Hasenack & Weber, 2007).

As 10 cartas restantes também estavam disponíveis em meio digital, porém como arquivos vetoriais no formato *shape file*, contendo as curvas de nível e os pontos cotados extraídos das folhas originais em papel (Hasenack & Weber, 2010). A FIGURA 10 e a TABELA 3 mostram, respectivamente, a localização e a relação das 30 cartas utilizadas, bem como a forma disponível no período de realização do estudo.

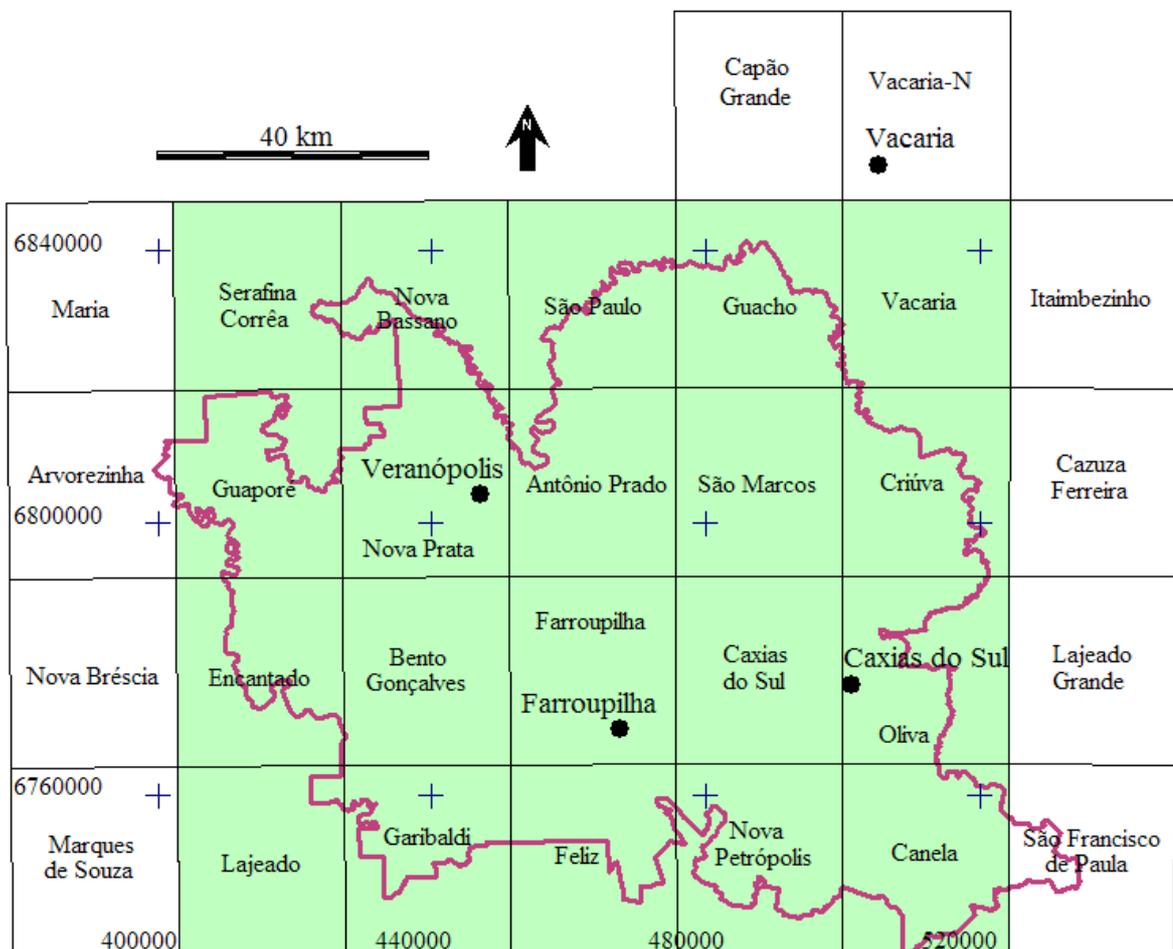


FIGURA 10. Localização das 30 cartas topográficas da DSG em escala 1:50.000 necessárias para cobrir a zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha e a estação meteorológica de Vacaria (verde: disponíveis como Modelo Digital de Elevação; branco: disponíveis como arquivos vetoriais).

TABELA 3. Nomenclatura Internacional da folha, MI (Mapa Índice), Nome Regional e forma disponível das 30 cartas topográficas da DSG na escala 1:50.000 necessárias para cobrir a zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha e a estação meteorológica de Vacaria.

Nome Internacional	MI	Nome Regional	Forma disponível
SH.22-V-B-VI-3	2936/3	Antônio Prado	Modelo Digital de Elevação
SH.22-V-D-II-2	2952/2	Bento Gonçalves	Modelo Digital de Elevação
SH.22-X-C-I-3	2954/3	Canela	Modelo Digital de Elevação
SH.22-V-D-III-2	2953/2	Caxias do Sul	Modelo Digital de Elevação
SH.22-X-A-IV-3	2937/3	Criúva	Modelo Digital de Elevação
SH.22-V-D-II-1	2952/1	Encantado	Modelo Digital de Elevação
SH.22-V-D-III-1	2953/1	Farroupilha	Modelo Digital de Elevação
SH.22-V-D-III-3	2953/3	Feliz	Modelo Digital de Elevação
SH.22-V-D-II-4	2952/4	Garibaldi	Modelo Digital de Elevação
SH.22-V-B-VI-2	2936/2	Guacho	Modelo Digital de Elevação
SH.22-V-B-V-3	2935/3	Guaporé	Modelo Digital de Elevação
SH.22-V-D-II-3	2952/3	Lajeado	Modelo Digital de Elevação
SH.22-V-B-V-2	2935/2	Nova Bassano	Modelo Digital de Elevação
SH.22-V-D-III-4	2953/4	Nova Petrópolis	Modelo Digital de Elevação
SH.22-V-B-V-4	2935/4	Nova Prata	Modelo Digital de Elevação
SH.22-X-C-I-1	2954/1	Oliva	Modelo Digital de Elevação
SH.22-V-B-VI-4	2936/4	São Marcos	Modelo Digital de Elevação
SH.22-V-B-VI-1	2936/1	São Paulo	Modelo Digital de Elevação
SH.22-V-B-V-1	2935/1	Serafina Correa	Modelo Digital de Elevação
SH.22-X-A-IV-1	2937/1	Vacaria	Modelo Digital de Elevação
SH.22-V-B-III-3	2920/4	Capão Grande	Arquivos vetoriais
SH.22-X-A-I-3	2921/3	Vacaria-N	Arquivos vetoriais
SH.22-V-B-IV-4	2934/4	Arvorezinha	Arquivos vetoriais
SH.22-X-A-IV-4	2937/4	Cazuza Ferreira	Arquivos vetoriais
SH.22-X-A-IV-2	2937/2	Itaimbezinho	Arquivos vetoriais
SH.22-X-C-I-2	2954/2	Lajeado Grande	Arquivos vetoriais
SH.22-V-B-IV-2	2934/2	Maria	Arquivos vetoriais
SH.22-V-D-I-4	2951/4	Marques de Souza	Arquivos vetoriais
SH.22-V-D-I-2	2951/2	Nova Brésia	Arquivos vetoriais
SH.22-X-C-I-4	2954/4	São Francisco de Paula	Arquivos vetoriais

3.2.3. Programas

Foram empregados vários programas para processamento e análise de dados georreferenciados, procurando-se aproveitar recursos específicos de cada um, a fim de executar da forma mais eficiente possível as diferentes etapas do estudo. Os programas, bem como a respectiva utilização, são detalhados a seguir.

- Idrisi (©Clarklabs): estruturação da base de dados espacial, mais especificamente a geração do Modelo Digital de Elevação da área de estudo;
- Arcview/ArcGIS (©ESRI): cálculo das variáveis topográficas (declividade e orientação) da superfície e suporte para o cálculo da radiação solar global;
- *Solar Analyst* (©HEMI): estimativa da radiação incidente em cada *pixel* do Modelo Digital de Elevação, de acordo com as características topográficas, com o período do ano e com as características da atmosfera.

Entre os fatores que justificam a opção pelo *Solar Analyst* está o fato de usar poucos parâmetros para caracterizar as condições da atmosfera (fração difusa e transmitância direta), os quais podem ser estimados a partir de dados medidos ou por meio de relações empíricas. A disponibilização do programa é gratuita e a documentação que o acompanha é bastante detalhada com relação aos métodos de cálculo empregados. Fornecido na forma de uma extensão para o SIG Arcview/ArcGIS, é de fácil utilização, tanto pelo fato de possuir uma interface amigável quanto por funcionar no ambiente de um SIG bastante conhecido e difundido. Existe também um número razoável de trabalhos já realizados sob diferentes condições, ambientes e escalas, que servem de referência para a avaliação dos resultados obtidos.

Além dos programas de análise espacial acima relacionados, foram também utilizados vários programas auxiliares para tabulação, análise e interpretação de dados, para elaboração de gráficos e editoração do texto e para o processamento de fotografias e

elaboração de figuras. A maior parte dessas tarefas foi executada com planilha eletrônica Excel e editor de textos Word, do pacote Office (©Microsoft), e com aplicativos do pacote Corel Draw (©Corel).

3.2.4. Equipamento para fotografias hemisféricas

O equipamento para obtenção de fotografias hemisféricas incluiu diversos itens, os quais são descritos com maior detalhe a seguir.

- Câmera fotográfica digital Nikon Coolpix 950: a posição do acoplamento da lente no topo do corpo da câmera (FIGURA 11), diferente das câmeras fotográficas convencionais com acoplamento frontal, facilita a obtenção de fotografias na direção do zênite;
- Lente grande angular tipo “olho de peixe” Nikon FC-E8 (FIGURA 11): possui campo de visada de 183° , possibilitando o registro de toda a abóbada acima de um ponto. É uma das lentes mais empregadas em estudos com fotografias hemisféricas, tanto para caracterizar a obstrução do horizonte quanto em estimativas de área foliar e cobertura do solo em dosséis de vegetação. A projeção da imagem obtida é bem conhecida e documentada, tanto nas especificações técnicas do fabricante quanto em estudos de calibração (Bakstein & Pajdla, 2002).
- Acessórios: tripé (para instalação do conjunto de câmera e lente hemisférica), nível de bolha (para nivelamento do conjunto de câmera e lente) e câmera digital convencional (para registro de informações auxiliares).



FIGURA 11. Conjunto de câmera fotográfica e lente grande angular, montado sobre tripé.

3.2.5. Receptores GPS

Foram utilizados receptores GPS de navegação Garmin modelo GPS MAP 76 S, para a coleta das coordenadas das estações meteorológicas e de outros pontos visitados para obtenção de fotografias hemisféricas na área de estudo. De acordo com as especificações técnicas do fabricante, o posicionamento com esse equipamento tem uma acurácia nominal de 15 m, valor que representa um erro de obtenção das coordenadas equivalente à metade da resolução espacial adotada no Modelo Digital de Elevação (ver item 3.3.1).

3.3. Metodologia

3.3.1. Estruturação da base topográfica

A estruturação da base topográfica teve como objetivo a obtenção de um Modelo Digital de Elevação contínuo para toda a área de estudo, o qual serviu de base para a análise das interferências do relevo sobre a radiação solar incidente na superfície. A

primeira etapa foi a interpolação de três Modelos Digitais de Elevação parciais, um cobrindo as quatro cartas adicionais da porção leste da área de estudo, outro para as quatro cartas adicionais da porção oeste e um terceiro para as duas cartas adicionais necessárias para cobrir o entorno da estação meteorológica de Vacaria, ao Norte. Nos três casos, manteve-se uma sobreposição de 4 km com as cartas adjacentes, a fim de evitar descontinuidades posteriormente.

O método de interpolação utilizado foi o mesmo empregado por Hasenack & Weber (2007) na geração do Modelo Digital de Elevação disponível para 20 cartas da área de estudo, com uma interpolação linear baseada em uma rede triangular irregular (TIN - *Triangulated Irregular Network*) e uma função parabólica para ajustar as quebras de relevo e eliminar os efeitos de “ponte” e de “túnel” (estimar a altitude do fundo dos vales e do topo de elevações). A resolução espacial também foi mantida com o valor idêntico àquele, com 30 m. A opção pela interpolação TIN leva em consideração as vantagens que esse tipo de modelo introduz na representação de áreas com relevo complexo (Medeiros & Câmara, 2001). Redes triangulares podem incorporar mais facilmente descontinuidades no terreno e são estruturas eficientes porque a densidade dos triângulos pode variar para se ajustar à complexidade do terreno (Moore *et al.*, 1991; Wilson & Gallant, 2000).

Após a interpolação, aplicou-se em cada Modelo Digital de Elevação parcial uma máscara, para eliminar *pixels* de sobreposição com cartas adjacentes, e realizou-se a concatenação com o Modelo Digital de Elevação existente. O produto final constituiu um Modelo Digital de Elevação contínuo para as 30 cartas previamente descritas (FIGURA 12 e FIGURA 13). Totalizando 5.709 colunas e 4.638 linhas, abrange um retângulo definido pelas coordenadas UTM do fuso 22 (Datum SAD69) entre 377.680 mE e 548.950 mE ao longo do eixo X e entre 6.735.960 mN e 6.875.100 mN ao longo do eixo Y.

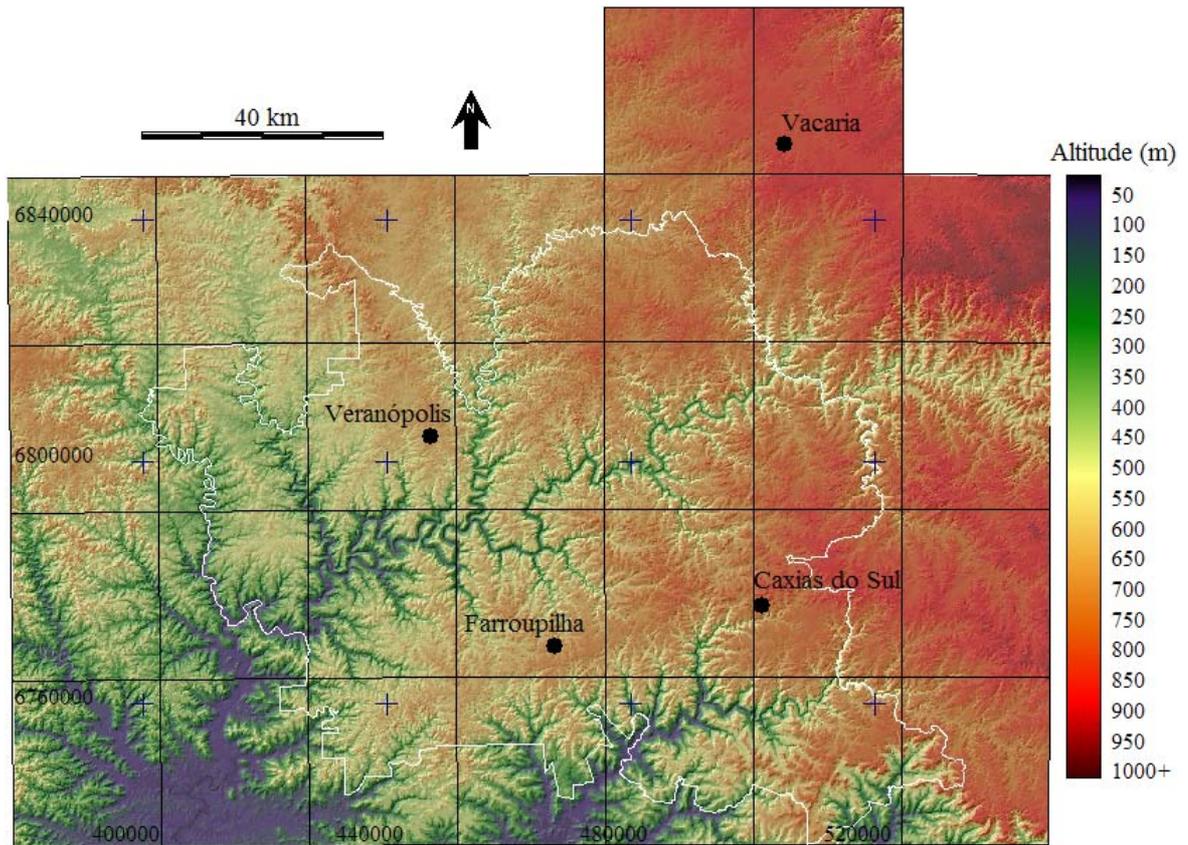


FIGURA 12. Modelo Digital de Elevação correspondente às 30 cartas da DSG e localização das quatro estações meteorológicas utilizadas (cruzetas = referências de coordenadas UTM; linhas pretas = articulação das cartas; linhas brancas = limites da zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha).

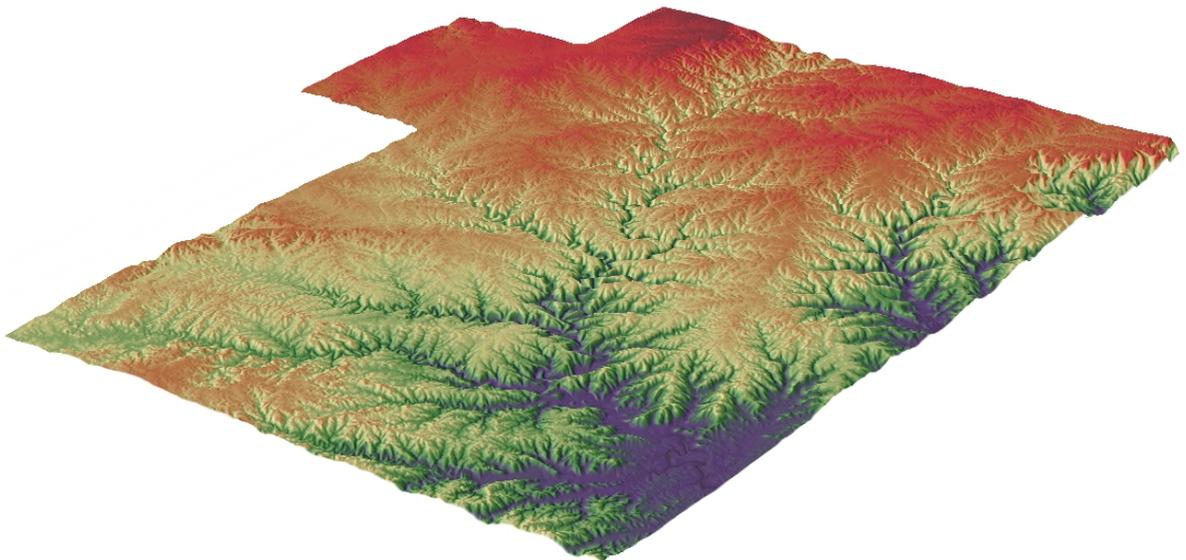


FIGURA 13. Visualização em perspectiva do Modelo Digital de Elevação contínuo correspondente às 30 cartas utilizadas, sentido sudoeste-nordeste.

A FIGURA 12 mostra que as altitudes no Modelo Digital de Elevação final apresentam uma amplitude de cerca de 1.000 m, com as áreas mais baixas situadas na

porção sudoeste e sul, respectivamente junto aos vales dos rios Taquari e Caí, e as áreas mais altas na porção nordeste, sobre a região fisiográfica dos Campos de Cima da Serra. Como pode ser melhor observado na FIGURA 13, as áreas mais acidentadas situam-se nas encostas, predominantemente entre 100 a 700 m de altitude.

A partir do Modelo Digital de Elevação foi realizado o cálculo da declividade e da orientação de cada *pixel*. Ambas as grandezas são determinadas através de uma janela móvel de 3×3 *pixels*, na qual a altitude do *pixel* central é comparada com as altitudes dos *pixels* ao seu redor. A matriz de declividades resultante ilustra o gradiente de mudança na altitude ao longo de uma certa distância, neste caso o tamanho de um *pixel*. A imagem de orientação ilustra a direção predominante para a qual a declividade da superfície aponta, expressa em graus, no sentido horário a partir do norte, de 0 a 360 (Chrysoulakis *et al.*, 2004; Peckham & Jordan, 2007).

3.3.2. Estimativa da radiação solar incidente

O algoritmo para estimar a radiação solar em diferentes superfícies no *Solar Analyst* adota como ponto de partida o fluxo de radiação solar incidente em uma superfície plana, perpendicular à direção dos raios solares, situada à distância média entre a Terra e o Sol e sem o efeito da atmosfera, conhecida como constante solar. A partir da radiação incidente no topo da atmosfera, considerando a latitude do local (ϕ), a declinação solar (δ) e o ângulo zenital do Sol (θ), uma série de operações procura computar a atenuação causada pela atmosfera e o efeito do relevo sobre a radiação solar que chega à superfície.

A atenuação atmosférica é representada por parâmetros que precisam ser estimados como um valor médio para a área de estudo em cada período, enquanto o efeito do relevo é computado de acordo com as características topográficas de cada local. Todo o cálculo se baseia em um Modelo Digital de Elevação e é efetuado *pixel a pixel*, iniciando no canto superior esquerdo e avançando ao longo das colunas e das linhas, similar ao processo de

uma janela móvel. A metodologia utilizada na estimativa dos parâmetros atmosféricos e no cálculo da radiação incidente é detalhada a seguir.

3.3.2.1. Propriedades ópticas da atmosfera

Os parâmetros necessários para caracterizar as propriedades ópticas da atmosfera no algoritmo utilizado são a porção da radiação solar global incidente na superfície que é constituída por radiação difusa, chamada de fração difusa (K_d), e a transmitância da atmosfera à radiação direta (τ_{dir}).

Segundo Pereira *et al.* (2006), esses parâmetros podem ser estimados por meio de modelos físicos ou através de relações empíricas. Os primeiros tentam resolver equações de transferência radiativa para descrever matematicamente os processos físicos que ocorrem na atmosfera, mas os dados necessários são de obtenção mais difícil, como a cobertura de nuvens e o perfil dos constituintes atmosféricos (aerossóis, vapor d'água, ozônio e outros gases atmosféricos). As relações empíricas, embora não descrevam os processos físicos, usam variáveis registradas comumente em estações meteorológicas, como a precipitação pluviométrica, umidade relativa e a duração do brilho solar, entre outros (Souza & Silva, 2005; Trnka *et al.*, 2005; Matsuda *et al.*, 2006).

Em função da indisponibilidade de dados para alimentar modelos mais complexos, os dois parâmetros foram estimados por meio de relações empíricas. Como não há registros de longo prazo de radiação difusa e inexistem relações para estimar a fração difusa ajustadas para a região, foram utilizadas relações empíricas encontradas na literatura. Tanto a fração difusa quanto a transmitância direta foram estimadas como um valor médio para toda a área de estudo, em cada decêndio, a partir da média dos dados decendiais de radiação solar global das quatro estações meteorológicas descritas no item 3.2.1.

3.3.2.1.1 Estimativa da fração difusa

A fração difusa (K_d) é definida como a porção da radiação solar global incidente na superfície em um plano horizontal que é constituída por radiação difusa (equação 3). Os

valores teóricos para a fração difusa variam de 0 a 1, sendo que valores típicos para condições de céu claro oscilam entre 0,2 e 0,3 e para condições de céu muito nublado situam-se em torno de 0,7 (Fu & Rich, 2000).

$$Kd = \frac{Rdif}{Rg} \quad (3)$$

Sendo:

Rdif: radiação solar difusa incidente na superfície, em um plano horizontal

Rg: radiação solar global incidente na superfície, em um plano horizontal

Liu & Jordan (1960), em um trabalho pioneiro, demonstraram haver uma relação entre a razão da radiação difusa na superfície terrestre e no topo da atmosfera e a razão da radiação global na superfície terrestre e no topo da atmosfera, para diversas partições temporais: horária, diária e mensal. A partir de 1960, diversos autores confirmaram a validade do modelo proposto, mas constataram que as correlações encontradas não poderiam ser extrapoladas para regiões de grande extensão, devido à variabilidade nas condições da atmosfera e devido à latitude (Recieri *et al.*, 2002; Recieri *et al.*, 2004).

Em função da limitação geográfica, ao longo do tempo vários modelos foram propostos para diferentes locais, sendo que alguns se tornaram trabalhos de referência. Nesta categoria encontram-se os trabalhos de Ruth & Chant (1976), no Canadá, Collares-Pereira & Rabl (1979) e Erbs *et al.* (1982), nos Estados Unidos, entre outros. No Brasil, os estudos com estimativa de radiação difusa são mais recentes e em menor número, provavelmente devido ao número reduzido de instrumentos que registram este componente. Entre os exemplos estão os trabalhos de Lima *et al.* (1995) e Souza & Alves (1997), em Minas Gerais; Ricieri *et al.* (1996), Gomes & Escobedo (2002) e Escobedo *et al.* (2007), em São Paulo, Recieri *et al.* (2004), no Paraná, Guedes *et al.* (2006), no Rio Grande do Sul, entre outros.

Atualmente existe uma quantidade relativamente grande de relações desenvolvidas para estimar a fração difusa a partir de outras variáveis mais facilmente medidas. A maior parte dos modelos empíricos relaciona a fração difusa com a razão entre a radiação solar global incidente na superfície (R_g) e a radiação solar no topo da atmosfera (R_a), também denominado de índice de claridade (K_t) (equação 4). Este, convém ressaltar, também é a base da equação de Ångström para estimar a radiação global.

$$K_t = \frac{R_g}{R_a} \quad (4)$$

A maioria das relações é ajustada para partições temporais utilizando períodos horários, diários ou mensais, dependendo do objetivo e da área de aplicação. Assim, ao utilizar uma determinada relação para aplicações práticas é importante observar a partição temporal para a qual ela foi ajustada a fim de prevenir seu uso inadequado. Nesse sentido, UO Solar Monitoring Lab (1999) avaliou correlações ajustadas para partição de 1, 5, 10, 15 e 30 dias em sete locais com diferentes climas nos Estados Unidos. Somente a partição diária apresentou diferença significativa das demais, sugerindo que uma relação ajustada com dados diários não deve ser empregada para estimar a fração difusa em períodos maiores. Em contrapartida, relações ajustadas para dados médios de vários dias podem ser usadas em intervalos diferentes, preferencialmente de cinco dias ou mais.

Com base nesses resultados, o cálculo da fração difusa a partir de K_t foi efetuado com relações ajustadas para períodos de vários dias, optando-se pela relação de Erbs *et al.* (1982), ajustada para partição mensal (equação 5) e já testada em áreas de relevo complexo (Olyphant, 1984; Kang *et al.*, 2002), e pela relação de UO Solar Monitoring Lab (1999) (equação 6), uma das raras relações ajustadas para partição decenal.

$$K_d = 1,317 - 3,023K_t + 3,372K_t^2 - 1,769K_t^3 \quad (\text{para } K_t \text{ entre } 0,3 \text{ e } 0,8) \quad (5)$$

$$Kd = 1,118 - 1,358Kt \quad (6)$$

Além das relações acima, também foi utilizado o coeficiente linear (a) da equação de Ångström ajustado por Conceição & Mandelli (2006) para dados de radiação solar global média mensal no município de Bento Gonçalves, situado aproximadamente no centro da zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha. Como o coeficiente linear corresponde à transmitância difusa, Kd foi calculado multiplicando-se o coeficiente linear pela irradiação solar no topo da atmosfera e dividindo-se o resultado pela radiação solar global média decendial registrada nas quatro estações, de acordo com a equação (7).

$$Kd = \frac{Ra \times a}{Rg} \quad (7)$$

O cálculo da densidade de fluxo de radiação solar global incidente em uma superfície horizontal paralela à superfície do solo no topo da atmosfera (Ra) foi efetuado para partição diária, utilizando-se a expressão de Iqbal (1983) (equações (8) a (11)). Os resultados diários obtidos foram depois totalizados para períodos decendiais. Para possibilitar o cálculo de Kd , os valores decendiais de Ra e de Rg foram convertidos para as mesmas unidades ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$).

$$Ra = \frac{S}{\pi} \left[\frac{\bar{d}}{d} \right]^2 \left[H \left(\frac{\pi}{180} \right) \text{sen } \varphi \text{sen } \delta + \cos \varphi \text{sen } \delta \text{sen } H \right] \quad (8)$$

$$\left[\frac{\bar{d}}{d} \right]^2 = 1 + 0,034 \left(\frac{360D}{365,25} \right) \quad (9)$$

$$H = \arccos(-\text{tg } \varphi \text{tg } \delta) \quad (10)$$

$$\delta = 3,931 + 23,2577 \cos(0,961D - 170,7) + 0,3906 \cos(1,9154D - 174,4) \quad (11)$$

Sendo:

S: constante solar ($2.880 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, ou $118,1 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1} = 1.367 \text{ W.m}^{-2}$)

\bar{d} : distância média entre a Terra e o Sol (km)

d : distância entre o Sol e a Terra na época considerada (km)

H : ângulo horário no momento do nascer astronômico do Sol (graus) (equação 10)

φ : latitude do local (graus)

δ : declinação do Sol (graus)

D : dia juliano

3.3.2.1.2 Transmitância da atmosfera à radiação direta

A transmitância direta (τ_{dir}) é expressa como a porção da radiação incidente em uma superfície horizontal paralela à superfície do solo no topo da atmosfera que é transmitida na forma de radiação direta. Os valores teóricos variam de 0 (atmosfera opaca) a 1 (atmosfera totalmente transparente), sendo que valores típicos para condições normais de céu claro situam-se em torno de 0,5 e para céu muito claro oscilam entre 0,6 e 0,7 (Fu & Rich, 2000). Uma vez dispondo-se das estimativas de K_d , obtidas com as equações 5 a 7, τ_{dir} foi calculada por diferença (Batlles *et al.*, 2008; Ruiz-Arias *et al.*, 2009), conforme a equação 12.

$$\tau_{dir} = \frac{(1 - K_d) \times R_g}{R_a} \quad (12)$$

A fim de ser usada como dado de entrada, a transmitância direta precisou ser corrigida para o menor caminho atmosférico, ou seja, para a direção do zênite. A posição do Sol em um determinado instante pode ser definida pelos seus ângulos de elevação e de azimute. O primeiro representa a altura angular do Sol em relação a um plano horizontal local, e seu complemento para o zênite corresponde ao ângulo zenital do Sol. O ângulo de elevação solar e, conseqüentemente o ângulo zenital, variam continuamente, tanto ao longo do dia quanto sazonalmente. Quando os dados compreendem um determinado período, a correção da transmitância direta para o zênite pode ser feita utilizando-se o ângulo zenital médio do período, conforme a equação 13.

$$\tau_{dir(\theta)} = \frac{\tau_{dir}}{\cos \theta\mu} \quad (13)$$

Sendo:

$\tau_{dir(\theta)}$: transmitância direta corrigida para o menor caminho atmosférico

$\theta\mu$: ângulo zenital médio do Sol no período

Entretanto, Gardner & Nadeau (1991), estudando o potencial fotovoltaico no Ártico do Canadá, constataram que quando o Sol encontra-se próximo do horizonte a relação entre as condições da atmosfera e Kt torna-se altamente dependente da elevação solar. Os autores concluíram que, em latitudes elevadas, para um mesmo valor de Kt , a contribuição da radiação difusa sobre a radiação global é maior em ângulos baixos que em ângulos de elevação mais altos. Segundo os autores, a quebra da relação entre Kd e Kt ocorre em ângulos de elevação em torno de 8° a 10°, limite abaixo do qual Kd tende a aumentar progressivamente até o Sol atingir o horizonte, situação em que toda a radiação incidente na superfície é difusa.

Como consequência, para ângulos muito baixos de elevação solar o cálculo da radiação direta a partir de estimativas de Kd baseadas em Kt tende a resultar em valores superestimados, que podem resultar exagerados quando corrigidos para o ângulo zenital. Na latitude média da área de estudo (29° S), em uma superfície plana horizontal, ângulos de elevação solar inferiores a 10° ocorrem durante cerca de 10% do comprimento do dia no solstício de verão e durante 20% do comprimento do dia no solstício de inverno, quando a declinação solar atinge o seu valor máximo.

Tendo em vista essas diferenças, calculou-se dois valores de ângulo zenital médio, um incluindo todos os ângulos zenitais ($\theta\mu$) e outro levando em conta apenas aqueles inferiores a 80° ($\theta\mu < 80^\circ$), que correspondem a elevações do Sol superiores a 10°. Em ambos os casos o cálculo foi feito para o dia central de cada decêndio, com base na

variação da posição do Sol ao longo do dia na latitude média da área de estudo (29°S), usando intervalos de 15 min da alvorada ao ocaso. Em cada intervalo, o ângulo zenital (θ) foi determinado a partir do ângulo de elevação solar disponibilizado na *homepage* do Departamento de Astronomia do Instituto de Física da UFRGS.

A FIGURA 14 mostra o ângulo zenital médio do Sol na latitude de 29°S calculado pelos dois métodos, bem como o respectivo cosseno, cuja diferença relativa chega a 17,5% no inverno e a 8,4% no verão. Como na latitude média da área de estudo a ocorrência de ângulos de elevação baixos predomina apenas no período de outono-inverno, a correção da transmitância direta para o zênite foi efetuada de três formas. A primeira usou o cosseno do ângulo zenital médio (θ_{μ}), a segunda o cosseno do ângulo zenital médio considerando somente os valores de θ inferiores a 80° ($\theta_{\mu} < 80^{\circ}$), como sugerido por Gardner & Nadeau (1991), e a terceira usou o cosseno do ângulo zenital médio no período de primavera-verão e o cosseno dos ângulos inferiores a 80° no período de outono-inverno ($\theta_{\mu} < 80^{\circ} \varepsilon$).

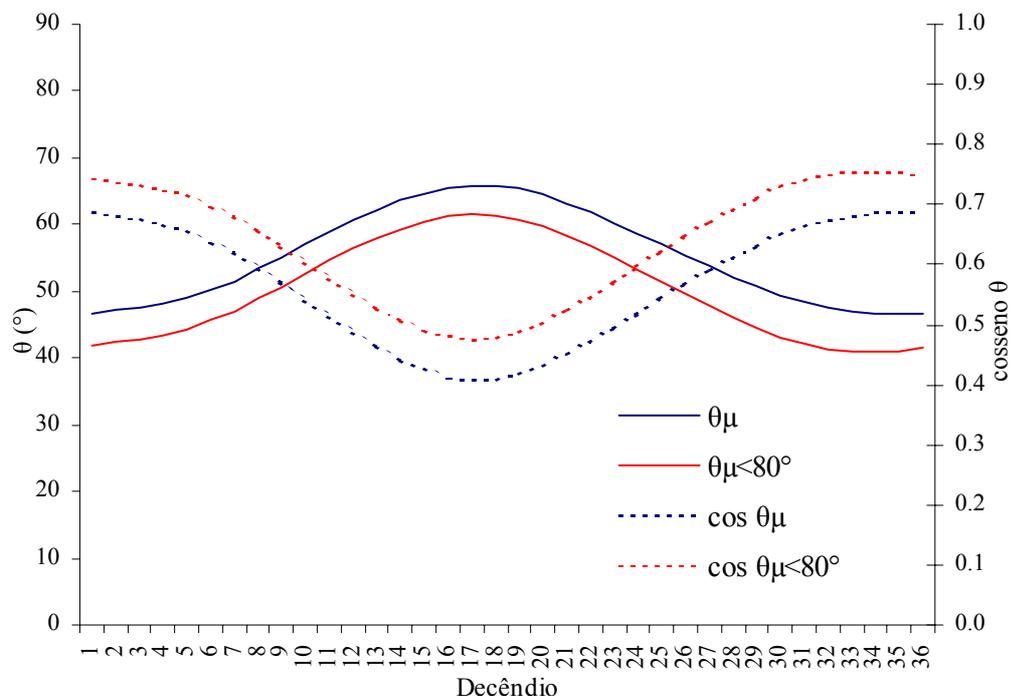


FIGURA 14. Ângulo zenital médio para a latitude de 29°S , calculado para o dia central do decêndio com intervalos de 15 min (θ_{μ} = média de todos os ângulos zenitais, $\theta_{\mu} < 80^{\circ}$ = média dos ângulos zenitais inferiores a 80°) e respectivo cosseno.

3.3.2.2. Obstrução do horizonte

O efeito do relevo sobre a interceptação da radiação solar incidente na superfície é computado com base em um Modelo Digital de Elevação, *pixel a pixel*. O cálculo considera todos os componentes angulares detalhados na FIGURA 3, além da obstrução do horizonte causada por elevações existentes no entorno de um determinado local. Os componentes angulares dependem do período do ano, da hora do dia e das características topográficas do local em análise, notadamente a declividade e a orientação da superfície. A obstrução do horizonte, entretanto, necessita avaliar adicionalmente as características topográficas da vizinhança do local em questão. A obstrução do horizonte afeta de forma distinta as porções direta e difusa da radiação global incidente, determinando, respectivamente, o tempo máximo possível de incidência de radiação direta e a porção da abóbada celeste que efetivamente pode contribuir com radiação difusa.

A determinação da obstrução do horizonte no algoritmo *Solar Analyst* se baseia no cálculo de um diagrama com a distribuição angular das obstruções do céu, similar à representação da abóbada celeste em uma fotografia hemisférica obtida com lente “olho de peixe”. A construção do diagrama de obstrução é feita para cada *pixel* do Modelo Digital de Elevação, partindo de um conjunto pré-determinado de direções. O número de direções influi na qualidade do diagrama e afeta sensivelmente o tempo total de processamento, uma vez que o cálculo é aplicado a todos os *pixels* do Modelo Digital de Elevação, sendo repetido tantas vezes quantos forem os períodos desejados.

Segundo Fu & Rich (2000), geralmente oito direções são suficientes para produzir diagramas de obstrução de qualidade satisfatória, podendo-se aumentar esse número conforme a complexidade da topografia, o tamanho da área e a demanda de processamento. Foram utilizadas 32 direções, número recomendado pelos autores para regiões de topografia complexa, o que equivale a uma medida de ângulo do horizonte a cada 11,25° no sentido horário a partir do Norte (FIGURA 15).

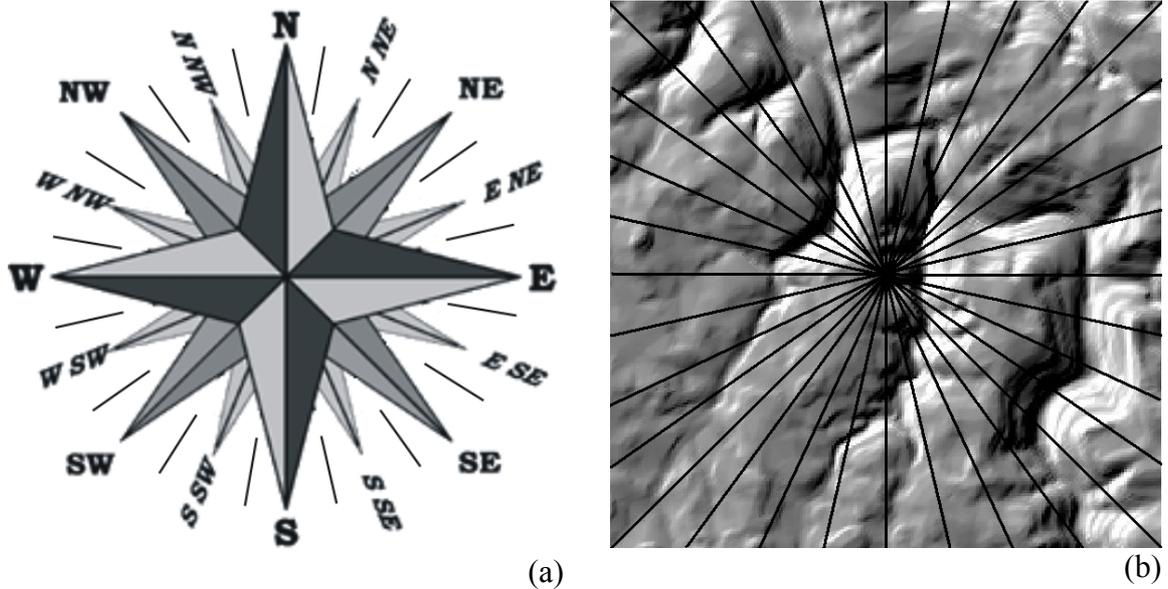


FIGURA 15. Representação das 32 direções utilizadas para o cálculo do ângulo do horizonte efetivo de um ponto: (a) na rosa dos ventos; (b) em um *pixel* no Modelo Digital de Elevação.

Uma vez definido o número de direções, o passo seguinte é o cálculo do ângulo máximo de obstrução do céu ao longo de cada uma (FIGURA 16), também chamado de ângulo do horizonte efetivo. Ele é determinado a partir da diferença entre a altitude do *pixel* em análise e a altitude de cada *pixel* existente ao longo da direção em questão, dividida pela distância horizontal que os separa. O resultado corresponde à tangente do ângulo do horizonte para o *pixel* em análise. O maior ângulo encontrado ao longo de uma determinada direção representa o horizonte efetivo.

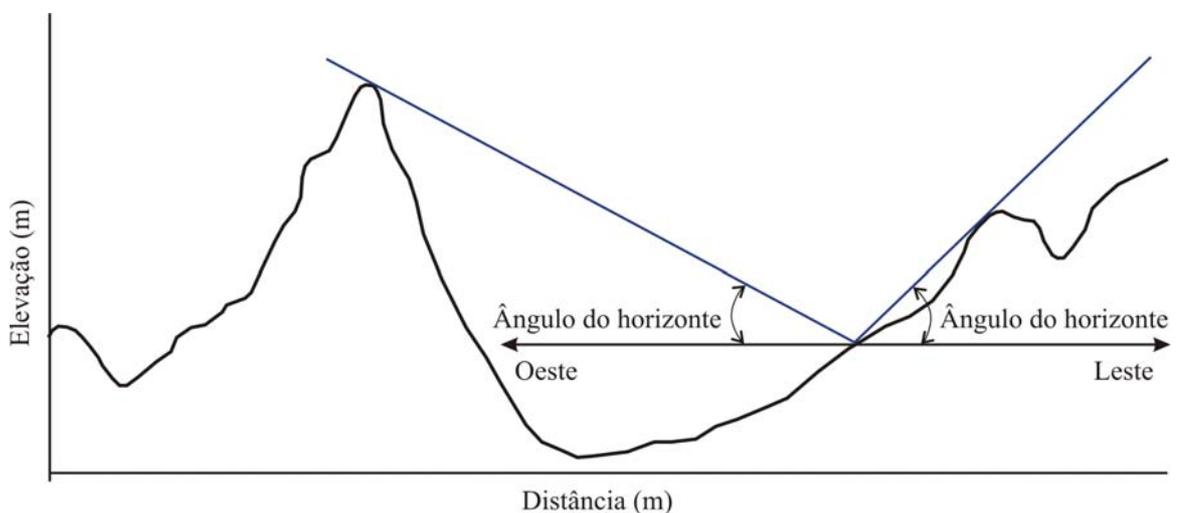


FIGURA 16. Esquema do cálculo do ângulo do horizonte de um ponto (Fu & Rich, 2000).

Para as direções não contempladas, os ângulos do horizonte são estimados através de uma interpolação linear entre os valores correspondentes às direções cujo ângulo foi efetivamente calculado (FIGURA 17). Os ângulos do horizonte calculados e estimados permitem descrever geometricamente a obstrução da abóbada celeste sobre o ponto em análise, através de um sistema de coordenadas hemisféricas baseado nos ângulos zenital e azimutal (FIGURA 18).

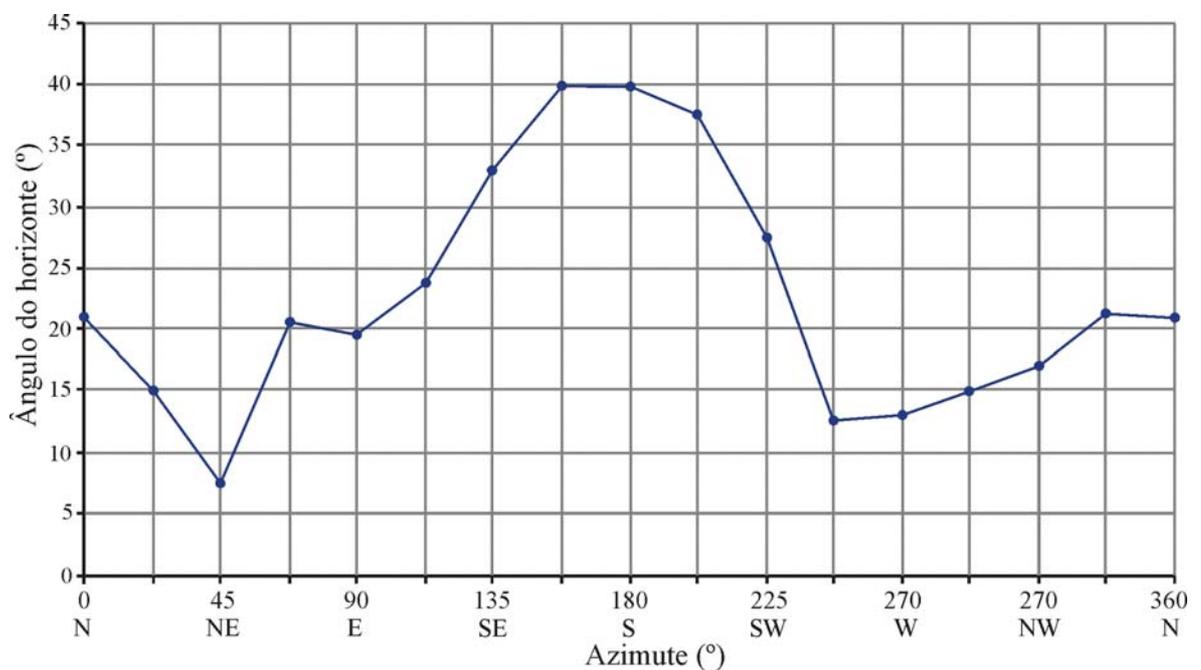


FIGURA 17. Interpolação dos ângulos do horizonte para as demais direções a partir dos ângulos calculados nas direções especificadas (Fu & Rich, 2000).

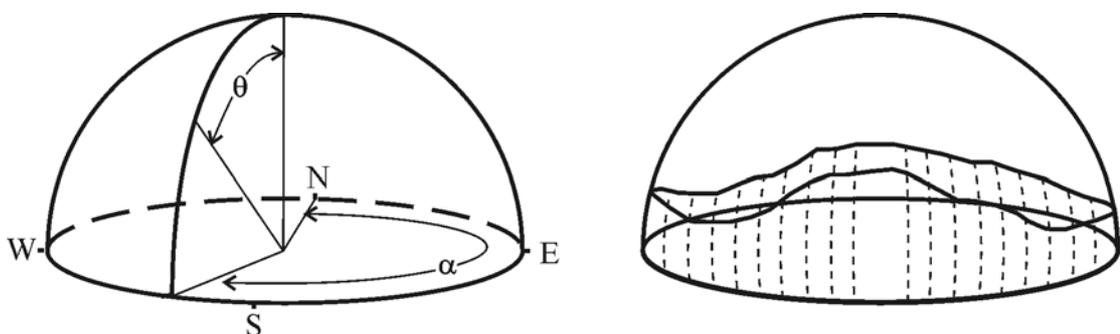


FIGURA 18. Representação da obstrução do horizonte através de coordenadas hemisféricas (Fu & Rich, 2000; Gál *et al.*, 2009).

Uma projeção hemisférica equiangular é então aplicada para representar a obstrução da abóbada celeste na forma de uma grade bidimensional, com igual número de colunas e de linhas. Sendo uma representação plana da abóbada acima de um ponto, distâncias medidas nessa grade, assim como em uma fotografia hemisférica, correspondem a ângulos, não a distâncias reais. O componente radial da distância medida na grade é proporcional ao ângulo zenital, e a distância medida sobre um arco ao longo de um raio fixo é proporcional ao ângulo azimutal (Rich *et al.*, 1999; Frazer *et al.*, 1999).

A cada célula dessa grade é atribuído um valor que corresponde à identificação das direções visíveis e das direções obstruídas. A localização de uma célula, definida pela sua linha e sua coluna, corresponde a uma posição no hemisfério celeste definida por um ângulo zenital (ou de elevação) e por um ângulo azimutal. Segundo Fu & Rich (2000), uma grade de 512 colunas e linhas é suficiente para quantificar a obstrução com qualidade satisfatória. Neste estudo foi utilizada uma grade de 800 colunas e 800 linhas, totalizando 640.000 células, o que permitiu representar adequadamente as direções do céu de onde provém radiação direta e radiação difusa e simultaneamente possibilitou a realização dos cálculos para estimar a radiação solar incidente em tempo hábil.

A FIGURA 19 mostra o esquema de um diagrama de obstrução calculado para um ponto na área de estudo, a partir do Modelo Digital de Elevação. O centro do diagrama corresponde ao zênite sobre o ponto em questão, os círculos concêntricos representam intervalos dos ângulos de elevação acima do horizonte (complemento do ângulo zenital) e os valores em torno do diagrama representam intervalos de ângulos azimutais. A superfície em cinza no diagrama corresponde às direções obstruídas pelo horizonte real em torno do ponto, enquanto a superfície em branco corresponde às direções da abóbada celeste que são visíveis e, portanto, podem contribuir com radiação difusa e direta.

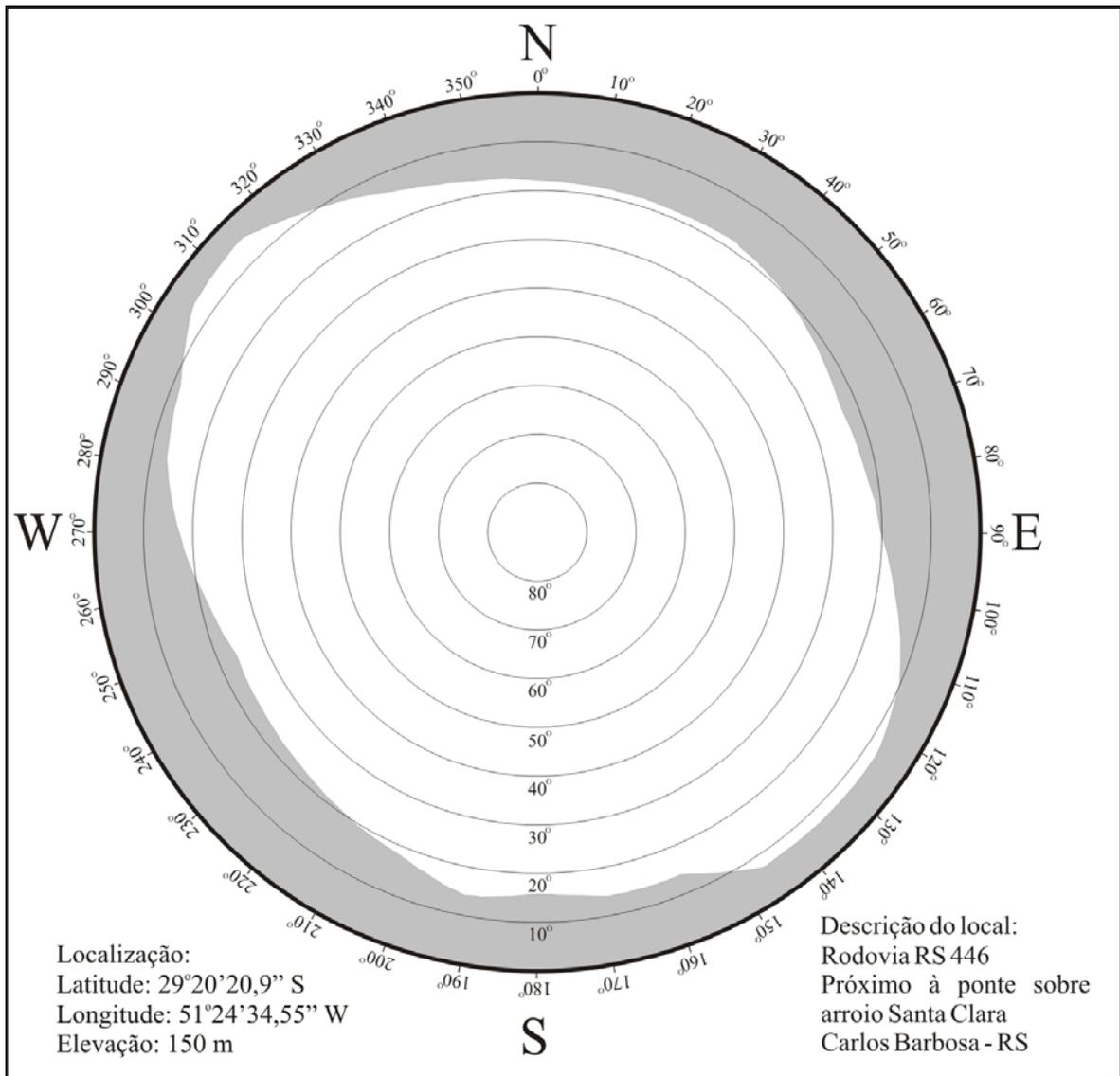


FIGURA 19. Diagrama de obstrução calculado para um ponto na área de estudo.

3.3.2.3. Cálculo da radiação solar direta

A radiação solar direta é computada no algoritmo *Solar Analyst* considerando as direções do céu a partir das quais ela pode incidir na superfície, definidas pelo percurso do Sol ao longo de um determinado período. A radiação direta originária de cada direção do céu é calculada com base em um mapa do percurso do Sol, que descreve as trajetórias do Sol, ou seja, a posição aparente do Sol variando através do tempo. A posição do Sol, definida pelos seus ângulos zenital e azimutal, é calculada com base na latitude, no dia do ano e na hora do dia, usando fórmulas astronômicas padrão (Gates, 1980; Fu & Rich, 2000). As trajetórias do Sol são representadas por setores do céu discretos, definidos pela

posição do Sol a determinados intervalos de tempo ao longo do dia e ao longo do ano. Os setores do percurso do Sol são então projetados sobre grades bidimensionais utilizando a mesma projeção hemisférica e a mesma resolução do diagrama de obstrução (ver item 3.3.2.2).

O cálculo do percurso do Sol foi realizado considerando-se a latitude média da área de estudo, correspondente a 29° S. Os intervalos de tempo utilizados para descrever a variação da trajetória do Sol ao longo do ano foram de 10 dias, partição temporal coincidente com os registros de radiação solar global das estações meteorológicas. Para descrever a variação na posição do Sol ao longo do dia foram utilizados intervalos de 30 min, partição temporal abaixo da qual raramente são verificadas diferenças significativas nas estimativas de radiação, segundo Kumar *et al.* (1997).

A FIGURA 20 mostra um esquema do mapa de percurso do Sol calculado para a latitude de 29° S. Com o propósito de facilitar a visualização da trajetória do Sol nesse esquema, a variação do percurso ao longo do ano está representada em períodos mensais apenas no período compreendido entre o solstício de verão e o solstício de inverno. As linhas curvas horizontais no mapa de percurso do Sol da FIGURA 20 representam a trajetória do Sol ao longo do dia para as datas especificadas. As linhas curvas verticais, por outro lado, correspondem aos intervalos de 30 min utilizados para descrever a variação na posição do Sol ao longo do dia.

A intersecção entre as linhas da trajetória do Sol ao longo do dia e as linhas dos intervalos de tempo ao longo do dia forma setores discretos, cujos centróides definem a posição do Sol em termos de ângulo zenital e de ângulo azimutal. Assim como no diagrama de obstrução anteriormente descrito, o centro do mapa de percurso do Sol corresponde ao zênite, os círculos concêntricos representam intervalos dos ângulos de elevação do Sol acima do horizonte e os valores em torno do esquema representam intervalos de ângulos azimutais do Sol.

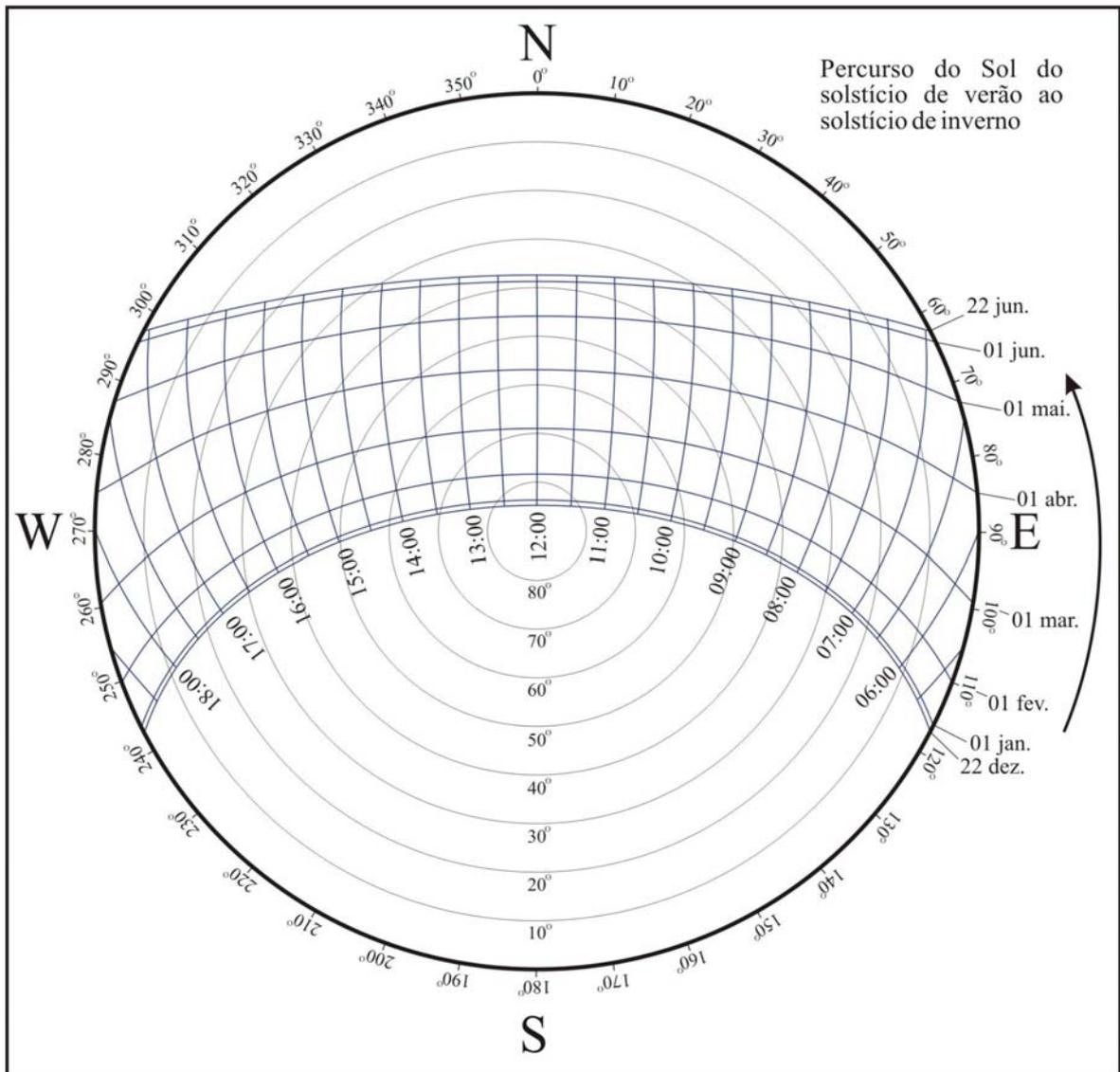


FIGURA 20. Percurso do Sol calculado para a latitude de 29° S, do solstício de verão ao solstício de inverno.

Uma vez definido o mapa de percurso do Sol, a sobreposição ao diagrama de obstrução de um determinado local permite excluir os setores obstruídos e calcular o tempo de permanência do Sol nos setores não obstruídos, a partir do ângulo azimutal e do ângulo zenital que definem sua posição. Esse cálculo também é feito para setores parciais, considerando apenas a porção do setor situada acima do horizonte efetivo. A FIGURA 21 ilustra a sobreposição do diagrama de obstrução de um ponto na área de estudo ao percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno. Os setores do percurso do Sol que coincidem com a superfície cinza correspondem a direções obstruídas, enquanto os que

coincidem com a superfície branca correspondem a direções visíveis, que efetivamente podem contribuir com radiação direta para o local em análise.

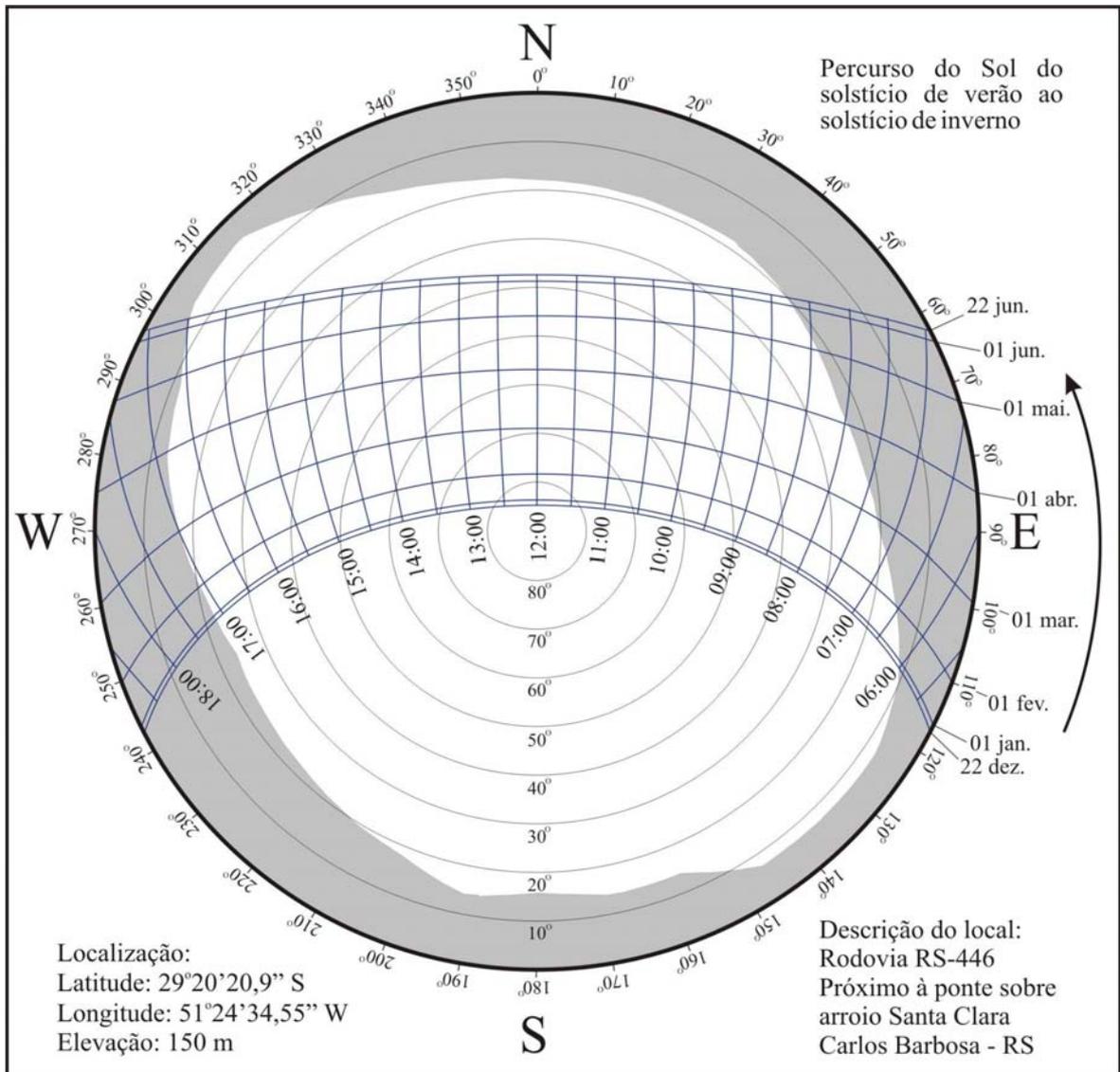


FIGURA 21. Sobreposição do diagrama de obstrução de um ponto na área de estudo ao percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno.

A radiação solar direta incidente na superfície é calculada para cada setor do percurso do Sol não obstruído pelo horizonte, levando em conta a posição do Sol no centróide do setor, a atenuação atmosférica e a orientação e a inclinação da superfície. A atenuação atmosférica é estimada por meio de um modelo de transmissão simples, iniciando com o valor da constante solar e então quantificando os efeitos da atmosfera com base na transmitância à radiação direta (previamente estimada, de acordo com a

metodologia descrita no item 3.3.2.1.2) e na espessura da massa de ar (Gates, 1980; Rich, 1990; Fu & Rich, 2000; Tsubo & Walker, 2005). A orientação e a inclinação da superfície foram computadas previamente para todo o Modelo Digital de Elevação, conforme descrito no item 3.3.1, e os respectivos planos de informação usados como dados de entrada.

Assim, a radiação direta incidente na superfície a partir da direção de um setor do percurso do Sol $Rdir_{\theta,\alpha}$, com um centróide no ângulo zenital θ e no ângulo azimutal α , é calculada conforme a equação 14.

$$Rdir_{\theta,\alpha} = S \times (\tau_{dir(\theta)})^{m(\theta)} \times SunDur_{\theta,\alpha} \times SunGap_{\theta,\alpha} \times \cos AngIn_{\theta,\alpha} \quad (14)$$

Sendo:

S : constante solar (1.367 W.m^{-2})

$\tau_{dir(\theta)}$: transmitância da atmosfera à radiação direta (média para todos os comprimentos de onda) ao longo do caminho mais curto (na direção do zênite)

$m(\theta)$: caminho óptico relativo, expresso como uma porção em relação ao comprimento do caminho óptico no zênite (equação 15)

$SunDur_{\theta,\alpha}$: Tempo de incidência da radiação direta oriunda de um setor do percurso do Sol

$SunGap_{\theta,\alpha}$: fração aberta do céu para o setor do percurso do Sol (proporção do setor não obstruída)

$AngIn_{\theta,\alpha}$: ângulo de incidência entre o centróide do setor do percurso do Sol e o eixo normal à superfície (graus) (equação 16)

O caminho óptico relativo é calculado a partir do ângulo zenital do Sol e da altitude da superfície, conforme a equação 15.

$$m(\theta) = \frac{EXP(-0,000118 \times Elev - 1,638 \times 10^{-9} \times Elev^2)}{\cos \theta} \quad (15)$$

Sendo:

θ : ângulo zenital do Sol (graus)

$Elev$: altitude (m)

O ângulo de incidência entre um dado setor do percurso do Sol, com o centróide no ângulo zenital θ e no ângulo azimutal α , e o eixo normal à superfície é calculado conforme a equação 16.

$$AngIn_{\theta,\alpha} = \arccos[\cos \theta \times \cos G_z + \sin \theta \times \sin G_z \times \cos(\alpha - G_a)] \quad (16)$$

Sendo:

G_z : ângulo zenital da superfície (graus) (derivado do arquivo *raster* de declividade, previamente calculado a partir do Modelo Digital de Elevação)

G_a : ângulo azimutal da superfície (graus) (arquivo *raster* de orientação, previamente calculado a partir do Modelo Digital de Elevação)

Uma vez calculada a radiação direta oriunda de cada setor do percurso do Sol, a radiação direta total é computada como a soma da radiação direta de todos os setores individuais, conforme a equação 17.

$$Rdir_{tot} = \sum Rdir_{\theta,\alpha} \quad (17)$$

3.3.2.4. Cálculo da radiação solar difusa

Diferente da radiação direta, a radiação solar difusa pode ser originária de qualquer direção do hemisfério celeste. Portanto, o montante de radiação difusa incidente na superfície depende da porção da abóbada celeste que efetivamente contribui para tal, também chamada de fração aberta do céu. A radiação solar difusa originária da fração aberta do céu é calculada a partir de um mapa de setores do céu, que divide a abóbada celeste em um conjunto finito de setores definidos por intervalos de ângulo azimutal e de ângulo zenital.

Os setores do céu precisam ser suficientemente pequenos para que os ângulos zenital e azimutal dos respectivos centróides representem adequadamente a direção do setor do céu nos cálculos subsequentes. Segundo Fu & Rich (2000), uma divisão de oito

intervalos de zênite e de azimute é suficiente para uma caracterização satisfatória da fração aberta do céu para o cálculo de radiação difusa. Para racionalizar o tempo de processamento, foram utilizados 32 intervalos igualmente espaçados de ângulo zenital, cada um estendendo-se por $2,81^\circ$, e 32 intervalos de ângulo azimutal, cada um estendendo-se por $11,25^\circ$, totalizando 1.024 setores do céu (FIGURA 22).

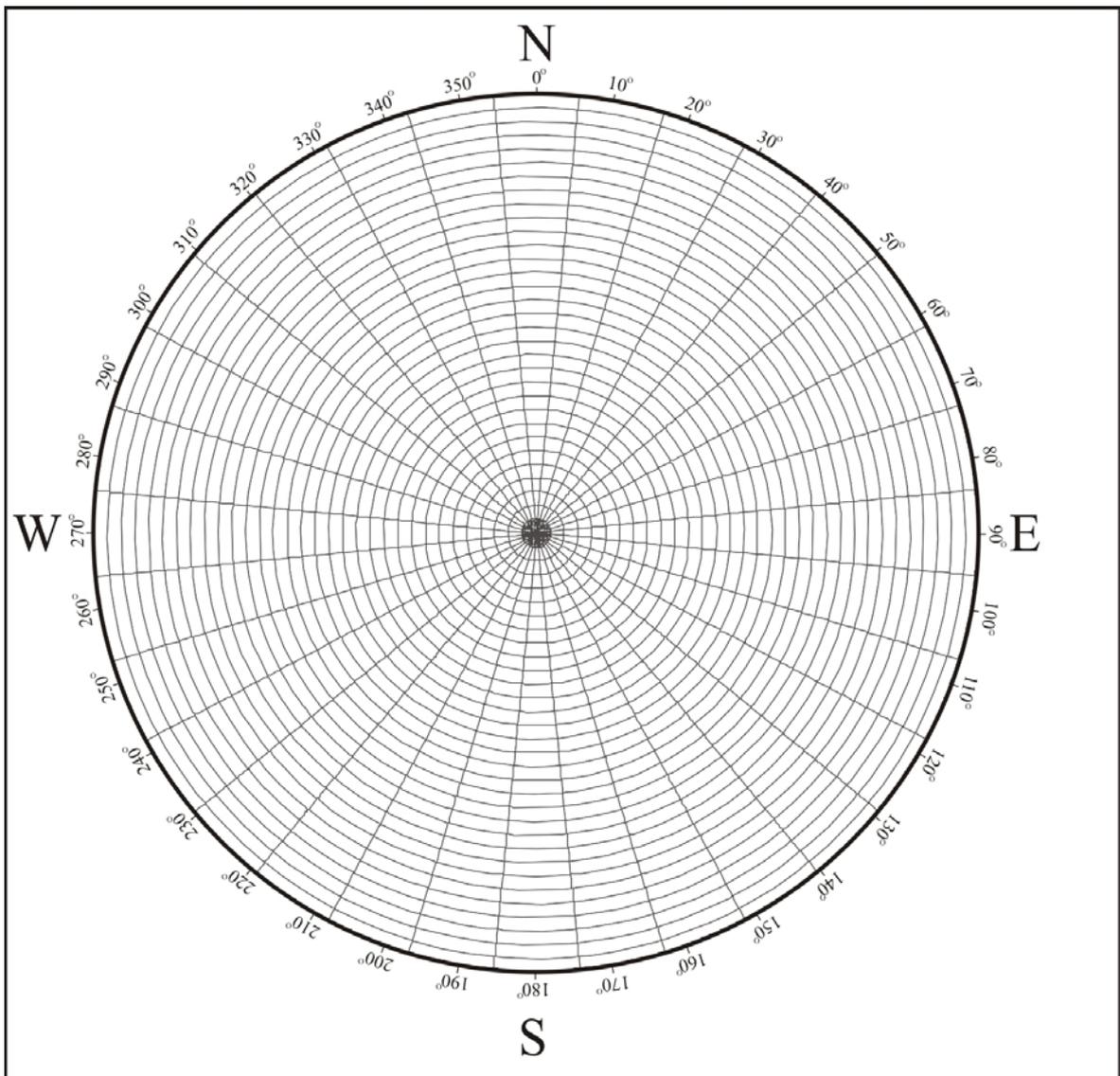


FIGURA 22. Mapa de setores do céu, gerado a partir de 32 divisões zenitais e 32 divisões azimutais.

Cada setor do céu recebe um número de identificação único e seu centróide define a respectiva posição em termos de ângulo zenital e ângulo azimutal. Assim como no percurso do Sol, os setores do céu são projetados sobre grades bidimensionais utilizando a

mesma projeção hemisférica e a mesma resolução do diagrama de obstrução (512 colunas e 512 linhas). Assim como no caso da radiação direta, a sobreposição do diagrama de obstrução ao mapa de setores do céu (FIGURA 23) permite identificar os setores não obstruídos, que efetivamente contribuem com radiação difusa para o local em questão.

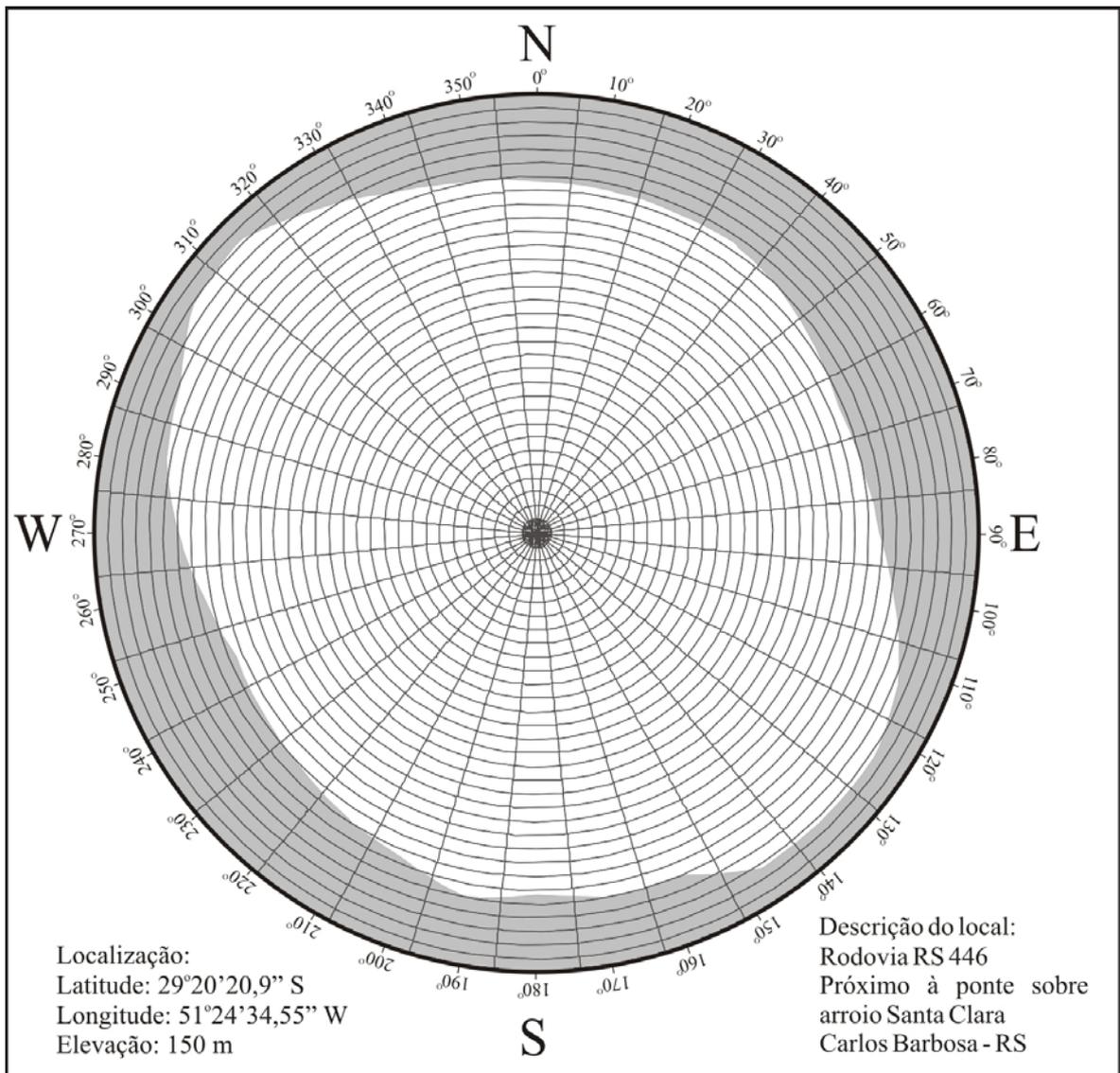


FIGURA 23. Sobreposição do diagrama de obstrução de um ponto na área de estudo ao mapa de setores do céu.

A fração aberta do céu é calculada através da divisão do número de células não obstruídas pelo número total de células da grade, incluindo também setores parciais, onde é considerada a apenas proporção do setor que é visível acima do horizonte efetivo.

O cálculo da radiação difusa foi realizado com um modelo difuso uniforme, onde a radiação difusa é considerada como sendo oriunda igualmente de todas as direções do céu. A radiação difusa incidente na superfície é calculada para cada setor do céu não obstruído pelo horizonte, levando em conta a posição do respectivo centróide, integrada para o intervalo de tempo considerado e corrigida pela fração aberta do céu e pelo ângulo de incidência. Assim, a radiação difusa incidente na superfície a partir da direção de um setor do céu $Rdif_{\theta,\alpha}$, com um centróide no ângulo zenital θ e ângulo azimutal α , é calculada conforme a equação 18.

$$Rdif_{\theta,\alpha} = Rg_n \times Kd \times Dur \times SkyGap_{\theta,\alpha} \times Weight_{\theta,\alpha} \times \cos AngIn_{\theta,\alpha} \quad (18)$$

Sendo:

Rg_n : radiação global normal (equação 19)

Kd : fração difusa (previamente estimada, de acordo com a metodologia descrita no item 3.3.2.1.1)

Dur : intervalo de tempo para análise (decêndio, neste estudo)

$SkyGap_{\theta,\alpha}$: fração aberta do céu para o setor (proporção do setor não obstruída)

$Weight_{\theta,\alpha}$: proporção da radiação difusa originária de um dado setor do céu em relação ao total de setores (equação 20)

$AngIn_{\theta,\alpha}$: ângulo de incidência entre o centróide do setor do céu e a superfície de interceptação (graus)

A radiação global normal (Rg_n) é calculada pela soma da radiação direta oriunda de cada setor (incluindo os setores obstruídos) sem correção para o ângulo de incidência, e então corrigindo para a porção de radiação direta, igual a $1-Kd$, conforme a equação 19.

$$Rg_n = \frac{S \times \sum \tau_{dir(\theta)}^{m(\theta)}}{1 - Kd} \quad (19)$$

A porção da radiação difusa originária de um dado setor do céu em relação ao total de setores é calculada conforme a equação 20.

$$Weight_{\theta,\alpha} = \frac{\cos \theta_1 - \cos \theta_2}{Div_{azi}} \quad (20)$$

Sendo:

θ_1, θ_2 : ângulos zenitais limítrofes do setor do céu (graus)

Div_{azi} : Número de divisões azimutais no mapa do céu

Finalmente, a radiação difusa total para o local é calculada pela soma da radiação difusa oriunda de todos os setores do céu, conforme a equação 21.

$$Rdif_{tot} = \sum Rdif_{\theta,\alpha} \quad (21)$$

3.3.2.5. Cálculo da radiação global

O cálculo da radiação solar global (Rg_{tot}) incidente em cada *pixel* do Modelo Digital de Elevação é feito pela soma simples da radiação direta e da radiação difusa, conforme a equação 22.

$$Rg_{tot} = Rdir_{tot} + Rdif_{tot} \quad (22)$$

3.3.3. Verificação dos resultados

3.3.3.1. Obstrução do horizonte

A avaliação da obstrução do horizonte foi realizada através da comparação entre o diagrama de obstrução calculado e o horizonte real registrado com fotografias hemisféricas, em 16 pontos distribuídos em 9 municípios da área de estudo. Os pontos visitados encontram-se em diferentes condições topográficas quanto à altitude, declividade, orientação da superfície e obstrução do horizonte e incluem as quatro estações

meteorológicas descritas no item 3.2.1. Em todos os locais visitados foram coletadas as coordenadas geográficas e as coordenadas UTM da posição do equipamento fotográfico, bem como a altitude, com auxílio de receptor GPS.

A TABELA 4 relaciona a identificação, o município, a descrição do local, as coordenadas geográficas, as coordenadas UTM e a altitude dos pontos visitados para aquisição de fotografias hemisféricas. É importante considerar que as coordenadas coletadas com receptores GPS nas estações são diferentes daquelas apresentadas na TABELA 1, chegando em alguns casos a representar quilômetros no terreno. Isso pode ser explicado pela menor precisão dos métodos de determinação das coordenadas na época de implantação das estações, em comparação com o GPS. Como a chave para o cálculo do diagrama de obstrução foi a posição do ponto em análise, coletar coordenadas com precisão compatível com o material cartográfico utilizado foi fundamental para reduzir erros no cálculo dos diagramas e evitar interpretações equivocadas dos resultados obtidos.

TABELA 4. Identificação, município, local, coordenadas geográficas e UTM (Datum WGS84) e altitude dos pontos visitados para aquisição de fotografias hemisféricas.

Ponto	Município	Local	Coordenadas geográficas		Coordenadas UTM		Altitude (m)
			Latitude (S)	Longitude (W)	X (m E)	Y (m N)	
1	Caxias do Sul	FEPAGRO	29° 08' 35,91"	50° 59' 09,92"	501403	6776181	836
2	Farroupilha	FEPAGRO	29° 12' 10,01"	51° 20' 08,02"	467431	6769545	680
3	Vacaria	FEPAGRO	28° 27' 13,91"	50° 56' 49,35"	505235	6852562	912
4	Veranópolis	FEPAGRO	28° 53' 19,59"	51° 32' 33,85"	447130	6804260	704
5	Bento Gonçalves	EMBRAPA	29° 09' 52,25"	51° 32' 03,17"	448100	6773713	618
6	Farroupilha	Estrada vicinal	29° 06' 14,64"	51° 22' 43,54"	463196	6780469	569
7	Farroupilha	Estrada vicinal	29° 06' 25,62"	51° 23' 45,74"	461515	6780126	564
8	Farroupilha	Estrada vicinal	29° 06' 16,91"	51° 24' 20,10"	460586	6780391	508
9	Farroupilha	Estrada vicinal	29° 06' 29,27"	51° 23' 35,70"	461787	6780014	600
10	Farroupilha	Estrada vicinal	29° 06' 51,98"	51° 22' 38,35"	463339	6779321	562
11	Carlos Barbosa	Rodovia RS 446	29° 20' 20,90"	51° 24' 34,55"	460286	6754414	150
12	Caxias do Sul	Estrada vicinal	29° 17' 19,63"	51° 04' 14,18"	493192	6760060	173
13	Caxias do Sul	Estrada vicinal	29° 18' 13,96"	51° 06' 39,90"	489262	6758385	223
14	Ipê	Rodovia RS 122	28° 48' 54,08"	51° 16' 00,39"	474020	6812523	740
15	Veranópolis	Rodovia RS 470	29° 02' 41,13"	51° 34' 03,62"	444782	6786967	152
16	Vila Flores	Estrada vicinal	28° 52' 53,16"	51° 27' 41,75"	455039	6805107	347

Em cada ponto visitado o conjunto de câmera e lente foi nivelado (FIGURA 24), a fim de que o plano horizontal da fotografia hemisférica coincidissem com o plano horizontal local. O equipamento também foi orientado, com auxílio do GPS, de modo que o topo da fotografia hemisférica fosse coincidente com o Norte geográfico, que não varia ao longo do tempo, como o Norte magnético. No caso dos pontos correspondentes à localização das estações meteorológicas, procurou-se instalar o equipamento o mais próximo possível da posição original do actinógrafo.



FIGURA 24. Nivelamento do equipamento para obtenção das fotografias hemisféricas.

Após o trabalho de campo, as coordenadas UTM dos pontos visitados foram utilizadas para calcular o diagrama de obstrução do horizonte de cada ponto, a partir de sua posição sobre o Modelo Digital de Elevação. Em cada diagrama, quantificou-se a porção ocupada por áreas obstruídas e pela fração aberta do céu. Para as fotografias hemisféricas,

empregou-se a técnica do limiar de nível de cinza (Fraser, 1999; Chapman *et al.*, 2001) a fim de discriminar as áreas obstruídas e a fração aberta do céu. A porção obstruída e aberta foi calculada a partir da soma do número de *pixels* em cada situação, dividida pelo número total de *pixels* da área útil da fotografia.

A concordância entre a fração aberta do céu estimada a partir do diagrama de obstrução e a partir da fotografia hemisférica de cada ponto foi avaliada pelos erros absoluto e proporcional e pelo teste F, para os níveis de significância de 5% e 1%. Para avaliação visual, o diagrama de obstrução de cada ponto também foi sobreposto à fotografia hemisférica correspondente, tomando-se o Norte geográfico como referência para o alinhamento. O conjunto de cada fotografia e respectivo diagrama foi invertido na direção Leste-Oeste com vistas a facilitar a associação com as direções habituais, pois em fotografias hemisféricas as direções Leste e Oeste ficam trocadas porque a visão é da superfície para o céu, ao contrário do que ocorre com mapas ou imagens de satélite, em que a visão se dá em direção à Terra.

3.3.3.2. Estimativa da radiação solar global

A verificação dos resultados foi realizada pela comparação entre os valores decendiais de radiação solar global estimados para os sítios das quatro estações meteorológicas descritas no item 3.2.1 e os valores médios decendiais registrados pelas mesmas. Assim, considerando-se os 36 decêndios de dados em cada estação, foram comparados 144 valores para cada combinação de estimativa da fração difusa (K_d) e de correção da transmitância direta para o zênite ($\tau_{dir(\theta)}$).

Os parâmetros estatísticos utilizados para a avaliação foram o erro médio absoluto e proporcional, ou *Mean Bias Error* (MBE e MBE%), e a raiz quadrada do erro quadrático médio absoluto, ou *Root Mean Square Error* (RMSE) e proporcional (RMSE%). Além do MBE e do RMSE, também foi analisada a correlação entre os valores de radiação solar

global estimados e registrados, submetendo-se os coeficientes angulares das equações ao teste F para os níveis de significância de 5% e 1%, conforme Fontana & Oliveira (1996).

3.3.4. Cálculo dos mapas de radiação

A demanda de processamento computacional para o cálculo de mapas de radiação é intensiva, pois o processo é feito para todos os *pixels* do Modelo Digital de Elevação. A fim de racionalizar o tempo de processamento, os mapas de radiação foram calculados para um recorte do Modelo Digital de Elevação com dimensões mínimas necessárias para conter integralmente a área de estudo. Compreendendo um retângulo em torno dos limites da zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha, esse recorte totaliza 4.644 colunas e 3.568 linhas. É definido pelas coordenadas UTM do fuso 22 (Datum SAD69) entre 397.690 mE e 537.010 mE ao longo do eixo X e entre 6.735.960 mN e 6.843.000 mN ao longo do eixo Y.

O cálculo foi efetuado para cada período decendial, usando como parâmetros os respectivos valores de fração difusa (K_d) e de transmitância direta corrigida para o zênite ($\tau_{dir(\theta)}$) que possibilitaram melhor ajuste na verificação da estimativa de radiação global. Em cada decêndio foram calculados três mapas para a radiação solar, sendo um relativo à radiação difusa, outro para a radiação direta e um terceiro para a radiação global. Adicionalmente, foi calculado também um quarto mapa correspondente à insolação (duração do brilho solar) em cada *pixel*. Mesmo com uma área reduzida ao mínimo necessário, o cálculo dos mapas consumiu cerca de 60 h de processamento para cada decêndio, com os recursos computacionais disponíveis. Ao final do processo os mapas decendiais foram somados para obter as estimativas anuais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Propriedades ópticas da atmosfera

4.1.1. Índice de claridade

A FIGURA 25 mostra a radiação solar global média decendial incidente no topo da atmosfera (R_a) na latitude de 29° S e registrada na superfície (R_g) pelas quatro estações meteorológicas na Serra Gaúcha e entorno. Diferente da constante solar, que considera uma superfície perpendicular à direção dos raios solares, R_a depende da latitude do local (φ), da declinação solar (δ) e do ângulo zenital do Sol (θ). Assim, devido à variação na inclinação do eixo de rotação da Terra ao longo de sua órbita anual, tanto R_a quanto R_g apresentam uma oscilação senoidal e, na latitude média da área de estudo, no verão são praticamente o dobro do inverno.

A diferença entre as curvas de R_a e de R_g evidencia o efeito dos diversos fenômenos que ocorrem com a radiação que atravessa as camadas atmosféricas, como absorção, reflexão e espalhamento, os quais atenuam a quantidade de energia que efetivamente chega à superfície terrestre. A FIGURA 26 mostra o índice de claridade (K_t), que expressa o efeito atenuante da atmosfera de forma adimensional. Os maiores valores de K_t tendem a ocorrer no verão e no outono e os menores no inverno e na primavera, com redução mais acentuada entre o segundo e o terceiro decêndio de setembro. Esse padrão é coerente com a distribuição temporal decendial do Índice de Nebulosidade Diurna (IND) no Rio Grande do Sul, obtida por Custódio *et al.* (2009). Os períodos de maior IND coincidem com os menores valores de K_t , e vice-versa.

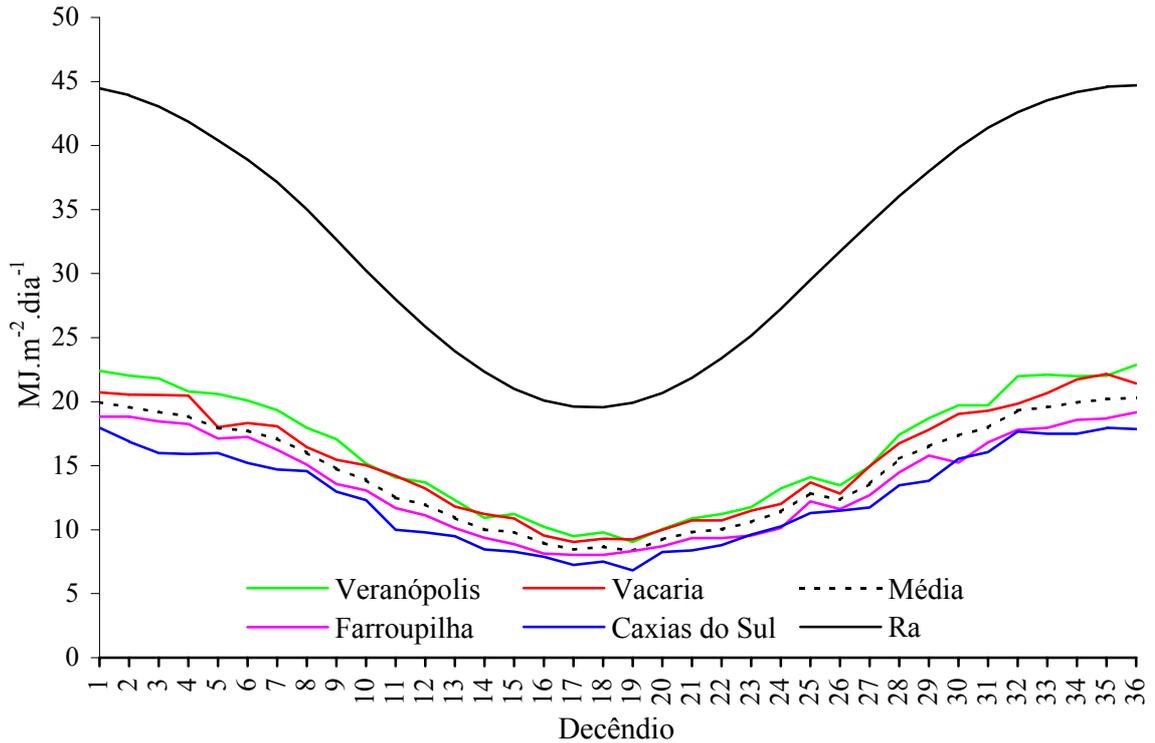


FIGURA 25. Radiação solar global média decendial ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) incidente no topo da atmosfera (R_a) e registrada em quatro estações meteorológicas na Serra Gaúcha e entorno.

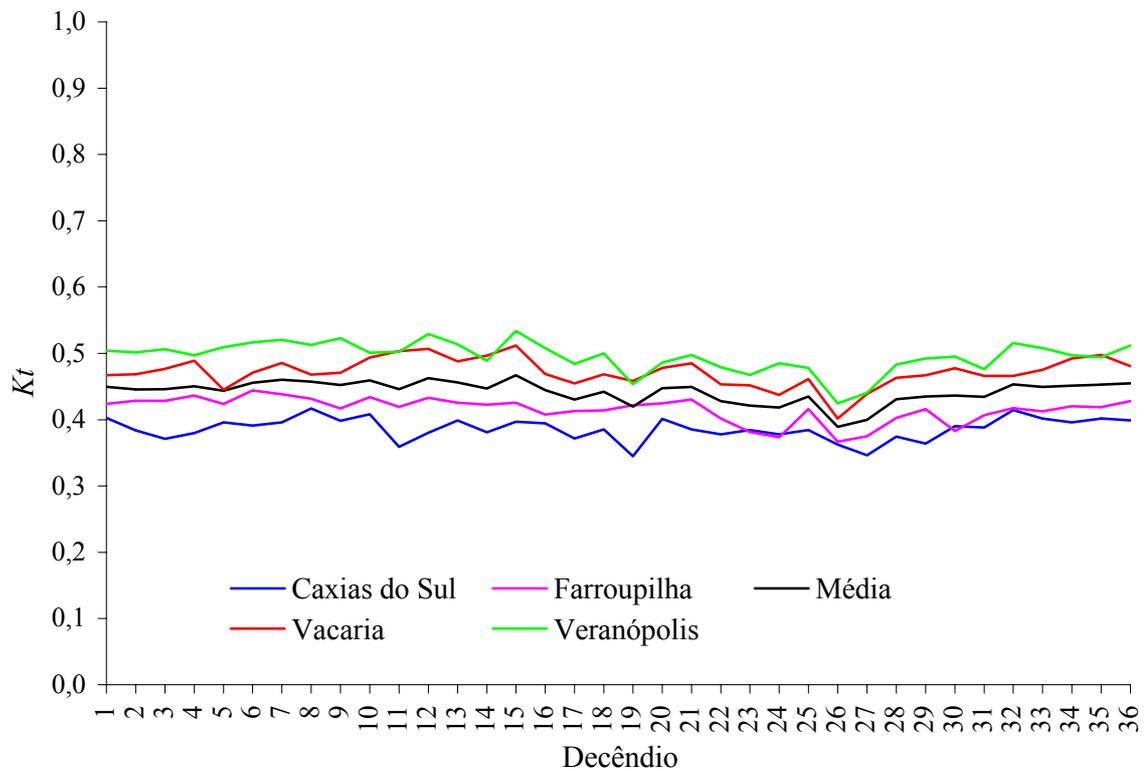


FIGURA 26. Índice de claridade (K_t) médio decendial calculado para quatro estações meteorológicas na Serra Gaúcha e entorno.

Comparando-se as quatro estações meteorológicas, observa-se um padrão temporal semelhante de Kt , porém com valores em patamares diferentes. Analisando-se a FIGURA 26, constata-se que as estações de Caxias do Sul e de Farroupilha são as que apresentam os menores valores de Kt . No caso de Caxias do Sul a explicação pode estar relacionada à localização, situada na transição entre a encosta da serra e o planalto, onde a nebulosidade mais frequente reduz a quantidade de radiação que chega à superfície. A estação de Farroupilha, por outro lado, não está sujeita exatamente às mesmas condições e o seu baixo Kt , provavelmente, se deve a outras características do local que reduzem a quantidade de radiação incidente, como a obstrução do horizonte, por exemplo (ver item 4.2).

A estação de Veranópolis é a que apresenta os valores mais elevados de Kt , seguida de Vacaria, o que contraria o esperado, já que Vacaria está situada em maior altitude. Segundo Lingamgunta & Verizoglu (2004), a atenuação atmosférica tem relação inversa com a altitude. Para uma dada latitude, à medida que a altitude diminui, os raios solares atravessam camadas cada vez mais espessas e mais densas da atmosfera, contendo maiores quantidades de vapor d'água e de aerossóis, aumentando a atenuação da radiação incidente. Todavia, é na região de Vacaria que ocorrem os maiores índices de nebulosidade diurna do Rio Grande do Sul, em função da elevada precipitação pluvial (Custódio *et al.*, 2009), o que explica os menores registros de Rg em relação a Veranópolis.

A TABELA 5 apresenta alguns parâmetros estatísticos de Kt das quatro estações meteorológicas e de Kt médio. O valor mínimo (0,3450) é verificado na estação de Caxias do Sul, no primeiro decêndio de julho, e o máximo (0,5340) na estação de Veranópolis, no terceiro decêndio de maio. As estações de Caxias do Sul e de Vacaria apresentam, respectivamente, a menor e a maior variação durante o ano. Com relação à média de Kt das quatro estações, o menor valor (0,3890) é verificado no segundo decêndio de setembro e o maior valor (0,4670) no terceiro decêndio de maio, representando uma variação de cerca de 20% entre esses dois extremos.

TABELA 5. Parâmetros estatísticos para o índice de claridade (Kt) em quatro estações meteorológicas na Serra Gaúcha e entorno.

Parâmetro	Caxias do Sul	Farroupilha	Veranópolis	Vacaria	Kt médio
Média anual	0,3860	0,4160	0,4950	0,4720	0,4420
Variância	0,0003	0,0004	0,0005	0,0005	0,0003
Desvio-padrão	0,0170	0,0189	0,0231	0,0218	0,0169
Mínimo	0,3450	0,3670	0,4250	0,4020	0,3890
Máximo	0,4170	0,4440	0,5340	0,5120	0,4670
Intervalo	0,0720	0,0770	0,1090	0,1100	0,0780
Variação (%)	20,8790	21,0730	25,6240	27,4030	20,0740

Os valores de Kt médio decendial obtidos para a zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha são próximos aos encontrados por Marques *et al.* (2000) para a estação agrometeorológica de Pelotas (31° 42' S, clima Cfa de Köppen). Analisando valores mensais de Kt no período de 1993 a 1999, os autores encontraram mínimo de 0,33 e máximo de 0,61, com a maior parte dos casos oscilando entre 0,39 e 0,54. A média anual foi praticamente constante ao longo de período estudado, situando-se em torno de 0,47, semelhante à média das estações meteorológicas de Veranópolis e Vacaria. A condição de cobertura do céu média mensal variou de parcialmente nublado a claro.

Comparados aos resultados encontrados em outras regiões, os valores de Kt médio decendial obtidos para a Serra Gaúcha podem ser considerados baixos. Grigoletto & Ricieri (2003), em estudo de frequência de Kt máximo para o período de 1983 a 1998 em Cascavel (24° 53' S, clima Cfa de Köppen), encontraram valores entre 0,50 e 0,58 em 92% dos dias, com Kt máximo médio de 0,53 para partição diária, de 0,57 para partição quinzenal e de 0,59 para partição mensal.

Escobedo *et al.* (2006), para um período de 1.359 dias de 2001 a 2004, em Botucatu (22° 54' S, clima Cwa de Köppen), obtiveram valores médios diários de Kt variando de um mínimo de 0,04 a um máximo de 0,78, com média de 0,54. Almeida & Escobedo (2010), no período de 1996 a 2006 na mesma região, observaram valores médios diários de Kt entre 0,51 e 0,56, com média anual de 0,54. Os valores mais elevados ocorreram nas

estações de baixa concentração de nuvens e de vapor d'água na atmosfera (outono e inverno) e os menores valores nas estações de altas concentrações de nuvens e vapor d'água (verão e primavera).

Costa *et al.* (1998), estudando o efeito da nebulosidade sobre Kt em Piracicaba (22° 42' S, clima Cwa de Köppen), no segundo semestre de 1993, obtiveram valores médios de 0,54 para situação de dias claros e 0,15 para situação de dias nublados. Com relação à distribuição sazonal, tanto para dias claros quanto para dias nublados os valores de Kt foram menores no inverno que no verão. Souza *et al.* (2000), estudando a distribuição anual da frequência diária de Kt para o ano de 1997 em Maceió (09° 40' S, clima As' de Köppen), encontraram mínimo de 0,45 em agosto e máximo de 0,62 em dezembro, com média anual de 0,54. Em dias com nebulosidade entre 25 e 50%, o valor médio de Kt foi 0,57 e com nebulosidade acima de 75% o valor médio de Kt foi de 0,45.

Os menores valores de Kt obtidos na Serra Gaúcha, em relação a outros locais, podem estar relacionados, em parte, à maior latitude e às características específicas do clima da região. A precipitação pluvial, por exemplo, é distribuída ao longo do ano, com média acumulada superior a 100 mm em todos os meses (FIGURA 7). Bergamaschi & Didoné (1981) atribuíram as menores médias de R_g na região Nordeste do Rio Grande do Sul aos elevados índices de precipitação pluviométrica e número de dias de chuva. Isso significa que a nebulosidade é frequente ao longo do ano, reduzindo a radiação que chega à superfície devido à atenuação atmosférica, conseqüentemente diminuindo Kt .

Outra possível causa refere-se aos próprios dados de radiação global das estações meteorológicas, cujos valores podem ser, eventualmente, menores que o real. Embora não correspondam ao mesmo período, médias decendiais de R_g da estação meteorológica automática da Embrapa Uva e Vinho (Embrapa, 2011) parecem corroborar essa hipótese, pois são cerca de 17% superiores às das quatro estações meteorológicas da FEPAGRO, obtidas com actinógrafos. No mesmo sentido, Sentelhas *et al.* (1997) compararam médias

diárias e mensais de diferentes variáveis meteorológicas registradas em estações convencionais e automáticas, no período de 01/06/1996 a 30/06/1997, em Piracicaba (22° 30' 30" S). A radiação global foi a variável com maior discrepância, apresentando tendência de subestimativa nos instrumentos convencionais, com RMSE% de 13,19%, e com a maior diferença nos meses de maior irradiância. A discrepância foi atribuída às diferenças de resposta, de precisão e de sensibilidade dos dois tipos de sensores, além da calibração do actinógrafo e dos problemas relativos à cotação dos diagramas, principalmente em períodos com nebulosidade variável.

4.1.2. Fração difusa

A FIGURA 27 mostra a fração difusa (K_d) média decencial estimada a partir do índice de claridade (K_t), com as relações empíricas de Erbs *et al.* (1982) e UO Solar Monitoring Lab (1999), e a partir do coeficiente linear da equação Ångstrom ajustada por Conceição & Mandelli (2006) para dados mensais de Bento Gonçalves, RS.

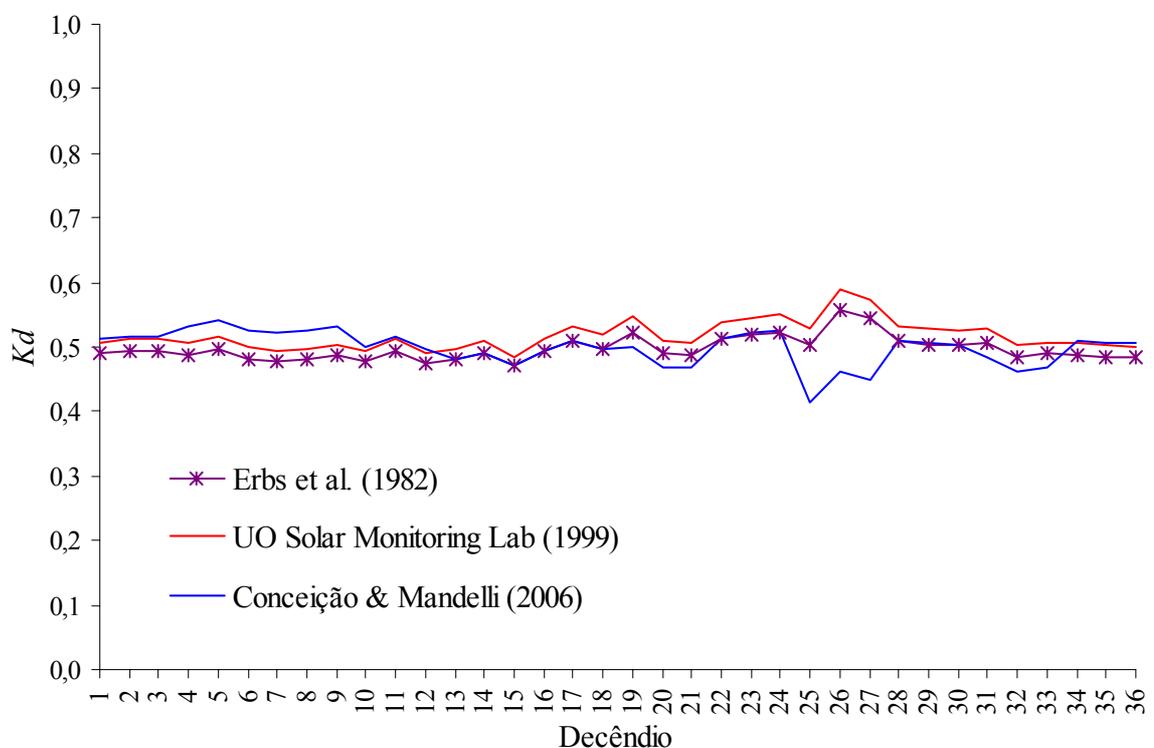


FIGURA 27. Fração difusa (K_d) média decencial estimada para a zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha a partir de K_t , com as relações empíricas de Erbs *et al.* (1982) e UO Solar Monitoring Lab (1999), e a partir do coeficiente linear da equação de Ångstrom ajustada por Conceição & Mandelli (2006).

As estimativas de K_d obtidas com os três métodos apresentam valores bastante próximos durante a maior parte do ano. As relações de Erbs *et al.* (1982) e UO Solar Monitoring Lab (1999) apresentam curvas semelhantes, o que é esperado já que ambas se baseiam no índice de claridade, mas a última resultou em valores sempre superiores à primeira. Em ambas as relações, o valor mínimo ocorreu no decêndio 15 (terceiro decêndio de maio), respectivamente com 0,471 e 0,484, e o valor máximo no decêndio 26 (segundo decêndio de setembro), respectivamente com 0,557 e 0,59. A média anual foi 0,497 para a primeira e 0,517 para a segunda, o que representa uma diferença relativa em torno de 4%.

A estimativa de K_d a partir do coeficiente linear de Ångström ajustado por Conceição & Mandelli (2006), entretanto, não é consistente com as duas primeiras. Em alguns períodos os valores estimados foram superiores e em outros inferiores àqueles obtidos com as duas relações anteriores. As principais discordâncias ocorreram nos decêndios 4 a 10 (primeiro decêndio de fevereiro ao primeiro decêndio de abril), quando ela foi superior às anteriores, e nos decêndios 25 a 27 (primeiro ao terceiro decêndio de setembro), quando ela foi inferior. Os valores mínimo e máximo de K_d também ocorreram em períodos distintos, respectivamente 0,414 no decêndio 25 (primeiro decêndio de setembro) e 0,541 no decêndio 5 (segundo decêndio de fevereiro), e a média anual foi 0,499. A maior discrepância foi verificada entre os decêndios 25 a 27 (primeiro ao terceiro decêndio de setembro), onde a tendência é oposta às duas relações anteriores. A diminuição de K_d nesse período contraria o esperado, tendo em vista que ocorre justamente no mês de maior precipitação pluvial (FIGURA 27), quando a cobertura de nuvens tende a ser maior, como demonstrado por Custódio *et al.* (2009).

Nos demais períodos houve uma concordância que se alterna entre as duas relações anteriores ao longo do ano. K_d estimado a partir de Conceição e Mandelli (2006) foi coincidente com a relação de UO Solar Monitoring Lab (1999) nos decêndios 1 a 3 (primeiro ao terceiro decêndio de janeiro), 10 a 12 (primeiro ao terceiro decêndio de abril)

e 34 a 36 (primeiro ao terceiro decêndio de dezembro). Já nos decêndios 13 a 18 (primeiro decêndio de maio ao terceiro decêndio de junho), 22 a 24 (primeiro ao terceiro decêndio de agosto) e 28 a 30 (primeiro ao terceiro decêndio de outubro), a estimativa de K_d foi praticamente idêntica àquela obtida com a relação de Erbs *et al.* (1982).

Como não há registros de radiação difusa para a região, a interpretação dos resultados da FIGURA 27 precisa basear-se em outros estudos. Todavia, ao se comparar resultados obtidos com diferentes relações empíricas, é importante lembrar que elas foram desenvolvidas para condições específicas de determinadas regiões. Há uma variabilidade entre sítios na relação entre a fração difusa e a irradiação total, e os modelos usados para estimar componentes da radiação global são desenvolvidos sobre dados de radiação registrados em sítios específicos. A aplicação fora das condições originais resulta em incertezas porque os efeitos da atmosfera no espalhamento e na absorção da radiação solar variam no espaço e no tempo, em função da latitude, da altitude e de mudanças nas condições atmosféricas típicas do clima de cada local (Bindi *et al.*, 1992; Recieri *et al.*, 2002; Lingamgunta & Verizoglu; 2004).

Olyphant (1984) aplicou a relação de Erbs *et al* (1982) com sucesso em áreas de relevo complexo e Bindi *et al* (1992) concluíram que ela, em geral, é acurada, especialmente para valores baixos de K_d . Entretanto, Fu *et al.* (1995) sugerem que a equação de Erbs *et al.* (1982) tende a subestimar a radiação difusa. Na FIGURA 27 observa-se que, de fato, ela estimou valores de K_d inferiores à equação de UO Solar Monitoring Lab (1999), mas a diferença foi muito pequena. Em determinados períodos, ambas se aproximam da estimativa feita a partir de Conceição & Mandelli (2006), que é a única derivada de uma relação ajustada especificamente para a região. Recieri *et al* (2002) concluíram que a relação de Erbs *et al.* (1982) é semelhante a correlações de terceiro e de quarto grau ajustadas para Cascavel e pode ser aplicada ao local com precisão igual ou

superior a 80%. Kang *et al.* (2002) a usaram no modelo TopoRad para estimar a radiação solar em superfícies inclinadas na Coréia, obtendo um erro médio em torno de 3%.

Bindi *et al* (1992) constataram que diferenças entre métodos tendem a diminuir com a redução da resolução temporal. As diferenças são maiores entre relações ajustadas para valores horários, especialmente durante as horas de pico de radiação, devido à grande dispersão dos dados. Quando são usadas médias de períodos maiores, tanto os erros das estimativas quanto a diferença entre os métodos são geralmente baixos, o que os resultados mostrados na FIGURA 27 parecem confirmar. Sem dispor de dados medidos de radiação difusa não é possível inferir qual das três relações utilizadas produz estimativas de Kd mais acuradas que as demais. Todavia, uma avaliação indireta pode ser realizada com base no resultado final, pressupondo-se que um cálculo adequado da fração difusa deve possibilitar uma estimativa acurada da radiação global.

4.1.3. Transmitância direta

A FIGURA 28 mostra a transmitância média decendial da atmosfera à radiação direta para a zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha, calculada a partir de Kd estimada por meio de três relações empíricas. Para cada relação de estimativa de Kd são apresentados os respectivos valores da transmitância direta, corrigida de três maneiras para o menor caminho óptico ($\tau_{dir(\theta)}$) a partir do cosseno do ângulo zenital médio de cada decêndio.

Apesar de ter sido calculada a partir da fração difusa, a transmitância direta corrigida para o zênite ($\tau_{dir(\theta)}$) apresenta variação anual diferente daquela, oscilando segundo um padrão aproximadamente senoidal. De modo geral, os menores valores ocorrem no verão e os mais elevados no inverno, o que se deve em parte ao efeito do ângulo zenital. Isso ocorre porque no inverno o ângulo zenital é maior, ou seja, os raios solares são mais inclinados e o caminho óptico que a radiação percorre é mais extenso. Como consequência, após ser corrigida para o zênite (menor espessura óptica) a

transmitância direta resulta em valores mais elevados que nos demais períodos, o que concorda com o observado por Sucharov & Rosa (1994). Esse efeito tende a aumentar com o aumento da latitude, uma vez que o ângulo zenital é altamente dependente da mesma (Williams, 1976; Querino *et al.*, 2006).

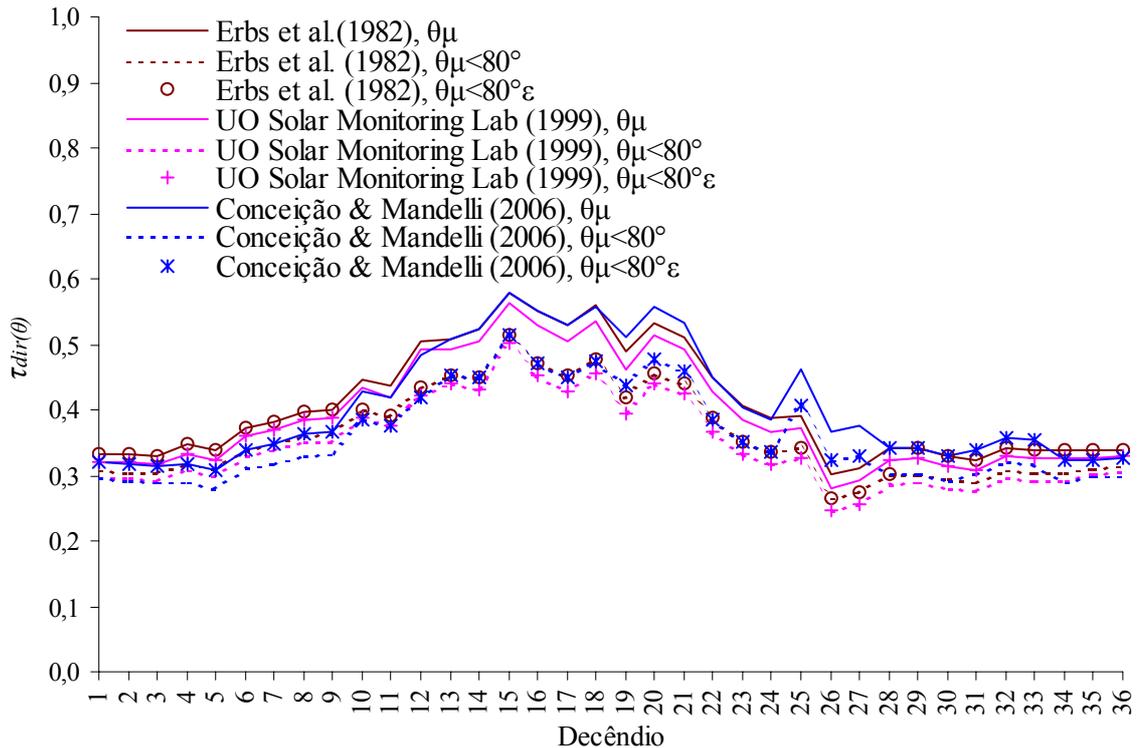


FIGURA 28. Transmitância direta (τ_{dir}) para a zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha, calculada a partir de K_d estimada por meio de três relações empíricas, corrigida pelo cosseno do ângulo zenital médio (θ_μ = média de todos os ângulos zenitais, $\theta_\mu < 80^\circ$ = média dos ângulos zenitais inferiores a 80° , $\theta_\mu < 80^\circ \varepsilon$ = média de todos os ângulos zenitais na primavera-verão e dos ângulos zenitais inferiores a 80° no outono-inverno).

Além disso, Fontana & Oliveira (1996) e Conceição & Mandelli (2006) afirmam que este padrão de oscilação também resulta da maior transmissividade da atmosfera no inverno em relação ao verão. As principais causas são a menor quantidade de partículas de poeira em suspensão no ar e a frequente entrada de massas de ar polar, que são mais frias e com menor turbulência em relação às massas tropicais que atuam no verão. Isso é válido não apenas para a zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha, mas para todo o Rio Grande

do Sul, e também explica o fato de Kt variar pouco ao longo do ano. Apesar da camada atmosférica ser mais espessa no inverno em função do maior ângulo de incidência dos raios solares, a transmitância por unidade de espessura óptica (transmissividade) também é maior. Como consequência, a porção da radiação solar incidente no topo da atmosfera que chega à superfície nesse período varia pouco em relação ao verão.

Quando corrigida pelo ângulo zenital médio ($\theta\mu$), a transmitância direta calculada a partir de Kd estimado pela relação de Erbs *et al.* (1982) apresentou mínimo de 0,3028 e máximo 0,5777, respectivamente no decêndio 26 (segundo decêndio de setembro) e no decêndio 15 (terceiro decêndio de maio), com média anual de 0,4077. Com a relação de UO Solar Monitoring Lab (1999) o mínimo foi de 0,2806 e o máximo de 0,5632, nos mesmos decêndios verificados para Erbs *et al.* (1982), com média anual de 0,3911. Para Conceição & Mandelli (2006), o mínimo foi de 0,3067 e o máximo de 0,5775, respectivamente no decêndio 5 (segundo decêndio de fevereiro) e no decêndio 15 (terceiro decêndio de maio), com média anual de 0,4065. A maior discrepância foi verificada nos decêndios 25 a 27 (primeiro ao terceiro decêndio de setembro), quando estimativas segundo Conceição & Mandelli (2006) foram superiores às outras relações (FIGURA 28), o que é consistente com as estimativas de Kd (FIGURA 27).

A correção da transmitância direta pelo ângulo zenital médio, incluindo apenas os ângulos zenitais inferiores a 80° ($\theta\mu < 80^\circ$), não alterou o período de ocorrência dos mínimos e máximos encontrados a partir de cada relação, mas afetou a magnitude dos valores. Para a relação de Erbs *et al.* (1982) o mínimo foi de 0,2657 e o máximo de 0,5131, com média anual de 0,3609. Para UO Solar Monitoring Lab (1999) o mínimo foi de 0,2462 e o máximo de 0,5002, com média anual de 0,3463. Para Conceição & Mandelli (2006), o mínimo foi de 0,2815 e o máximo de 0,5129, com média anual de 0,3595. A FIGURA 28 mostra que, nos três casos, há uma redução ao longo de todo o ano, que é mais pronunciada no período do inverno, quando os ângulos zenitais elevados são mais frequentes.

A correção da transmitância direta pelo ângulo zenital médio no período de primavera-verão e pela média dos ângulos zenitais inferiores a 80° no outono-inverno ($\theta_\mu < 80^\circ \varepsilon$) também não alterou o período de ocorrência dos mínimos e máximos, mas afetou a magnitude dos valores de maneira distinta em relação à correção anterior. Para as relações de Erbs *et al.* (1982) e UO Solar Monitoring Lab (1999) os mínimos se mantiveram, respectivamente, em 0,2657 e 0,2462 e os máximos, respectivamente, em 0,5131 e 0,5002. A média anual, entretanto, aumentou para 0,3759 e 0,3617, respectivamente. Para Conceição & Mandelli (2006), o mínimo aumentou para 0,3067, o máximo se manteve em 0,5129 e a média anual aumentou para 0,3750.

Resguardadas as diferenças climáticas e de latitude, os resultados da transmitância direta obtidos a partir das três relações e três formas de correção para o menor caminho óptico encontram-se próximos dos encontrados por Souza *et al.* (2000) em Maceió. O autor encontrou transmitância direta mínima de 0,24 em fevereiro e máxima de 0,50 em dezembro, com média anual de 0,3. Em dias com nebulosidade entre 25-50% a transmitância direta teve valor médio de 0,31 e com nebulosidade acima de 75% teve como média 0,17. Embora não tenham sido corrigidos para o zênite, esses valores servem de referência porque a latitude de Maceió é baixa ($09^\circ 40' S$) e, portanto, o efeito do ângulo zenital é menos pronunciado que na área de estudo ($29^\circ S$).

Existem poucos estudos relacionados à determinação da transmitância direta, provavelmente em função da pouca disponibilidade de instrumentos para medir a radiação direta e a radiação difusa. Sem dispor de dados medidos de radiação direta não é possível inferir se uma das três formas adotadas para correção da transmitância direta para o menor caminho óptico produz estimativas mais acuradas que as demais. Assim, como no caso da fração difusa, a avaliação pode ser realizada apenas de forma indireta, assumindo-se que um cálculo adequado da transmitância direta deve possibilitar uma estimativa acurada da radiação global.

4.2. Obstrução do horizonte

Os diagramas calculados de obstrução do horizonte e do percurso do Sol sobrepostos a fotografias hemisféricas para os 16 locais visitados são apresentados da FIGURA 29 à FIGURA 44, incluindo os sítios das quatro estações meteorológicas utilizadas para caracterizar as propriedades da atmosfera na área de estudo. A fotografia corresponde ao horizonte real e a linha vermelha representa o horizonte efetivo (obstrução) calculado para cada ponto a partir do Modelo Digital de Elevação. A TABELA 6 relaciona a fração aberta do céu determinada por fotografia hemisférica e estimada por meio do diagrama de obstrução calculado para os 16 pontos visitados.

TABELA 6. Fração aberta do céu em 16 pontos na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha, determinada por fotografia hemisférica e estimada por diagrama de obstrução.

Ponto	Fração aberta do céu (%)			
	Fotografia hemisférica	Diagrama de obstrução	Erro absoluto	Erro proporcional
1	89,14	94,56	5,42	6,08
2	75,76	80,47	4,72	6,23
3	94,27	97,11	2,84	3,01
4	91,73	98,13	6,40	6,98
5	90,86	96,35	5,49	6,04
6	77,51	84,03	6,52	8,41
7	81,06	76,93	-4,13	-5,09
8	81,06	78,71	-2,34	-2,89
9	79,36	81,26	1,90	2,40
10	77,48	76,73	-0,75	-0,96
11	63,57	68,33	4,76	7,48
12	65,04	71,71	6,67	10,26
13	72,35	73,77	1,42	1,97
14	83,03	84,45	1,41	1,70
15	49,04	65,53	16,49	33,62
16	71,61	73,98	2,37	3,32
Média	77,68	81,38	3,70	5,53

Não houve diferença significativa entre a média da fração aberta do céu estimada pelo diagrama de obstrução e pelas fotografias hemisféricas, em nível de confiança de 1%, e o coeficiente de determinação (r^2) entre as duas medidas foi de 0,8428. Entretanto,

observa-se uma tendência de superestimativa da fração aberta do céu na maioria dos pontos, resultando em um erro médio absoluto de 3,7 e um erro médio proporcional de 5,53%. As maiores superestimativas ocorreram nos pontos 12 (FIGURA 40) e 15 (FIGURA 43), onde os erros absoluto e proporcional foram respectivamente de 6,67 e 10,26% e 16,49 e 33,62%. Apenas para os pontos 7 (FIGURA 35), 8 (FIGURA 36) e 10 (FIGURA 38) a fração aberta do céu foi subestimada pelo diagrama de obstrução.

Na maior parte dos casos, os erros de superestimativa da fração aberta do céu devem-se à presença da vegetação, a qual o cálculo da obstrução não considera porque se baseia unicamente no Modelo Digital e Elevação. Os erros de subestimativa, por outro lado, podem estar associados ao próprio método de cálculo ou à incerteza nas curvas de nível (equidistância vertical de 20 m) das cartas em escala 1:50.000 da DSG. Quanto mais próxima uma elevação estiver do ponto em questão, maiores tendem a ser os erros na determinação do ângulo do horizonte.

A FIGURA 29 mostra que a obstrução do horizonte estimada para a estação meteorológica de Caxias do Sul superestima a fração aberta do céu em 6,08% em relação à fotografia hemisférica. Parte do erro pode estar relacionada à altimetria das cartas em escala 1:50.000 da DSG. A leste do ponto, por exemplo, o horizonte no diagrama é maior que o horizonte real, enquanto na direção sul observa-se uma superfície mais alta que não foi adequadamente representada nas cartas. A maior parte do erro, entretanto, está relacionada à presença de vegetação, que não pode ser computada no diagrama de obstrução. O sombreamento causado pela vegetação é maior na direção leste, chegando a bloquear em cerca de uma hora a radiação direta em alguns períodos do ano, reduzindo a radiação solar incidente no actinógrafo que, juntamente com a maior nebulosidade da região, pode explicar os baixos valores de Kt encontrados para esta estação.

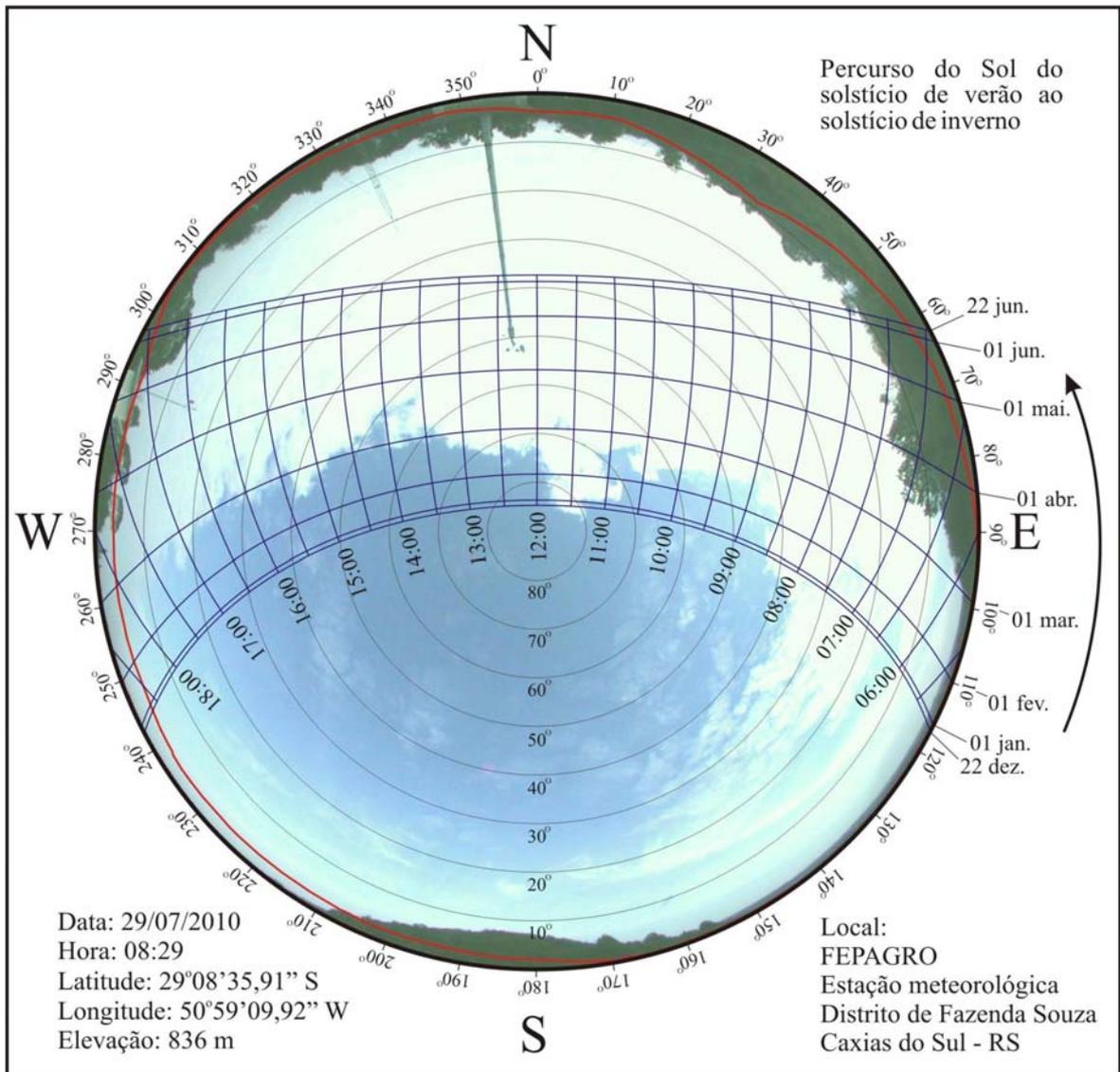


FIGURA 29. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 1 (estação meteorológica da FEPAGRO), Caxias do Sul/RS.

A obstrução do horizonte estimada para a estação meteorológica de Farroupilha (FIGURA 30) superestima a fração aberta do céu em 6,23%. O terreno está corretamente representado no diagrama de obstrução, atribuindo-se o erro principalmente à presença de vegetação. A fotografia hemisférica mostra que a vegetação obstrui mais a metade norte da abóbada sobre a estação e afeta principalmente a radiação difusa. Das quatro estações utilizadas, Farroupilha é a que apresenta o sítio com a maior obstrução do horizonte. A obstrução afeta tanto a radiação difusa quanto a radiação direta, bloqueando em média 1,5 h de radiação direta diária. É importante ressaltar ainda a presença de uma árvore situada

nas proximidades da estação, na direção oeste, próximo do azimute de 272°. O percurso do Sol mostra que esta árvore bloqueou a radiação direta durante anos, por mais de duas horas diárias em alguns períodos, reduzindo este componente nos registros de radiação global. A grande obstrução do sítio desta estação pode ser a causa dos menores valores de K_t (ver item 4.1.1) em relação às demais estações utilizadas.

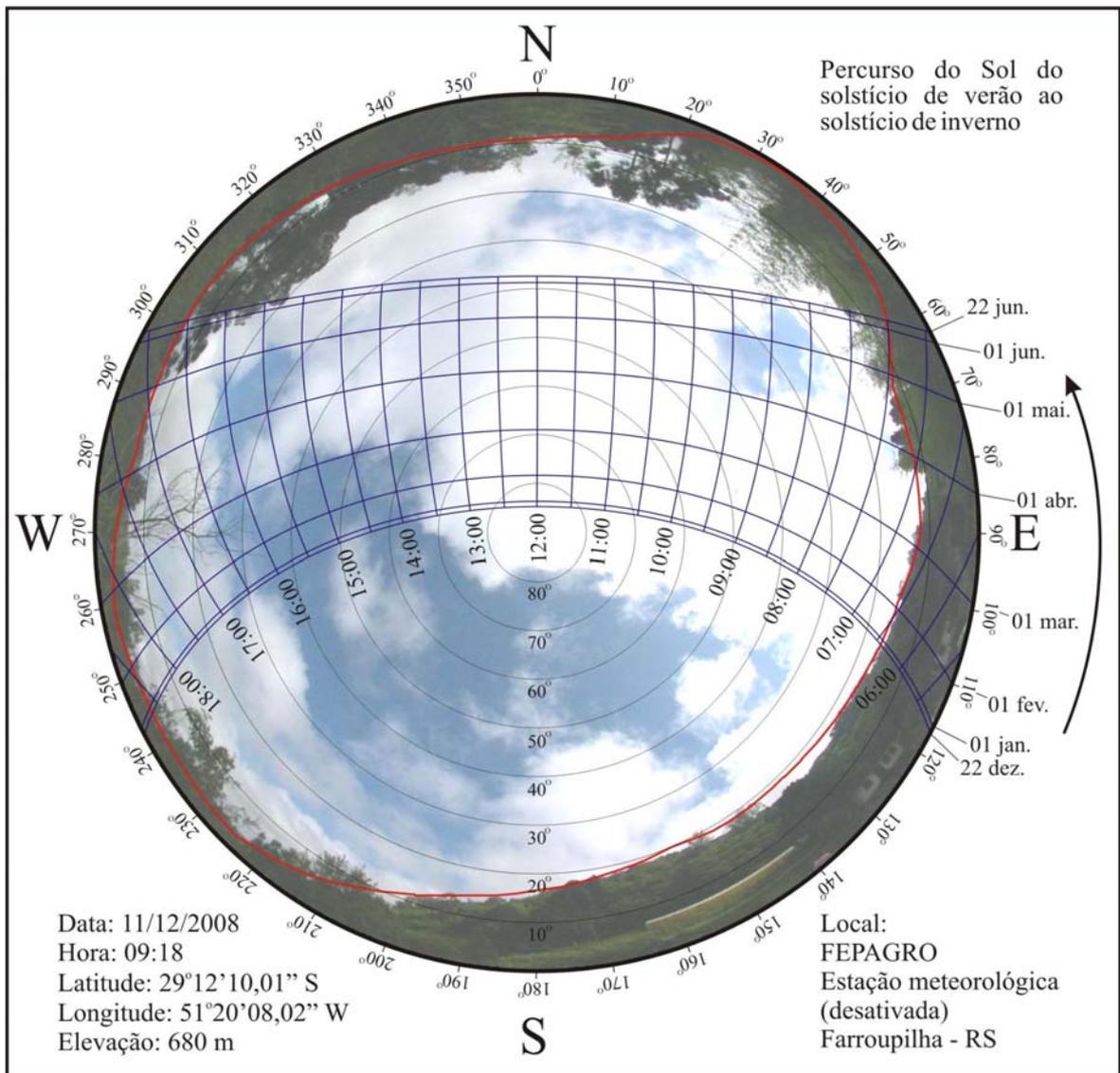


FIGURA 30. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 2 (estação meteorológica da FEPAGRO), Farroupilha/RS.

A estação de Vacaria (FIGURA 31) apresenta a menor obstrução do horizonte entre as quatro estações utilizadas. A obstrução calculada se aproxima da real, que praticamente

não afeta o horizonte efetivo. O diagrama de obstrução superestima a fração aberta do céu em 3,01% devido à presença de árvores isoladas, que obstruem principalmente a radiação difusa. Todavia, duas araucárias, no azimute de 297°, chegam a obstruir 1,5 h de radiação direta no final da tarde próximo ao solstício de inverno. Há ainda direções do percurso do Sol com obstruções menores a leste (azimute de 72°) e a oeste (azimute de 278°), onde a vegetação alcança ângulos de elevação em torno de 10°.

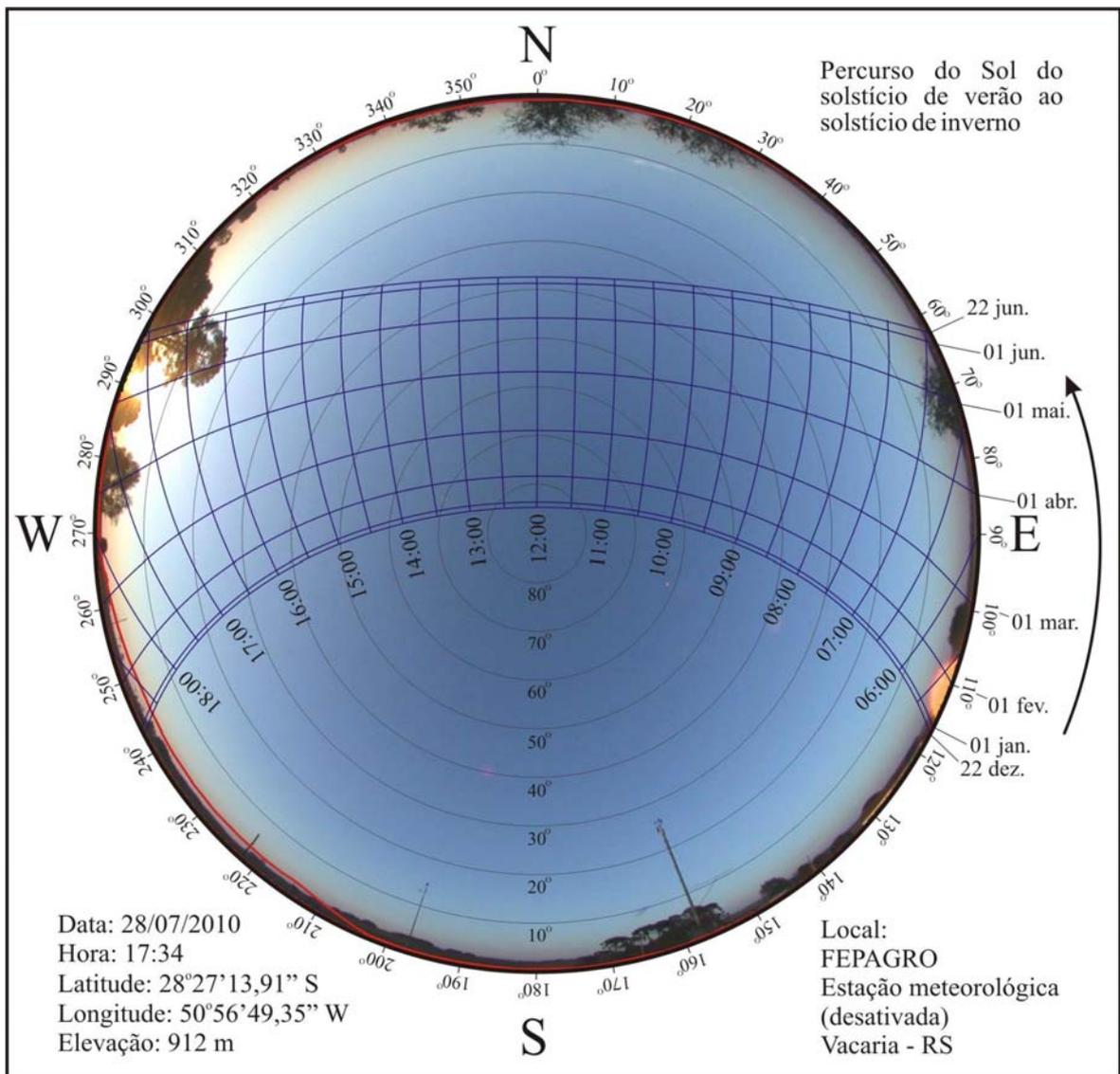


FIGURA 31. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 3 (estação meteorológica da FEPAGRO), Vacaria/RS.

A obstrução do horizonte calculada para a estação meteorológica de Veranópolis (FIGURA 32) superestima a fração aberta do céu em 6,98%. O terreno está corretamente representado no diagrama e o erro se deve à vegetação, que obstrui mais a porção oeste e sudoeste da abóbada e afeta principalmente a radiação difusa. Em alguns períodos a vegetação também bloqueia a radiação direta, mas com sombreamento inferior a 30 min ao final da tarde. A obstrução na estação de Veranópolis é maior que em Vacaria, mas afeta mais a radiação difusa, o que ajuda a explicar o menor Kt obtido para Vacaria onde, apesar da maior altitude, a obstrução também reduz a radiação direta.

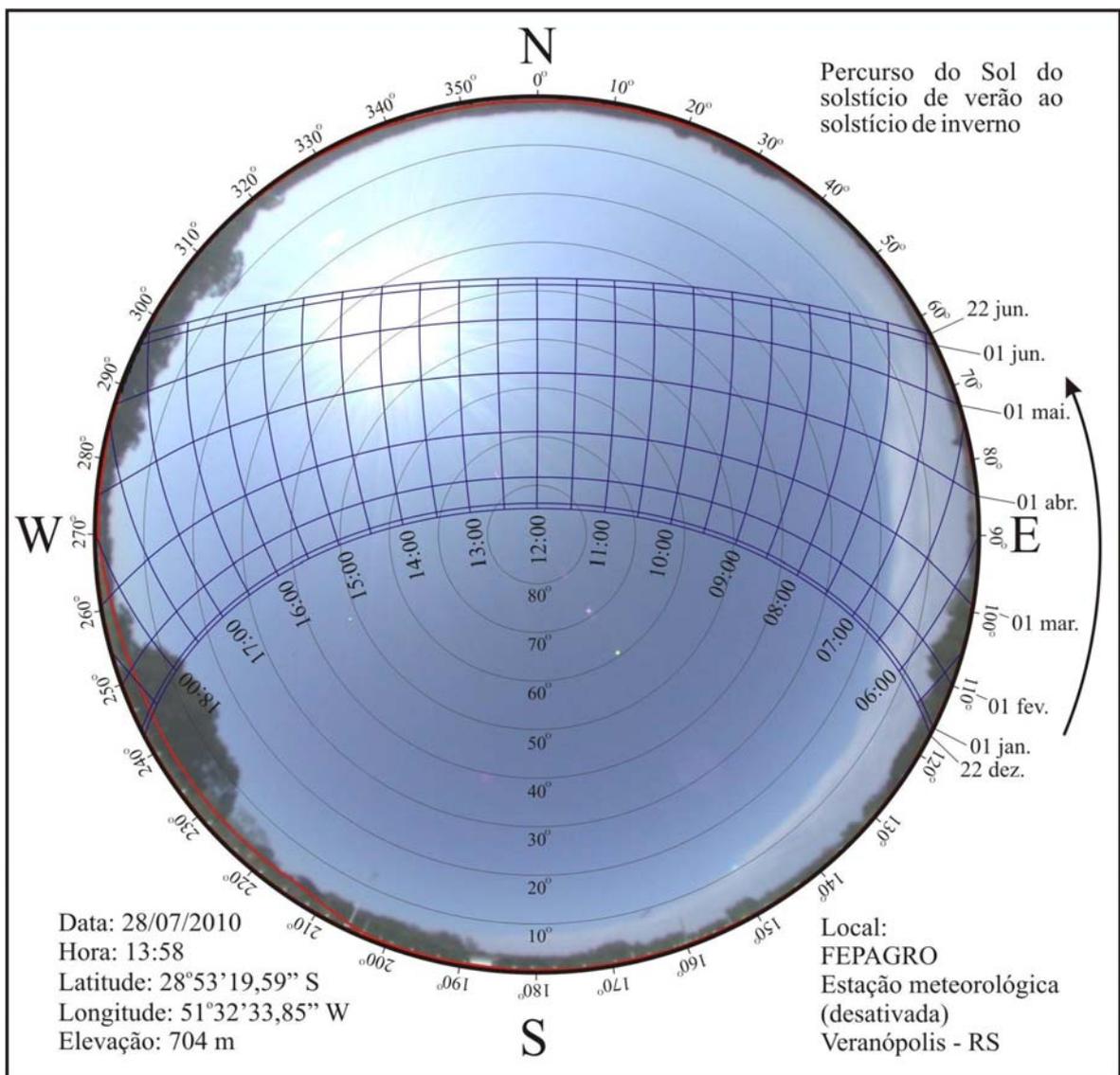


FIGURA 32. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 4, (estação meteorológica da FEPAGRO), Veranópolis/RS.

A obstrução do horizonte estimada para o ponto 5 (FIGURA 33) superestima a fração aberta do céu em 6,04%. O terreno está corretamente representado no diagrama de obstrução, atribuindo-se o erro à presença de vegetação. A fotografia hemisférica mostra que a vegetação obstrui mais a metade leste da abóbada sobre este ponto, e afeta principalmente a radiação difusa. Em alguns períodos a vegetação bloqueia a radiação direta, com sombreamento em torno de 0,5 h diária, notadamente no início da manhã, pouco afetando a radiação direta.

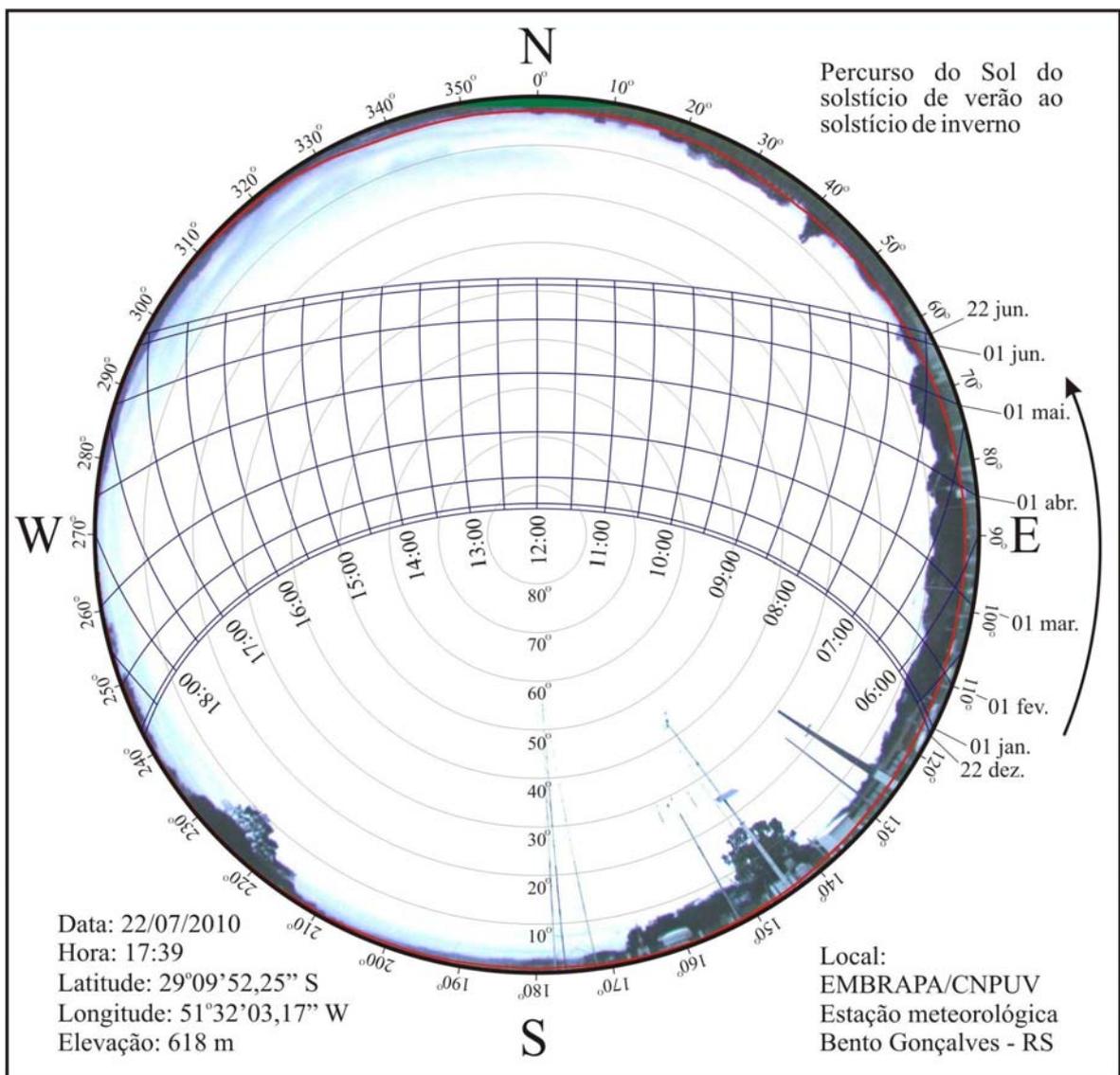


FIGURA 33. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 5 (estação meteorológica automática da Embrapa Uva e Vinho), Bento Gonçalves/RS.

A obstrução do horizonte estimada para o ponto 6 (FIGURA 34) superestima a fração aberta do céu em 8,41%. O terreno está corretamente representado no diagrama de obstrução, devendo-se o erro à presença de vegetação. A fotografia hemisférica mostra que a obstrução pela vegetação ocorre principalmente em dois locais nas proximidades do ponto. Há uma árvore de espécie desconhecida no azimute de 131° e uma araucária no azimute de 338° , sendo que ambas afetam somente a radiação difusa, pois sua posição não coincide com o percurso do Sol.

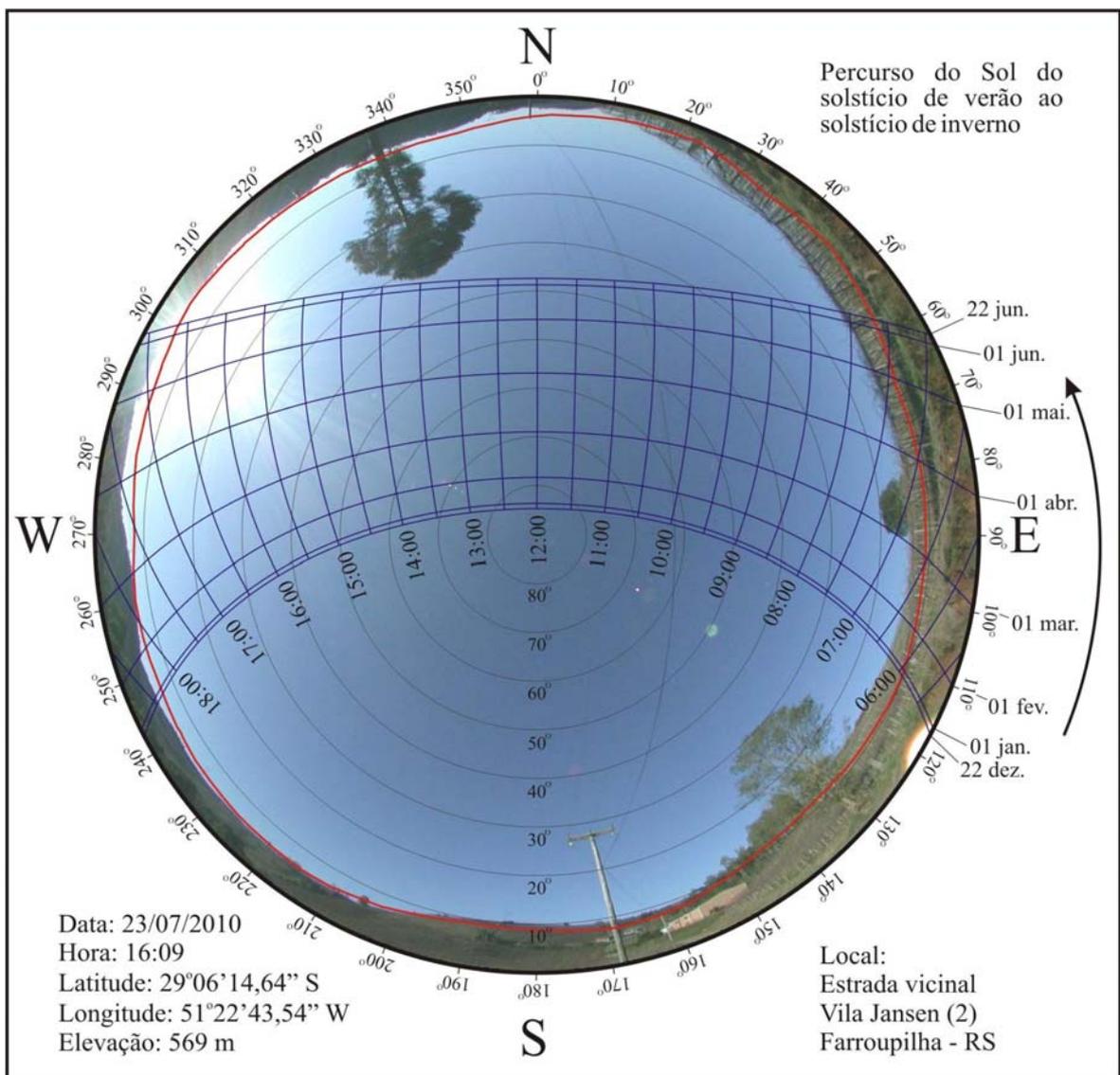


FIGURA 34. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 6, Farroupilha/RS.

A obstrução do horizonte estimada para o ponto 7 (FIGURA 35) subestima a fração aberta do céu em 5,09%. Neste local a obstrução pela vegetação é praticamente inexistente e o erro se deve à superestimativa do ângulo de obstrução do horizonte. A fotografia hemisférica mostra que os erros situam-se a nordeste, em torno do azimute de 50°, e a noroeste, em torno do azimute de 305°, em elevações próximas do ponto. Nas demais direções o terreno está corretamente representado no diagrama de obstrução. Os erros observados no diagrama afetam basicamente a radiação difusa.

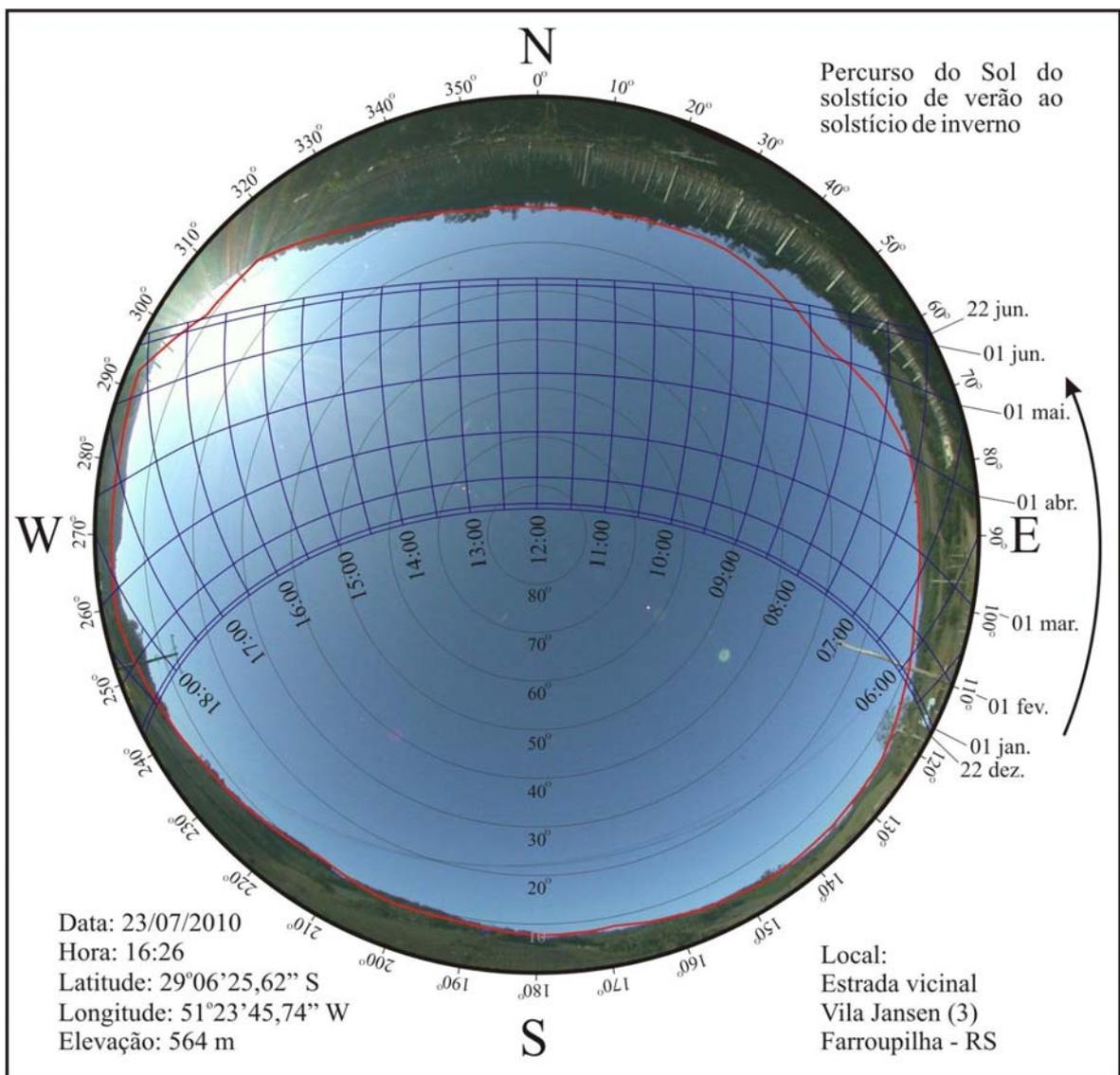


FIGURA 35. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 7, Farroupilha/RS.

A obstrução do horizonte estimada para o ponto 8 (FIGURA 36) subestima a fração aberta do céu em 2,89%. Neste local a obstrução causada pela vegetação é pequena e o erro se deve à superestimativa do ângulo de obstrução do horizonte. A fotografia hemisférica mostra que os erros distribuem-se a noroeste, principalmente em torno do azimute de 330°, em elevações próximas do ponto. Nas demais direções o terreno está corretamente representado no diagrama de obstrução. Os erros afetam basicamente a radiação difusa, pois se situam em direções que não coincidem com o percurso do Sol.

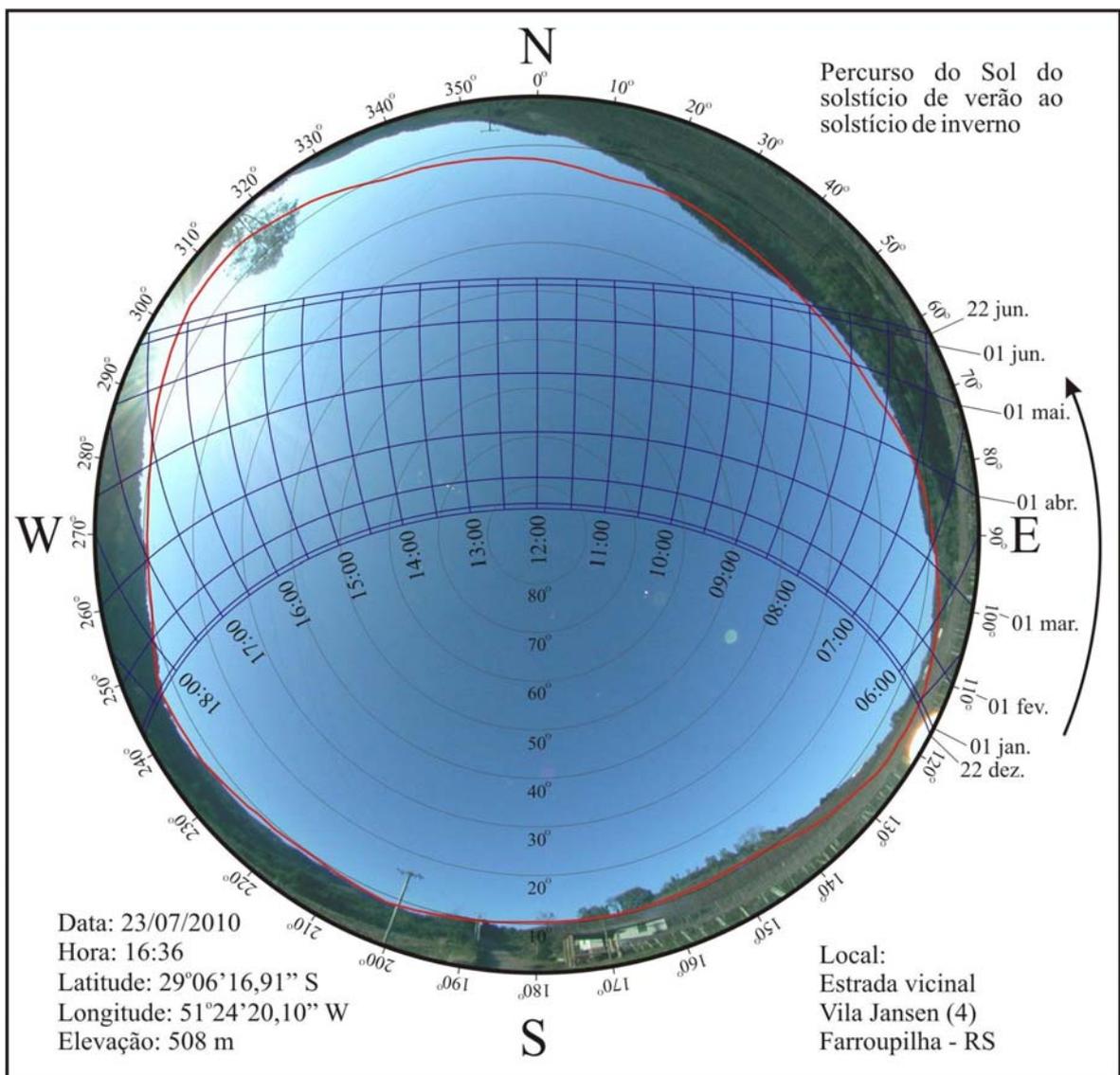


FIGURA 36. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 8, Farroupilha/RS.

A obstrução do horizonte estimada para o ponto 9 (FIGURA 37) superestima a fração aberta do céu em 2,4%. A fotografia hemisférica mostra que, na metade norte da abóbada, o erro se deve principalmente à presença de vegetação. Na direção sudeste, em torno do azimute de 130°, o erro se deve a uma superestimativa do ângulo do horizonte, enquanto a leste ocorreu uma subestimativa do horizonte efetivo. Os três erros se compensam, fazendo com que o erro de estimativa da fração aberta do céu seja baixo e afete basicamente a radiação difusa, uma vez que as direções dos erros não coincidem com o percurso do Sol

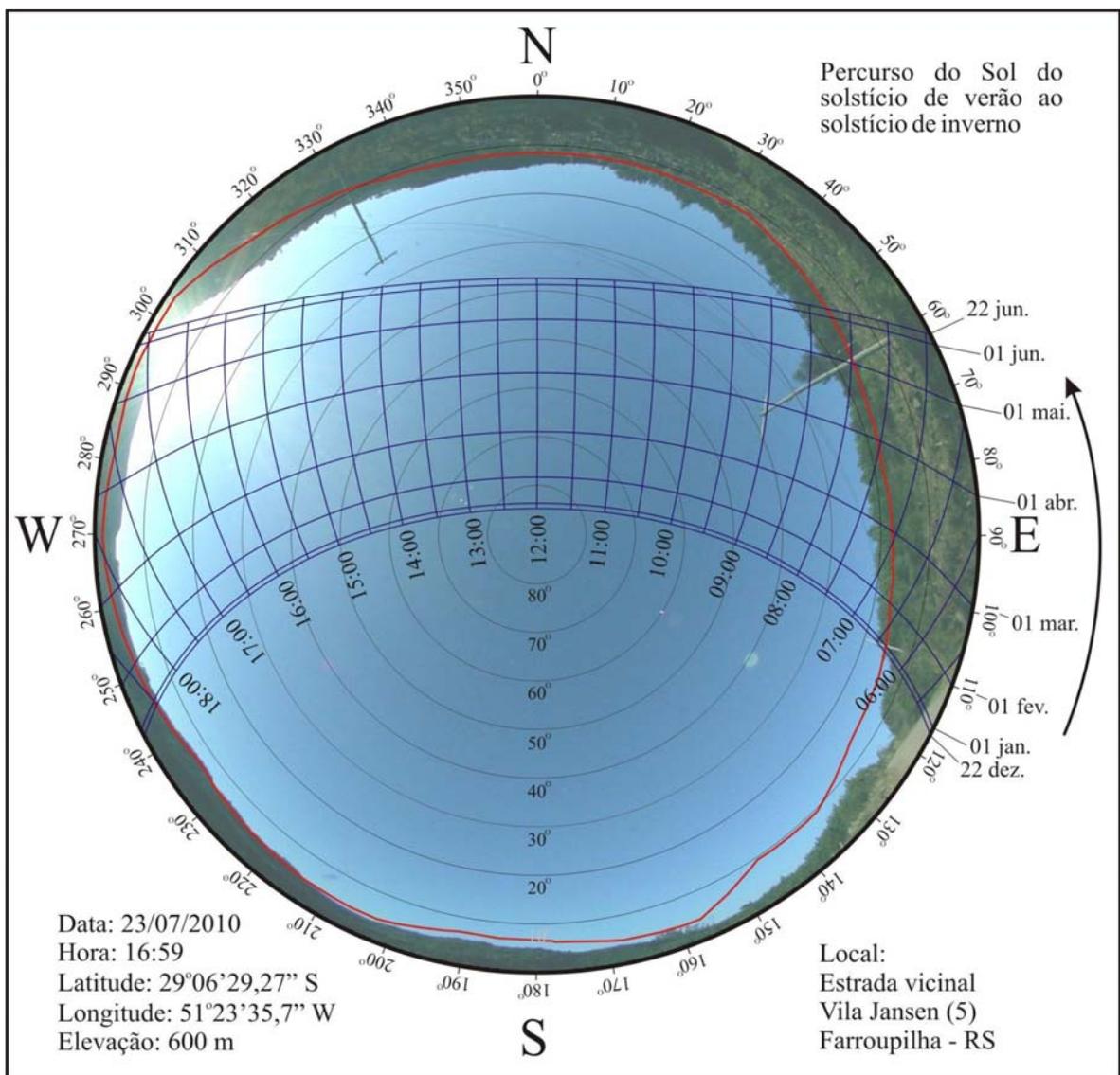


FIGURA 37. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 9, Farroupilha/RS.

A obstrução do horizonte estimada para o ponto 10 (FIGURA 38) subestima a fração aberta do céu em 0,96%. A obstrução pela vegetação é pequena, causada por duas árvores próximas, a leste, entre os azimutes de 83° e 97°, e o erro se deve principalmente à superestimativa do ângulo de obstrução do horizonte. A fotografia hemisférica mostra que os erros ocorrem principalmente na porção norte, em elevações próximas do ponto. Há uma pequena subestimativa do horizonte efetivo na direção sudeste, entre os azimutes de 115° e 125°. Os erros diminuem a duração da radiação direta no outono, inverno e primavera em apenas cerca de 15 min, afetando basicamente a radiação difusa.

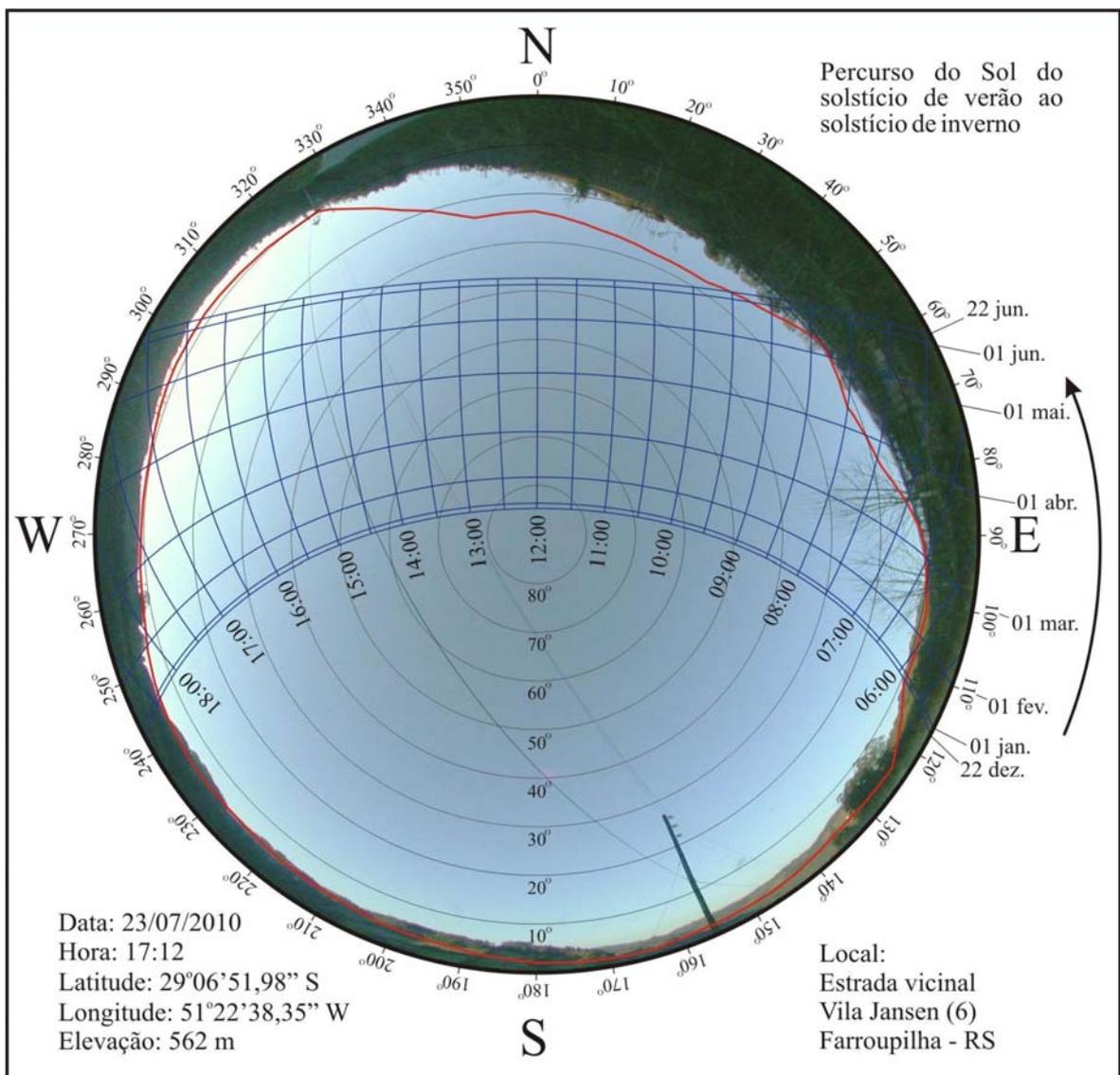


FIGURA 38. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 10, Farroupilha/RS.

A obstrução do horizonte estimada para o ponto 11 (FIGURA 39) superestima a fração aberta do céu em 7,48%. A fotografia hemisférica mostra que o erro se deve principalmente à presença de vegetação na direção sudoeste, entre os azimutes de 180° e 300°. Na direção sudeste, em torno do azimute de 135°, constata-se uma pequena superestimativa do ângulo do horizonte. Nas demais direções o terreno está corretamente representado no diagrama de obstrução. Os erros na obstrução calculada afetam tanto a radiação difusa quanto a radiação direta, com a vegetação bloqueando até 1 h diária de radiação direta em alguns períodos.

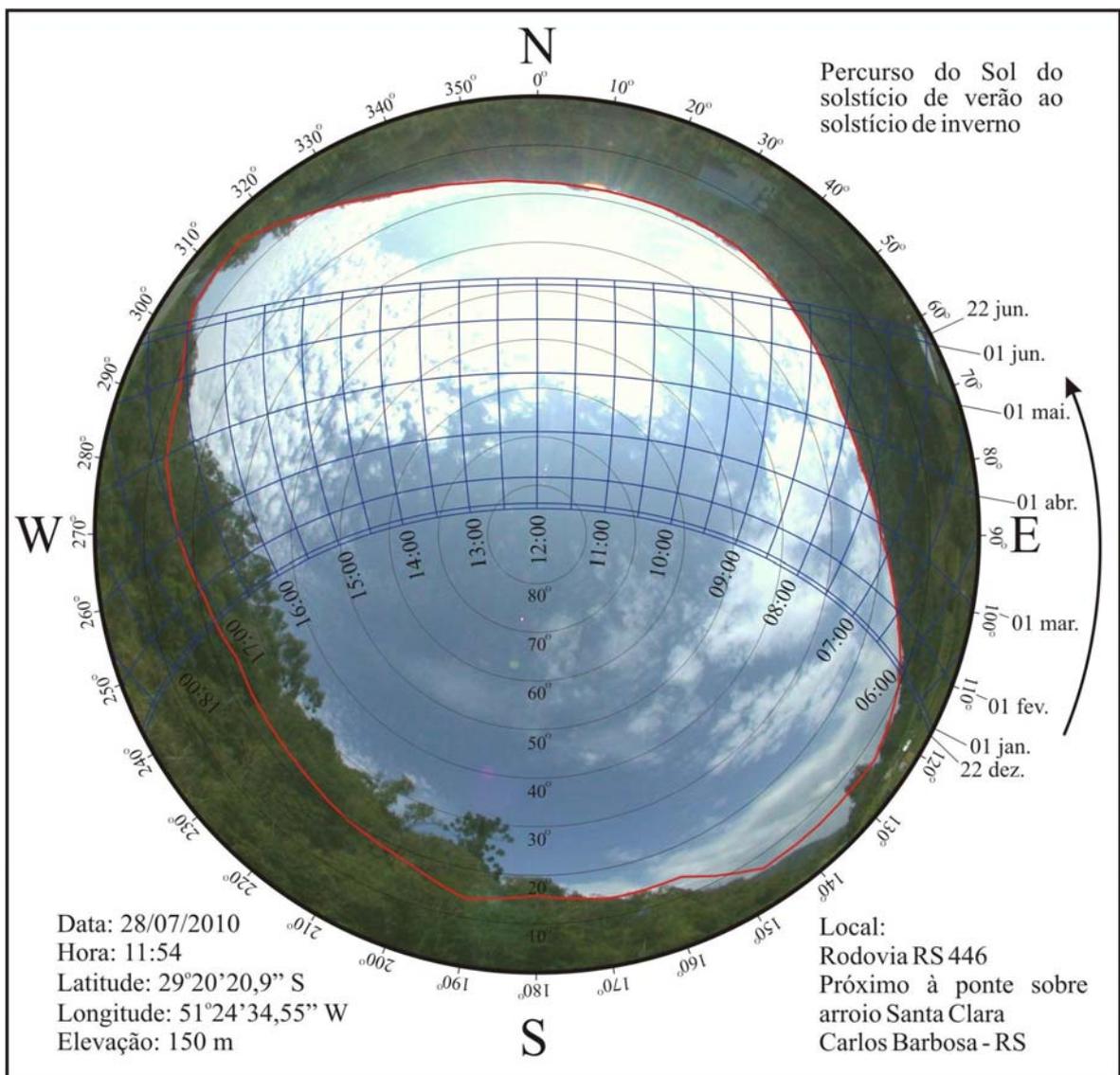


FIGURA 39. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 11, Carlos Barbosa/RS.

A obstrução do horizonte estimada para o ponto 12 (FIGURA 40) superestima a fração aberta do céu em 10,26%, o segundo maior erro entre os 16 pontos visitados. A fotografia hemisférica mostra que o erro deve-se principalmente à presença de vegetação na direção sudeste, entre os azimutes de 115° e 155°, e em quase toda a metade oeste da abóbada, entre os azimutes de 225° e 345°. Nas demais direções o terreno está corretamente representado no diagrama de obstrução. Os erros afetam tanto a radiação difusa quanto a radiação direta, com a vegetação bloqueando de 1 a 1,5 h diárias de radiação direta em alguns períodos.

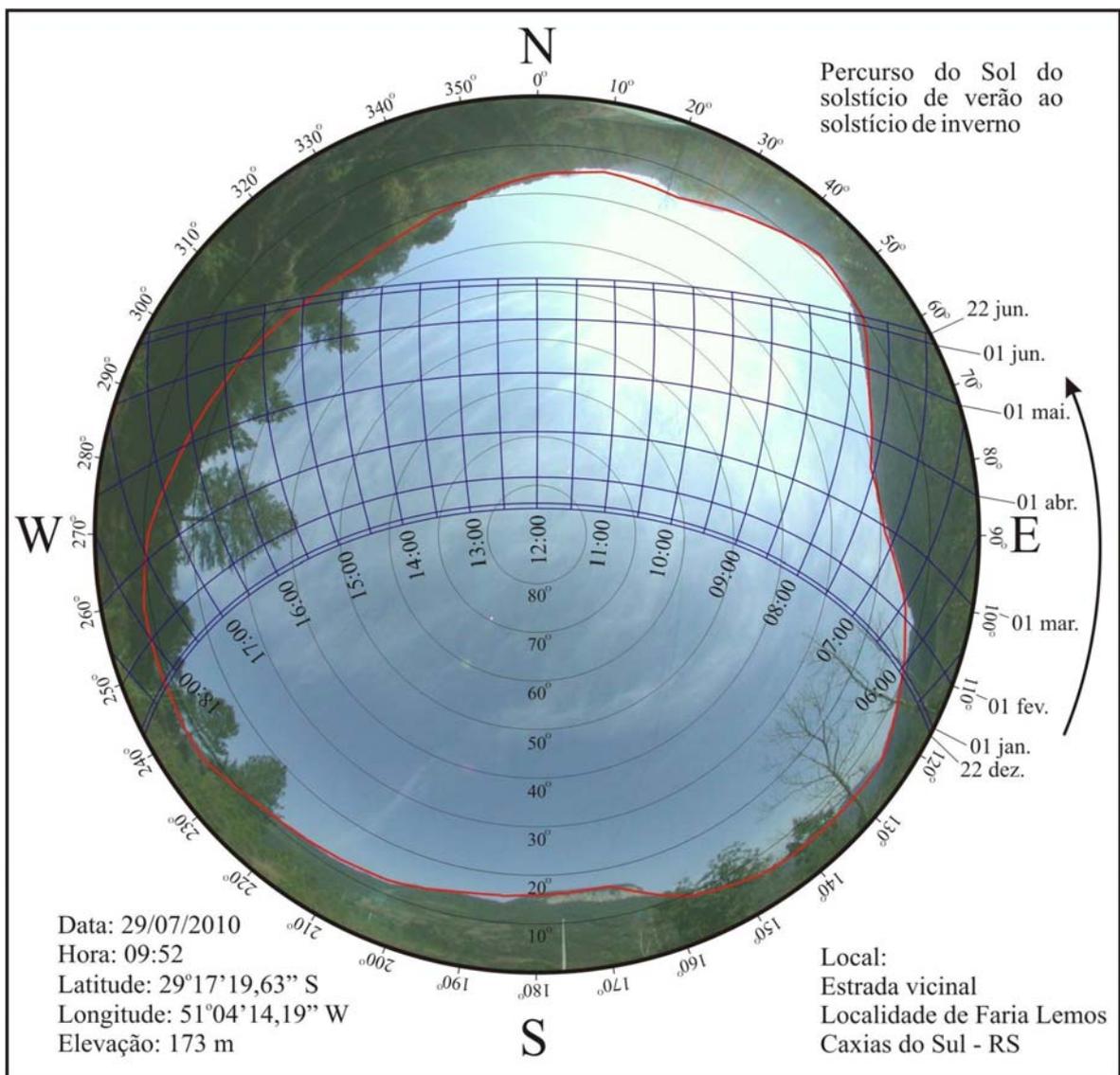


FIGURA 40. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 12, Caxias do Sul/RS.

A obstrução do horizonte estimada para o ponto 13 (FIGURA 41) superestima a fração aberta do céu em apenas 1,97%. A fotografia hemisférica mostra que o terreno está corretamente representado no diagrama de obstrução e que o erro se deve principalmente à presença de vegetação em diversas direções. Os erros na obstrução calculada afetam tanto a radiação difusa quanto a radiação direta, com a vegetação bloqueando cerca de 0,5 h diária de radiação direta no final da tarde em alguns períodos.

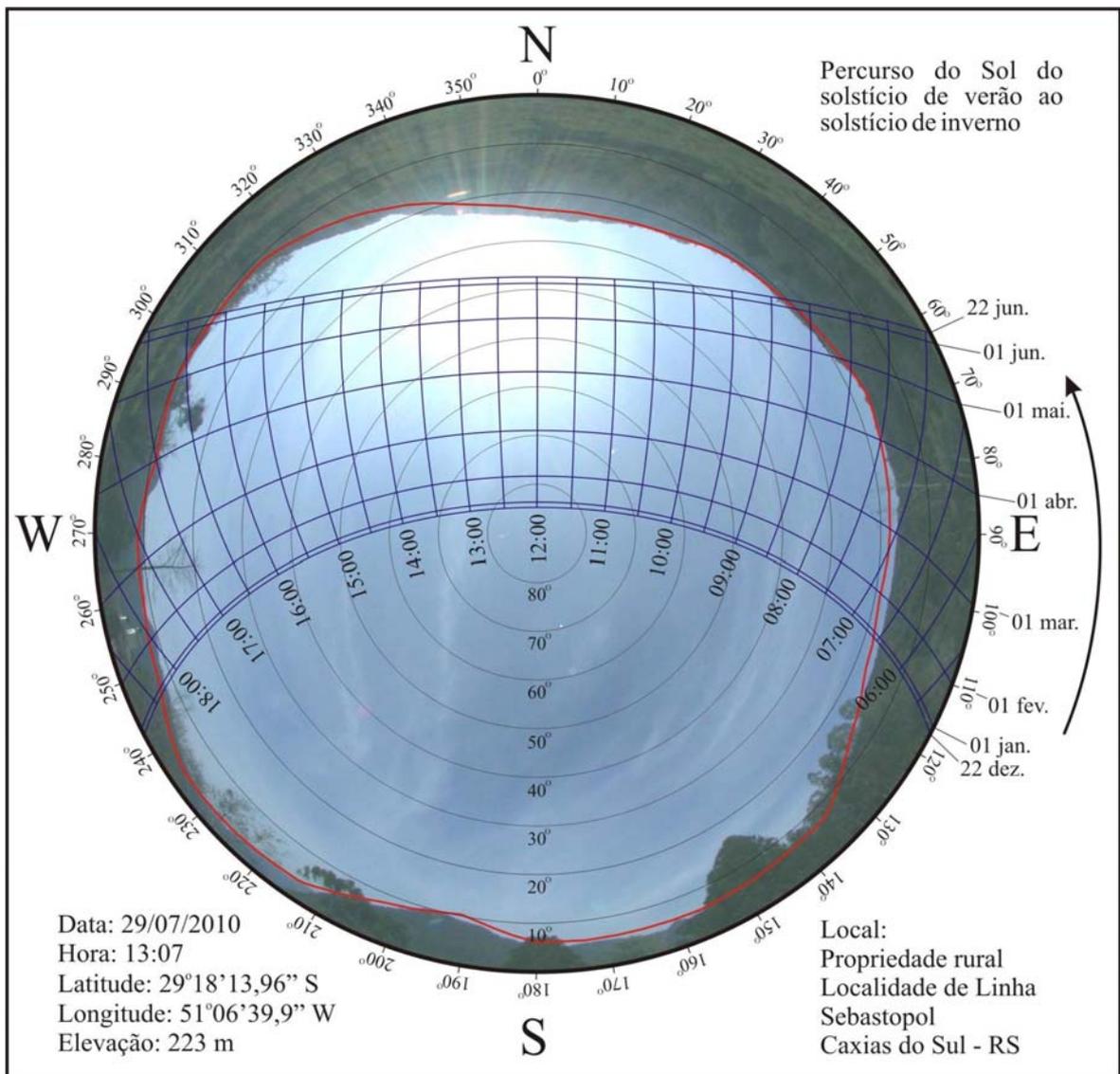


FIGURA 41. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 13, Caxias do Sul/RS.

A obstrução do horizonte estimada para o ponto 14 (FIGURA 42) superestima a fração aberta do céu em apenas 1,7%. Neste local a obstrução pela vegetação é pequena e o erro se deve à determinação do ângulo de obstrução do horizonte. A fotografia hemisférica mostra que o horizonte efetivo é subestimado na porção leste, entre os azimutes de 50° e 120°, e leste do ponto, entre os azimutes de 255° e 295°, e superestimado na porção norte da abóbada. Nas demais direções, o terreno está corretamente representado no diagrama de obstrução. Embora pequenos, os erros afetam tanto a radiação difusa quanto a direta, com cerca de 0,5 h diária a mais de radiação direta em alguns períodos.

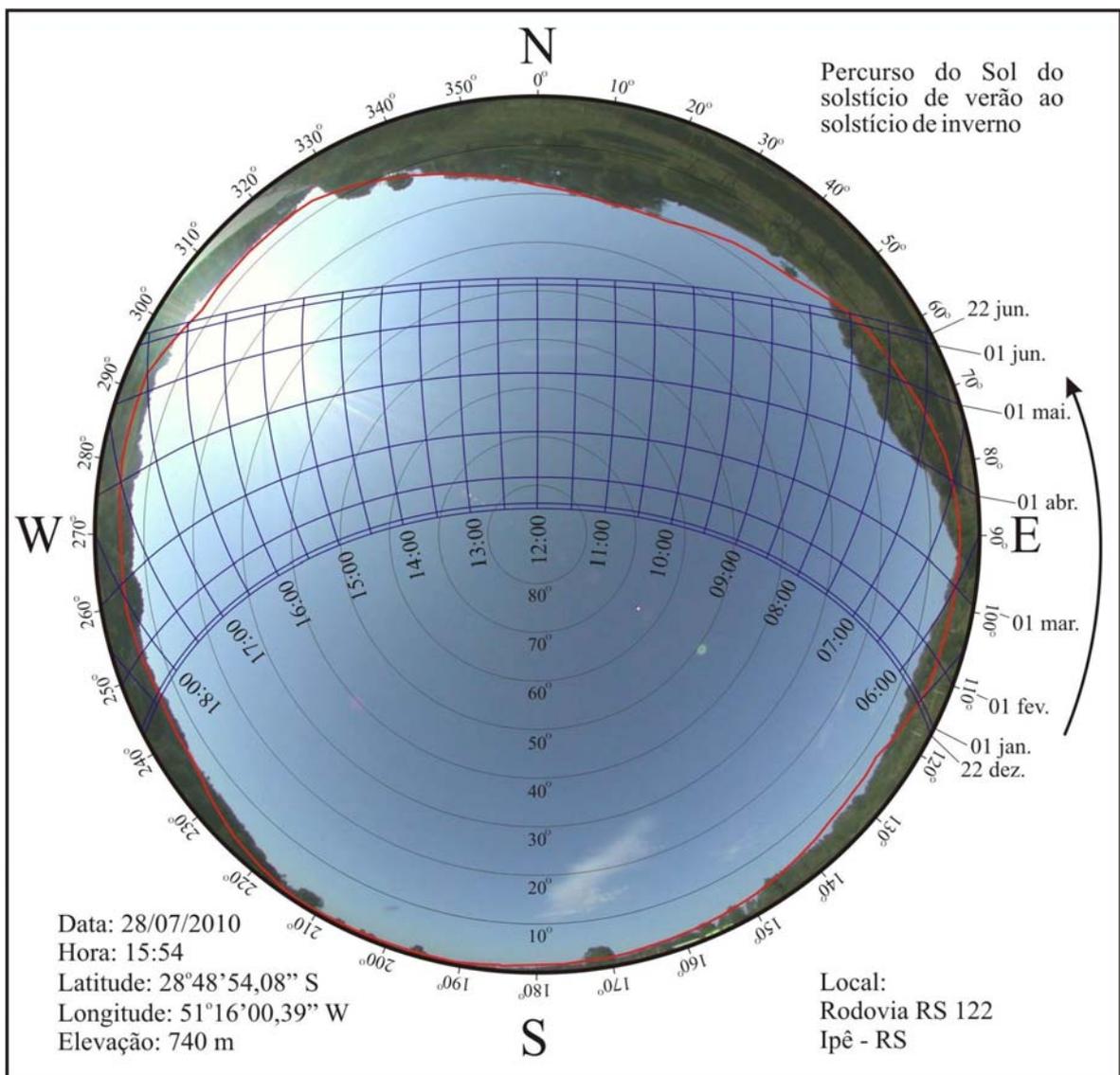


FIGURA 42. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 14, Ipê/RS.

A obstrução do horizonte estimada para o ponto 15 (FIGURA 43) superestima a fração aberta do céu em 33,62%, o maior erro entre os 16 pontos visitados. A fotografia hemisférica mostra que o terreno está corretamente representado no diagrama de obstrução e os erros se devem à presença de vegetação. Há uma floresta permanente na metade noroeste e indivíduos isolados de plátano na metade sudeste, os quais obstruem quase totalmente o horizonte em alguns períodos. Neste local os erros na obstrução calculada afetam drasticamente a radiação difusa e a radiação direta.

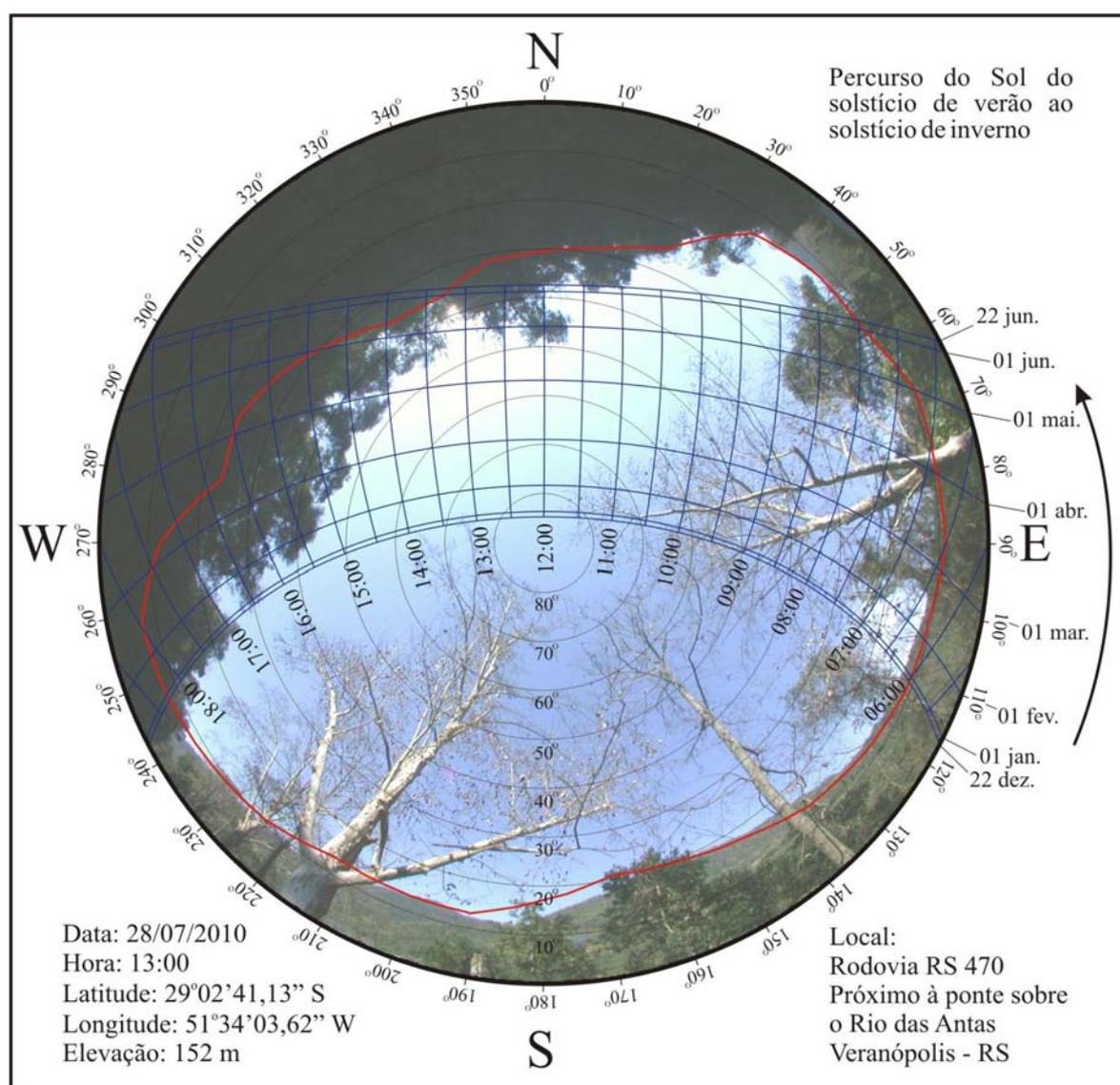


FIGURA 43. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 15, Veranópolis/RS.

A obstrução do horizonte estimada para o ponto 16 (FIGURA 44) superestima a fração aberta do céu em apenas 3,32%. A fotografia hemisférica mostra que o terreno está corretamente representado no diagrama de obstrução e os erros se devem à presença de vegetação em diversas direções, afetando principalmente a radiação difusa.

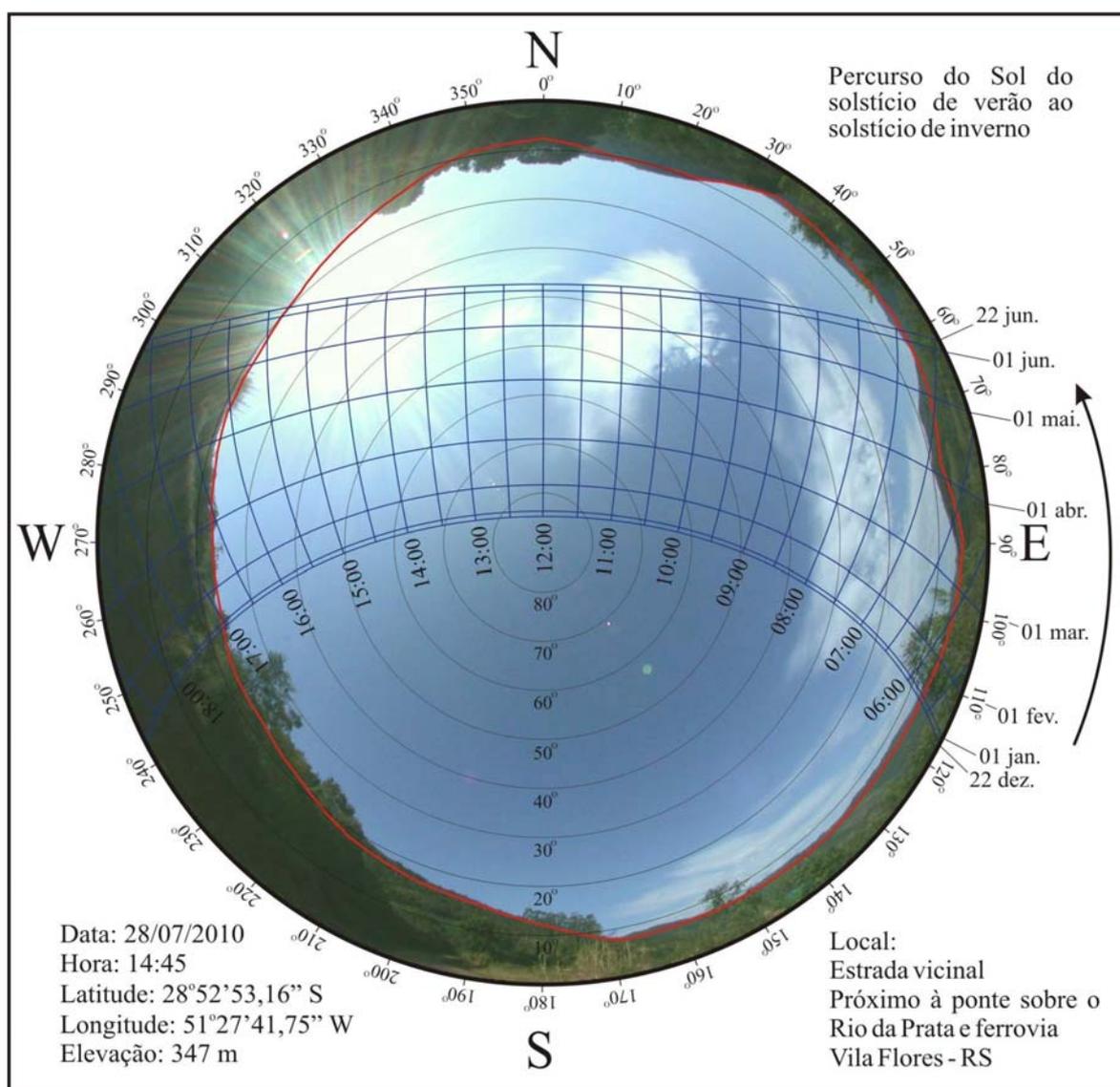


FIGURA 44. Diagramas de obstrução do horizonte e do percurso do Sol, do solstício de verão ao solstício de inverno, sobre fotografia hemisférica do ponto 16, Vila Flores/RS.

O diagrama de obstrução do horizonte permite identificar e quantificar a contribuição das direções do céu não obstruídas, tanto para a radiação solar direta quanto para a radiação difusa. Conhecer o grau de exatidão com o qual as direções obstruídas e

não obstruídas foram computadas é importante para interpretar tanto os registros das estações meteorológicas quanto os resultados das estimativas de radiação. Contudo, convém ressaltar que o efeito dos erros sobre as estimativas de radiação não é linear, pois aqueles relacionados à radiação direta impactam mais as estimativas do que erros que afetam apenas a radiação difusa.

A qualidade do diagrama de obstrução depende da acurácia e da resolução espacial do Modelo Digital de Elevação usado como base para o cálculo. Tovar-Pescador *et al.* (2006) usaram uma resolução espacial de 20 m para estimar a radiação solar global em áreas de relevo complexo na Espanha e verificaram diferenças pouco significativas entre a declividade e a orientação calculada e a real. Thompson *et al.* (2001) afirmam que o incremento da resolução espacial não está diretamente relacionado à melhoria nos resultados, pois ela deve ser compatível com a acurácia e a escala dos dados altimétricos originais. Kang *et al.* (2002) investigaram o efeito de escala na estimativa da irradiação em superfícies inclinadas na Coreia e constataram que a acurácia dos resultados está relacionada de forma não linear à resolução espacial do Modelo Digital de Elevação.

A resolução espacial de 30 m adotada neste estudo é compatível com as cartas da DSG, correspondendo a cerca de 0,6 mm na escala dos mapas originais em papel (1:50.000). Os resultados mostraram que o cálculo da obstrução do horizonte permite representar adequadamente o terreno, mas observa-se uma tendência de superestimativa da fração aberta do céu devido à impossibilidade de quantificar a obstrução causada pela vegetação. Apesar dessa tendência, o cálculo da obstrução representa uma melhoria substancial em relação a outros métodos que consideram apenas a declividade e a orientação na estimativa da irradiação solar em superfícies inclinadas. Isso é especialmente válido em áreas de relevo movimentado, como a Serra Gaúcha, pois permite contabilizar o bloqueio da radiação incidente causado pelo relevo, e concorda com o observado por Tovar-Pescador *et al.* (2006).

4.3. Estimativas de radiação solar global

A TABELA 7 apresenta as medidas de erro (MBE, MBE%, RMSE, RMSE%) e os coeficientes de determinação (r^2) entre a radiação solar global média decencial estimada com o algoritmo *Solar Analyst* e registrada nas quatro estações meteorológicas da Serra Gaúcha e entorno. A FIGURA 45 mostra a distribuição anual do MBE% e a FIGURA 46 ilustra a relação entre os valores de radiação global estimados e registrados.

Para facilitar a discussão dos resultados, no texto subsequente as relações de Erbs *et al.* (1982) e UO Solar Monitoring Lab (1999) e o coeficiente linear da equação de Ångstrom ajustado por Conceição & Mandelli (2006), usados para estimar K_d , serão referidos respectivamente como relações de ER, UO e CM. Da mesma maneira, a correção da transmitância direta para o zênite ($\tau_{dir(\theta)}$) pelo ângulo zenital médio será referida como $\theta\mu$, a correção pela média dos ângulos zenitais inferiores a 80° como $\theta\mu < 80^\circ$, e a correção pela média dos ângulos zenitais inferiores a 80° apenas no período de outono-inverno será referida como $\theta\mu < 80^\circ \varepsilon$.

TABELA 7. Medidas de erro e coeficiente de determinação entre a radiação solar global média decencial ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) estimada com o algoritmo *Solar Analyst*, a partir da fração difusa (K_d) obtida por três relações empíricas e três formas de correção da transmitância direta (τ_{dir}) para o zênite, e registrada em quatro estações meteorológicas na Serra Gaúcha e entorno.

Estimativa de K_d	*Correção de τ_{dir}	MBE	MBE%	RMSE	RMSE%	r^2
Erbs <i>et al.</i> (1982)	$\theta\mu$	0,29	8,52	2,84	19,62	0,7606
	$\theta\mu < 80^\circ$	-1,90	-9,33	3,06	21,17	0,8349
	$\theta\mu < 80^\circ \varepsilon$	-1,77	-4,75	2,24	15,44	0,8355
UO Solar Monitoring Lab (1999)	$\theta\mu$	0,01	6,22	2,77	19,13	0,7634
	$\theta\mu < 80^\circ$	-2,13	-11,19	3,19	22,01	0,8343
	$\theta\mu < 80^\circ \varepsilon$	-1,25	-6,26	2,30	15,90	0,8388
Conceição & Mandelli (2006)	$\theta\mu$	0,27	8,66	2,93	20,25	0,7718
	$\theta\mu < 80^\circ$	-1,91	-9,12	3,14	21,69	0,8446
	$\theta\mu < 80^\circ \varepsilon$	-1,08	-4,59	2,25	15,52	0,8511

* $\theta\mu$ = média de todos os ângulos zenitais, $\theta\mu < 80^\circ$ = média dos ângulos zenitais inferiores a 80° , $\theta\mu < 80^\circ \varepsilon$ = média de todos os ângulos zenitais na primavera-verão e dos ângulos zenitais inferiores a 80° no outono-inverno

Os dados da TABELA 7 mostram que o menor MBE foi obtido com a estimativa de Kd pela relação de UO, com $0,01 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, seguido de CM e de ER, respectivamente com $0,27$ e $0,29 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Em todas as três relações, a correção da transmitância direta por θ_{μ} resultou nos menores erros absolutos, com valores sempre positivos. A correção por $\theta_{\mu} < 80^{\circ}$ resultou nos erros mais elevados, porém negativos, com $-1,90 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para a relação de ER, seguida em ordem crescente de CM e UO, com $-1,91$ e $-2,13 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, respectivamente. A correção por $\theta_{\mu} < 80^{\circ}\epsilon$ resultou em valores intermediários de MBE para as três relações de Kd , mantendo a ordem anterior de magnitude.

Com relação o erro proporcional (MBE%), observa-se que a correção da transmitância direta por $\theta_{\mu} < 80^{\circ}\epsilon$ apresentou os valores mais baixos. O menor erro proporcional para a correção por $\theta_{\mu} < 80^{\circ}\epsilon$ foi obtido pela relação de CM, com $-4,59\%$, seguido de ER e UO, respectivamente com $-4,75\%$ e $-6,26\%$. A FIGURA 45 mostra que, durante o ano, em todos os casos testados, os erros de subestimativa concentram-se próximo ao verão e os de superestimativa próximo ao inverno, enquanto junto aos equinócios eles tendem a situar-se próximo de zero. A relação de CM para estimativa de Kd , combinada com a correção da transmitância direta para o zênite por $\theta_{\mu} < 80^{\circ}\epsilon$, apresenta a menor amplitude na distribuição anual dos valores de MBE%. Os erros proporcionais podem ser considerados satisfatórios para todas as situações, pois a magnitude é compatível com a precisão dos actinógrafos utilizados nas estações.

Quanto ao RMSE e ao RMSE%, os resultados da TABELA 7 mostram que os dois parâmetro apresentam a mesma tendência observada para MBE%. Porém, a magnitude dos valores entre as três relações para estimativa de Kd é muito próxima em todas as formas de correção da transmitância direta para o zênite. Os menores valores de RMSE e de RMSE% foram obtidos com a correção da transmitância direta por $\theta_{\mu} < 80^{\circ}\epsilon$, seguido da correção por θ_{μ} e por $\theta_{\mu} < 80^{\circ}$.

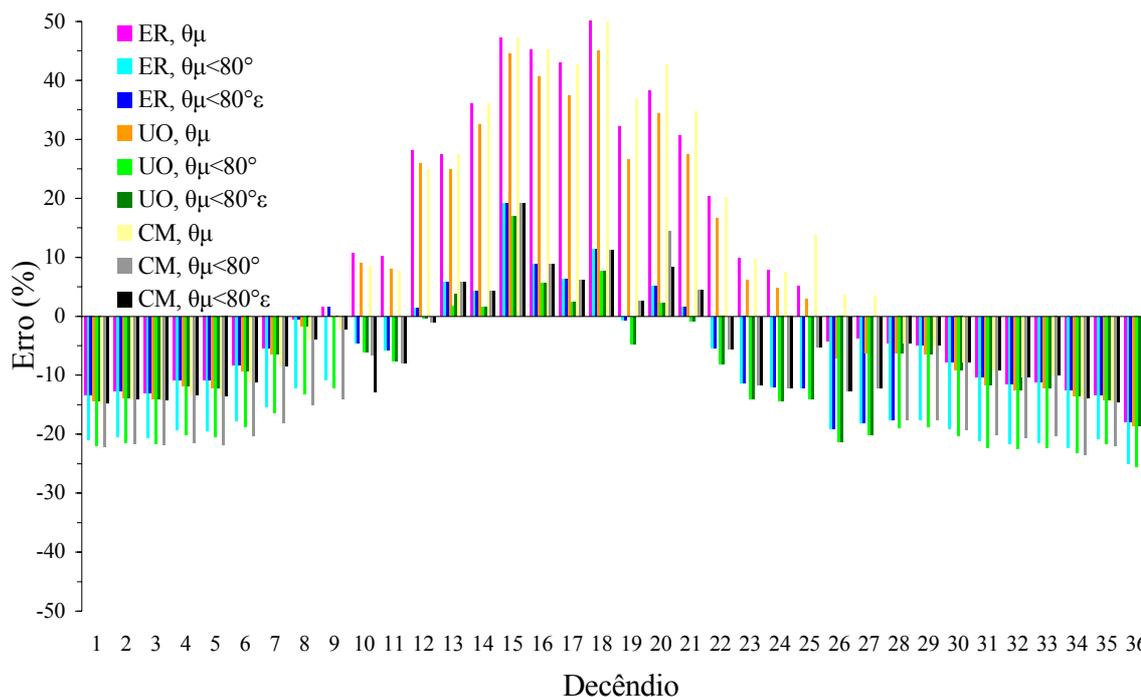


FIGURA 45. Erro médio proporcional (MBE%) entre a radiação solar global média decenal ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) estimada e registrada em quatro estações meteorológicas na Serra Gaúcha e entorno (ER = Erbs *et al.*, 1982; UO = UO Solar Monitoring Lab, 1999; CM = Conceição & Mandelli, 2006; θ_{μ} = média de todos os ângulos zenitais, $\theta_{\mu}<80^{\circ}$ = média dos ângulos zenitais inferiores a 80° , $\theta_{\mu}<80^{\circ}\epsilon$ = média de todos os ângulos zenitais na primavera-verão e dos ângulos zenitais inferiores a 80° no outono-inverno).

Segundo Bashahu (2003) e Dal Pai e Escobedo (2006), o MBE mede o erro sistemático e provê informação sobre o desempenho de um modelo em longo prazo. Um valor positivo indica superestimativa, enquanto um valor negativo indica subestimativa, e valores com sinais contrários se compensam. Já o RMSE descreve a dispersão dos dados e fornece informação quanto ao desempenho do modelo em curto prazo. Uma desvantagem é que alguns poucos valores discrepantes podem causar um aumento significativo em sua magnitude. Quanto menor MBE e RMSE, melhor a performance das estimativas, sendo desejável que ambos situem-se próximos de zero. Os valores proporcionais (MBE% e RMSE%), geralmente, são mais apropriados para expressar os erros, pois levam em conta a magnitude destes em relação à magnitude dos valores observados.

Os dados da TABELA 7 mostram que o coeficiente de determinação (r^2) entre os valores estimados e observados de radiação global, apresenta valores próximos entre as

três relações para estimativa de K_d para todas as formas de correção. A maior diferença é observada entre a correção da transmitância direta para o zênite por θ_μ e $\theta_\mu < 80^\circ$. Porém, a FIGURA 46 mostra que nos três métodos de estimativa de K_d a relação entre os valores estimados e observados tende a se aproximar mais de 1:1 com a correção da transmitância direta feita por $\theta_\mu < 80^\circ \varepsilon$.

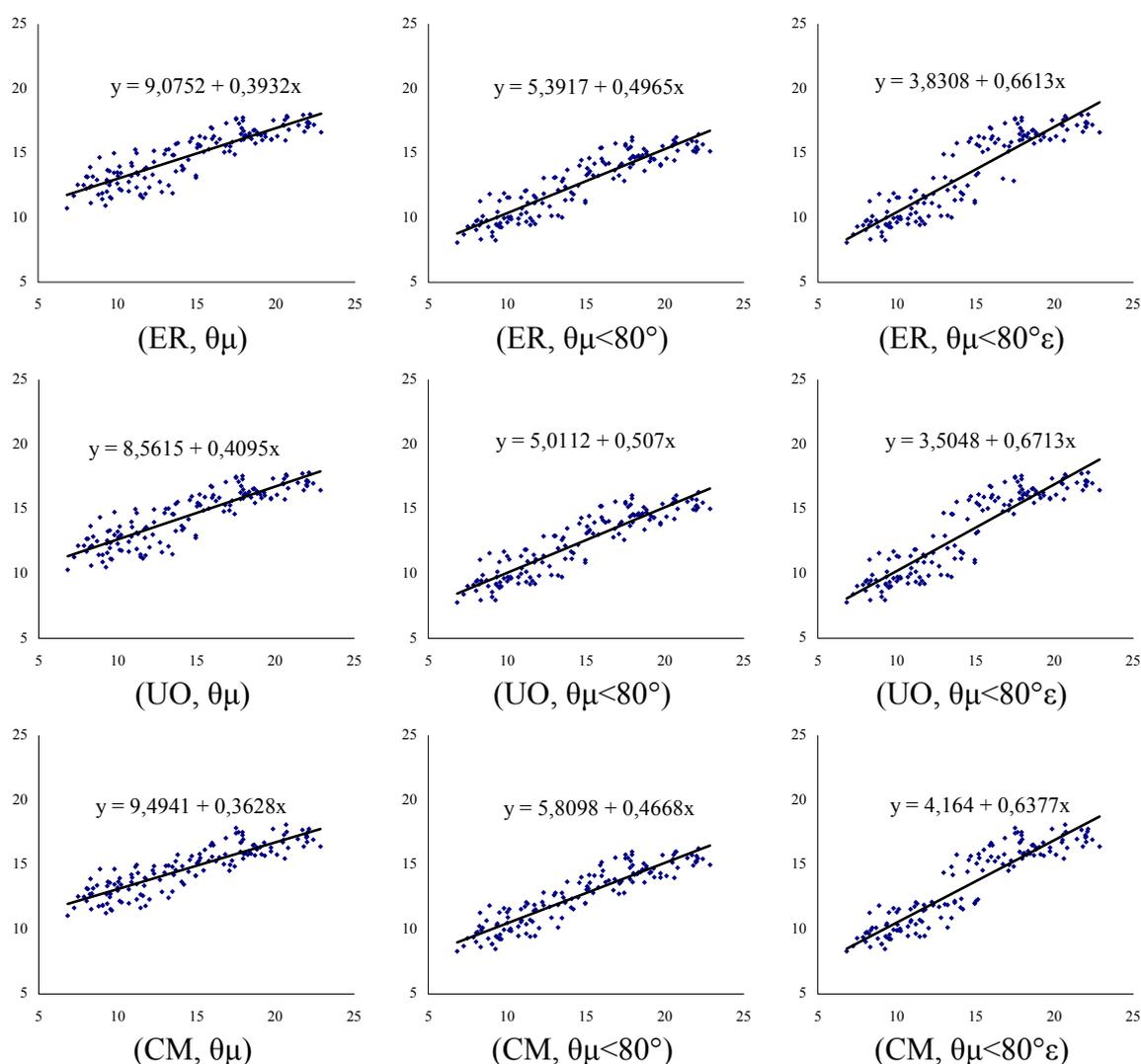


FIGURA 46. Relação entre a radiação solar global média decenal ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) estimada e registrada em quatro estações meteorológicas na Serra Gaúcha e entorno (ER = Erbs *et al.*, 1982; UO = UO Solar Monitoring Lab, 1999; CM = Conceição & Mandelli, 2006; θ_μ = média de todos os ângulos zenitais, $\theta_\mu < 80^\circ$ = média dos ângulos zenitais inferiores a 80° , $\theta_\mu < 80^\circ \varepsilon$ = média de todos os ângulos zenitais na primavera-verão e dos ângulos zenitais inferiores a 80° no outono-inverno).

A dispersão dos dados também mostra duas nuvens de pontos, uma em torno de valores mais elevados e outra em torno de valores mais baixos. A primeira corresponde aos dados das estações de Vacaria e de Veranópolis, enquanto a segunda corresponde às estações de Caxias do Sul e de Farroupilha (ver item 4.1.1). Isso sugere que essa forma de correção possibilitou uma estimativa da radiação global mais consistente para diferentes situações topográficas, já que cada estação se encontra em uma altitude diferente e apresenta um grau de obstrução do horizonte distinto.

Os resultados apresentados na TABELA 7, na FIGURA 45 e na FIGURA 46 mostram que as relações utilizadas para estimativa de K_d exercem menor influência nos resultados das estimativas do que a forma de correção da transmitância direta para o zênite. O melhor desempenho global foi obtido com a combinação entre a estimativa de K_d pela relação de CM e a correção da transmitância direta para o zênite por $\theta_{\mu} < 80^{\circ}\epsilon$, onde os valores de radiação global média decendial tendem a uma subestimativa em torno de 4,59%. Esse resultado concorda com o esperado, uma vez que a relação de CM é o único dos três métodos testados que representa especificamente as condições da atmosfera na área de estudo. Isso também sugere que o coeficiente linear da equação de Ångström é um estimador adequado para a fração difusa na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha. Como o coeficiente utilizado foi ajustado para partição mensal, é provável que resultados ainda melhores sejam obtidos caso seu ajuste seja realizado para dados decendiais, partição dos registros e das estimativas de radiação global realizadas.

Os resultados obtidos concordam parcialmente com os encontrados por outros autores que usaram o mesmo algoritmo em diversas condições topográficas e atmosféricas. Batlles *et al.* (2008), por exemplo, obtiveram RMSE% de 10%, MBE% em torno de 7% e coeficiente de determinação de 0,93, mas tiveram que excluir os dados de uma das 25 estações usadas como referência, devido à elevada discrepância entre os valores estimados e observados. Os autores também observaram a mesma tendência constatada neste estudo,

de superestimativa durante o inverno e de subestimativa durante o verão. Tovar-Pescador *et al.* (2006), por outro lado, obtiveram coeficiente de determinação de 0,75 e observaram uma tendência de superestimativa da radiação global ao longo de todo o ano. Ruiz-Arias *et al.* (2009) obtiveram MBE% de -25,71% e RMSE% de 31,10% e coeficiente de determinação de 0,91.

4.3.1. Possíveis causas de erros

Os resultados apresentados na TABELA 7, na FIGURA 45 e na FIGURA 46 são produto do efeito combinado dos parâmetros utilizados para caracterizar as propriedades ópticas da atmosfera, dos parâmetros topográficos derivados do Modelo Digital de Elevação e do algoritmo empregado para estimar a radiação incidente. Ao interpretá-los é necessário ter em conta que a maneira ou a magnitude com a qual cada um dos três fatores acima interfere na estimativa não pode ser discriminada. Um alto grau de concordância entre os valores estimados e registrados indica que os valores dos parâmetros e o algoritmo foram provavelmente adequados, mas a recíproca não é necessariamente verdadeira porque uma concordância baixa pode resultar da inadequação de apenas um ou de todos os fatores. Todavia, é possível levantar hipóteses sobre as possíveis causas relacionadas aos erros das estimativas.

4.3.1.1. Erros relacionados ao algoritmo

4.3.1.1.1 Uso de valor médio para propriedades ópticas da atmosfera

Ruiz Arias *et al.* (2009) descreveram duas abordagens para caracterizar o estado da atmosfera em modelos de radiação, a partir de dados observados: estimar os parâmetros para alimentar o modelo, antes de executá-lo, ou corrigir as estimativas posteriormente. Alguns algoritmos implementados em SIG, como o *Solar Analyst* (Fu & Rich, 2000) e o *Solei-32* (Mészároš & Miklánek, 2006), adotam a primeira abordagem, enquanto outros, como o *r.sun* (Hofierka & Šúri, 2002) e o SRAD (Wilson & Gallant, 2000) adotam a segunda. Em ambas as alternativas, o uso de um valor médio para caracterizar a atmosfera

leva inevitavelmente a generalizações que podem afetar a confiabilidade dos resultados. O grau com que isso ocorre varia de local para local, em função da complexidade e da variabilidade temporal e espacial das condições atmosféricas (Šúri *et al.*, 2007).

Ruiz Arias *et al.* (2009) compararam os quatro algoritmos acima para estimar a radiação solar global em superfícies de topografia complexa no parque de Sierra Nevada, na Espanha. A confiabilidade das estimativas dos algoritmos do *Solar Analyst* e SRAD tendeu a decrescer no outono e no inverno, enquanto a performance do *r.sun* e do *Solei-32* se manteve praticamente constante ao longo do ano. A razão apontada é o incremento na complexidade atmosférica da região durante o outono e inverno, que dificulta a parametrização da atmosfera nos dois primeiros algoritmos, nos quais um único valor médio é usado. Como consequência, seu uso não é recomendado em áreas com grandes extensões. Os algoritmos *r.sun* e *Solei-32* permitem o uso de uma grade, na qual a variabilidade espacial dos parâmetros pode ser melhor descrita. Porém, isso exige uma densidade e uma frequência de dados observados que não estão disponíveis para a maioria das regiões.

4.3.1.1.2 Desconsideração do albedo

A tendência de subestimativa também pode estar relacionada ao fato de o algoritmo utilizado não considerar a contribuição do albedo. Conforme Dubayah & Loechel (1997), o fluxo de radiação global que incide em uma superfície inclinada pode ter três diferentes origens: a irradiância direta proveniente do Sol, a irradiância difusa proveniente do céu e a irradiância direta e difusa refletida pela vizinhança (FIGURA 47). A magnitude desta última é função do albedo, um dado raramente disponível com alta resolução espacial, em virtude da dificuldade de sua obtenção e do elevado grau de incerteza envolvido na sua determinação (Hantzsche *et al.*, 2005).

Francelino *et al.* (2007) usaram o *Solar Analyst* para estimar a radiação solar global e relacioná-la com a distribuição espacial das comunidades vegetais, em uma área na ilha

Rei George, na Antártida. Contudo, os parâmetros necessários para caracterizar as propriedades ópticas da atmosfera (fração difusa e transmitância direta) foram arbitrados e os resultados das estimativas não foram testados em comparação com dados medidos. Para as condições da região, onde a porção da radiação incidente refletida pelas superfícies cobertas de gelo e de neve é elevada, os autores sugerem que o fato de não considerar o albedo é uma das causas da discrepância observada entre a radiação solar global estimada e a distribuição de algumas comunidades vegetais.

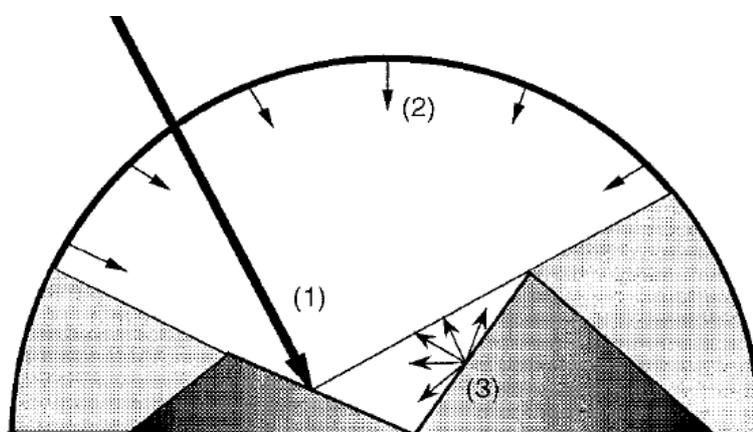


FIGURA 47. As três origens da radiação solar global incidente em uma superfície inclinada: (1) irradiância direta oriunda do Sol; (2) irradiância difusa oriunda do céu, onde parte da abóbada pode estar obstruída; (3) irradiância direta e difusa refletida pela vizinhança (Dubayah & Loechel, 1997).

O albedo apresenta grande variabilidade de local para local, sendo altamente dependente do ângulo de incidência da radiação e do tipo de cobertura da superfície. Em uma mesma área, os valores de albedo variam continuamente no tempo e de maneira distinta para cada tipo de cobertura do solo, em função do desenvolvimento das culturas e da fenologia da vegetação natural. A variação espacial e temporal do albedo pode ser estimada através de imagens de satélite, mas os dados obtidos apresentam uma baixa resolução espacial, usualmente com *pixels* de 1 quilômetro ou mais (Dubayah & Loechel, 1997; Meyer *et al.*, 2003).

Para levar em conta o albedo na estimativa da radiação incidente seria necessário dispor de um mapa de uso e cobertura do solo para toda a área de interesse, com a mesma

resolução espacial do Modelo Digital de Elevação (30 m, neste caso). A partir desse mapa, o valor do albedo para cada tipo de cobertura do solo teria de ser determinado de alguma maneira em cada decêndio, a fim de concordar com a partição temporal dos dados de radiação. Dadas as dificuldades de obtenção e as incertezas envolvidas, é possível que os erros devido à desconsideração do albedo sejam comparáveis àqueles resultantes do uso de valores generalizados no tempo e no espaço.

4.3.1.2. Erros relacionados aos parâmetros atmosféricos

4.3.1.2.1 Superestimativa da fração difusa

As relações de ER e UO usadas para estimar a fração difusa a partir do índice de claridade (Kt) baseiam-se no modelo isotrópico de Liu & Jordan (1960), que não caracteriza plenamente o efeito da atmosfera em condições de céu claro ou parcialmente nublado. Segundo Scola *et al.* (2003), nessas condições a radiação difusa apresenta um padrão anisotrópico, tornando-se necessário que a correção contemple mais que a simples correção geométrica. Como os valores médios decendiais de Kt correspondem a condições de céu parcialmente nublado, uma hipótese possível é que a fração difusa tenha sido superestimada. Como consequência, ocorre uma subestimativa da radiação global decorrente de uma subestimativa da transmitância direta, que é calculada por diferença a partir de Kd . Por outro lado, o coeficiente linear da equação de Ångström, que não assume o mesmo pressuposto, resultou em valores similares de Kd (ver item 4.1.2), o que contraria essa hipótese.

Outra possibilidade é o efeito da média. Assim como ocorre com a determinação do valor de um parâmetro para toda a área de estudo, o uso de um valor médio para caracterizar o estado da atmosfera ao longo de um determinado período também implica em generalizações. O cálculo de médias sempre introduz uma suavização, que tende a ser mais perceptível à medida que aumenta a variabilidade dos dados (Šúri *et al.*, 2007). Nesse caso os valores obtidos para Kd , pelos três métodos utilizados, concordam parcialmente

com Bindi *et al.* (1992), que observaram tendência de redução nas diferenças entre métodos com o uso de médias, mas isso não permite conclusões acerca do sentido dos erros nas estimativas.

4.3.1.2.2 Correção da transmitância direta

A transmitância direta é altamente sensível à presença de nuvens, o que a torna um parâmetro de difícil determinação, razão pela qual frequentemente é derivada de forma indireta (Ruiz-Arias *et al.*, 2009) como feito neste estudo. Os resultados mostram que a correção da transmitância direta para o zênite é crítica para melhorar a acurácia das estimativas de radiação global em superfícies de topografia heterogênea com o algoritmo *Solar Analyst*, porém restam questões sobre a maneira mais adequada de efetuar essa correção, principalmente com relação ao cálculo do ângulo zenital médio do período.

O limite de 10° de elevação solar sugerido por Gardner & Nadeau (1991), para inclusão no cálculo do ângulo zenital médio, foi determinado para latitudes elevadas e para condições em que a contribuição do albedo é alta, devido à reflexão pelo gelo e pela neve. Na latitude da Serra Gaúcha a ocorrência de ângulos de elevação solar baixos é mais frequente durante o inverno, quando o Sol atinge a máxima declinação. Isso explica, em parte, a melhor concordância entre as estimativas de radiação global e os dados medidos quando a transmitância direta é corrigida com a média dos ângulos zenitais inferiores a 80° apenas no período de outono-inverno. Todavia, como as condições de cobertura da superfície e as propriedades atmosféricas da região da Serra Gaúcha são diferentes, convém que o limite da elevação solar e a forma de efetuar a correção da transmitância direta sejam estudados com maior profundidade.

Por último, conforme sugerido por Batlles *et al.* (2008), há que se considerar também a possibilidade de a fração difusa e a transmitância direta serem insuficientes para representar plenamente as propriedades ópticas da atmosfera para a região da Serra Gaúcha. Neste caso, outros algoritmos para estimativa de radiação solar global em

superfícies de topografia heterogênea devem ser avaliados, uma vez que o *Solar Analyst* emprega apenas estes dois parâmetros.

4.3.1.2.3 Partição temporal

A partição temporal pode ser uma fonte de erro à medida que o algoritmo utilizado considera que as condições da atmosfera, representadas pela fração difusa e pela transmitância direta, são constantes durante toda a duração de cada decêndio. Evidentemente, isso não corresponde à realidade, pois um mesmo índice de claridade (Kt) pode ser resultado de várias combinações de grau e de duração da cobertura de nuvens. O mesmo vale para o coeficiente linear da equação de Ångstrom. Assim, além da suavização pela média, a fração difusa, e conseqüentemente a transmitância direta, também apresenta um grau de incerteza decorrente da variabilidade temporal.

Os resultados obtidos por Tovar-Pescador *et al.* (2006), Battles *et al.* (2008) e Ruiz-Arias *et al.* (2009) parecem corroborar essa hipótese. Os autores empregaram o *Solar Analyst* e o mesmo procedimento deste estudo para estimar a radiação global em superfícies com topografia heterogênea, porém com partição diária. Os resultados apresentaram uma tendência de superestimativa quando comparados com registros de estações meteorológicas de superfície, ao contrário do verificado neste estudo com partição decendial.

O efeito da partição temporal sobre os parâmetros que caracterizam as propriedades atmosféricas em modelos para estimar a radiação incidente em superfícies com topografia heterogênea deve ser investigado com maior profundidade. É provável que o uso de dados com partição diária possibilite uma melhor caracterização da variabilidade das condições atmosféricas, obtendo estimativas mais acuradas da radiação incidente. Neste caso, as médias para outras partições podem ser geradas posteriormente a partir das estimativas diárias. O inconveniente é o tempo de processamento exigido, que seria 10 a 11 vezes maior que em estimativas feitas diretamente para períodos decendiais, por exemplo.

4.3.1.3. Erros relacionados aos parâmetros topográficos

Segundo Chrysoulakis *et al.* (2004), a confiabilidade das estimativas de radiação global em superfícies com topografia heterogênea depende das incertezas relacionadas ao Modelo Digital de Elevação utilizado. O erro introduzido no cálculo da irradiância solar para uma superfície inclinada depende da acurácia na determinação da sua inclinação e orientação, bem como da obstrução do horizonte. Ruiz-Arias *et al.* (2009) verificaram que o efeito da resolução espacial do Modelo Digital de Elevação tende a se acentuar com o aumento da complexidade da topografia. As diferenças entre estimativas a partir de Modelos Digitais de Elevação com diferentes resoluções foram maiores em relevos mais acidentados.

O Modelo Digital de Elevação utilizado neste estudo foi gerado por interpolação a partir de dados cartográficos na escala 1:50.000, cuja acurácia vertical situa-se em torno de 10 m. A resolução espacial adotada de 30 m é compatível com a escala e a acurácia do material original, mas a exatidão do produto da interpolação não é conhecida, porque não foi realizada uma análise comparativa com a altitude real observada no terreno. Contudo, o método de interpolação e a resolução espacial do Modelo Digital de Elevação são comparáveis aos empregados por Tovar-Pescador *et al.* (2006), Batlles *et al.* (2008) e Ruiz-Arias *et al.* (2009), que não detectaram limitações ou restrições relacionadas à determinação das variáveis topográficas necessárias ao cálculo da radiação incidente em superfícies de topografia complexa com o *Solar Analyst*.

Bonk (2007) considera que avaliar a qualidade de um Modelo Digital de Elevação é uma tarefa complexa, pois se deve considerar tanto a exatidão (grau com o qual a altitude no modelo se aproxima do valor real) quanto a aptidão do modelo (grau com o qual ele possibilita a determinação correta das variáveis topográficas desejadas). Embora não tenha sido feita uma avaliação, os resultados obtidos na verificação do cálculo da obstrução do horizonte (ver item 4.2) sugerem que o Modelo Digital de Elevação teve pouca

tendência de superestimativa, o esperado é que a radiação global também seja superestimada, porque a duração do brilho solar e o tamanho da abóbada que contribui com radiação difusa, considerados no modelo, tendem a ser maiores que o real.

Ruiz-Arias *et al.* (2009) também constataram que a qualidade do Modelo Digital de Elevação, em especial a resolução espacial, é mais importante em condições de céu claro, quando as características topográficas influenciam fortemente a radiação incidente. Em condições de céu nublado ou parcialmente nublado esse efeito tende a diminuir porque a radiação difusa exerce maior importância que a radiação direta. Nestas condições a fração aberta do céu pode ser mais importante que a inclinação e a orientação da superfície. Os valores da fração difusa obtidos para a zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha (ver item 4.1.2) correspondem a condições de céu parcialmente nublado. Portanto, eventuais incertezas no Modelo Digital de Elevação tendem a ter menor impacto sobre as estimativas da radiação incidente em superfícies com diferentes situações topográficas.

4.4. Mapas de radiação e insolação

A estimativa de radiação solar incidente em superfícies com topografia heterogênea, usando como parâmetros a fração difusa e a correção da transmitância direta para o zênite com o melhor ajuste na etapa de verificação, resultou em 144 mapas individuais. Esse total está dividido em três conjuntos de mapas, com os resultados do cálculo da radiação global, da radiação direta e da radiação difusa, além de um conjunto adicional com a estimativa da insolação.

Cada conjunto contém 36 mapas, referentes às estimativas para os diferentes decêndios do ano. Todos os mapas cobrem a zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha e o seu entorno, com uma resolução espacial de 30 m, conforme descrito no item 3.3.4. Nos mapas de radiação global, de radiação direta e de radiação difusa, cada *pixel* expressa a

energia acumulada (irradiação) no período, em MJ.m^{-2} , enquanto na insolação o valor de cada *pixel* representa a duração do brilho solar, em horas.

O mapa de radiação solar global anual (FIGURA 48), obtido pela soma dos 36 mapas decendiais estimados de radiação global, integra, em cada *pixel*, todos os efeitos topográficos e das propriedades da atmosfera ao longo do ano. Observa-se uma amplitude considerável na distribuição da radiação global anual sobre a área de estudo, com extremos que variam de aproximadamente 425 MJ.m^{-2} (preto) a 5.045 MJ.m^{-2} (branco). A distribuição espacial é altamente heterogênea, consequência da variabilidade introduzida pela topografia complexa da região.

Os maiores valores de radiação solar global anual ocorrem nas superfícies com topografia plana e suave e em altitudes mais elevadas (cores claras), o que é esperado, já que nesses locais a obstrução do horizonte e a espessura da camada atmosférica são menores. Essa condição predomina na região fisiográfica dos Campos de Cima da Serra e ao longo do divisor de águas entre as bacias dos rios Caí e Taquari/Antas. Destacam-se com maior extensão de superfícies nessa situação os municípios de Farroupilha, Flores da Cunha, Campestre da Serra, Ipê, Nova Prata e Vila Flores, além da porção norte de Canela e de Caxias do Sul.

As áreas com menor disponibilidade anual de radiação global (cores escuras na FIGURA 48) estão associadas às encostas dos vales dos rios Caí e Taquari/Antas e de seus afluentes, bem como de afluentes do rio dos Sinos, na porção sul de Canela e de Gramado. Nestas áreas a variação no ângulo de incidência, determinado pela declinação do Sol e pela inclinação e orientação da superfície, e a obstrução do horizonte, são os fatores que dominam o regime de radiação incidente ao longo do ano. As planícies também apresentam valores menores de radiação global anual. Porém, neste caso, a causa está mais relacionada à atenuação da radiação incidente causada pela camada atmosférica mais espessa, em virtude da menor altitude.

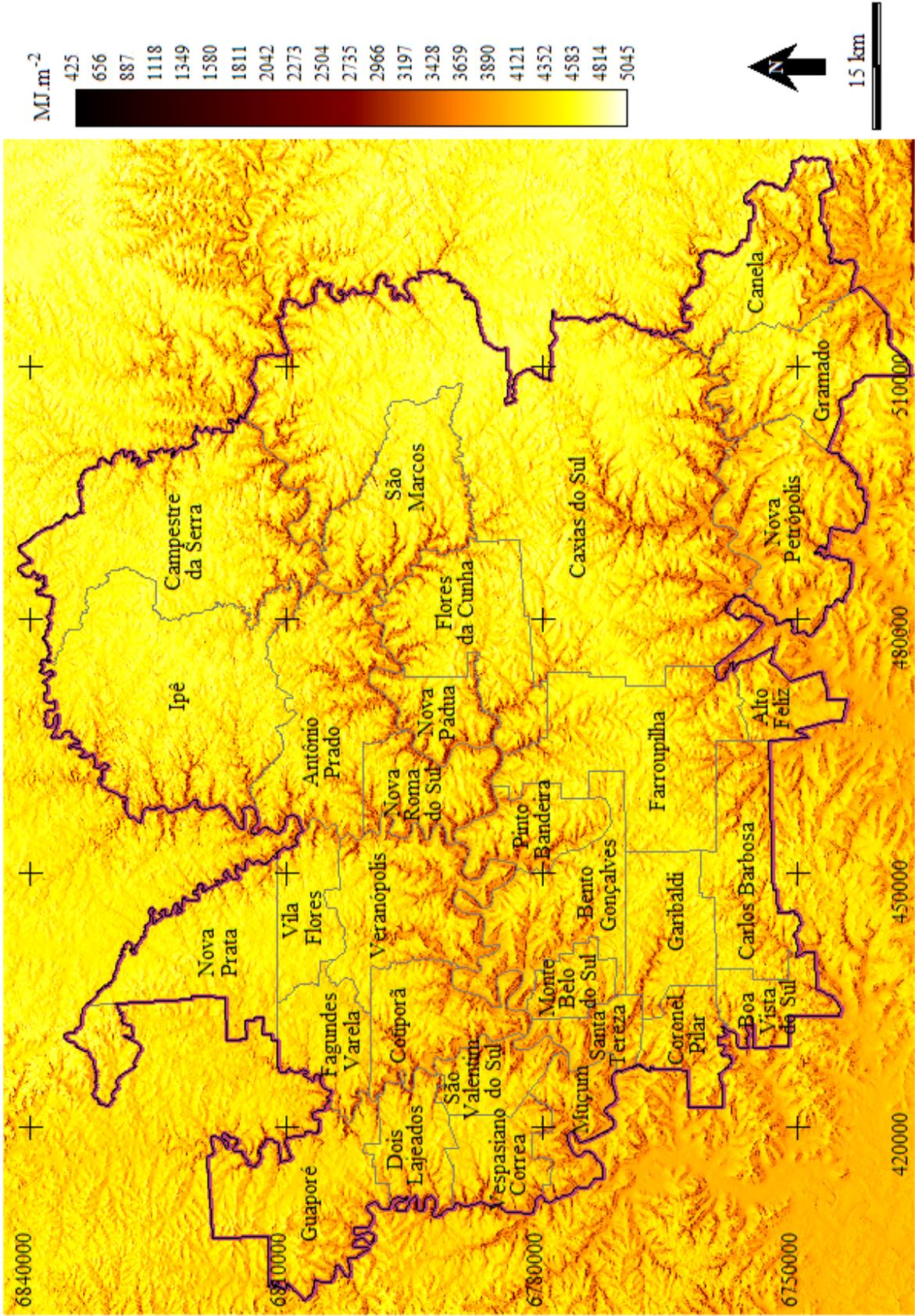


FIGURA 48. Radiação solar global (MJ.m⁻²) anual em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha.

Considerando-se apenas o perímetro da zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha, que totaliza 8.916.464 *pixels*, o valor médio da irradiação solar global anual é 4.255,10 MJ.m⁻², com um desvio-padrão de 401,05 MJ.m⁻² (TABELA 8). A distribuição de frequências dos valores estimados de radiação solar global anual é assimétrica (FIGURA 49), com maior amplitude de valores abaixo da média, embora com baixas frequências. A cauda esquerda do histograma representa os *pixels* da área de estudo cujo regime de radiação é mais influenciado pela topografia.

TABELA 8. Parâmetros estatísticos da radiação solar global (MJ.m⁻²) estimada em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha para diferentes períodos.

Período	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Verão (dez., jan., fev.)	175,8	1.475,38	1.309,87	96,52
Outono (mar., abr., mai.)	56,80	1.274,38	1.017,26	118,88
Inverno (jun., jul., ago.)	40,51	1.036,25	747,04	111,21
Primavera (set., out., nov.)	114,94	1.357,51	1.180,94	97,38
Anual	425,50	5.045,40	4.255,10	401,05

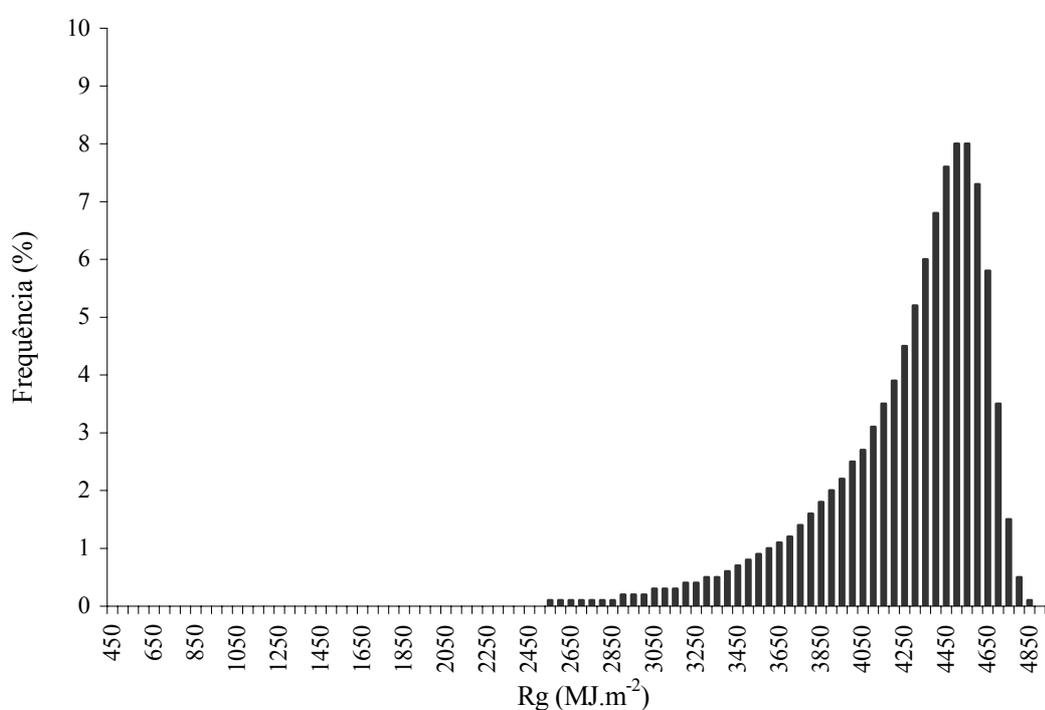


FIGURA 49. Distribuição de frequências (%) dos valores estimados de radiação solar global anual (MJ.m⁻²) em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha (n = 8.916.464 *pixels*).

As figuras 50, 51 e 52 apresentam, respectivamente, os mapas com a estimativa da radiação solar direta anual, a radiação difusa anual e a insolação anual. Constata-se que a radiação direta (FIGURA 50) é o componente da radiação global que apresenta maior variabilidade espacial, o que é esperado e concorda com o observado por Kang *et al.* (2002). A radiação direta é fortemente afetada pela variação no ângulo de incidência ao longo do ano, bem como pela obstrução do horizonte. A combinação desses fatores é responsável pela amplitude observada, de 41 MJ.m⁻² a 3.108 MJ.m⁻². As superfícies com menor radiação direta encontram-se no fundo dos vales encaixados dos rios Caí e Taquari/Antas, onde a obstrução do horizonte e a espessura da camada atmosférica reduzem consideravelmente a radiação incidente.

A radiação difusa (FIGURA 51), por outro lado, apresenta distribuição espacial mais homogênea, uma vez que é influenciada predominantemente pela obstrução do horizonte e pela espessura da camada atmosférica. A amplitude dos valores observados na área de estudo varia de 171 MJ.m⁻² a 2.001 MJ.m⁻², com os menores valores encontrados nas encostas e no fundo dos vales, principalmente em consequência da obstrução do horizonte. Contudo, nos locais mais obstruídos, ainda que seja reduzida, a radiação difusa apresenta magnitude superior à radiação direta, tornando-se o componente mais importante da radiação global incidente. Entre as áreas abertas, sem obstrução do horizonte pelo relevo, as planícies recebem menos radiação difusa que as altitudes mais elevadas, o que é explicado pela diferença na espessura óptica da atmosfera.

A insolação anual (FIGURA 52) apresenta uma heterogeneidade espacial menor que a radiação direta (FIGURA 50) e maior que a radiação difusa (FIGURA 51), o que é esperado, uma vez que o tempo de incidência da radiação direta é afetado simultaneamente pela inclinação e orientação da superfície e pela obstrução do horizonte. A insolação potencial na área de estudo varia de um mínimo de 320 h a um máximo de 3.930 h anuais.

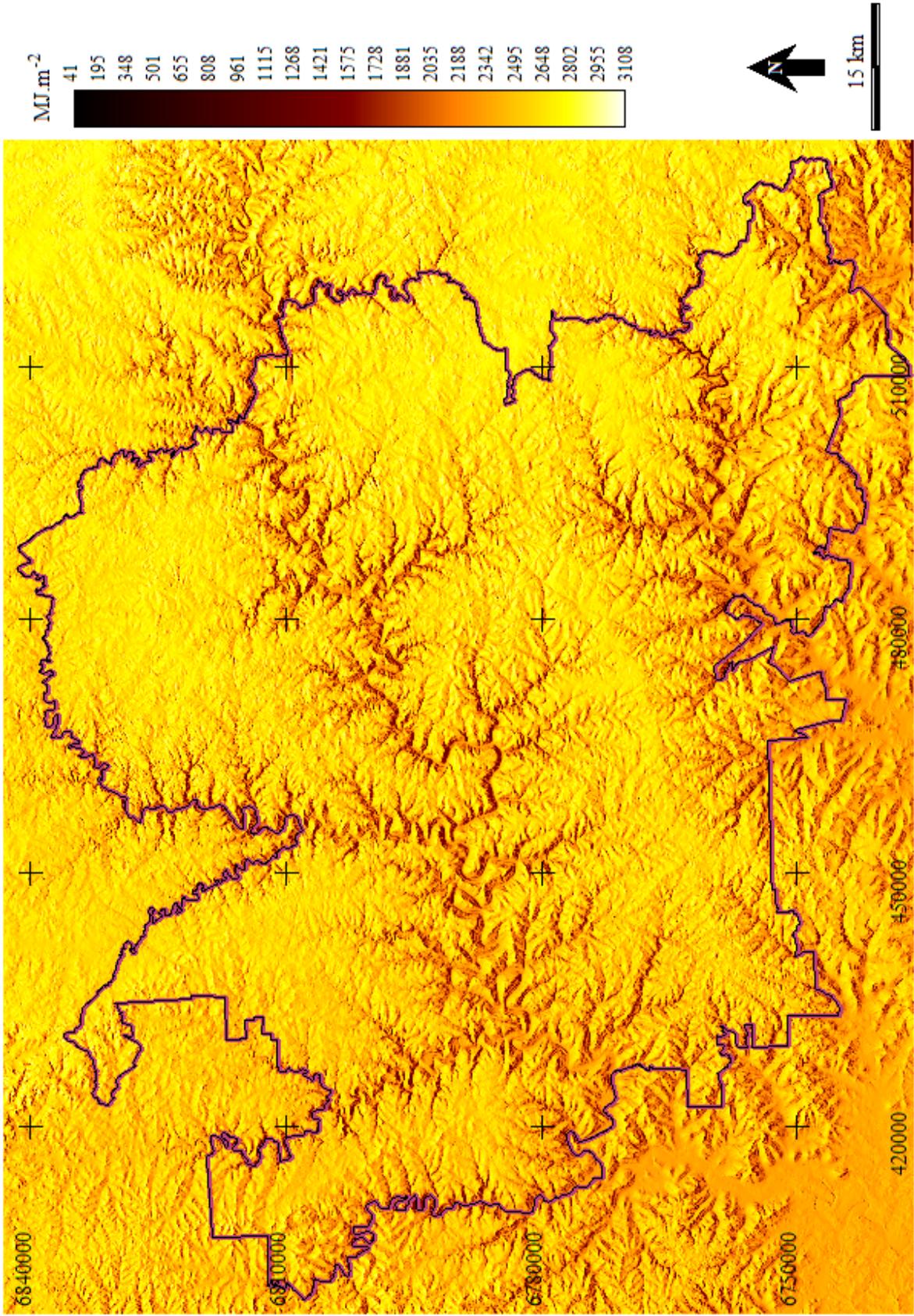


FIGURA 50. Radiação solar direta (MJ.m⁻²) anual em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha.

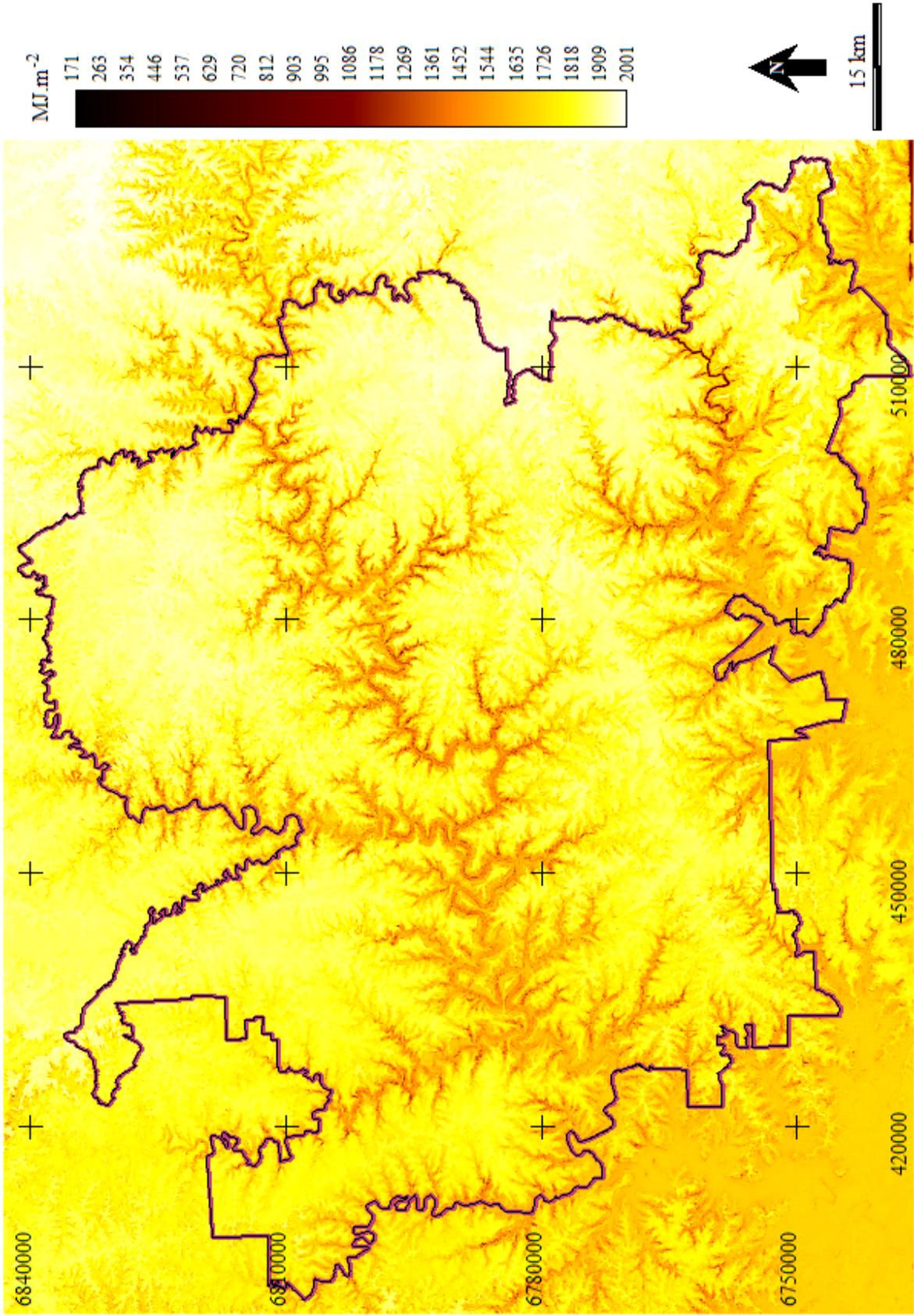


FIGURA 51. Radiação solar difusa (MJ.m⁻²) anual em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha.

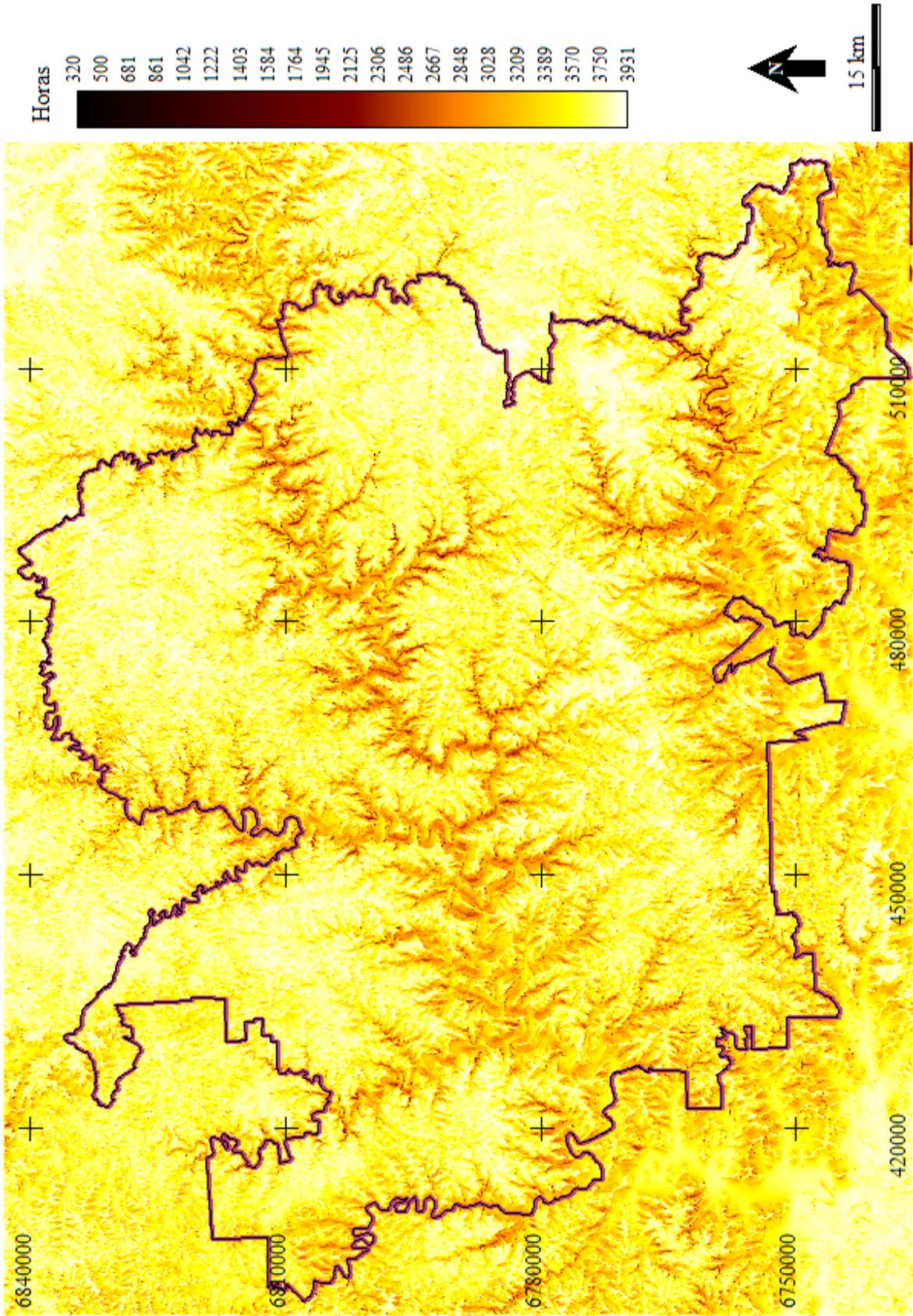


FIGURA 52. Insolação anual (horas) em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha.

As superfícies horizontais e aquelas inclinadas para norte, nordeste ou noroeste, e sem obstrução do horizonte pelo relevo, recebem radiação direta por mais tempo ao longo do ano. Superfícies voltadas para o sul, sudeste ou sudoeste, ou superfícies obstruídas pelo relevo durante algum tempo, têm menor insolação. Os menores valores de insolação coincidem com os locais onde também se verificam os menores valores de irradiação direta e difusa. Contudo, não há necessariamente uma relação direta entre a radiação direta ou global e a insolação, pois em superfícies inclinadas a radiação direta incidente é modulada pelo ângulo de incidência.

A FIGURA 53 apresenta as relações da radiação difusa, da radiação direta e da insolação com a estimativa da radiação solar global anual em superfícies com topografia heterogênea, calculadas com 8.916.464 *pixels* compreendidos no perímetro da zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha. Se a interpretação da FIGURA 48 e da FIGURA 52 não possibilita uma avaliação adequada dessas relações, a FIGURA 53a mostra claramente que o maior determinante da variabilidade espacial e temporal da radiação global incidente em superfícies com diferentes situações topográficas na área de estudo é, de fato, a radiação direta.

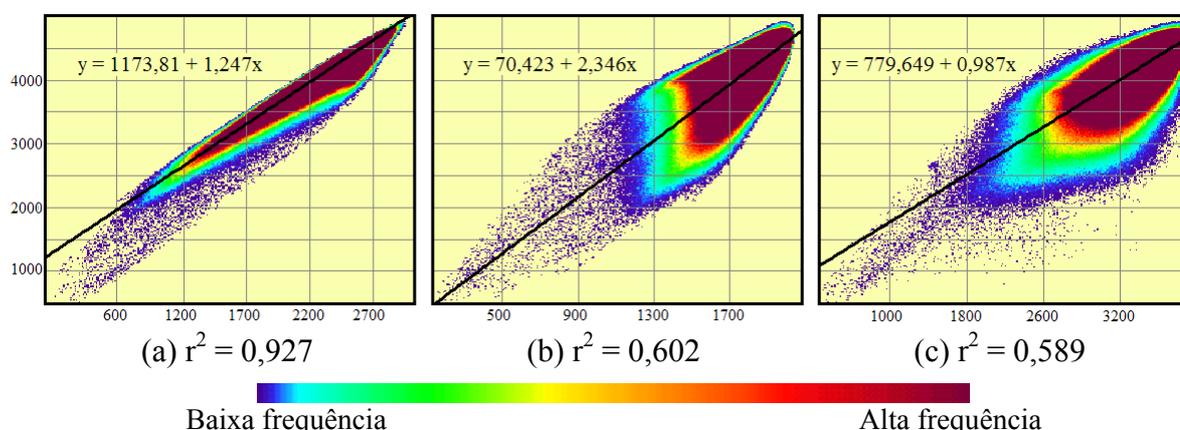


FIGURA 53. Relação entre valores anuais de radiação solar global (MJ.m^{-2}) e (a) radiação direta (MJ.m^{-2}), (b) radiação difusa (MJ.m^{-2}) e (c) insolação (horas) em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha ($n = 8.916.464$ *pixels*).

A FIGURA 53b mostra que, embora constitua a maior porção da radiação global incidente no plano em vários períodos ao longo do ano (ver item 4.1.2), em superfícies com topografia heterogênea a radiação difusa apresenta correlação com a irradiação global anual inferior à radiação direta. A FIGURA 53c também mostra que a insolação apresenta baixa correlação com a irradiação global em superfícies com diferentes situações topográficas. Por esta razão, relações empíricas para estimativa da radiação global baseadas na duração do brilho solar, como a equação de Ångstrom, tendem a não apresentar resultados satisfatórios nessas condições.

A FIGURA 54 e a FIGURA 55 apresentam, respectivamente, os mapas e a distribuição de frequências dos valores de irradiação solar global em superfícies com topografia heterogênea na área de estudo, para diferentes períodos. A irradiação global estimada atinge seus máximos no verão (FIGURA 54a e FIGURA 55a) e na primavera (FIGURA 54d e FIGURA 55d), respectivamente com média de $1.309,87 \text{ MJ.m}^{-2}$ e $1.180,94 \text{ MJ.m}^{-2}$ (TABELA 8). A irradiação elevada na primavera é explicada pelas propriedades da atmosfera neste período, conforme descrito no item 4.1.2. Os mínimos de irradiação global são verificados no outono (FIGURA 54b e FIGURA 55b) e no inverno (FIGURA 54c e FIGURA 55c), respectivamente com média de $1.017,26 \text{ MJ.m}^{-2}$ e $747,04 \text{ MJ.m}^{-2}$ (TABELA 8).

De maneira geral, esses resultados estão de acordo com o esperado, pois seguem o padrão sinusoidal da variação da irradiação global ao longo do ano. Entretanto, a distribuição espacial da irradiação solar global é heterogênea. Na maioria das superfícies da área de estudo a variação sinusoidal da irradiação ao longo do ano é modificada pela topografia, cujo efeito no campo de radiação local é visível em todas as estações. A variabilidade espacial apresenta um padrão diferente em cada período do ano, sendo menor na primavera e no verão e tendendo a aumentar no outono e no inverno, com maiores variações observadas em encostas orientadas para o sul.

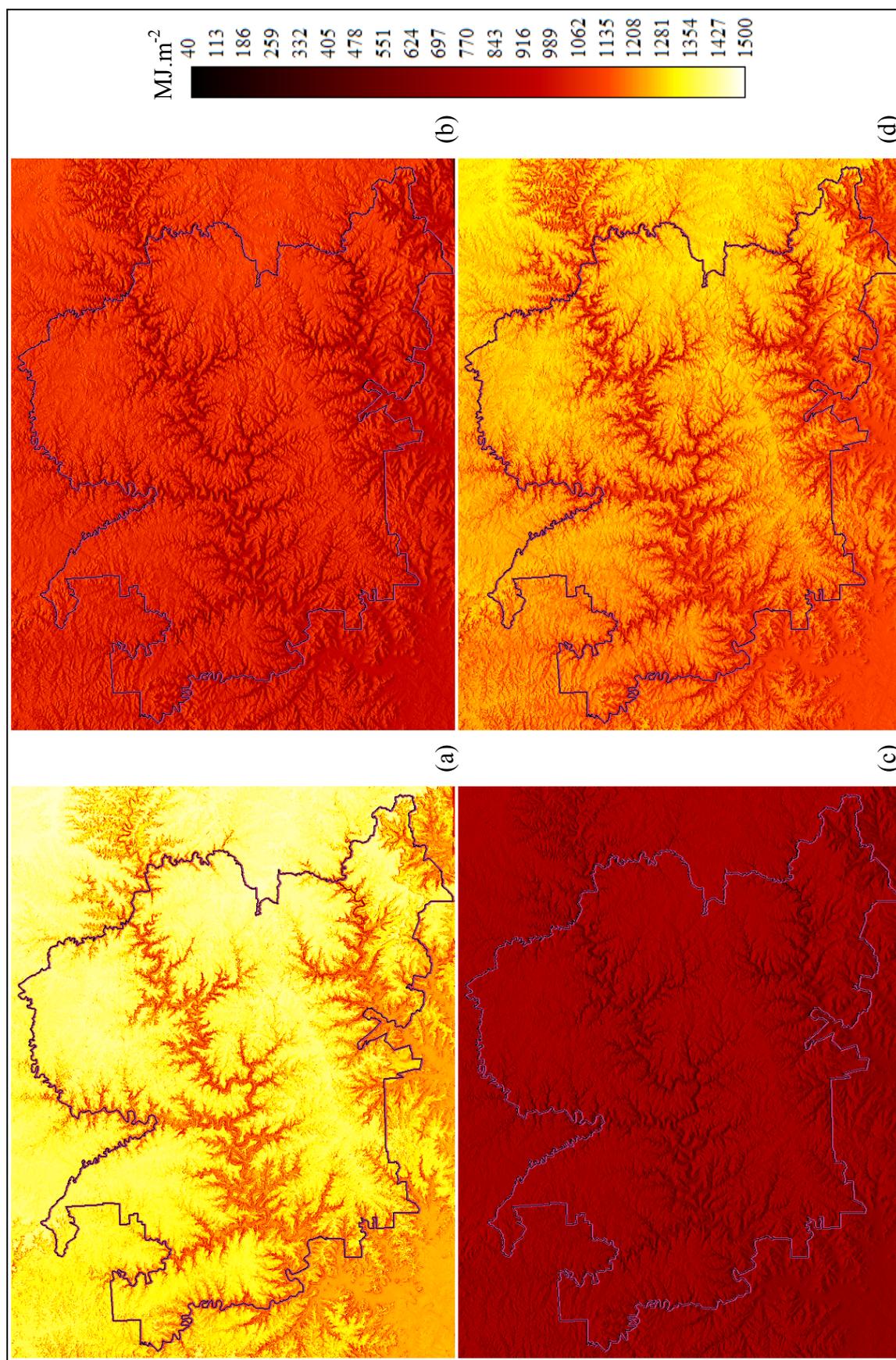
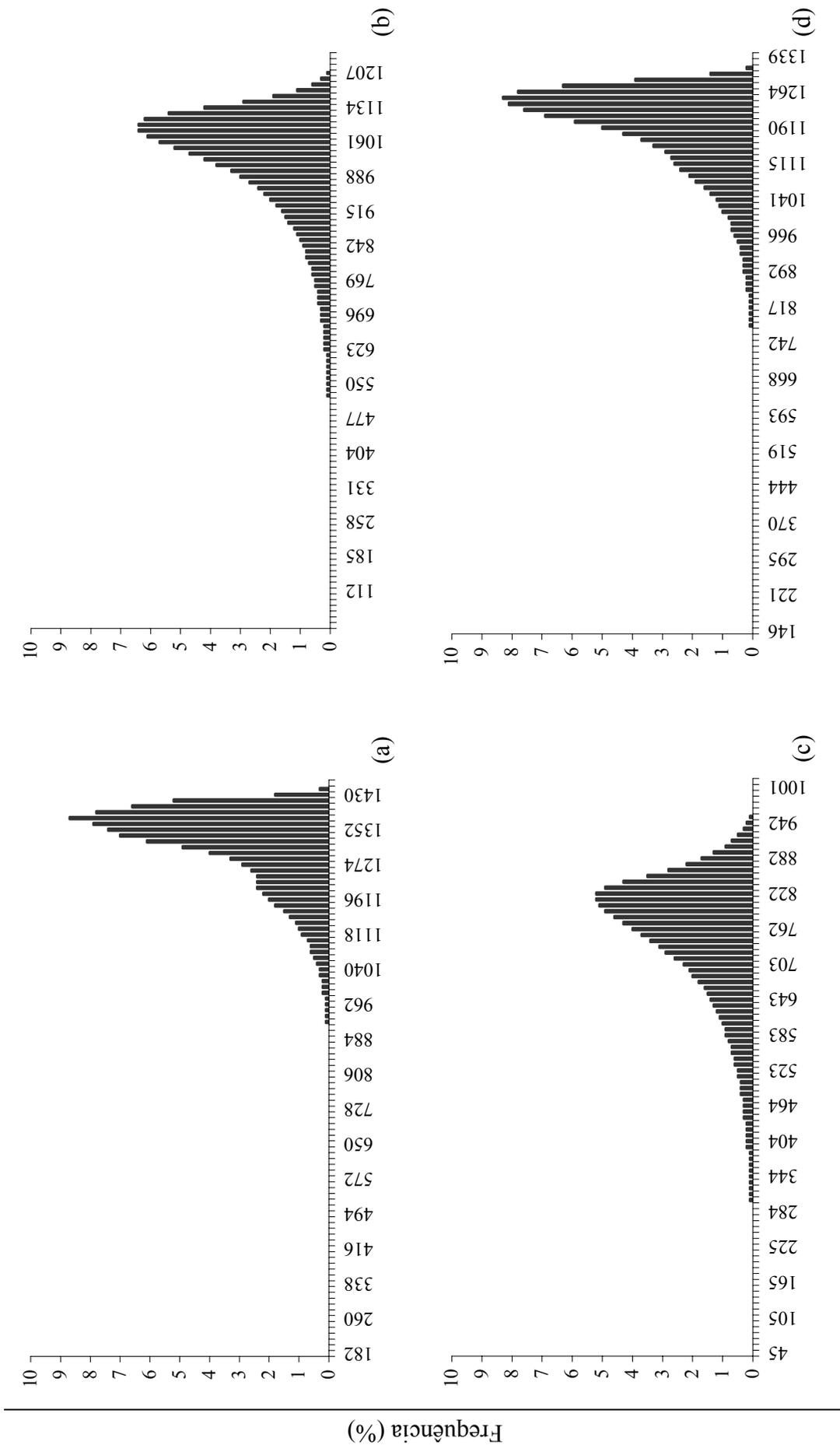


FIGURA 54. Radiação solar global (MJ.m⁻²) em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha em diferentes períodos: (a) verão, (b) outono, (c) inverno, (d) primavera.



R_g (MJ.m⁻²)

FIGURA 55. Distribuição de frequências (%) dos valores de radiação solar global (MJ.m⁻²) incidente em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha em diferentes períodos: (a) verão; (b) outono; (c) inverno ; (d) primavera.

Por exemplo, no verão, quando a irradiação na maior parte da área de estudo está acima de 1.200 Mj.m^{-2} , ainda existe uma quantidade considerável de *pixels* com valores inferiores a esse valor (FIGURA 55a). Durante os períodos de maior declinação solar o efeito da variação no ângulo de incidência causado pela topografia tende a ser ainda mais acentuado, como evidenciado pela amplitude dos valores e pelo desvio-padrão observados no outono e no inverno (TABELA 8), bem como pela dispersão nos respectivos histogramas (FIGURA 55b e FIGURA 55bc).

Devido ao efeito da topografia, nos mapas do outono (FIGURA 54b) e do inverno (FIGURA 54c) as áreas acidentadas orientadas para sul podem ser facilmente detectadas como locais de baixa irradiação (cores escuras). Essas áreas são mais sombreadas durante os períodos de maior declinação solar, quando o ângulo zenital do Sol também aumenta. Elas tornam a receber alguma radiação direta nos períodos em que a declinação solar, e conseqüentemente o ângulo zenital do Sol, volta a ser menor.

As superfícies horizontais, por outro lado, são caracterizadas na FIGURA 54 por uma distribuição da radiação global com maior homogeneidade espaço-temporal, aproximando-se do um padrão sinusoidal. Diferenças na magnitude da radiação global entre áreas horizontais não obstruídas pelo horizonte devem-se, principalmente, à altitude de cada uma, que determina a espessura da camada atmosférica. À medida que acompanham a variação sinusoidal, áreas horizontais mais elevadas apresentam campo de radiação que se mantém com valores maiores ao longo do tempo (cores mais claras) em relação àquelas situadas em altitudes menores.

Os resultados dos mapas estimados concordam com vários autores, que usaram modelos implementados em SIG para estimar a radiação incidente em superfícies com topografia heterogênea, tanto com relação à variabilidade espacial observada nas estimativas quanto à contribuição dos componentes da radiação global (Kumar *et al.*, 1997; Kang *et al.*, 2002; Chrysoulakis *et al.*, 2004; Zaksek *et al.*, 2005, Batlles *et al.*, 2008).

Conforme ressaltado por Kumar *et al.* (1997), a radiação solar global em uma dada localização é aproximadamente proporcional à radiação direta e varia com a geometria da superfície. A radiação difusa tende a variar mais suavemente em diferentes declividades, de forma que as variações temporais e espaciais da radiação global em superfícies inclinadas podem ser associadas, basicamente, às suas características topográficas.

4.5. Considerações finais

Os resultados obtidos mostram que o regime de radiação na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha é fortemente afetado pela topografia. Todavia, o esquema de verificação usado neste estudo não pode ser considerado plenamente suficiente, porque o número de locais com dados medidos é reduzido. A baixa disponibilidade de registros de longo prazo de radiação global reflete a realidade brasileira e de vários outros países, o que demonstra a necessidade de fazer o melhor uso possível dos mesmos. É importante lembrar que, ainda que um modelo calcule com sucesso a radiação solar, o resultado dependerá da qualidade dos dados usados para obter os parâmetros necessários. Kumar *et al.* (1997) e Myers (2003) ressaltam que dois dos maiores desafios para a modelagem de radiação no Século 21 residem, justamente, nesta questão: aumentar a quantidade e reduzir a incerteza nos registros de radiação e desenvolver modelos mais robustos, que necessitem menos parâmetros e que sejam aplicáveis a uma maior variedade de condições.

No caso do Brasil, é bem verdade que iniciativas recentes em aumentar a densidade e modernizar a rede oficial de coleta de dados meteorológicos de superfície têm contribuído para contornar o primeiro desafio. Todavia, ainda é necessário aumentar e intensificar ações nesse sentido, bem como prover à maior quantidade possível de pesquisadores e técnicos a acessibilidade aos registros, tanto para períodos específicos quanto para séries históricas. Para contornar o segundo desafio, os modelos de radiação implementados em SIG constituem uma alternativa importante a ser considerada, uma vez

que possibilitam acoplar, simultaneamente, os efeitos da atmosfera e do relevo sobre a radiação incidente na superfície. Como bem colocado por Mészáros & Miklánek (2006), essa abordagem possibilita uma representação mais realista da natureza tridimensional da paisagem em modelagem de radiação.

Neste estudo, a distribuição espacial da irradiação global média decenal em superfícies de topografia heterogênea, para toda a zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha, apresentou uma subestimativa média de 4,59% em relação a dados climatológicos. O desempenho das estimativas pode ser considerado satisfatório, dada a extensão e a heterogeneidade topográfica da área para a qual elas foram realizadas. A magnitude dos erros, bem como a relação entre os dados estimados e medidos, é equivalente ou superior aos encontrados por outros autores, com o mesmo método e com outros métodos empregados para estimar a radiação global. A vantagem com relação a estes é a possibilidade de estimar a radiação global em áreas relativamente extensas, considerando a influência da topografia.

Os resultados obtidos constituem estimativas inéditas de radiação solar difusa, direta e global para toda a área de estudo, com alto grau de detalhamento espacial, levando em conta as características topográficas de cada local. Os produtos finais são mapas *raster* (matriciais) com resolução espacial de 30 m, em meio digital e georreferenciados, o que possibilita sua integração em SIG com outras informações espaciais da região, tornando-os potenciais dados de entrada para zoneamentos ou para novas modelagens. A estimativa da radiação solar global e dos componentes direta e difusa em superfícies com topografia heterogênea tem diversas aplicações, como modelos de desenvolvimento de culturas, estimativas de evapotranspiração, regime de umidade e balanço hídrico, modelagem hidrológica e climatológica, estimativas de tipos ou de propriedades dos solos, aproveitamento de energia solar fotovoltaica ou para aquecimento, entre outras.

No caso específico da viticultura, os resultados constituem subsídio importante para a definição de políticas setoriais com vistas ao incremento da qualidade da uva e do vinho. Os mapas de radiação podem ser empregados para o cálculo da maior parte dos índices climáticos relacionados à videira, como o Índice Heliotérmico (IH) e o Quociente Heliopluiométrico de Maturação (QM), por exemplo, bem como para gerar mapas de radiação fotossinteticamente ativa, entre outras aplicações. Neste caso, é possível pensar em estudos para recomendar a localização adequada de vinhedos ou de cultivares mais adequadas para determinados locais, de acordo com a disponibilidade de radiação.

No futuro, a metodologia também pode ser empregada para gerar estimativas periódicas da radiação solar em superfícies com topografia heterogênea na Serra Gaúcha, a partir de dados medidos em poucos locais, com vistas a acompanhar o ciclo de desenvolvimento da videira ou de outras culturas. Neste caso, junto com outras variáveis medidas em estações meteorológicas de superfície, como precipitação pluvial, temperatura e umidade relativa, as estimativas de radiação podem ser empregadas para subsidiar recomendações de tratamentos culturais e para previsão de maturação e colheita, entre outros.

Além das potenciais aplicações na área de estudo, os resultados obtidos também podem servir de referência para estudos similares em outras regiões do Rio Grande do Sul, potencializando o uso dos dados de radiação disponíveis. Dessa forma, espera-se também contribuir para fomentar a introdução de novas técnicas no planejamento e gerenciamento de recursos na agricultura, explorando melhor o potencial das tecnologias e dos dados disponíveis. Usando-os melhor e mais intensivamente, espera-se, em última instância, a obtenção de produtos agrícolas de qualidade superior, aliada à preservação do meio ambiente, com diminuição de impactos ambientais, menor uso de insumos e maior rentabilidade econômica.

5 CONCLUSÕES

- O algoritmo *Solar Analyst* possibilita estimativas acuradas e com alta resolução espacial da radiação solar global decendial em superfícies com topografia heterogênea na Serra Gaúcha, desde que a fração difusa e a transmitância direta sejam estimadas a partir de dados medidos em alguns locais na superfície;
- A radiação solar global na Serra Gaúcha é afetada pelo relevo, apresentando alta variabilidade espacial e temporal em função da topografia heterogênea;
- A variabilidade espacial da radiação solar global é menor na primavera e no verão e maior no outono e no inverno, com maiores variações em encostas voltadas para o sul;
- A radiação direta é o componente da radiação global mais afetado pelas características topográficas na Serra Gaúcha;
- O Modelo Digital de Elevação derivado de cartas em escala 1:50.000 permite calcular satisfatoriamente os parâmetros topográficos, como a obstrução do horizonte;
- O coeficiente linear da equação de Ångstrom com ajuste mensal possibilita estimativas satisfatórias da fração difusa para períodos decendiais na Serra Gaúcha;
- As diferenças entre os métodos utilizados para estimar a fração difusa exercem pouca influência sobre a estimativa da radiação global para períodos decendiais;
- O efeito da correção da transmitância direta para o zênite é significativo na latitude de 29°S, e a omissão dos ângulos de elevação solar inferiores a 10° no outono-inverno permite estimativas mais acuradas de radiação global.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SABER, A. N. Conhecimentos sobre as flutuações climáticas do quaternário no Brasil. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geografia**, São Paulo, n. 6, p. 41 - 48, 1957.
- AGUILAR, C.; HERRERO, J.; POLO, M. J. Topographic effects on solar radiation distribution in mountainous watersheds and their influence on reference evapotranspiration estimates at watershed scale. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, Göttingen, v. 14, n. 12, p. 2479-2494, 2010. Disponível em: <<http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/14/2479/2010/hess-14-2479-2010.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2011.
- AKPABIO, L. E.; ETUK, S. E. Relationship between global solar radiation and sunshine duration for Onne, Nigeria. **Turkish Journal of Physics**, Erzurum, v. 27, n.2, p. 161-167. 2003. Disponível em: <<http://journals.tubitak.gov.tr/physics/issues/fiz-03-27-2/fiz-27-2-9-0207-1.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2008.
- ALMEIDA, T. N. S.; ESCOBEDO, J. F. Frações solares K_t , K_{dh} e K_d em Botucatu/SP/Brasil. In: SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP, 18., 2010, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://sistemas.usp.br/siicusp/cdOnlineMenu?numeroEdicao=18>>. Acesso em: 12 jan. 2011.
- BAKSTEIN, H.; PAJDLA, T. Panoramic mosaicing with a 180° field of view lens. In: OMNIDIRECTIONAL VISION WORKSHOP, 2002, Praga. **Proceedings...** Praga: IEEE Computer Society, 2002. p. 60-68. Disponível em: <<ftp://cmp.felk.cvut.cz/pub/cmp/articles/bakstein/Bakstein-Pajdla-Omnivis2002.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2011.
- BASHAHU, M. Statistical comparison of models for estimating the monthly average daily diffuse radiation at a subtropical African site. **Solar Energy**, Amsterdam, v. 75, p. 43-51, 2003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 17 set. 2008.
- BATLLES, F.J.; BOSCH, J.L.; TOVAR-PESCADOR, 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**, Amsterdam, v. 49, p. 336-345, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 26 ago. 2010.
- BERGAMASCHI, H.; DIDONÉ, I. A. Distribuição da radiação global no Estado do Rio Grande do Sul. **Agronomia Sulriogradense**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 139-148. 1981.
- BERLATO, M. A. Radiação solar no Estado do Rio Grande do Sul. **Agronomia Sulriogradense**, Porto Alegre, v. 5, p. 115-131. 1971.

BERLATO, M. A.; MELO, R. W.; FONTANA, D. C. Risco de ocorrência de granizo no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 121-132, 2000.

BEYER, H.G., CZEPLAK, G., TERZENBACH, U., WALD, L. Assessment of the method used to construct clearness index maps for the new european solar radiation atlas (ESRA). **Solar Energy**, Amsterdam, v. 61, n. 6, p. 389-397. 1997. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 16 jun. 2009.

BINDI, M.; MIGLIETTA, F.; ZIPOLI, G. Different methods for separating diffuse and direct components of solar radiation and their application in crop growth models. **Climate Research**, Oldendorf/Luhe, v. 2, p.47-54, 1992. Disponível em: <<http://www.int-res.com/articles/cr/2/c002p047.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2009.

BONK, R. Scale-dependent effect of input data design on DEM Accuracy. In: PECKHAM, R. J.; JORDAN, G. (Ed.) **Digital terrain modelling: development and applications in a policy support environment**. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 282 p.. Disponível em:<<http://www.springerlink.com/>>. Acesso em: 15 dez. 2010.

BRASIL. **Decreto número 99.066, de 8 de março de 1990**. Regulamenta a Lei Nº 7.678, de 8 de março de 1988, que dispõe sobre a produção, circulação e comercialização do vinho e da uva. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1990-1994/D99066.htm>. Acesso em: 10 mar. 2011.

CARGNELUTTI FILHO, A.; MATZENAUER, R.; MALUF, J. R. T.; DIDONÉ, I. A.; BUENO, A. C.; TRINDADE, J. K.; SAWASATO, J. T. **Radiação solar global decendial no estado do Rio Grande do Sul**: tabelas de probabilidades. Porto Alegre: FEPAGRO, 2007 . 78 p. (Série Técnica FEPAGRO n. 03)

CEBALLOS, J. C.; MOURA, G. B. A.; BEZERRA, V. F.; FARIAS, J. D. A. Desempenho de heliógrafos e actinógrafos na estimativa de insolação e fluxo direcional. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 7, n. 2, p. 563-581, 1992. Disponível em: <<http://www.rbmet.org.br/>>. Acesso em: 08 fev. 2011.

CHAPMAN, L.; THORNES, J. E.; BRADLEY, A. V. Rapid determination of canyon geometry parameters for use in surface radiation budgets. **Theoretical and Applied Climatology**, Vienna, v. 69, p. 81-89. 2001. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/tf5405y91qcknqfr/>>. Acesso em: 21 jul. 2008.

CHRYSOULAKIS, N.; DIAMANDAKIS, M.; PRASTACOS, P. GIS. Based estimation and mapping of local level daily irradiation on inclined surfaces. In: AGILE CONFERENCE ON GEOGRAPHIC INFORMATION SCIENCE, 7., 2004, Heraklion. **Proceedings...** Heraklion, 2004. Disponível em: <http://plone.itc.nl/agile_old/Conference/greece2004/papers/7-1-3_Chrysoulakis.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2007.

COLLARES-PEREIRA, M.; RABL, A. The average distribution of solar radiation - correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. **Solar Energy**, Amsterdam, v. 22, p. 155-164, 1979. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 05 jan. 2011.

CONCEIÇÃO, M. A. F.; MANDELLI, F. **Estimativa diária da radiação solar incidente com base no número de horas de brilho solar para a região de Bento Gonçalves, RS.**

Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2006. 12 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento)

COSTA, R. F.; FARIAS, S. E. M.; BARBIERI, V. Transmitância atmosférica para Piracicaba-SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10., 1998, Brasília. **Anais...** Brasília, 1998. Disponível em: <<http://www.cbmet.com/>>. Acesso em: 05 ago. 2009.

CRESESB. **Energia solar: princípios e aplicações.** [2004?]. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em: 08 fev. 2011.

CUNHA, G. R.; SCHEEREN, P. L.; SILVA, M. S. **Granizo e cereais de inverno no Rio Grande do Sul.** Passo Fundo: Embrapa, 2001. 24 p. (Documentos, n. 33) Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/pesquisa/agromet/pdf/granizo/granizo.pdf>>. Acesso em: 07 mar. 2011

CUSTÓDIO, M. S.; BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. Nebulosidade diurna no Rio Grande do Sul, Brasil: climatologia e tendência temporal. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 15, n.1, p. 45-52. 2009.

D'AGOSTINO, V.; ZELENKA, A. Supplementing solar radiation network data by co-kriging with satellite images. **International Journal of Climatology**, London, v. 12, p. 749–761, 1992. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/> . Acesso em: 06 jan. 2011.

DALLACORT, R.; GNOATTO, E.; AMORIN, R. C. F.; GASPARIM, E.; RICIERI, R. P. Desempenho de um actinógrafo - R. Fuess-Berlin-Steglitz. In: ENCONTRO ANUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 11., 2002, Maringá. **Anais...** Maringá, 2002. Disponível em: <http://www.ppg.uem.br/Docs/pes/eaic/XI_EAIC/trabalhos/arquivos/11-0071-0.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2011.

DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F. Série temporal diária média horária e anual média mensal diária da irradiação solar difusa anisotrópica. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 21, n. 2, p. 1-15, 2006. Disponível em: <http://200.145.140.50/html/CD_REVISTA_ENERGIA_vol6/vol21n22006/>. Acesso em: 08 out. 2010.

DUBAYAH, R; LOECHEL, S. Modeling topographic solar radiation using GOES data. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 36, p. 141-154. 1997. Disponível em: <[http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450\(1997\)036%3C0141%3AMTSRUG%3E2.0.CO%3B2.pdf](http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450(1997)036%3C0141%3AMTSRUG%3E2.0.CO%3B2.pdf)>. Acesso em: 24 jun. 2010.

DUBAYAH, R; RICH, P. M. Topographic solar-radiation models for GIS. **International Journal of Geographical Information Science**, London, v. 9, n. 4, p. 405–419, 1995. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/02693799508902046>>. Acesso em: 05 jan. 2011.

EMBRAPA. **Normal climatológica:** Estação Agroclimática da Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves, RS. Período de 1961 a 1990. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2008. Disponível em: <<http://www.cnpuv.embrapa.br/>>. Acesso em: 05 nov. 2010.

EMBRAPA. **Base de dados da Estação Agroclimática da Embrapa Uva e Vinho:** radiação solar global - período 1985-1994. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2011.

ERBS, D. G.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily, and monthly average global radiation. **Solar Energy**, Amsterdam, v. 28, n. 4, p. 293-304, 1982. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 06 jan. 2011.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Radiações solares UV, PAR e IV: II-estimativa das frações em função de *Kt*. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, Buenos Aires, v. 10, p. 87-94, 2006. Disponível em: <<http://www.cricyt.edu.ar/lahv/asades/averma/2006/rad11-6.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2009.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; FURLAN JÚNIOR, C. R.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Estimativa das radiações global, direta e difusa em função do índice de claridade (*Kt*) e razão de insolação (*n/N*). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 1., 2007, Fortaleza, **Anais...** Fortaleza: Associação Brasileira de Energia Solar, 2007. 1 CD-ROM.

FARIAS, C. V. S. A indústria vitivinícola e o desenvolvimento regional no RS: uma abordagem neoinstitucionalista da imigração italiana aos dias atuais. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, Taubaté, v. 5, n. 2, p. 64-93, 2009. Disponível em: <<http://www.rbqdr.net/revista/index.php/rbqdr/article/download/237/162>>. Acesso em: 07 mar. 2011.

FELTEN, R. Produção maior, gasto reduzido e qualidade ampliam competitividade do vinho brasileiro. **Sul 21**, Jornal on-line, 07/02/2011. Disponível em: <<http://sul21.com.br/jornal/2011/02/producao-maior-gasto-reduzido-e-qualidade-ampliam-competitividade-do-vinho-brasileiro/>>. Acesso em: 09 fev.2011.

FLORES, C. A.; FASOLO, P. J.; PÖTTER, R. O. Solos: levantamento semidetalhado. In: FALCADE, I.; MANDELLI, F. (Org.). **Vale dos Vinhedos: caracterização geográfica da região**. Caxias do Sul: EDUCS, 1999. p.87-134.

FLORES, C. A.; HASENACK, H.; WEBER, E.; SARMENTO, E. Potencial edáfico da Serra Gaúcha, Brasil para viticultura. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE VITICULTURA E ENOLOGIA, 11., 2007, Mendoza. **Anais...** Mendoza: CLEIFRA, 2007. 1 CD-ROM.

FLORES, Carlos Alberto. **Complementação geologia e solo**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por <eliseu.weber@ufrgs.br> em 27/06/2011.

FONTANA, D. C.; OLIVEIRA, D. Relação entre radiação solar global e insolação para o Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria, v. 4, n.1, p. 87-91. 1996.

FORTES, A. B. **Compêndio de geografia geral do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Sulina, 1979. 101 p.

FRANCELINO, M. R.; PEREIRA, A. B.; SÁ, M. M.; SPIELMANN, A. A.; BREMER, U. F.; TONIN, A.; SCHAEFER, C. A. Influência da radiação solar na distribuição das comunidades vegetais nas áreas livres de gelo da Baía do Almirantado, Ilha Rei George, Antártica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis, **Anais...** Florianópolis, 2007. Disponível em: <<http://www.ltid.inpe.br/sbsr2007/biblioteca/>>. Acesso em: 19 set. 2008.

FRAZER, G. W.; CANHAM, C. D.; LERTZMAN, K. P. **Gap Light Analyzer (GLA): users manual and program documentation**. Burnaby, British Columbia: Simon Fraser University, Millbrook, New York: Institute of Ecosystem Studies, 1999. 36 p.

FU, H.; TAJCHMAN, S. J.; KOCHENDERFER, J. N. Topography and radiation exchange of a mountainous watershed. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 34, p. 890-1995. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0450%281995%29034%3C0890%3ATAREOA%3E2.0.CO%3B2>>. Acesso em: 06 jan. 2011.

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

GABROVEC, M. Solar radiation and the diverse relief of slovenia. **Geografski Zbornik**, Ljubljana, Slovenia, v. 36, p. 49-68. 1996. Disponível em: <<http://giam.zrc-sazu.si/zbornik/Gabrovec36.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2007.

GÁL, T.; LINDBERG, F.; UNGER, J. Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: comparison and application to urban climate. **Theoretical and Applied Climatology**, Amsterdam, v. 95, p. 111-123. 2009. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/x821031m3p830321>>. Acesso em: 10 mar. 2011.

GARDNER, C. L.; NADEAU, C. A. **Modelling solar radiation in the Artic. An improved method for the subdivision of global radiation**. Ottawa: Defence Research Establishment, 1991. 16 p. (Technical Note 91-26)

GATES, D. M. **Biophysical Ecology**. New York: Springer-Verlag, 1980. 611p. Disponível em: <<http://books.google.com.br/>>. Acesso em: 08 nov. 2009.

GIACOMELLI, G. A. Components of radiation defined: definition of units, measuring radiation transmission, sensors. In: GREENHOUSE GLAZING & SOLAR RADIATION TRANSMISSION WORKSHOP, 1998, New Brunswick, **Proceedings ...** New Brunswick, 1998. Disponível em: <<http://aesop.rutgers.edu/~horteng/Workshop.htm>>. Acesso em: 26 nov. 2008.

GOMES, E. N.; ESCOBEDO, J. F. Modelos de estimativa da radiação fotossinteticamente ativa global e difusa em função da radiação de ondas curtas e do índice de claridade (K_t). **Irriga**, Botucatu, v. 7, n. 2, p. 122-129, 2002.

GRIGOLETO, M. W.; RICIARI, R. P. Análise de disponibilidade de energia solar à superfície para a região de Cascavel/PR. **Tecnologia e Humanismo**, Curitiba, v. 17, n. 24, p. 41-51. 2003. Disponível em: <<http://www.md.cefetpr.br/grigoletto/artigo2.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2011.

GUARNIERI, R. A.; MARTINS, F. R.; SILVA, S. A. B.; PEREIRA, E. B. Avaliação de estimativas de radiação solar incidente baseadas em extrapolação e interpolação na região sudeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis, **Anais...** Florianópolis, 2006. Disponível em: <<http://www.cbmet.com/>>. Acesso em: 06 jan. 2011.

GUEDES, M.; FIORIN, D. V.; PES, M. P.; BERTAGNOLLI, R. F.; SCHUCH, N. J. Análise de dados de radiação solar global e difusa da estação sonda de São Martinho da

Serra, RS, Brasil (29,4°S; 53,8°O). In: ENCONTRO SULBRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 1., 2006, Pelotas, **Anais...** Pelotas, 2006. Disponível em: <<http://mtc-m15.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m15@80/2006/07.28.18.44/doc/>>. Acesso em: 23 jun. 2009.

GUEYMARD, C.; JINDRA, P.; ESTRADA-CAJIGAL, V. A Critical look at recent interpretations of the Ångström approach and its future in global solar radiation prediction. **Solar Energy**, Amsterdam, v. 54, n. 3, p. 357-363, 1995. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 22 fev. 2011.

GUL, M. S.; MUNEEER, T.; KAMBEZIDIS, H. D. Models for obtaining solar radiation from other meteorological data. **Solar Energy**, Amsterdam, v. 64, n. 1-3, p. 99-108, 1998. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 06 jan. 2011.

HÄNTZSCHEL, J.; GOLDBERG, V.; BERNHOFER, C. GIS-based regionalisation of radiation, temperature and coupling measures in complex terrain for low mountain ranges. **Meteorological Applications**, Cambridge, v. 12, n. 1, p. 33-42. 2005. Disponível em: <<http://journals.cambridge.org/action/displayFulltext?type=1&fid=296167&jid=MAP&volumelId=12&issueId=01&aid=296166>>. Acesso em: 09 nov. 2007.

HASENACK, H.; FERRARO, L. W. Considerações sobre o clima da região de Tramandaí, RS. **Pesquisas**, Porto Alegre, n. 22, p. 53-70, 1989.

HASENACK, H.; WEBER, E. **Base cartográfica digital da Serra Gaúcha - Escala 1:50.000**. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia, 2007. 1 CD-ROM. (Série Geoprocessamento, n. 2)

HASENACK, H.; WEBER, E. **Base vetorial contínua do Rio Grande do Sul – Escala 1:50.000**. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia, 2010. 1 CD-ROM. (Série Geoprocessamento, n. 3)

HETRICK, W. A.; RICH, P. M.; BARNES, F. J.; WEISS, S. B. GIS-based solar radiation flux models. **American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers**, Bethesda, v. 3, p. 132-143, 1993. Disponível em: <http://www.creeksidescience.com/files/hetrick_et_al_1993_asprs.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2011.

HOFIERKA, J.; ŠŮRI, M. The solar radiation model for open source GIS: implementation and applications. In: OPEN SOURCE GIS - GRASS USERS CONFERENCE, 2002, Trento. **Proceedings...** Trento, 2002. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.19.9831&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 28 set. 2007.

HOFFMANN, A.; GUERRA, C. C.; TONIETTO, J., MELLO, L. M. R.; HOFF, R.; CAMARGO, U. A.; FALCADE, I.; HASENACK, H.; SARMENTO, E. C.; WEBER, E. **Serra Gaúcha - demarcação da zona de produção vitivinícola**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2005. 25 p. (Nota Técnica).

HUGLIN, P. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. 1978. **Comptes Rendus de l'Academie d'Agriculture de France**, Paris, p. 1117-1126. Disponível em: <<http://www.int-res.com/articles/cr2010/43/c043p163.pdf>>. Acesso em: 17 mai. 2009.

HUNT, L.A.; KUCHAR, L.; SWANTON, C. J. Estimation of solar radiation for use in crop modelling. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 91, p. 293–300, 1998. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 06 jan. 2011.

IBGE. **Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim**. Rio de Janeiro: IBGE, 1986. 1 CD-ROM. (Levantamento de Recursos Naturais, v. 33)

IBGE. **Geografia do Brasil - Região Sul**. Rio de Janeiro: IBGE, 1990.

IQBAL, M. **An Introduction to Solar Radiation**. Toronto: Academic Press, 1983. 390p.

KANG, S.; KIM, S.; LEE, D. Spatial and temporal patterns of solar radiation based on topography and air temperature. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 32, n. 3, p. 487-497, 2002. Disponível em: <http://cc.kangwon.ac.kr/~kangsk/for34_TopoRad.pdf>. Acesso em: 06 jan. 2011.

KUMAR, L.; SKIDMORE, A. K.; KNOWLES, E. Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. **International Journal of Geographical Information Science**, London, v. 11, p. 475–497, 1997. Disponível em: <<http://www.tandf.co.uk/journals>>. Acesso em: 06 jan. 2011.

LEFEVRE, M.; WALD, L.; DIABATE, L. Using reduced data sets ISCCP-B2 from the Meteosat satellites to assess surface solar irradiance. **Solar Energy**, Amsterdam, v. 81, n. 2, p. 240-253. 2007. Disponível em: <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/36/36/64/PDF/lefevre_solar_energy_2007.pdf>. Acesso em: 06 jan. 2011.

LIMA, F. Z.; ALVES, A. R.; MARTINS, J. H.; COSTA, J. M. N. Desenvolvimento de modelos para estimação da irradiância solar difusa horária. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., 1995, Viçosa, **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1995. p. 20-25.

LINGAMGUNTA, C.; VERIZOGLU, T. N. A universal relationship for estimating clear sky insolation. **Energy Conversion and Management**, Amsterdam, v. 45, p. 27-52, 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 17 set. 2008.

LIU, B. Y. H., JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, Amsterdam, v. 4, n. 3. p. 1-19, 1960. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 05 jan. 2011.

LOPES, P. M. O.; SILVA, B. S. G.; BOTTINO, M. J.; VALERIANO, D. M. Modelagem da irradiância solar incidente. In: RUDORFF, B. F.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Org.) **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 423p.

MANDELLI, F.; TONIETTO, J. HASENACK, H.; WEBER, E. 2005. Zoneamento climático para a produção de uvas para vinhos de qualidade: índice heliotérmico para o Estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15., 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2005. 1 CD-ROM.

MANDELLI, F.; TONIETTO, J.; HASENACK, H.; WEBER, E. Caractérisation Mésoclimatique de la Viticulture de la Serra Gaúcha, Brésil. In: CONGRESO SOBRE CLIMA Y VITICULTURA, 2007, Zaragoza. **Anais...** Zaragoza: Ministério da Agric. Pesca e Aliment: OIV: GESCO: Gob. Aragon, 2007. 1 CD-ROM.

MARQUES, K., PEREIRA, T. P.; ASSIS, S. V. Análise do comportamento mensal do índice de limpidez. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro, **Anais...** Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: <<http://www.cbmet.com/>>. Acesso em: 25 jan. 2011.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ECHER, M. P. S. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geostacionário - o Projeto SWERA. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 26, n. 2, p. 145-159, 2004. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br>>. Acesso em: 01 mar. 2011.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L.; COLLE, S. Mapas de irradiação solar para o Brasil - Resultados do Projeto SWERA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 2005. Disponível em: <<http://www.ltid.inpe.br/sbsr2005/biblioteca/>>. Acesso em: 28 jul. 2007.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; GUARNIERI, R. A.; SILVA, S. A. B.; YAMASHITA, C. S.; CHAGAS, R. C. Mapeamento dos recursos de energia solar no Brasil utilizando modelo de transferência radiativa BRASIL-SR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 1., 2007, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Associação Brasileira de Energia Solar, 2007. 1 CD-ROM.

MATSUDA, Y.; FUJITA, K.; AGETA, Y.; SAKAI, A. Estimation of atmospheric transmissivity of solar radiation from precipitation in the Himalaya and the Tibetan Plateau. **Annals of Glaciology**, Cambridge, v. 43, p. 344-349, 2006. Disponível em: <<http://www.igsoc.org/annals/43/a43a078.pdf>>. Acesso em: 26 ago. 2010.

MEDEIROS, J. S ; CÂMARA, G. **Geoprocessamento para projetos ambientais**. São José dos Campos: INPE, 2001. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.19.15.08/doc/cap10-aplicacoesambientais.pdf>>. Acesso em: 06 jan. 2011.

MELLO, L. M. R.; MACHADO, C. A. E. **Cadastro vitícola do Rio Grande do Sul: 2005 a 2007**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2008. 1 CD-ROM.

MELLO, L. M. R. **Vitivinicultura brasileira: panorama 2010**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2011. Disponível em: <<http://www.cnpuv.embrapa.br/publica/artigos/prodvit2010.pdf>>. Acesso em: 12 mai. 2011.

MÉSZÁROŠ, I.; MIKLÁNEK, P. Calculation of potential evapotranspiration based on solar radiation income modeling in mountainous areas. **Biologia**, Bratislava, v. 61, suppl. 19, p. S284-S288, 2006. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/3779k78vxl315758/>>. Acesso em: 01 mar. 2011.

MEYER, R.; HOYER, C.; SCHILLINGS, C.; TRIEB, F.; DIEDRICH, E.; SCHROEDTER, M. **SOLEMI**: a new satellite-based service for high-resolution and precision solar radiation data for Europe, Africa and Asia. In: ISES SOLAR WORLD CONGRESS, 2003, Göteborg. **Proceedings...** Göteborg: International Solar Energy

Society, 2003. Disponível em: <http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/Meyer2003a_proc.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2011.

MILLER, D. G.; RIVINGTON, M.; MATTHEWS, K. B.; BUCHAN, K.; BELLOCCHI, G. Testing the spatial applicability of the Johnson–Woodward method for estimating solar radiation from sunshine duration data. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, p. 466-480, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 15 mai. 2009.

MOORE, I. D., GRAYSON, R. B., LADSON, A. R. Digital terrain modeling - a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, London, v. 5, n.1, p. 3-30, 1991. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com>>. Acesso em: 15 mai. 2009.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 42 p.

MUNEER, T.; ZHANG, X.; WOOD, J. Evaluation of an innovative sensor for measuring global and diffuse irradiance, and sunshine duration. 2002. **International Journal of Solar Energy**, London, v. 22, p. 115-122. Disponível em: <<http://www.informaworld.com/>>. Acesso em: 17 mai. 2009.

MYERS, D. R. Solar radiation modeling and measurements for renewable energy applications: data and model quality. In: INTERNATIONAL EXPERT CONFERENCE ON MATHEMATICAL MODELING OF SOLAR RADIATION AND DAYLIGHT, 2003, Edinburg. **Proceedings...** Edinburg, 2003. Disponível em: <<http://www.osti.gov/bridge>>. Acesso em: 05 jan. 2011.

NIMER, E. **Clima do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1989.

OLYPHANT, G. A. Insolation topoclimates and potential ablation in alpine snow accumulation basins: Front Range, Colorado. **Water Resources Research**, Washington, v. 20, p. 491-498, 1984. Disponível em: <<http://www.agu.org/journals/ABS/1984/WR020i004p00491.shtml>>. Acesso em: 06 jan. 2011.

OESTERLE, H. Reconstruction of daily global radiation for past years for use in agricultural models. **Physics and Chemistry of the Earth**, Amsterdam, v. 26, n. 3, p. 253-256, 2001. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 06 jan. 2011.

PECKHAM, R. J.; JORDAN, G. (ed.) **Digital terrain modelling**. Development and applications in a policy support environment. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 282p., 126 fig. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/>>. Acesso em: 15 dez. 2010.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; DE ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. 60 p. Disponível em: <<http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/05.04.14.11/doc/>>. Acesso em: 24 ago. 2007.

PEREZ, R.; SEALS, R.; ZELENKA, A. Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data. **Solar Energy**, Amsterdam, v. 60, n. 2, p. 89-96, 1997. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 06 jan. 2011.

PROTAS, J. F. S.; CAMARGO, U. A.; MELLO, L. M. R. **A vitivinicultura brasileira: realidade e perspectivas**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2002. Disponível em: <<http://www.cnpuv.embrapa.br/publica/artigos/vitivinicultura/>>. Acesso em: 06 jan. 2011.

PROTAS, J. F. S.; CAMARGO, U. A.; MELLO, L. M. R. Vitivinicultura brasileira: regiões tradicionais e pólos emergentes. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 27, n. 234, p. 7-15, 2006.

QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.; LYRA, R. F. F.; MARIANO, G. L. Avaliação e comparação de radiação solar global e albedo com ângulo zenital na região amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 21, n. 3a, p. 42-49, 2006. Disponível em: <<http://www.rbmet.org.br/>>. Acesso em: 08 out. 2010.

RECIERI, R. P.; KOEHLER, K.; KOEHLER, A. C.; SOUZA, S. N. M. Modelos de estimativa da radiação difusa diária em Cascavel. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Anais...** Campinas, 2002. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/>>. Acesso em: 12 jan. 2011.

RECIERI, R. P.; QUALLIO, S.; FERRUZZI, Y.; SILVA, S. M.; BATISTA, V. R. L. Modelos de estimativa da radiação solar difusa. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., 2004, Campinas. **Anais...** Campinas, 2004. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/>>. Acesso em: 12 jan. 2011.

REVFEIM, K. J. A. On the relationship between radiation and mean daily sunshine. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 86, p. 183-191, 1997. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 18 out. 2009.

RICIERI, R. P., ESCOBEDO, J. F., MARTINS, D. Relações da radiação solar difusa em Botucatu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 9, 1996, Campos do Jordão, **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1996. p. 547-550.

RICH, P. M. Characterizing plant canopies with hemispherical photography. **Remote Sensing Reviews**, Amsterdam, v. 5, p. 13-29, 1990. Disponível em: <<http://www.creeksidescience.com/publications.html>>. Acesso em: 06 jan. 2011.

RICH, P. M.; WOOD, J.; VIEGLAIS, D. A.; BUREK, K.; WEBB, N. **Hemiview User Manual**. Cambridge: Delta-T Devices Ltd., 1999. 79 p.

RUIZ-ARIAS, J. A.; TOVAR-PESCADOR, J.; POZO-VÁZQUEZ, D.; ALSAMAMRA, H. A comparative analysis of DEM-based models to estimate the solar radiation in mountainous terrain. **International Journal of Geographical Information Science**, London, v. 23, n. 8, p. 1049-1076, 2009. Disponível em: <<http://matras.ujen.es/pdf/ruizarias2009comparative.pdf>>. Acesso em: 30 set. 2010.

RUTH, D. W.; CHANT, R. E. The relationship of diffuse radiation to total radiation in Canada. **Solar Energy**, Oxford, v. 18, n.2, p. 153-154, 1976.

ŞAHIN, A. D.; KADIOĞLU, M.; ŞEN, Z. Monthly clearness index values of Turkey by harmonic analysis approach. **Energy Conversion and Management**, Amsterdam, v. 42, p. 933-940, 2001. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 16 jun. 2009.

SANTOS, P. R. A.; GABOARDI, C.; OLIVEIRA, L. C. Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v.

58, n. 1, p. 101-107, 2006. Disponível em: <http://www.rbc.ufrj.br/_pdf_58_2006/58_01_11.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2008.

SARMENTO, E. C.; WEBER, E. J. ; HASENACK, H.; TONIETTO, J. ; MANDELLI, F. Topographic modeling with GIS at Serra Gaúcha, Brazil: elements to study viticultural terroir. In: TERROIR VITICOLE S 2006 CONGRÈS INTERNACIONAL, 6., 2006, Bordeaux. **Terroirs Viticoles 2006**. Bordeaux: Vigne et vin Publications Internationales, 2006, v. 1, p. 365-372.

SARMENTO, E. C. **Comparação de quatro algoritmos de aprendizagem de máquina no mapeamento digital de solos no Vale dos Vinhedos, RS, Brasil**. 2010. 109 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/25977/000756046.pdf>>. Acesso em: 05 dez. 2010.

SCOLAR, J.; MARTINS, D.; ESCOBEDO, J. F. Estimativa da irradiação total sobre uma superfície inclinada a partir da irradiação global na horizontal. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 3, p. 249-258, 2003. Disponível em : <<http://www.scielo.br/rbg>>. Acesso em: 23 jun. 2009.

SENTELHAS, P. C.; MORAES, S. O.; PIEDADE, S. M. S.; PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; MARIN, F. R. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estações convencional e automática. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, vol. 5, n. 2, p. 215-221, 1997.

SOUZA, M. J. H. de.; ALVES, A. R. Avaliação de modelos para estimar a irradiância solar direta diária em duas localidades do estado de Minas Gerais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 16, n. 4, p. 1-10, 1997.

SOUZA, J. L.; NICÁCIO, R. M.; BERNARDO, S. O.; CAVALCANTI, E. A. B. Irradiância solar e transmissão atmosférica na região de Maceió-AL. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: <<http://www.cbmet.com/>>. Acesso em: 09 set. 2010.

SOUZA, F. A. **Mudanças promovidas no setor vitivinícola do Rio Grande do Sul pela inserção de profissionais especializados nas áreas de viticultura e enologia**. 2005. 142 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em : <[http://www.ia.ufrj.br/ppgea/dissertacao/Flávio Abreu de Souza.pdf](http://www.ia.ufrj.br/ppgea/dissertacao/Flávio%20Abreu%20de%20Souza.pdf)>. Acesso em: 07 mar. 2011.

SOUZA, J. D.; SILVA, B. B. Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, p. 349-358, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/rbg>>. Acesso em: 21 jul. 2008.

SOUZA, A. P.; ESCOBEDO, J. F.; DAL PAI, A.; GOMES, E. N. Estimativa da radiação global incidente em superfícies inclinadas por modelos isotrópicos e índice de claridade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.4, p.339-350, 2010. Disponível em : <<http://webnotes.sct.embrapa.br/pdf/pab2010/04/45n04a01.pdf>>. Acesso em: 02 jul. 2010.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DAL MOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008. 222 p.

SUCHAROV, E. C.; ROSA, M. B. Estimativas da radiação solar direta normal através de um modelo parametrizado, na ausência de nuvens. **Anuário IGeo**, Rio de Janeiro, vol. 17, p. 73-92, 1994. Disponível em : <http://www.anuario.igeo.ufrj.br/anuario_1994/vol_17_73_92.pdf>. Acesso em: 9 set. 2009.

ŠÚRI, M.; HOFIERKA, J. A new GIS-based solar radiation model and its application to photovoltaic assessments. **Transactions in GIS**, Oxford, v. 8, n. 2, p. 175-190, 2004. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/>>. Acesso em: 13 jul. 2007.

ŠÚRI, M.; HULD, T.; DUNLOP, E. D.; HOFIERKA, J. Solar resource modelling for energy applications. In: PECKHAM, R. J.; JORDAN, G. (Ed.) **Digital terrain modelling: development and applications in a policy support environment**. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 282p., 126 fig. Disponível em:<<http://www.springerlink.com/>>. Acesso em: 15 dez. 2010.

THOMPSON, J. A.; BELL, J. C.; BUTLER, C. A. Digital Elevation Model resolution : effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. **Geoderma**, Amsterdam, v. 100, p. 67-89, 2001. Disponível em : <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 23 set. 2009.

THORNTON, P. E.; RUNNING, S. W.; WHITE, M. A. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 190, n. 3-4, p. 214-251, 1997. Disponível em : <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 06 jan. 2011.

TONIETTO, J.; CARBONNEAU, A. Análise mundial do clima das regiões vitícolas e de sua influência sobre a tipicidade dos vinhos: a posição da viticultura brasileira comparada a 100 regiões em 30 países. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE VITICULTURA E ENOLOGIA, 9., 1999, Bento Gonçalves, **Anais...** Bento Gonçalves, 1999. Disponível em: <<http://www.cnpuv.embrapa.br/tecnologias/ccm/bib.en.html>>. Acesso em: 06 jan. 2011.

TONIETTO, J.; MANDELLI, F. Como organizar, promover y reconocer regiones de excelencia de producción de vinos: una experiencia de Brasil en indicadores geográficos. In: SEMINARIO INTERNACIONAL DE VITIVINICULTURA, 2. 2005, Ensenada, **Anais...** Ensenada: Inifap, 2005, p. 7-19.

TONIETTO, J.; MANDELLI, F.; WEBER, E. J.; HASENACK, H. Zonage climatique viticole et cartographie numérique du Rio Grande do Sul - Brésil, par les indices du Système CCM Géoviticole. In: TERROIR VITICOLES 2006 CONGRÈS INTERNACIONAL, 6., 2006, Bordeaux. **Terroirs Viticoles 2006**. Bordeaux: Vigne et vin Publications Internationales, 2006a. v. 1, p. 21-26.

TONIETTO, J.; HASENACK, H.; WEBER, E. J.; SARMENTO, E. C.; FALCADE, I. Eléments de viticulture de montagne dans les indications géographiques Vale dos Vinhedos et Pinto Bandeira dans la Serra Gaúcha, Brésil. In: CONGRESSO INTERNAZIONALE SULLA VITICULTURA DI MONTAGNA E INFORTE PENDENZA, 1., 2006, Saint-Vincent (Vallée d'Aoste). **Proceedings...** Saint-Vincent (Vallée d'Aoste): CERVIM, 2006b.

TOUTIN, T. Elevation Modelling from Satellite VIR Data : A Review. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 22, n. 6, p. 1097-1225. 2001. Disponível em : <<http://geopub.rncan.gc.ca/>>. Acesso em: 06 jan. 2011.

TOVAR-PESCADOR, J.; POZO-VÁZQUEZ, D.; RUIZ-ARIAS, J. A.; BATLLÉS, J.; LÓPEZ, G.; BOSCH, J. L. On the use of the digital elevation model to estimate the solar radiation in areas of complex topography. **Meteorological Applications**, Oxford, v. 13, p. 279-287, 2006. Disponível em : <<http://onlinelibrary.wiley.com/>>. Acesso em : 08 nov. 2007.

TRNKA, M.; ZALUD, Z.; EITZINGER, J.; DUBROVSKY, M. Global solar radiation in Central European lowlands estimated by various empirical formulae. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 131, p. 54-76, 2005. Disponível em : <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 13 jul. 2007.

TSUBO, M.; WALKER, S. Relationships between photosynthetically active radiation and clearness index at Bloemfontein, South Africa. **Theoretical and Applied Climatology**, Vienna, v. 80, p. 17-25, 2005. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/>>. Acesso em: 16 jun. 2009.

TURCO, J. E. P.; RIZZATTI, G. S. Avaliação de modelo matemático para estimar a radiação solar incidente sobre superfícies com diferentes exposições e declividades. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.1, p. 257-267, 2006. Disponível em : <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v26n1/30117.pdf>>. Acesso em: 01 abr. 2009.

UO SOLAR MONITORING LAB. **Pacific Northwest Solar Radiation Data**. Eugene: University of Oregon. 1999. 51 p. Disponível em: <<http://solardata.uoregon.edu>>. Acesso em: 26 ago. 2010.

VALIATI, M. I.; RICIERI, R. P. Estimativa da irradiação solar global com partição mensal e sazonal para a região de Cascavel - PR. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 76-85, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v25n1/24873.pdf>>. Acesso em: 05 ago. 2009.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. Recife: ed. do autor, 2006. 449p. (Versão digital 2.) Disponível em : <http://www.agritempo.gov.br/modules.php?name=downloads&d_op=getit&lid=51>. Acesso em: 05 ago. 2009.

VILELA, W. A. **Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar**. 2010. 177 f. Tese (doutorado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Paulo, 2010. Disponível em : <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/389G8B5>>. Acesso em: 08 fev. 2011.

WANG, Q.; TENHUNEN, J.; SCHMIDT, M.; KOLCUN, O.; DROESLER, M. A model to estimate global radiation in complex terrain. **Boundary-Layer Meteorology**, Heidelberg, v. 119, n.2, p. 409-429, 2006. Disponível em : <<http://www.springerlink.com/>>. Acesso em: 08 nov. 2007.

WEBER, E.; HASENACK, H.; FLORES, C. A.; PÖTTER, R. O.; FASOLO, P. J. GIS as a Support to Soil Mapping in Southern Brazil. In: HARTEMINK, A. E.; MCBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. L. (Ed.) **Digital Soil Mapping with Limited Data**. Amsterdam: Springer, 2008. p. 103-112.

WILLIAMS, J. G. Change in the transmissivity parameter with atmospheric path length. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, vol. 15, p. 1321-1323, 1976. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450%281976%29015%3C1321%3ACITTPW%3E2.0.CO%3B2>>. Acesso em: 26 ago. 2010.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (Ed.). **Terrain Analysis: principles and applications**. New York: J. Wiley, 2000. 479 p.

WINSLOW, J. C.; HUNT, E. R.; PIPER, S. C. A globally applicable model of daily solar irradiance estimated from air temperature and precipitation data. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 143, p. 227-243, 2001. Disponível em : <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 06 jan. 2011.

ZAKŠEC, K.; PODOBNIKAR, T.; OSTIR, K. Solar radiation modelling. **Computers & Geosciences**, Amsterdam, v. 31, p. 233-240, 2005. Disponível em : <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00983004>>. Acesso em: 29 set. 2007.