

Obstrução do horizonte calculada a partir de modelo digital de elevação

Eliseu José Weber⁽¹⁾ e Denise Cibys Fontana⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Avenida Bento Gonçalves, nº 7.712, CEP 91540-000 Porto Alegre, RS. E-mail: eliseu.weber@ufrgs.br, dfontana@ufrgs.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar a exatidão do cálculo da obstrução do horizonte, a partir de um modelo digital de elevação (MDE), em diferentes situações topográficas. O material utilizado incluiu um MDE disponível para a região da Serra Gaúcha, RS, receptores GPS, câmera digital, lente grande-angular e os programas Idrisi, Arcview/ArcGIS e Solar Analyst. Foram adquiridas fotografias hemisféricas, e coletadas as coordenadas de 16 locais na área de estudo. As coordenadas e o MDE foram utilizados para calcular a obstrução do horizonte com uso do algoritmo Solar Analyst. Foram comparadas a fração aberta do céu calculada e a obtida pelas fotografias hemisféricas. O coeficiente de determinação foi de 0,8428, tendo-se observado superestimativa média de 5,53% da fração aberta do céu. Os erros são atribuídos principalmente à obstrução pela vegetação, que não pode ser identificada pelo MDE. A obstrução do horizonte, causada pelo relevo na Serra Gaúcha, pode ser calculada satisfatoriamente pelo Solar Analyst, a partir de um MDE interpolado de cartas topográficas na escala 1:50.000.

Termos para indexação: fração aberta do céu, radiação solar, SIG, Solar Analyst, topografia, vegetação.

Horizon obstruction computed from a digital elevation model

Abstract – The objective of this work was to evaluate the accuracy of the horizon obstruction calculation, from a digital elevation model (DEM), at different topographic situations. The material used included an available DEM for the Serra Gaúcha region, RS, Brazil, GPS receivers, a digital camera, wide angle lens, and Idrisi, Arcview/ArcGIS and Solar Analyst softwares. For 16 locations in the study area, hemispherical photographs were acquired and coordinates were collected. Coordinates and DEM were used to calculate the horizon obstruction using the Solar Analyst algorithm. The open sky fraction computed from the DEM and obtained by hemispherical photograph were compared. Determination coefficient was 0.8428, and an average overestimation of 5.53% of the open sky fraction was observed. Errors are mainly attributed to obstruction caused by vegetation, which cannot be identified by the DEM. The horizon obstruction caused by relief in Serra Gaúcha can be computed satisfactorily by the Solar Analyst, from a DEM interpolated from topographical charts at 1:50,000 scale.

Index terms: sky view factor, solar radiation, GIS, Solar Analyst, topography, vegetation.

Introdução

A radiação solar exerce papel determinante nos processos de troca de energia entre a atmosfera e a superfície terrestre, e afeta direta ou indiretamente a maioria das atividades humanas (Zakšec et al., 2005; Tovar-Pescador et al., 2006). A escassez de registros de radiação solar frequentemente torna necessário fazer uso de estimativas, para gerar dados em locais onde não há estações meteorológicas com radiômetros (Pereira et al., 2006). Em geral, os métodos para estimativas de radiação abrangem 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 ou o emprego de modelos de radiação.

Na última década, em razão do crescente interesse no aproveitamento energético, o desenvolvimento de modelos para estimativa da radiação solar ganhou maior impulso. Entre os avanços introduzidos, destaca-se a associação dos modelos de radiação aos sistemas de informação geográfica (SIG). Isso tornou possível gerar estimativas espacialmente contínuas e com alta resolução espacial, além de computar também o efeito da topografia local. Neste caso, as variáveis topográficas são derivadas de modelos digitais de elevação (MDE), o que permite a obtenção de estimativas de radiação incidente pixel a pixel. Entre os modelos que adotam este tipo de abordagem, pode-se citar o SolarFlux (Dubayah & Rich, 1995), Solei-32 (Mészáros &

Miklánek, 2006), Solar Analyst (Fu & Rich, 2000), SRAD (Wilson & Gallant, 2000), Toporad (Kang et al., 2002) e *r.sun* (Šuri & Hofierka, 2004), entre outros.

Nessa categoria de modelos, além de outros fatores, a qualidade das estimativas depende da resolução espacial e da exatidão do MDE, a partir do qual são determinadas a inclinação e a orientação da superfície e a obstrução do horizonte por elevações vizinhas. Assim, resultados pouco satisfatórios, eventualmente atribuídos ao desempenho de um determinado modelo de estimativa de radiação, podem ser, na verdade, consequência de dados topográficos inadequados, especialmente em regiões de relevo movimentado. Em geral, a inclinação e a orientação calculadas tendem a se aproximar da realidade à medida que a resolução espacial do MDE aumenta, o que não é necessariamente válido para a obstrução do horizonte e, portanto, para as estimativas de radiação obtidas (Thompson et al., 2001; Kang et al., 2002; Ruiz-Arias et al., 2009).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a exatidão do cálculo da obstrução do horizonte, a partir de um modelo digital de elevação (MDE), em diferentes situações topográficas na região da Serra Gaúcha.

Material e Métodos

A área de estudo compreende a zona de produção vitivinícola denominada Serra Gaúcha, localizada na porção nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, entre 28°30'S e 29°30'S e 50°40'W e 52°5'W. O clima da região, conforme a classificação de Köppen, é do tipo Cfb, subtropical com verão ameno.

A Serra Gaúcha integra a formação Serra Geral, da série São Bento, na Bacia do Rio Paraná, e situa-se na unidade geomorfológica da Serra Geral, na região geomorfológica do Planalto das Araucárias (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1986). De acordo com a divisão fisiográfica do Estado, a Serra Gaúcha situa-se parcialmente na Encosta Inferior do Nordeste, Encosta Superior do Nordeste e Campos de Cima da Serra. De maneira geral, o relevo da região é complexo e apresenta grandes variações de altitude, declividade e exposição solar (Sarmiento et al., 2008). A topografia é ondulada no topo e apresenta bordas escarpadas e recortadas, com 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. Esse modelado é conhecido regionalmente por “Região Serrana” (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1986).

Para caracterizar a topografia, foi utilizado um MDE interpolado a partir de curvas de nível de 20 cartas topográficas da Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (DSG) na escala 1:50.000. O método de interpolação utilizado foi 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”, para estimar a altitude do fundo dos vales e do topo de elevações. O MDE totaliza uma superfície de aproximadamente 1.348.961 ha e cobre a maior parte da Serra Gaúcha, com uma resolução espacial de 30 m (Hasenack & Weber, 2007). Para o processamento de dados, foram empregados os programas de SIG Idrisi Taiga (Clarklabs) e ArcView/ArcGIS (ESRI), além do aplicativo Solar Analyst (Helios Environmental Modeling Institute - HEMI), disponível gratuitamente.

Para a obtenção de fotografias hemisféricas, foi utilizada uma câmera digital Nikon Coolpix 950, com acoplamento vertical da lente. A lente empregada foi uma grande-angular Nikon FC-E8, com campo de visada de 183°, capaz de registrar toda a abóbada acima de um local. A projeção da imagem é bem conhecida e documentada, tanto pelo fabricante quanto em estudos de calibração (Inoue et al., 2004; Pekin & Macfarlane, 2009).

A primeira etapa do estudo envolveu trabalho de campo para aquisição de fotografias hemisféricas. Previamente, foi selecionado um conjunto de 30 pontos, distribuídos pela área de estudo e com possibilidade de acesso por via terrestre. O número de pontos foi estabelecido em razão da distância estimada a percorrer e dos recursos disponíveis, para viabilizar a aquisição dos dados. Optou-se por priorizar a distribuição espacial e a representatividade dos pontos em relação à situação topográfica quanto à altitude, declividade, orientação da superfície e obstrução do horizonte, em detrimento do número de pontos. Entre os locais selecionados, foram incluídas cinco estações meteorológicas que possuem registros de radiação solar, com o propósito de posterior interpretação e avaliação de seus dados e comparação com estimativas.

Em cada local, foram coletadas as coordenadas geográficas e as coordenadas UTM da posição do

equipamento fotográfico, bem como a altitude, com auxílio de receptor GPS. Para a aquisição das fotografias hemisféricas, o conjunto de câmera e lente foi nivelado, 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 coincidissem com o Norte geográfico, o qual não varia ao longo do tempo. No caso dos pontos correspondentes a estações meteorológicas, procurou-se instalar o equipamento o mais próximo possível do radiômetro.

Após o trabalho de campo, foi feita uma avaliação qualitativa dos dados, tendo-se descartado os pontos com inconsistências no posicionamento pela perda ou má recepção do sinal GPS, ou nas fotografias hemisféricas, pela orientação ou nivelamento inadequados do equipamento, entre outros. Ao todo, foram considerados válidos dezesseis pontos, distribuídos em nove municípios da área de estudo (Tabela 1). Embora reduzido, esse número de pontos possibilitou uma distribuição espacial e localização representativas das diferentes situações topográficas encontradas na região.

As fotografias hemisféricas foram processadas pela aplicação da técnica do limiar de nível de cinza

(Chapman et al., 2001), para discriminar as áreas obstruídas e não obstruídas (Figura 1). A porção obstruída e a fração aberta do céu foram, então, calculadas a partir da soma do número de pixels existentes em cada situação, dividida pelo número total de pixels da área útil de cada fotografia.

As coordenadas dos locais visitados em campo para obtenção das fotografias hemisféricas foram utilizadas para calcular um diagrama de obstrução do horizonte de cada ponto, com auxílio do aplicativo Solar Analyst. O cálculo do diagrama partiu da posição do ponto sobre o MDE e de um número pré-definido de direções, para as quais foi calculado o ângulo do horizonte. No presente estudo, foram utilizadas 32 direções (Figura 2 A), o que equivale a uma medida de ângulo do horizonte a cada 11° 15', no sentido horário, a partir do Norte.

Ao longo de cada direção especificada, foi calculado o ângulo máximo de obstrução do céu (Figura 2 B), determinado a partir da diferença entre a altitude do pixel em análise e a altitude de cada pixel (h) existente ao longo da direção em questão, dividida pela distância horizontal (d) que os separa. O resultado corresponde à tangente do ângulo do horizonte para o pixel em análise, de forma que o ângulo (ϕ) pode ser computado conforme a equação $\phi = \arctg(h/d)$. O maior ângulo encontrado ao longo de uma determinada direção representa o horizonte efetivo do pixel em questão.

Tabela 1. Identificação, município, coordenadas geográficas e UTM (Datum WGS84) e altitude de 16 pontos visitados para aquisição de fotografias hemisféricas, na zona de produção vitivinícola da Serra Gaúcha, RS.

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

⁽¹⁾Estação meteorológica convencional da Fepagro, com registro de radiação solar global de longo prazo. ⁽²⁾Estação meteorológica automática da Embrapa Uva e Vinho.

Os ângulos de obstrução calculados foram convertidos para coordenadas hemisféricas (Figura 3 A), interpolados linearmente nas direções não medidas (Figura 3 B) e, depois, projetados em uma grade bidimensional. No presente estudo, foi utilizada uma grade de 800 colunas e 800 linhas, no

total de 640 mil células. A posição de cada célula (linha e coluna) nessa grade corresponde a uma posição no hemisfério celeste, definida por um ângulo zenital (ou de elevação) e por um ângulo azimutal.

No diagrama de obstrução resultante (Figura 3 C), o centro corresponde ao zênite, os círculos concêntricos

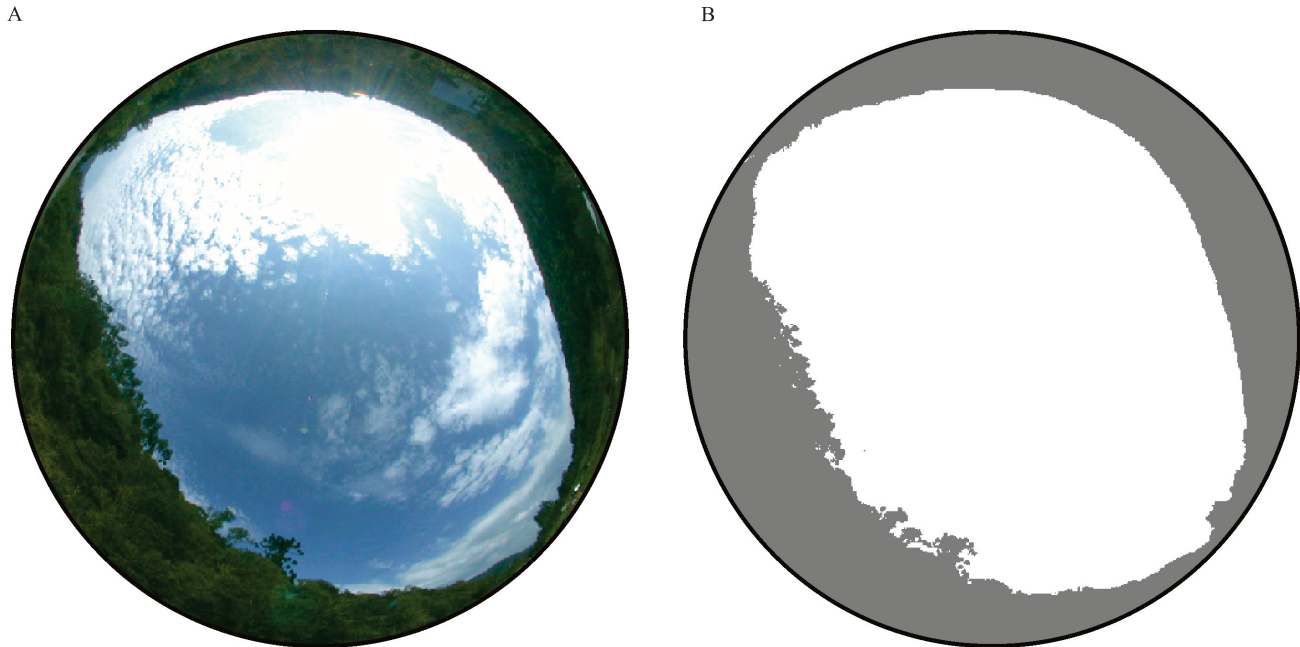


Figura 1. Fotografia hemisférica (A) e resultado da discriminação das áreas obstruídas (em cinza) e abertas (em branco), pela técnica do limiar de nível de cinza (B).

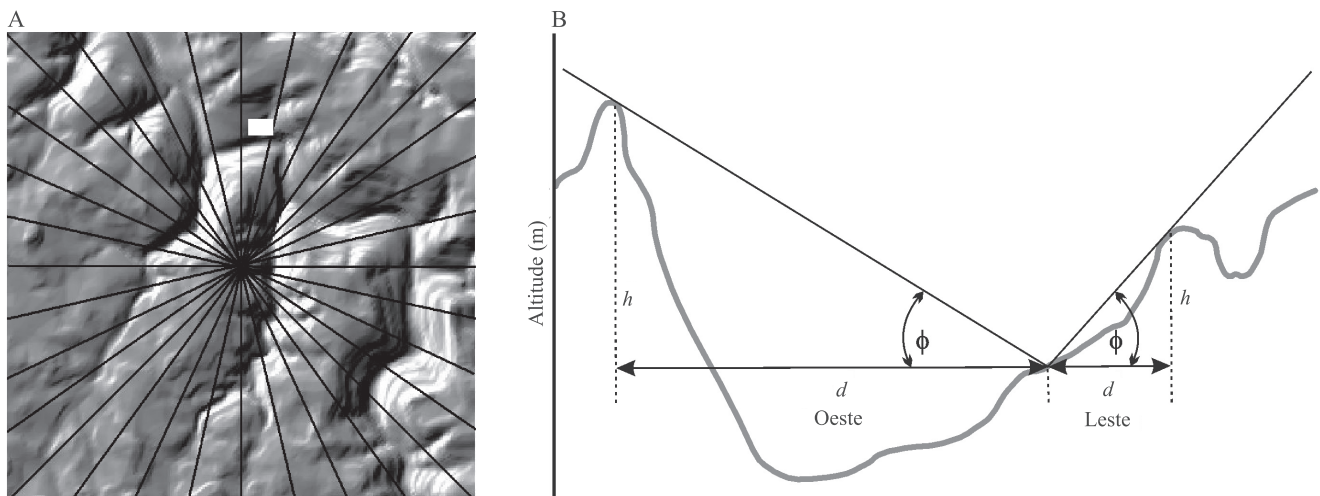


Figura 2. Definição de um conjunto de 32 direções para o cálculo do ângulo de obstrução do horizonte (A) e cálculo do ângulo do horizonte (Fu & Rich, 2000, modificado) (B).

representam ângulos de elevação acima da linha do horizonte, e os valores em torno do diagrama representam ângulos azimutais. As células situadas abaixo do horizonte efetivo correspondem a direções do céu obstruídas. Por último, assim como nas fotografias hemisféricas, a porção obstruída e a fração aberta do céu foram calculadas pela soma dos pixels, em cada situação, dividida pelo total de pixels na área útil do diagrama de obstrução.

Os resultados foram avaliados mediante comparação entre a fração aberta do céu, totalizada nos diagramas de obstrução, e a fração aberta, totalizada nas fotografias hemisféricas consideradas como referência. Os parâmetros utilizados foram o erro absoluto, o erro proporcional e o teste F, a 5 e 1% de probabilidade.

Para avaliação visual, a fim de auxiliar a interpretação dos resultados, o diagrama de obstrução de cada ponto foi sobreposto à fotografia hemisférica correspondente, tomando-se o Norte geográfico como referência para o alinhamento. Adicionalmente, o conjunto de cada fotografia e respectivo diagrama foi invertido na direção Leste-Oeste, para facilitar a associação com as direções habituais. 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.

Resultados e Discussão

O coeficiente de determinação (R^2), entre a fração aberta do céu determinada por fotografia hemisférica e a calculada por meio do diagrama de obstrução foi de 0,8428, e os erros absoluto e proporcional variaram de -4,13 a 16,49% e de -5,09 a 33,62%, respectivamente (Tabela 2). Observou-se tendência de superestimativa da fração aberta do céu, na maioria dos pontos, o que resultou em erro médio absoluto de 3,7 e erro médio proporcional de 5,53%. As maiores superestimativas ocorreram nos pontos 12 e 15. Ambos os locais correspondem a vales altamente encaixados no relevo, rodeados de encostas íngremes e cobertas com vegetação arbórea. Nesses locais, observou-se que o terreno foi corretamente representado no diagrama de obstrução, mas a obstrução do horizonte causada pela vegetação não foi mapeada (Figuras 4 A e B). Em outras palavras, os erros de superestimativa da fração aberta do céu ocorreram principalmente em razão da presença de vegetação nas proximidades, a qual não foi considerada no cálculo do diagrama de

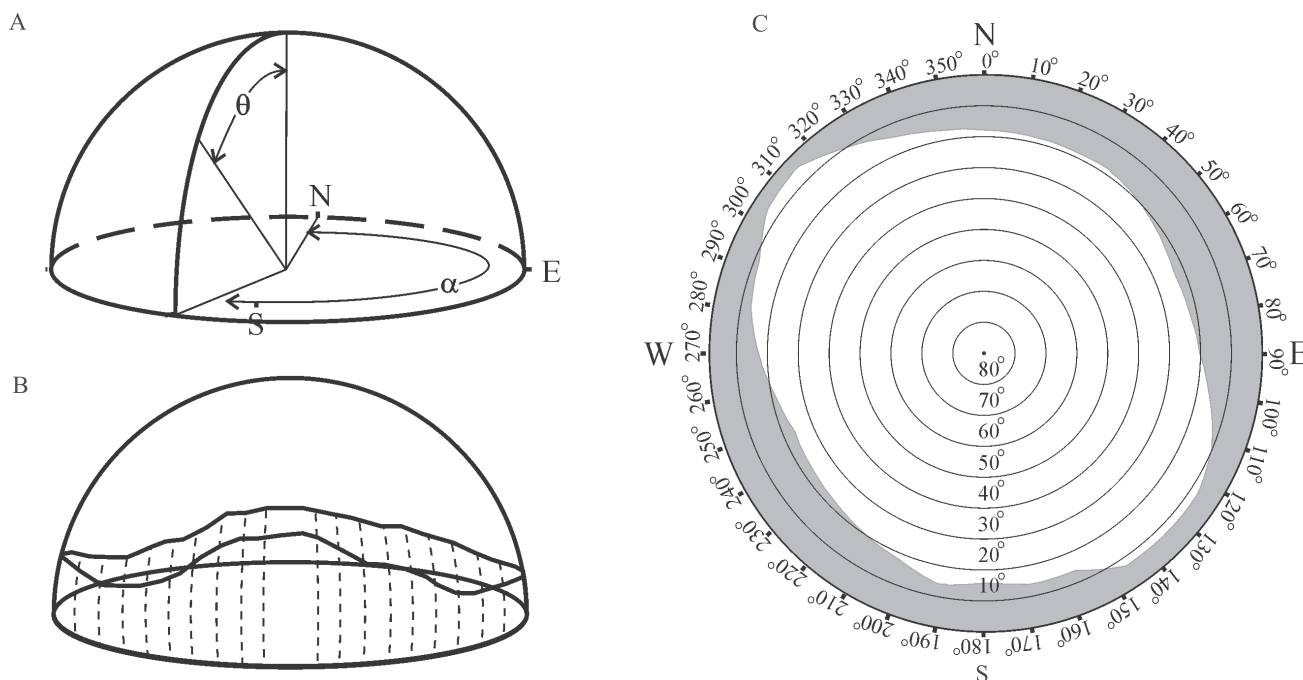


Figura 3. Conversão dos ângulos de obstrução do horizonte para coordenadas hemisféricas (A), interpolação entre as direções não medidas (B) e diagrama de obstrução (C) (Fu & Rich, 2000; Gál et al., 2008, modificados).

obstrução, uma vez que este se baseou unicamente nas altitudes do MDE.

Nos locais em que houve subestimativa, onde a obstrução calculada ficou acima do horizonte real (Figuras 4 C e D), observou-se que houve pouca contribuição da vegetação. Esse tipo de erro, em geral, apresentou menor magnitude, foi menos frequente do que o erro de superestimativa – tendo sido observado em apenas três locais (Tabela 2) – e está relacionado a elevações situadas próximo ao ponto em análise. As causas podem ser diversas, inclusive as incertezas nas curvas de nível utilizadas como base para gerar o MDE, o método de interpolação usado para gerar o MDE ou o próprio método de cálculo da obstrução. Quanto mais próxima uma elevação estiver do ponto em questão, maior é o valor do ângulo de obstrução e, conseqüentemente, o impacto de incertezas nas altitudes para a determinação do ângulo do horizonte tende a ser maior (Gál et al., 2009).

A confiabilidade de variáveis topográficas depende da acurácia e da resolução espacial do MDE a partir do qual elas são calculadas (Thompson et al., 2001; Kang et al., 2002). O MDE utilizado no presente estudo foi gerado por interpolação a partir de curvas

de nível, cuja acurácia vertical na escala em questão situa-se em torno de 10 m. O método empregado na interpolação é considerado apropriado para áreas de relevo movimentado, pois redes triangulares podem incorporar descontinuidades no terreno mais facilmente do que outros métodos, além de serem estruturas eficientes, pois a densidade dos triângulos pode variar para se ajustar à complexidade do relevo (Moore et al., 1991; Wilson & Gallant, 2000).

A exatidão do MDE não foi determinada, uma vez que não se realizou análise comparativa de seus valores com a altitude real observada no terreno. No entanto, considerando-se as cartas em escala 1:50.000 da DSG como documentos cartográficos classe A, cujo padrão de exatidão cartográfica (PEC) estabelece um erro-padrão altimétrico inferior a 6,67 m, e as propriedades do método de interpolação, presume-se que a qualidade do MDE seja igual ou superior a outras fontes de dados altimétricos disponíveis. Entre eles, citam-se os dados SRTM (“shuttle radar topography mission”), que cobrem a maior parte da superfície emersa da Terra entre as latitudes 60°N e 56°S, com resolução espacial de aproximadamente 90 m. Outra alternativa 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”), cujos dados cobrem a superfície terrestre entre as latitudes 83°N e 83°S, com resolução espacial de cerca de 30 m.

A qualidade de ambos os produtos varia conforme a região e necessita de avaliações específicas para determinação da acurácia local. O SRTM, por exemplo, tem acurácia vertical declarada de 16 m, mas Rodríguez et al. (2006) encontraram erros absolutos médios entre 5,6 a 9 m para 90% de confiança, conforme o continente. Gorokhovich & Voustianiouk (2006) avaliaram altitudes em duas áreas, com relevo distinto, e concluíram que os erros absolutos tendem a ser inferiores a 10 m. Santos et al. (2006) avaliaram o SRTM em uma área da Amazônia e, tendo encontrado erro médio quadrático em torno de 11 m, concluíram que o material atende aos pré-requisitos para documentos cartográficos classe A apenas na escala 1:100.000. O GDEM tem acurácia vertical declarada de 20 m para 95% de confiança, conforme Hirano et al. (2003) observaram para vários MDE derivados de imagens Aster. Hengl & Reuter (2011), entretanto, avaliaram o GDEM em quatro países e, tendo constatado muitos

Tabela 2. Fração aberta do céu, determinada por fotografia hemisférica e calculada a partir de modelo digital de elevação (diagrama de obstrução), para 16 locais na Serra Gaúcha, RS⁽¹⁾.

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	77,68a	81,38a	3,70	5,53

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si, pelo teste F, a 1% de probabilidade.

erros sistemáticos, concluíram que a resolução espacial mais apropriada para o GDEM deveria ser de 90 m, a fim de suavizar picos e buracos causados pelo registro imperfeito entre pares de imagens estereoscópicas e pela presença de nuvens e de sombras, entre outros.

Zhao et al. (2011), ao avaliar o GDEM em duas áreas na China, encontraram erros de 7,95 a 22,89 m.

Em razão do método de aquisição, tanto o SRTM quanto o GDEM reportam o topo do dossel da vegetação, o que é particularmente útil em aplicações

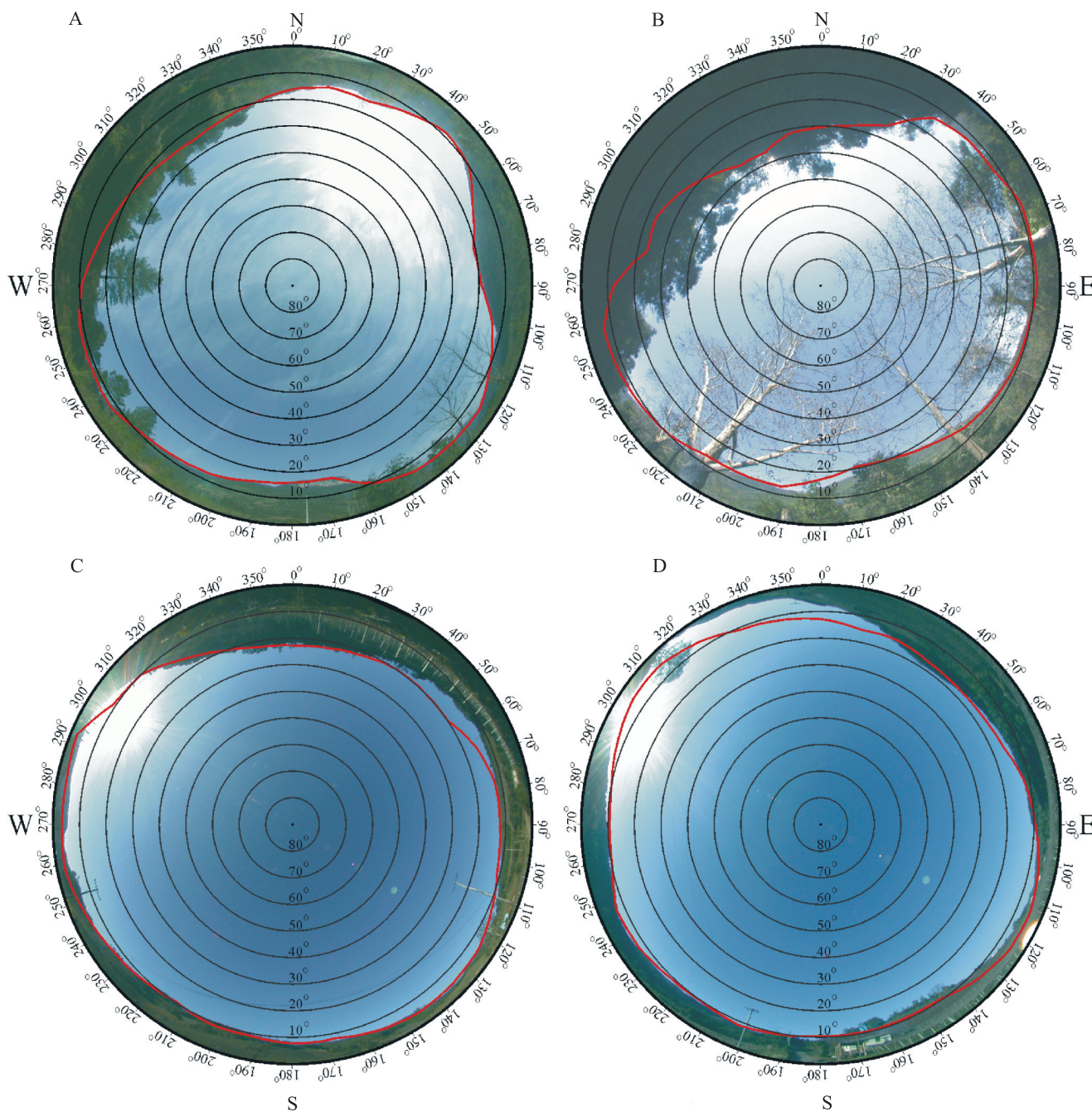


Figura 4. Diagramas de obstrução calculados (linha vermelha) e fotografias hemisféricas, para: A e B, locais com maior superestimativa da fração aberta do céu (respectivamente os pontos 12 e 15); e C e D, locais com maior subestimativa (respectivamente os pontos 7 e 8).

que procuram estimar propriedades da vegetação (Valeriano & Abdon, 2007). No entanto, isso introduz erros em aplicações que buscam estimar características do terreno, como cálculo de variáveis topográficas ou modelagem hidrológica, por exemplo (Hengl et al., 2011). Em regiões altamente antropizadas, como a Serra Gaúcha, a vegetação sofre variações consideráveis ao longo do tempo, em consequência de mudanças no uso do solo, o que introduz discrepâncias, especialmente com relação ao SRTM, cujos dados foram adquiridos há mais de uma década. Um MDE interpolado a partir de dados cartográficos, em contrapartida, desconsidera a vegetação e representa a superfície do terreno, que é mais apropriada para a extração de dados morfométricos e para aplicações climatológicas, porque varia menos no tempo, razão pela qual foi a alternativa adotada no presente estudo. Todavia, é importante destacar que, para muitas regiões, os dados do SRTM ou do GDEM constituem a melhor opção, porque não existe cartografia detalhada para elas.

Quanto à resolução espacial do MDE, o valor de 30 m adotado no presente estudo foi determinado por sua adequação e compatibilidade com a escala e acurácia das cartas originais da DSG. Thompson et al. (2001) ressaltam que o incremento da resolução espacial não está diretamente relacionado à melhoria no cálculo de variáveis topográficas, pois ela depende fundamentalmente da qualidade dos dados altimétricos originais. Kang et al. (2002) estudaram o efeito de escala na estimativa da irradiação, em superfícies inclinadas na Coreia, e também constataram que a acurácia dos resultados não está relacionada de forma linear à resolução espacial do MDE. Tovar-Pescador et al. (2006), ao usarem um MDE com resolução de 20 m, encontraram diferenças acentuadas entre os valores de declividade e de orientação da superfície calculados com o Solar Analyst e os medidos in loco em uma área de relevo complexo. Todavia, os autores não descrevem como o MDE foi obtido e não discutem as possíveis causas dos erros observados.

Batlles et al. (2008) avaliaram o efeito da topografia sobre a irradiação em superfícies inclinadas, em área montanhosa, a partir de um MDE com resolução de 20 m, e concluíram que a orientação da superfície e a obstrução do horizonte são as variáveis que controlam o fluxo de radiação incidente nessas condições. No entanto, os estudos, na literatura, em que se utilizou o Solar Analyst não avaliaram a confiabilidade do cálculo

da obstrução do horizonte; a maioria desses estudos apresenta e discute os resultados finais das estimativas de radiação incidente na superfície. Especificamente em áreas montanhosas, Tovar-Pescador et al. (2006), Batlles et al. (2008) e Ruiz-Arias et al. (2009) atribuem parte dos erros observados em estimativas de radiação com o Solar Analyst a incertezas na determinação de outras variáveis topográficas, como declividade e orientação, ou de parâmetros atmosféricos.

A obstrução do horizonte na Serra Gaúcha, calculada pelo Solar Analyst em diferentes locais, representou satisfatoriamente o horizonte real. Embora o número de pontos avaliados seja reduzido, os resultados indicam que o método usado pelo algoritmo permite calcular a obstrução do horizonte para qualquer local a partir de um MDE, o que possibilita sua consideração em estimativas da radiação e, inclusive, na interpretação de dados de radiação solar de estações meteorológicas, especialmente em áreas de relevo movimentado. Neste caso, as coordenadas da estação podem ser usadas para posicioná-la sobre o MDE e calcular o respectivo diagrama. Isso é importante, pois 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 (Aguilar et al., 2010). Com um diagrama de obstrução do local da estação, é possível contabilizar a interferência causada pelo relevo e, assim, fazer as devidas considerações ao usar e interpretar os dados.

Embora a obstrução pela vegetação e por construções não possa ser identificada no MDE derivado das cartas da DSG, a possibilidade de se avaliar o efeito da obstrução do horizonte sobre a radiação incidente com o Solar Analyst representa um avanço em relação a outras abordagens. Souza et al. (2010), por exemplo, estimaram a radiação solar em superfícies com diferentes inclinações, a partir de medidas feitas na horizontal, em Botucatu, SP, (22°51'S), com cinco modelos isotrópicos. Em todos os modelos, a dispersão das estimativas em relação aos dados medidos aumentou com a inclinação da superfície, o que foi parcialmente explicado pela obstrução do plano horizontal não considerada no cálculo.

A introdução da vegetação no cálculo da obstrução depende mais dos dados altimétricos de entrada do que do método de cálculo propriamente dito. Nesse caso, usar um MDE do SRTM ou do GDEM – ambos registram o topo da vegetação – é uma alternativa, embora possa haver discrepâncias entre a situação da vegetação no campo e no MDE. Outra alternativa é usar um mapa de uso e cobertura do solo, obtido a partir de imagens de sensoriamento remoto, atribuir a cada classe de cobertura uma altura e, então, adicioná-lo ao MDE interpolado de cartas topográficas. No entanto, para muitos locais, tal mapa não está disponível com detalhamento adequado e com qualidade conhecida. Produzi-lo requer trabalho de campo para coletar dados de áreas de treinamento e para avaliar a qualidade do resultado.

Conclusões

1. O Solar Analyst calcula satisfatoriamente a obstrução do horizonte a partir de um modelo digital de elevação (MDE).

2. Um MDE interpolado a partir de cartas topográficas em escala 1:50.000 permite determinar adequadamente a obstrução do horizonte causada pelo relevo, na Serra Gaúcha.

3. A obstrução do horizonte calculada com o Solar Analyst, a partir de um MDE derivado de cartas topográficas, tende a subestimar a obstrução do horizonte em locais circundados com vegetação arbórea.

Referências

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 Systems Science**, v.14, p.2479-2494, 2010.

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**, v.49, p.336-345, 2008.

CHAPMAN, L.; THORNES, J.E.; BRADLEY, A.V. Rapid determination of canyon geometry parameters for use in surface radiation budgets. **Theoretical and Applied Climatology**, v.69, p.81-89, 2001.

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

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

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**, v.95, p.111-123, 2009.

GOROKHOVICH, Y.; VOUSTIANIOUK, A. Accuracy assessment of the processed SRTM-based elevation data by CGIAR using field data from USA and Thailand and its relation to the terrain characteristics. **Remote Sensing of Environment**, v.104, p.409-415, 2006.

HASENACK, H.; WEBER, E. (Org.). **Dados digitais espaciais da Serra Gaúcha**: zoneamento vitícola para o Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 2007. CD ROM. (Série geoprocessamento, 2).

HENGL, T.; REUTER, H. How accurate and usable is GDEM? A statistical assessment of GDEM using LiDAR data. In: GEOMORPHOMETRY, 2., 2011, Redlands. **Proceedings**. Redlands: ESRI, 2011. p.45-48. Available at: <<http://www.geomorphometry.org/system/files/HenglReuter2011geomorphometry.pdf>>. Accessed on: 8 Aug. 2012.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Folha SH 22 Porto Alegre e parte das Folhas SH 21 Uruguaiana e SI 22 Lagoa Mirim**: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro: IBGE, 1986. 809p. (Levantamento de recursos naturais, 33).

INOUE, A.; YAMAMOTO, K.; MIZOUE, N.; KAWAHARA, Y. Calibrating view angle and lens distortion of the Nikon fish-eye converter FC-E8. **Journal of Forest Research**, v.9, p.177-181, 2004.

KANG, S.Y.; KIM, S.; LEE, D. Spatial and temporal patterns of solar radiation based on topography and air temperature. **Canadian Journal of Forest Research**, v.32, p.487-497, 2002.

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

MOORE, I.D.; GRAYSON, R.B.; LADSON, A.R. Digital terrain modeling - a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, v.5, p.3-30, 1991.

PEKIN, B.; MACFARLANE, C. Measurement of crown cover and leaf area index using digital cover photography and its application to remote sensing. **Remote Sensing**, v.1, p.1298-1320, 2009.

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

- RODRÍGUEZ, E.; MORRIS, C.S.; BELZ, J.E. A global assessment of the SRTM performance. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.72, p.249-260, 2006.
- 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**, v.23, p.1049-1076, 2009.
- SANTOS, P.R.A. dos; GABOARDI, C.; OLIVEIRA, L.C. de. Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.58, p.101-107, 2006.
- SARMENTO, E.C.; FLORES, C.A.; WEBER, E.; HASENACK, H.; PÖTTER, R.O. Sistema de informação geográfica como apoio ao levantamento detalhado de solos do Vale dos Vinhedos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2795-2803, 2008.
- SOUZA, A.P. de; 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**, v.45, p.339-350, 2010.
- ŠÚRI, M.; HOFIERKA, J. A new GIS-based solar radiation model and its application to photovoltaic assessments. **Transactions in GIS**, v.8, p.175-190, 2004.
- THOMPSON, J.A.; BELL, J.C.; BUTLER, C.A. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. **Geoderma**, v.100, p.67-89, 2001.
- TOVAR-PESCADOR, J.; POZO-VÁZQUEZ, D.; RUIZ-ARIAS, J.A.; BATLLES, 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**, v.13, p.279-287, 2006.
- VALERIANO, M. de M.; ABDON, M. de M. Aplicação de dados SRTM a estudos do Pantanal. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.59, p.63-71, 2007.
- WILSON, J.P.; GALLANT, J.C. (Ed.). **Terrain analysis: principles and applications**. New York: J. Wiley, 2000. 479p.
- ZAKŠEC, K.; PODOBNIKAR, T.; OSTIR, K. Solar radiation modelling. **Computers and Geosciences**, v.31, p.233-240, 2005.
- ZHAO, S.; CHENG, W.; ZHOU, C.; CHEN, X.; ZHANG, S.; ZHOU, Z.; LIU, H.; CHAI, H. Accuracy assessment of the ASTER GDEM and SRTM3 DEM: an example in the Loess Plateau and North China Plain of China. **International Journal of Remote Sensing**, v.32, p.8081-8093, 2011.

Recebido em 27 de julho de 2011 e aprovado em 6 de setembro de 2012